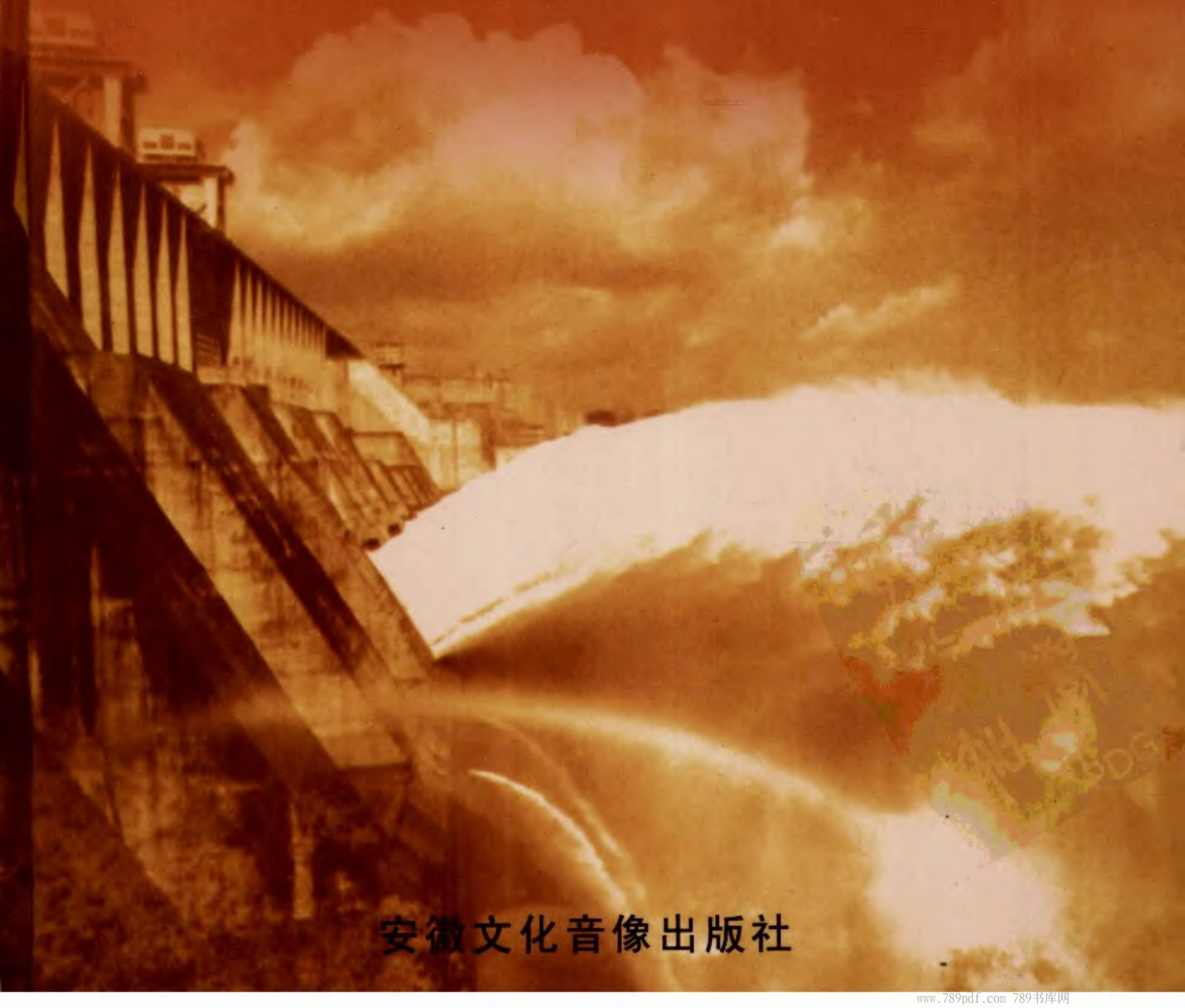
www.789pdf.com 789书库网

最新水利水电机电组安装工程施工工艺与技术标准实用手册

主编：刘文清
水利水电工程学院教授



安徽文化音像出版社

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

责任编辑:刘文清
封面设计:幸小红

ISBN7-88413-391-1
定价:798元(全三卷)

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

最新水利水电机电组安装工程施工工艺与技术标准实用手册

主编：刘文清

（第二卷）

安徽文化音像出版社

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第一章　水电站用油系统与压缩空气系统设备安装工艺

第一节　油的劣化分析及净化措施

油在使用或储存过程中，由于种种原因而生成酸和其它各种氧化物，使油的酸值增大及杂质增多，油的使用性能变坏，这种变化称为油的劣化。根据劣化程度的不同。可采取不同措施加以净化，恢复油原来的品质。

一、油劣化的原因及防止

油劣化的根本原因是氧化。油被氧化后其酸值增高，闪点降低，粘度增大，颜色加深，并有胶质及油泥沉淀物析出。这将影响正常润滑及散热作用，腐蚀在属及纤维，使操作控制系统失灵等。促使油加速氧化的因素有：

(1)水分：水使油乳化，加速油的氧化。水分是从以下几方面混入油中的：油与空气接触能吸收大气中水分；运行时随着油与空气温度的变化，空气在低温油表面冷却而凝结出水分；设备联结处不严密漏水或冷却器破裂漏水；变压器、贮油罐的呼吸器中干燥剂失效或效率低会带入空气中水分；从油系统或操作系统中混进的水分。

(2)温度：油温升高吸氧速度加快，从而加速氧化。据试验，在正常压力下，油温30℃时氧化很少；50～60℃时开始加速氧化。因此，通常规定透平油不得高于45℃，绝缘油不得高于65℃。水电站油系统油温升高的原因是设备运行不良，如冷却水中断或冷却效果下降，过负荷以及设备中油膜破坏出现干摩擦等。

(3)空气：空气中含有氧和水分，其影响如上所述。空气中还含有沙粒及尘埃等物，增加油中的机械杂质。油与空气除直接接触外，还有泡沫接触，泡沫使接触面增大，加快氧化速度。产生泡沫的原因常有：运行人员加油时速度太快，因油的冲击而带入空气；油回到油槽由于排油管设计不正确或流速太大造成泡沫；油被油泵或在轴承中剧烈搅动也会产生泡沫。

(4)天然光线；因它含有紫外线，对油的氧化起触媒作用。经天然光线照射后的油，再

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

转到阴暗处，劣化还会继续进行。

(5)电流：穿过油内部的电流会使油分解劣化，如发电机转子铁芯所产生的涡流，通过轴颈后穿过轴承的油膜时，油的颜色将较快地变深并生成油泥沉淀物。

(6)其它因素：如金属与油接触(特别是铜)促使油品氧化变质；检修清洗不良；净油与污油相混合而污染等。

根据劣化的因素可采取相应的措施：

(1)将设备密封，保持呼吸器的性能良好，以防止水分混入。

(2)维持设备在正常状况下运行，冷却水供应正常，保持正常油膜，以防止油和设备过热。。

(3)减少油与空气的接触，防止泡沫形成，如在贮油槽中设呼吸器及油槽上部设抽气管，用真空泵油出油槽内湿空气；油系统的供排油管伸入油内并使流速不要太大。

(4)将油槽置于阴凉干燥之处，避免阳光直接照射。

(5)在轴承等处加绝缘垫，防止轴电流。

(6)设备检修后涂上合适的油漆(如亚麻仁油、红铅油、白漆即氧化铝等)，正确地加以清洗。

尽管采取了相应措施，可以减缓油的劣化，但在长期运行中。油难免变质，应根据劣化程度采取不同措施加以净化，以恢复原来的使用性能。

二、净化措施

(一)机械净化

用以处理轻度劣化或被水分和机械杂质污染的油。常用方法有以下几种。

1.沉降法

油在较长时间处于静止状态时，重度大的水分及机械杂质便沉到底部。因油中水分和机械杂质的沉降速度与粘度成反比，而油的粘度又与温度有关，经验证明，保持油温在70～80℃，废油中的大部分水分和杂质能很快地沉降下来。各种废油沉降需要保持的温度及所需的时间可参考表4－1－1。

表4－1－1　　废油沉降温度和时间参考表

沉降时间(h) / 沉降温度(℃)	薄质废油 (50℃，$<20\times10^{-6}m^2/s$)	中质废油 (50℃，$(25\sim50)\times10^{-6}m^2/S$)
80～90	—	—

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

沉降温度(℃) \ 沉降时间(h)	薄质废油 (50℃, $<20\times10^{-6}m^2/s$)	中质废油 (50℃, $(25\sim50)\times10^{-6}m^2/S$)
70~80	6~8	8~10
60~70	8~10	10~12
50~60	10~12	12~16
30(夏季常温)	7~8(d)	8~10(d)
10(春季常温)	12~15(d)	15~20(d)

注 本表适用于高2.5m左右的沉降罐。

沉降法简单经济,但不能完全净化。

2.压力过滤

压力过滤是目前电站广泛使用的一种方法。它是把油加压使之通过能吸收水分并阻止脏物的过滤层,以达到使油净化的目的。

压力过滤的设备是压滤机,工作原理如图4-1-1所示。压滤机由齿轮油泵、预滤过器、安全阀、回油阀、滤床(包括滤框、滤板、滤纸及油盘)、支架、电动机等组成。油泵与电动机装在支架下边,滤床装于支架上边。滤床上的9块滤板与8块滤框顺序交替地组成各个独立的过滤室,滤纸夹在滤板与滤框之间。

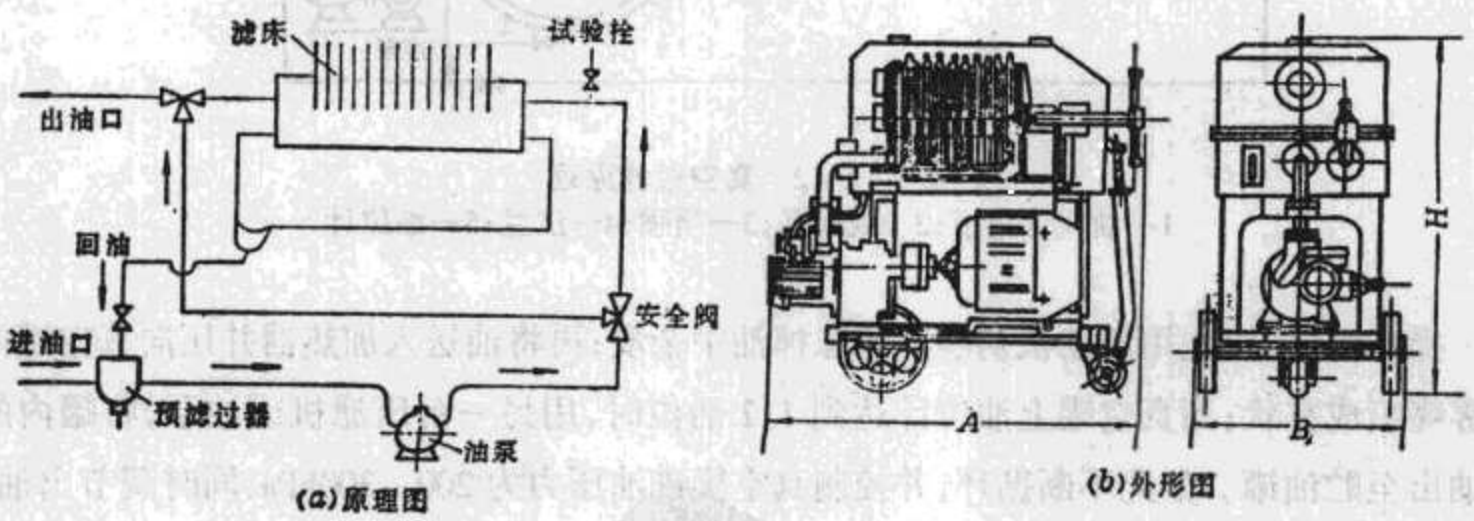


图4-1-1 压力滤油机

在油泵作用下,脏油先经过预过滤器除去较大的杂质后,再送至滤床并强迫油渗透过滤纸,由于滤纸有毛细管作用,水分将被吸收并使杂质附于其上,过滤后的净油从另一边汇集并通过油管流出。安全阀的作用是控制油的压力,当油压超过最高使用压力时,安全阀立即动作,使油不经滤床,直接排出,油压不再上升,确保设备安全工作。回油阀借助齿轮泵的真空作用,将盘内的积油吸入预过滤器。

压滤机的操作及使用条件应按厂家要求进行。在滤油期间,每隔一定时间取样作耐

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

压试验，若进出口油的耐压强度相同时，说明滤纸的吸水能力已达到饱和，需要更换滤纸，滤纸换下来清洗烘干，还可重复使用。

压力过滤的质量较高，但生产率较低。

3.真空分离

真空分离是一种快速除水的好方法。它是利用油和水的沸点不同，在真空罐内水分和气体形成减压蒸发，将油中的水分及气体分离出来，达到除水脱气的目的。

真空滤油机的工作原理如图 4－1－2 所示。将污油加热至 50～70℃，用油泵压向真空罐内并经过喷嘴扩散成雾状，由于油与水的沸点不同，而沸点又与压力有关，在一定温度和真空下，沸点将降低而使油中的水分与气体汽化，形成减压蒸发，油与水分及气体得到分离，再利用真空泵经油气分离挡板，将水蒸汽及气体抽吸出来。

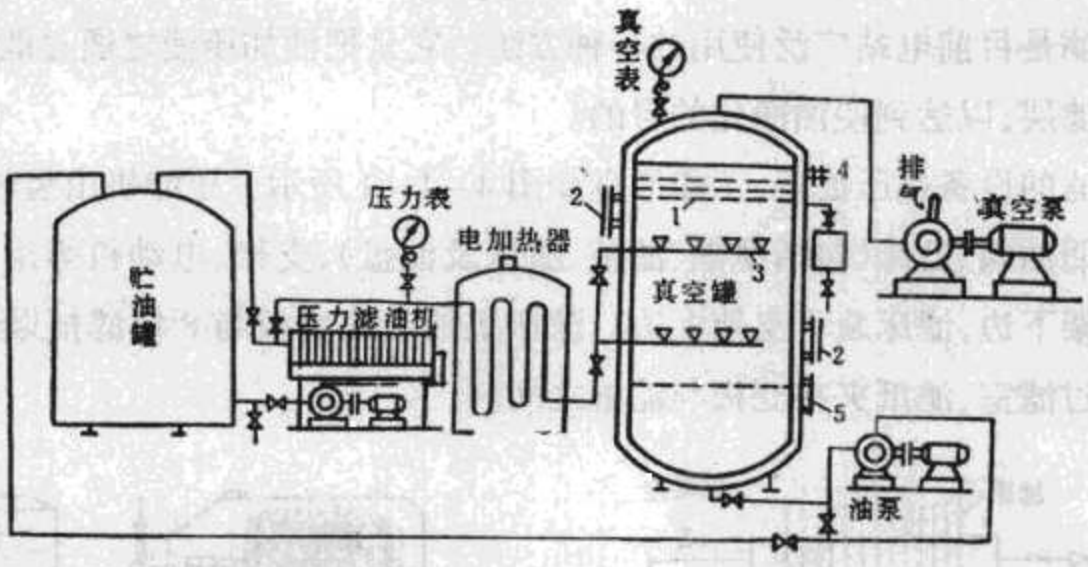


图 4－1－2 真空过滤原理

1—油气分离板；2—观察孔；3—喷嘴；4—法兰；5—油位计

操作程序是：先用压滤机初步过滤除掉油中杂质；再将油送入加热器并压向真空罐内喷雾嘴喷成雾状；当真空罐上油位计达到 1/2 油位时，用另一台压滤机或油泵，将罐内的油抽出至贮油罐。如此不断循环，并控制真空罐进油压力为 200～300kPa，同时调节出油，使进出油量平衡；待加热器出油温度达到 50～70℃时，开启真空泵，使罐内真空度逐渐提高 J 至额定值，油循环趋于正常，直至污油中的除水、脱气达到合格为止（若油泵抽不出油，可能是油泵吸程小于真空罐内真空值，应关小油泵出口阀门开度，使油压上升）。

真空分离的优点是速度快（比压滤机除水效能高二十多倍），除水脱气能力强，无油耗、纸耗且不受气候条件影响。缺点是不能清除机械杂质。对于变压器等用油量大，油中机械杂质少的设备，在检修后注油或运行时换油，常用这种净化方法。

4.离心分离法

污油在离心滤油机转筒内绕中心轴高速旋转时，利用离心力的作用，可将重度不同的

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

水分及杂质从油中分离出来。杂质重度大，分离在容器的最外层；油的比重小，分离在容器的最内层；水在二者之间。

离心分离因脱水效果不好，操作时又不好掌握，而且设备笨重易损，现在电站已很少使用了。

(二)油的再生

前面已讲过，油劣化的根本原因是氧化，但氧化生成物只占极小的比例，就是劣化严重的废油，一般也只有百分之几到百分之十几的烃类是真正变质的。用化学方法除去变质的烃类和混入的杂质，必要时再加入适当的添加剂，就能使废油再生成为良好的润滑油。通常电站常用的废油再生回收率如下：

废机械油：85～90%；　　废变压器油：90～92%；

废透平油。80～90%。

石油是重要的战略物资，也是不可缺少的化工原料。润滑油的生产成本是原油的10倍至30倍，而且原油中只含有10～17%的润滑油成分，在加工中还要损失一半左右。因此，用废油再生的办法来节约用油，具有十分重要的政治和经济意义。

随着抗氧化剂的使用，大大地延长了油的使用寿命。水电站通常只对运行油进行再生，废油再生由于机率很小而且再生设备较复杂，可送到专门的石油化工厂去处理。

运行中油的再生，普遍采用吸附剂法。吸附剂是一种多孔结构并且具有相当强的吸附能力的固体，它能吸附多种化学物质。最常用的是白土，其次是硅胶，此外，活性炭、粘土、矾土、氧化铝等都可以作为吸附剂，它们每一颗粒上都有许多不同直径的微孔，这些微孔使它们在单位质量上具有极大的内表面。如1g白土的内表面有100～300m^2，1g硅胶的内表面可达300～450m^2，所以它们有很强的吸附能力。能将一些化学物质如劣化生成的酸类、胶质、沥青等吸附在其表面小孔内，使油得到再生。吸附剂与多种物质接触时，不能把所有与它接触的物质都吸附下来，当吸附剂表面的小孔已充满被吸附的物质时，就失去了再吸附的能力。

1.变压器油的再生

吸附器可装在变压器原有的放油阀门上，也可在不影响散热的情况下，去掉变压器一个散热器，将其装在散热器的上下管口上。工作原理如图4－1－3(a)所示：变压器带负荷时，油因受热而密度减小，从变压器上部流出，油在流动中逐渐变冷而密度变大。从吸附器底部流回变压器。吸附器内装有吸附剂，油在运行中所生成的氧化物通过吸附剂时被吸附，从而使油得到再生，延长了油的使用期限。这种将吸附剂装在变压器外的吸附器中进行再生的方法，叫做热虹吸法。

若变压器小，可用布袋盛吸附剂悬挂在变压器油箱的上部；若变压器较大，可将吸附

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

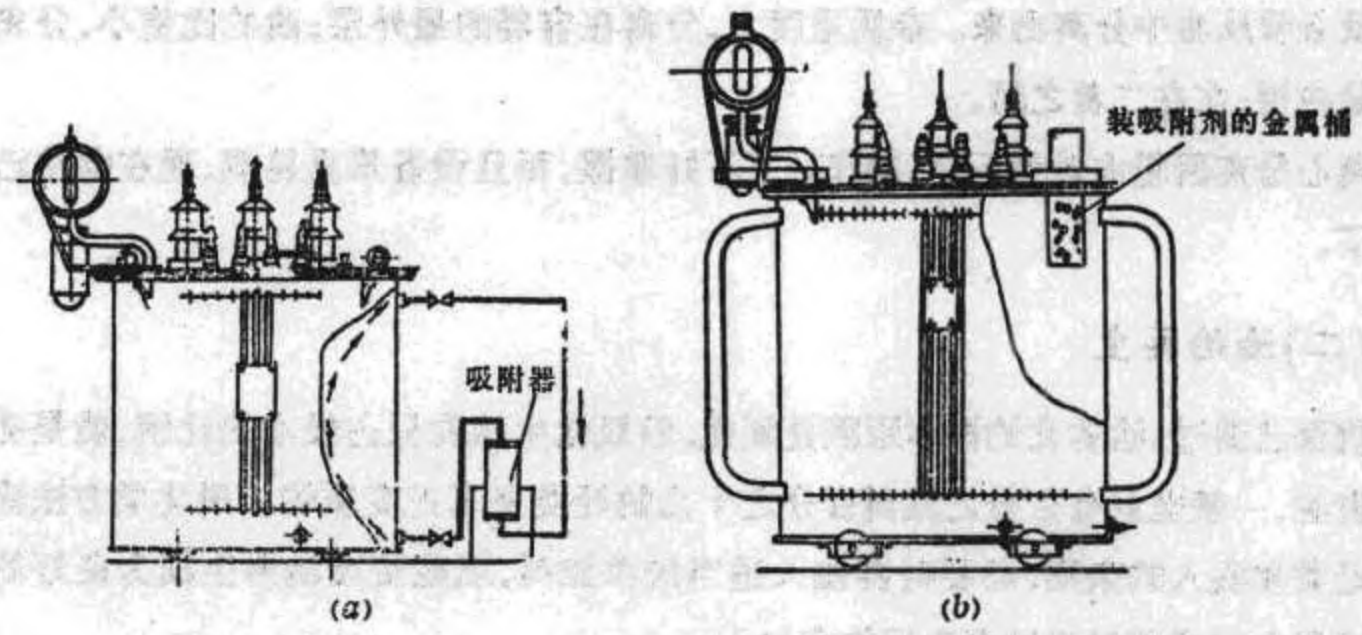


图 4-1-3 变压器运行油连续处理
(a)吸附剂放在变压器外部;(b)吸附剂放在变压器内部

剂置于变压器顶盖上的金属桶中[如图 4-1-3b]。后者需注意金属桶与变压器带电部分的距离要合符规定,且安装严密,防止空气及水分进入变压器。

此外,还有非连续再生方法(如图 4-1-4)。油从变压器下部排油阀门放出,经过吸附器和压滤机,最后进入油枕。这种方法再生效率高。用以再生劣化程度较轻的油,或变压器检修时与油的机械净化方法一起串联使用。

大型变压器尚有薄膜保护法,即在顶部用丁腈橡胶袋进行吸附。

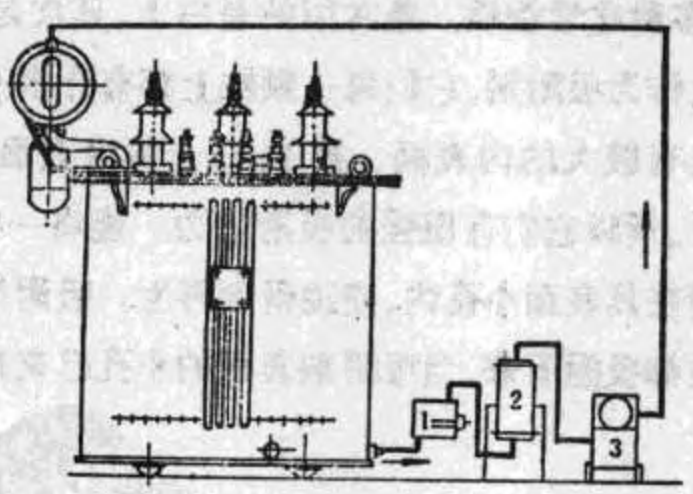


图 4-1-4 变压器运行油非连续处理
1—电加热器;2—吸附器;3—压力滤油机

2.透平油的再生

除强迫油循环系统可采用连续性再生外,一般可用非连续性再生(考虑到运行设备的安全及吸附器布置的困难)。即在机组检修时,可按图 4-1-5 所示办法,既进行机械净化。同时又进行油的再生。

3.运行中油再生应注意的几个问题

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

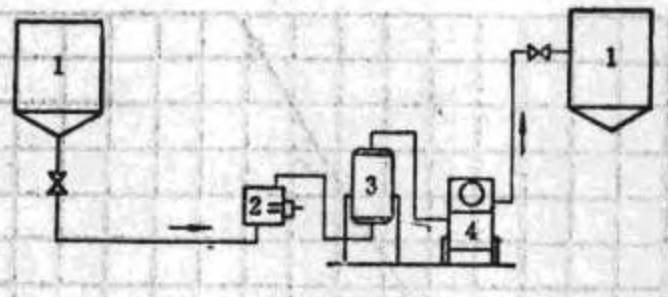


图4-1-5 透平油非连续再生处理
1—油罐;2—电加热器;3—吸附器;4—压力滤油机

(1)油的酸价较低,进行运行中的再生,才能收到较好效果。否则会产失大量油泥沉淀物。

(z)吸附剂的粒径以3~5mm为宜。其用量为油量的0.5~1.5%。使用时应将吸附剂中的气体清除。

(3)透平油在运行中进行再生时,应先除去油中水分,否则将影响再生效果及经济性。

(4)吸附器的安装应尽量减少管道的弯曲,油系统应保证正常循环。

第二节 用油量的计算与设备选用

一、用油量的计算

机组用油量与机型及容量等有关,由图4-1-6中可见,转桨式机组比同容量的混流式机组用油量大得多。机组用油量应以制造厂提供的资料为准。在未获得厂家资料时,可参照容量和尺寸相近的同型机组进行估算。此外,绝缘神可在产品目录中查出,透平油可按后面的公式进行计算。

(一)调速系统用油量

调速系统用油量包括油压装置、导叶接力器(转桨式还有轮叶接力器)及管道的充油量。

(1)油压装置用油量见表4-1-2。

表4-1-2 油压装置的充油量

型号	充油量(m^3)		型号	充油量(m^3)	
	压力油罐	回油箱		压力油罐	回油箱
YZ-1	0.35	1.3	YZ-20/2	7.0	8.0

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

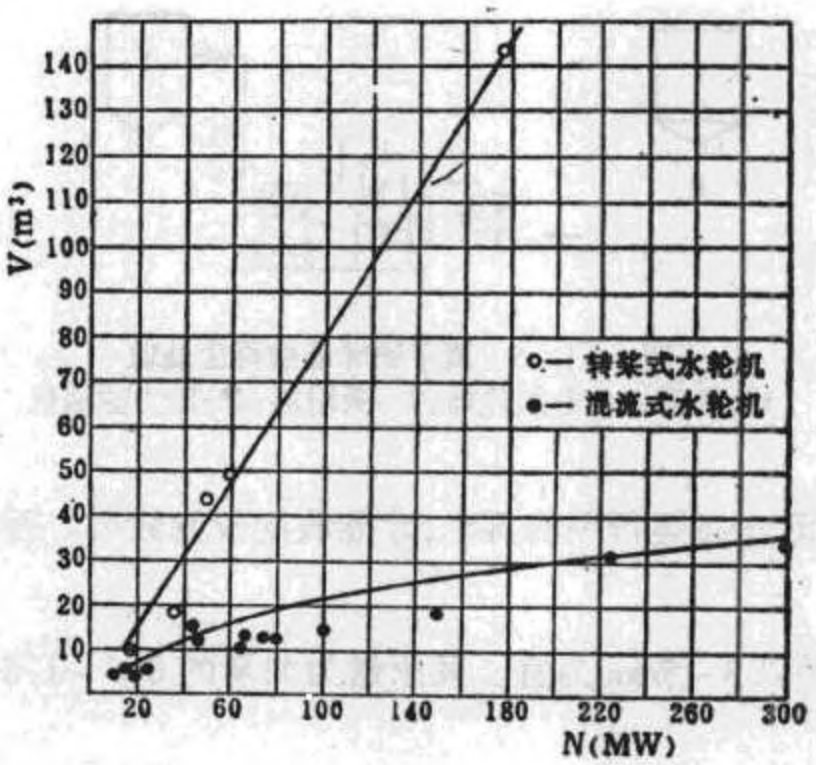


图 4-1-6 机组容量与用油量关系统计曲线

型号	充油量(m^3)		型号	充油量(m^3)	
	压力油罐	回油箱		压力油罐	回油箱
YZ-1.6	0.56	1.3	HYZ-0.3	0.105	0.3
YZ-2.5	0.9	2.0	HYZ-0.6	0.21	0.6
YZ-4	1.4	2.0	HYZ-1	0.35	1.0
YZ-6	2.1	4.0	HYZ-1.6	0.56	1.6
YZ-8	2.8	4.0	HYZ-2.5	0.875	2.5
YZ-10	3.5	5.0	HYZ-4	1.4	4.0
YZ-12.5	4.4	6.0	CT-40	0.21	0.9
YZ-16/2					

(2)导叶接力器(两个)用油量(V_d)

$$V_d = \frac{\pi \cdot d_d^2 \cdot S_d}{2}(m^3)$$

式中 d_d——导叶接力器直径(m);

S_d——接力器最大行程,可取 $S_d=(1.4\sim1.8)a_0$,a_0 为导叶最大开度(m),转轮直径小于 5m 时,取较小的系数。

(3)桨叶接力器用油量(V_p)

$$V_p = \frac{\pi \cdot d_p^2 \cdot S_p}{4}(m^3)$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

式中 d_p——桨叶接力器直径(m),$d_p=(0.3\sim0.45)D_1$,D_1 为水轮机转轮直径(m),当 $D_1\geqslant5m$ 时取较小的系数;

S_p——转轮接力器活塞行程(m),$S_p=(0.12\sim0.16)d_p$,当 $D_1\geqslant5m$ 时用较小系数。

(4)受油器用油量:取 V_p 的20%计。

(5)冲击式水轮机喷针接力器用油量(V_i)

$$V_i=\frac{A}{P_{min}}(m^3)$$

式中 A——调速功(N·m);

P_{min}——油压装置最低油压(Pa)。

(二)机组润滑油系统用油量

机组润滑油系统用油量(V_T),包括机组推力轴承和导轴承的充油量,可按轴承每千瓦损耗计算

$$V_T=q\sum P_m(m^3)$$

式中 q——轴承损耗每千瓦所需油量(m^3/kW),见表4-1-3;

表4-1-3 轴承每千瓦损耗需油量(m^3/kW)

轴承结构	q 值 (m^3/kW)
一般结构的推力轴承和导轴承	0.04~0.05
组合结构(推力轴承与导轴承在同一油槽)	0.03~0.04
设有专用泵或镜板泵的外循环推力轴承	0.018~0.026

$\sum P_m$——推力轴承和导轴承损耗,$\sum P_m=P_T+P_d$;

P_T——推力轴承损耗,$P_T=A\cdot P_t$(kW);

A——单位负荷推力轴承损耗(W/N),见表4-1-4;

表4-1-4 推力轴承损耗与转速的关系

转速 (r/min)	A 值 (W/N)	注
54.6~83.3	0.0087~0.0102	适用于伞式机组
88.2~107	0.0158~0.0173	适用于伞式机组
100~150	0.0143~0.0184	适用于悬吊式机组
115.4~500	0.0204~0.0306	高速大容量取上限
375~500	0.051~0.0612	

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

P_t——推力轴承负荷，包括水轮机的轴向水推力及机组转动部分的重量(kN)；

P_d——导轴承损耗，$P_d = 1.2\frac{S\cdot\mu\cdot v_u^2}{\delta}\cdot 10^{-3}$(kW)；

S——轴与轴瓦的接触面积，$S = \pi\cdot D_z h(m^2)$；

D_z——主轴直径；

h——轴瓦高度，一般 $h = (0.5\sim0.8)D_u$；

u——油的动力粘度系数(Pa·s)；

V_u——主轴圆周速度(m/s)；

δ——轴瓦间隙，一般为0.0002(m)。

(三)主阀接力器的充油量

国内已生产的蝴蝶阀直径为1.75~5.3m，其接力器充油量为0.1~1.6m³，球阀直径为1.0~1.6m，接力器充油量为0.16~6.89m³。具体数据可查阅设计手册。

用上述公式计算充油量时，应加上总油量的5%作为充满油管的油量。

透平油系统(或绝缘油系统)总用油量

$$V = ZV_1 + V_2 + ZV_3$$

式中 Z——机组台数；

V_1——一台机组(或变压器)的用油量(即设备充油量)；

V_2——事故备用油量，应取最大一台机组(或变压器)用油量的1.05~1.1倍，大型机组(或变压器)系数可取小值；

V_3——一台机组(或变压器)的补充油量，可按 $V_3 = \frac{45}{365}\sigma\cdot V_1$ 计算(即45天的补充备用油)；

σ——一台机组(或变压器)一年内因漏损、挥发、取样等所需补充油量的百分数。混流式机组σ取5~10%；转桨式机组σ取15~25%，变压器σ取5%；油开关σ取10%。

二、设备选择

(一)贮油设备的选择

(1)净油罐——贮存净油，以便机组或电气设备换油时使用。容积按一台最大机组(或变压器)用油量的110%确定。透平油和绝缘油通常各设一个。如油罐容积过大不易布置时，可设两个或多个，其总容积不变。当透平油只设一个净油罐时，为了日常添油及

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

油务管理方便，可增设一个添油罐，其容量按全部运行设备45天添油量确定。

(2)运行油罐——用于接受新油与检修时设备排油及油的净化处理。一般透平油及绝缘油运行油罐的容量与净油罐相等。为了使运行油净化处理方便，提高效率，最好设两个运行油罐，每个运行油罐容量为总容量的一半。

(3)中间油罐——对于透平油系统，若油库和油处理室不设在厂内，为了检修方便，可在厂内设置中间油罐，其容量等于机组最大用油设备的用油量。

(4)事故排油池——事故排油用。如需设置，可布置在油库底层或其它合适的位置上，容积为各油罐容积之和。

(5)重力加油箱——用以向设备自流添油。一般转桨式机组漏油量较大，添油频繁，可设重力加油箱。当机组台数超过五台时，可设置两个。对混流式或冲击式机组，添油机会少，可用移动小车添油。重力加油箱的容量常为0.5~1.0m^3。有时为了改善调速系统的油质，将漏油箱中的油直接排至油库，这时油压装置添油量较大，可考虑设置重力加油箱。

目前国内多数电站，透平油和绝缘油分别设一个净油罐、两个运行油罐。工作情况良好。鉴于油开关经常发生电弧，油质易于劣化，最好开关油与变压器油不混在一起。

(二)净化设备的选择

透平油和绝缘油的净化设备应按两个独立系统分别设置，以利运行管理。

(1)油泵。用于接受新油、设备充油和排油及油净化。常用2CY和KCB型换轮油泵，其结构简单，工作可靠，维护方便，价格便宜，能满足一般电站输油要求。油泵容量(Q)应保证在4~6小时内充满一台机组的用油设备，或在6~8小时内充满一台最大变压器。如用以接受新油，应在油槽车允许停车时间内将油卸完。油泵的扬程(H)应能将油送至最高(或最远)用油设备并克服管路损失。根据Q、H可从产品目录中选择合适的油泵。大中型电站一般设两台，小型电站可只设一台移动式油泵。

(2)滤油机。压滤机和真空滤油机，其容量按8小时内能净化一台最大机组的用油量或24小时内能滤清一台最大变压器的用油量来确定。考虑到更换滤纸等要花费时间，在计算时应将其额定生产率减少30%。根据容量可从产品目录中选取。对中型电站，当用油设备与机组台数不多时，可考虑透平油与绝缘油共用一台真空滤油机；对装机4台以上的电站，透平油系统可设两台压滤机。对小型电站，一般只设一台移动式压滤机。

前面已经谈过，离心滤油机缺点甚多，目前常用真空滤油机代替。

(3)油管。管径可按$d=1.3\sqrt{\frac{Q}{v}}$计算。其中流速v视油的粘度而定，对调速系统可取4~8m/s。至于管壁厚度、管材等详细计算，可参阅《水电站机电设计手册》。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第二章 水电站的排水系统设备安装工艺

第一节 渗漏与检修排水装置

一、排水系统的任务和排水方式

在水电站生产过程中，需要排除各种各样的水。排水系统虽比较简单，但却非常重要，有的电站曾发生过水淹及人身伤亡事故，应引起设计、施工和运行人员重视。排水系统由厂房渗漏排水和机组检修排水两部分组成。

排水系统的任务、特点和排水方式

厂内渗漏排水通常包括：厂内水工建筑物的渗水；机组顶盖与主轴密封漏水（轴流式水轮机的顶盖与主轴密封漏水单独设泵排至下游）；钢管伸缩节漏水及各供排水阀门、管件渗漏水；气水分离器及贮气罐的排水等。有些电站将水冷式空压机和水冷式变压器的冷却水也排至厂内集水井。

渗漏排水的特点是排水量小，高程较低，不能靠自流排至下游。因此，一般电站都设有集水井，将上述渗漏水集中起来，然后用水泵抽出。

检修排水包括：尾水管内的积水；低于尾水位的蜗壳和压力管道内的积水（高于尾水位的大量积水应先自流排走）；上下游闸门的漏水等。

检修排水的特点是排水量大，高程很低，需用水泵在较短时间内排除.

总之，无论渗漏排水、检修排水以及冷却器等生产用水的排水，只要能靠自压排至下游的，应尽量采用自流排水方式，这样既可靠又经济。否则可将其先排至高程较低的集水井（或集水廊道），再用水泵抽出。

二、渗漏排水

（一）渗漏水量的估计

厂内渗漏水量与电站地质条件、枢纽布置、施工质量及设备制造、安装水平有关，难以

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

用计算方法确定。因此，在确定厂内渗漏水量时，应先由水工专业组提出厂房水工建筑物的渗漏水量估计值，再参考已运行的同类电站渗漏水量的大小，并结合电站实际情况，确定一个渗漏水量值作为渗漏排水系统的设计依据。

(二)集水井容积的确定

厂内的渗漏水通过排水管或排水沟，引至集水井，然后由渗漏排水泵排至下游。

集水井工作水泵的起动水位与停止水位之间的容积，称为集水井的有效容积(V_{ix})，如图4-2-1所示。集水井的有效容积可按30~60min的渗漏水量的容积来考虑，即渗漏排水泵每隔半小时至1小时起动1次

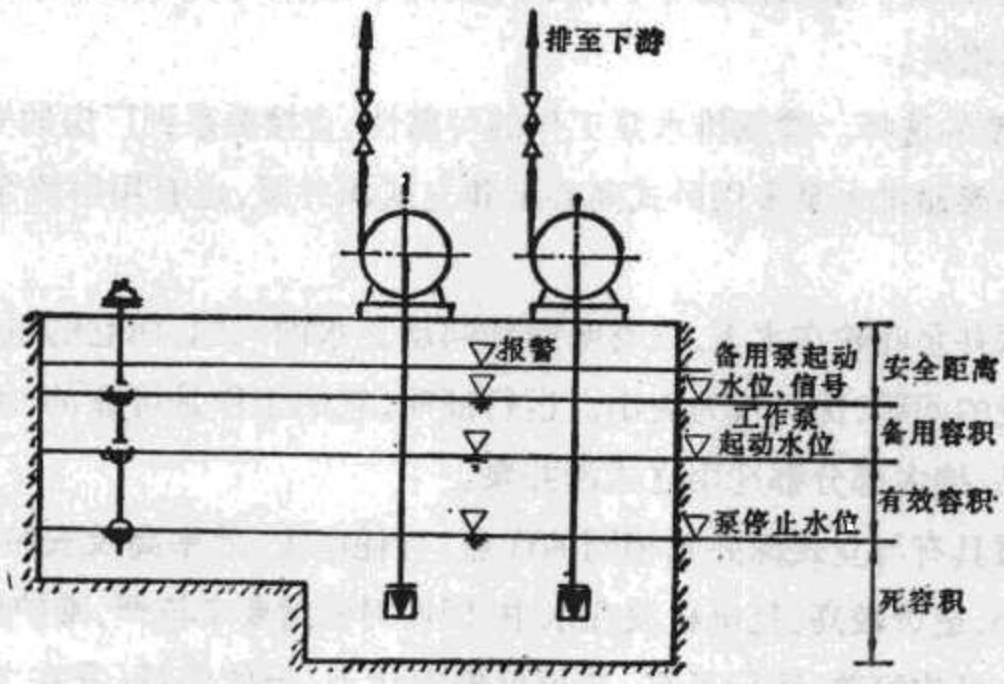


图4-2-1　集水井容积示意图

$$V_{ix} = (30 \sim 60) q_{zh} (m^3)$$

式中　q_{zh}——厂内渗漏水量(m^3/min)，

根据厂房布置情况，并考虑施工初期排水量较大等各种因素，容积可适当加大。

渗漏集水井的总容积除有效容积外，还包括死容积和备用容积。死容积决定于水泵的吸水底阀与井底的距离，以及吸水底间所要求的淹没深度(深井泵第一级叶轮须浸在水下1~3m)。备用容积一般按工作泵起动水位与备用泵起动水位之间有0.5m左右的距离来确定。备用泵起动水位一般应低于厂房最低排水地面的高程。报警水位可按高出备用泵起动水位0.1~0.2m来考虑。

集水井布置在厂房底层，能把最低一层设备及该层地面的渗漏水，依靠自流排入集水井，采用卧式离心泵时，按此要求确定集水井井顶高程。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(三)渗漏排水泵选择

(1)水泵生产率(Q)计算。根据集水井有效容积(V_{iv})和水泵工作时间,可按下式计算

$$Q = \frac{V_{iv}}{T} + q_{zh} \quad (m^3/h)$$

式中 V_{iv}——集水井有效容积(m^3);

T——水泵工作时间(h),常取 20~30(min);

q_{zh}——厂内渗漏水量(m^3/h)。

渗漏排水泵应不少于两台,其中一台工作,一台备用。

(2)水泵扬程计算。水泵扬程等于集水井最低水位(即水泵切除水位)与最高尾水位之差再加上管路损失。

(3)水泵类型的选择。渗漏排水泵工作的可靠性,直接关系到厂房的安全。国内已建成的大中型电站渗漏排水泵多用卧式离心泵和立式深井泵,也有用射流泵与立式潜水泵的。

由于立式深井泵叶轮在水下,没有吸程和起动充水的问题,而它的电动机又在井上,没有受潮和淹役的问题,优点较为突出。运行证明,它的工作是可靠的,因而近年来投产的大中型水电站,绝大部分都选用立式深井泵。

立式潜水泵具有与立式深井泵相同的优点,且耗电少、效率高及安装方便;但目前已生产的容量较小,造价较高,且电机浸在水中,因而对密封要求较严,维护检查不大方便。

射流泵具有结构简单,运行可靠,造价低廉等优点,但效率低(常在 30%以下),可用作渗漏排水的备用泵。特别是在厂用电源消失的紧急情况下,可以保证渗漏水的正常排除。若电站水量丰富,不存在用水的经济性问题,也可将射流泵做工作泵使用。

(4)渗漏排水泵的操作方式。由于渗漏排水泵起停频繁,而渗漏水的来水情况又很难预计。稍有不慎,水泵未及时起动将造成水淹事故。因此,渗漏排水泵一般都采用自动化操作,由液位信号器控制工作泵与备用泵的起停,并在水位过高时发出警报信号.如果立式深井泵采用橡胶轴承,则在水泵起动前,应先自动给上清洁润滑水。

第二节 排水系统安装流程图

一、排水系统图绘制要求

排水系统或因设计不合理,或因运行操作失误,容易造成水淹厂房的事故,威胁电站

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

的安全。因此,对于排水系统图要进行认真仔细的研究,以达到技术上可靠,经济上合理的要求。

检修排水和渗漏排水,由于其内容和工作性质不同,对大、中型水电站,原则上应分成两个独立的系统。这样可以避免由于误操作或排水系统的某些缺陷而带来危险。同时检修排水量大,水泵容量也大,而渗漏排水量小,水泵容量也小,要选择对两方面都合适的水泵困难很大,加之检修排水与渗漏排水在操作方式与自动化程度上的要求也有很大差别。故对大、中型电站,这两个系统以分开设置为好。对机组检修排水量较小的小型水电站,为了减少设备,节约投资,也可考虑两个系统合用设备,但必须有防止尾水倒灌厂内的措施。

当排水设备及排水方式确定以后,应根据厂房布置情况及排水部位相对位置绘制水系统单线图。通常将检修排水与渗漏排水两个系统绘在同一张图上。图中要标明管径、阀门及水泵型号等。

二、排水系统图示例

图4-2-2为采用卧式离心泵排水的系统图实例。图中,检修排水采用直接排水方式。渗漏排水泵两台一台工作,一台备用,由电极式水位计自动控制起停。四台泵均装有底阀,水泵起动充水采用经旁通阀由下游倒灌的方式。对于检修排水泵,由于底阀长期浸泡在水中,要检修底阀必须潜水或加临时水泵抽干尾水管内积水后才能进行。此外。家房位置较低,有防潮和防淹的问题。

图4-2-3为采用立式深井泵排水的系统图实例。这是一个有八台机组(图中只绘出了两台)的排水系统,检修排水采用有排水廊道的间接排水方式。渗漏集水井与检修排水的集水井相邻,中间有管路相通,用阀门控制。渗漏集水井的静水位(即停泵水位),低于检修排水集水井的井底高程,必要时可排空检修集水井内的水。两井连通管径应保证管内的过水量小于渗漏排水泵的排水量,以防止误操作或阀门损坏而使尾水倒灌厂房。

图4-2-4为某水电站采用卧式离心泵作检修排水,射流泵作渗漏排水的系统图。检修排水采用直接排水方式,两台8BA-12型卧式离心泵直接从尾水管内抽水,尾水管底板集水坑内装设底阀。由于该电站为地下厂房,检修排水采用阀门切换办法,分别排向非检修机组的尾水管内。渗漏排水采用一台 $Q=150m^3/h$, $H=30m$ 的射流泵作为集水井排水的工作泵,检修排水泵兼作渗漏排水泵的备用泵,由电极式或水位计控制射流泵和备用泵。射流泵的高压水源由1号机蝴蝶阀前的压力钢管引来。检修排水泵的起动充水问题,用设置底阀的方式来解决。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

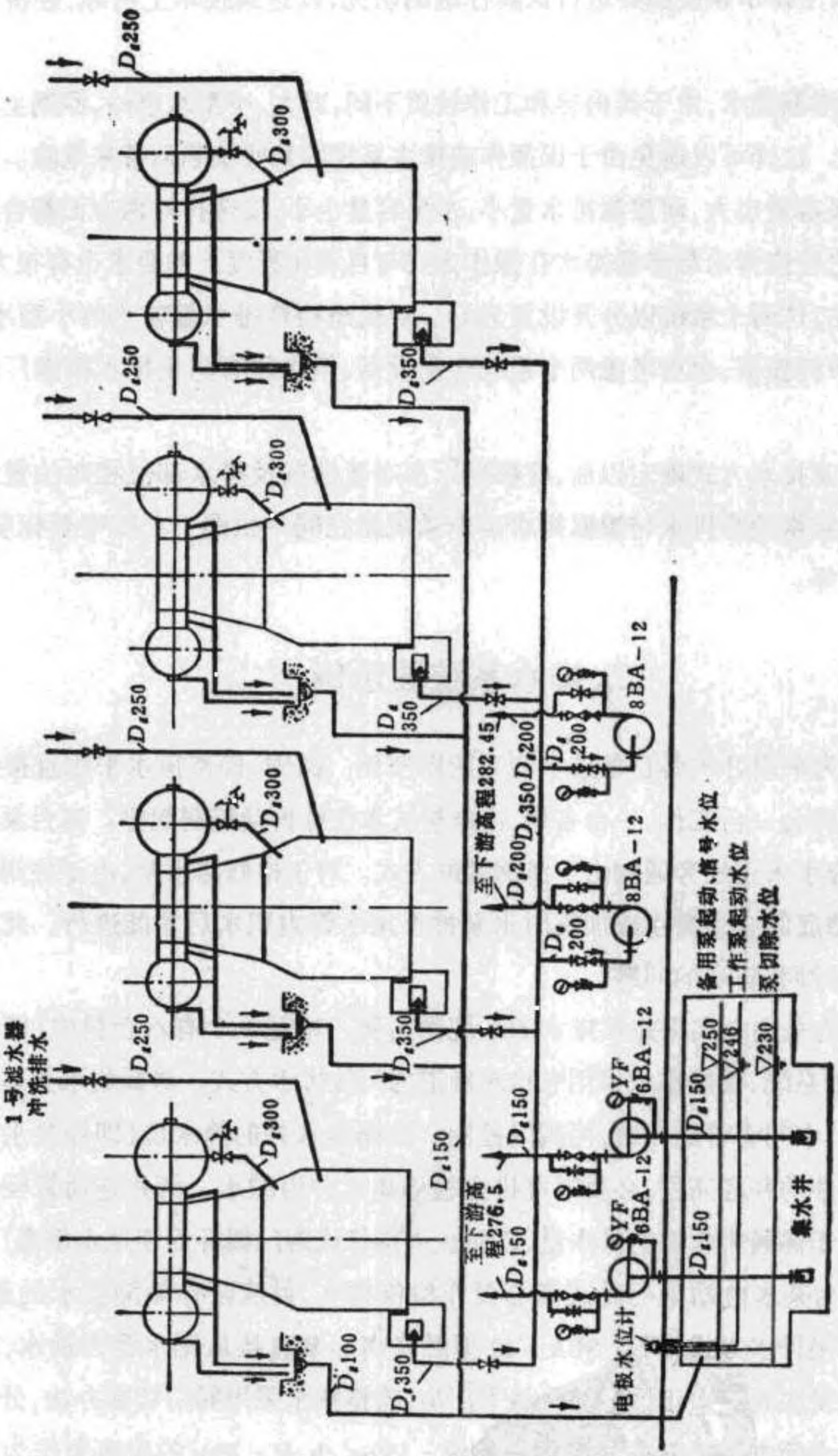


图4-2-2 用卧式离心泵作渗漏与检修排水系统图实例

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

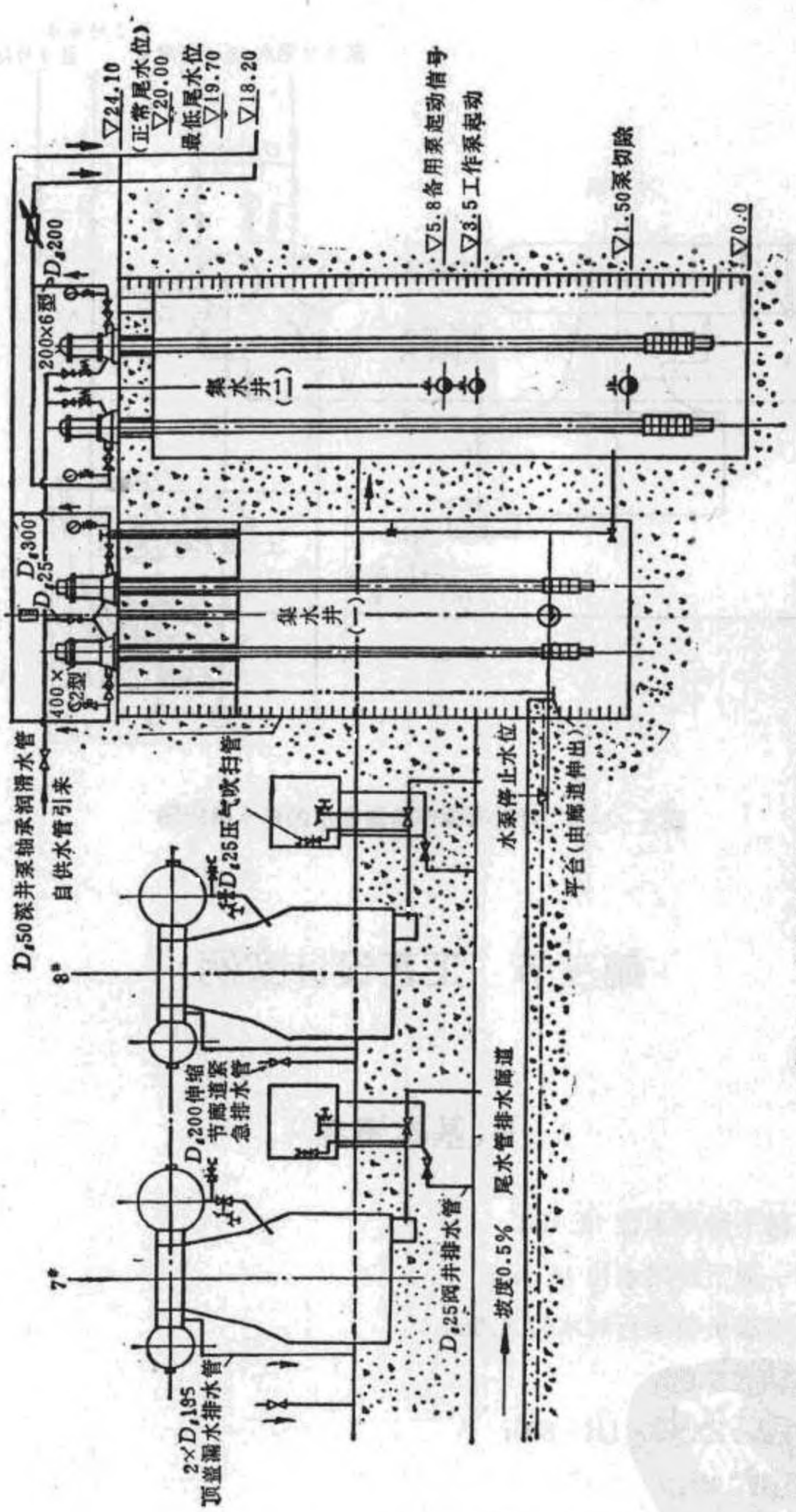


图4-2-3　用立式深井泵作渗漏与检修排水系统图实例

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

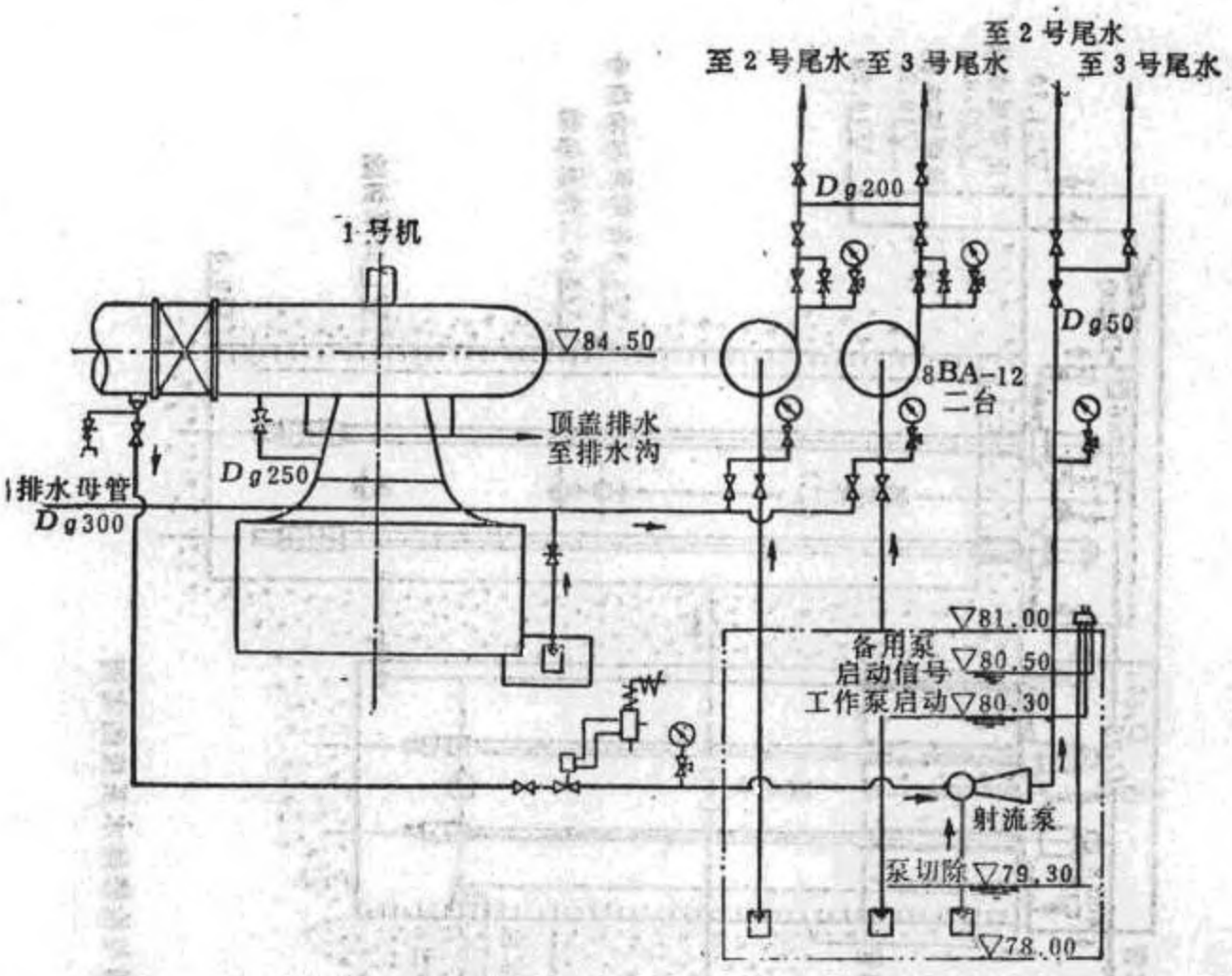


图4-2-4 用射流泵作渗漏排水的排水系统图

第三节 工艺设计实例

一、基本资料

(1)百年一遇下游尾水位18.1m;

(2)二十年一遇下游尾水位16.3m;

(3)全部机组满负荷运行时水位8.6m;

(4)最低尾水位5.8m;

(5)水轮机型号ZZ548-LH-800;

(6)尾水管型式4A;

(7)输水段及蜗壳段主要尺寸如图4-2-5。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

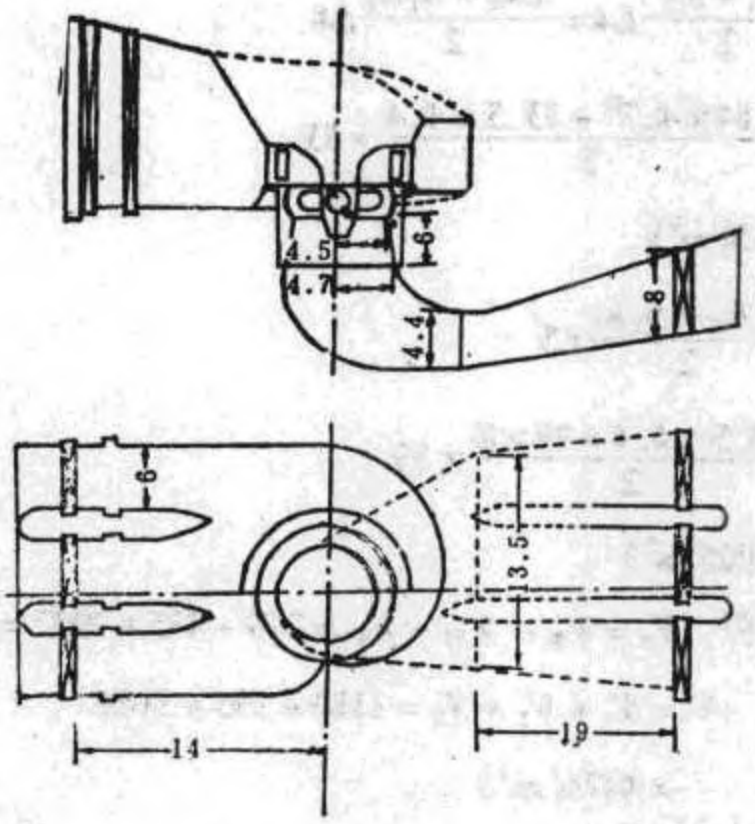


图4-2-5　排水量计算图

二、机组检修排水系统的计算

1.排水量的计算

取全部机组满负荷运行时的尾水位8.6(m)作为机组检修排水的设计下游水位。这时不能自流排出的存水容积为(注:下面的存水容积计算式中的数字除图中标明的外,其余均用平均值)。

(1)输水段 $V_1 = 3F_1L_1 = 3\times(6\times4.4\times14) = 1110(m^3)$

(2)蜗壳段,分两段计算

$$V_2 = \frac{F_1+F_2}{2}L_2 + \frac{F_3}{2}L_3$$

$$= \frac{4.4\times5.9+3.3\times4.7}{2}\times7.1 + \frac{3.3\times4.7}{2}\times6.2$$

$$= 195(m^3)$$

(3)尾水管段,分三段计算

圆锥段　$V_{锥} = \frac{1}{3}\pi h_1(R_3^2+R_4^2+R_3R_4)$

$$= \frac{1}{3}\times3.14\times6\times(4.5^2+4.7^2+4.5\times4.7)$$

$$399(m^3)$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

肘管段 $V_{肘}=\frac{F_4+F_5}{2}\cdot L4=\frac{\pi R_4^2+b_2h_2}{2}L4$

$=\frac{3.14\times4.7^2+13.5\times4.4}{2}\times13$

$=835(m^3)$

扩散段 $V_{扩}=\frac{b_2h_2+b_3h_3}{2}L5$

$=\frac{13.5\times4.4+18\times8}{2}\times19$

$=1932(m^3)$

尾水管存水总容积 $V_3=V_{锥}+V_{肘}+V_{扩}=399+835+1932=3166(m^3)$

检修排水总容积 $V=V_1+V_2+V_3=1110+195+3166$

$=4471(m^3)$

2.闸门漏水量的计算

(1)进水闸门:进水闸门尺寸:7.2×13.5,三扇;闸门中间接缝每扇为:2×7.2,进水闸门盘根总长度

$$L_{进}=(13.5+7.2)\times2\times3+2\times7.2\times3=168(m)$$

进水闸门单位漏水量取为0.0015m³/S·m,进水闸门漏水量为

$$Q_{进漏}=168\times0.0015=0.252(m^3/S)$$

(2)尾水闸门:尾水闸门尺寸:7×8,三扇;每扇尾水闸门中间接缝为2×7;尾水闸门盘根总长度

$$L_{尾}=(7+8)\times2\times3+2\times7\times3$$

$$=132(m)$$

尾水闸门盘根单位漏水量取为0.0015m³/S·m,尾水闸门漏水量

$$Q_{尾漏}=132\times0.0015=0.198(m^3/S)$$

闸门总漏水量 $Q_{漏}=Q_{进漏}+Q_{尾漏}=0.252+0.198=0.45(m^3/S)$

$=1620(m^3/h)$

3.检修排水泵的选择

排水时间按4~8小时考虑,根据水泵生产率 $Q=\frac{V}{T}+Q_{漏}$,估计到本例的排水扬程,初选三台20H×3型深井水泵,其Q=900m³/h,H=34m,N=155(kW)。水泵运行方式:开始时三台水泵同时工作,待积水抽干后,用两台水泵排上、下游闸门的漏水量。

当三台同时工作时,检修排水时间

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$T = \frac{V}{ZQ - Q_{漏}} = \frac{4471}{3 \times 900 - 1620} = 4.2(h)$$

故满足要求。

4.排水泵进出水管水力损失的计算

计算简图如图4-2-6。按3号泵排水时损失最大(管线最长,附件最多)来考虑。

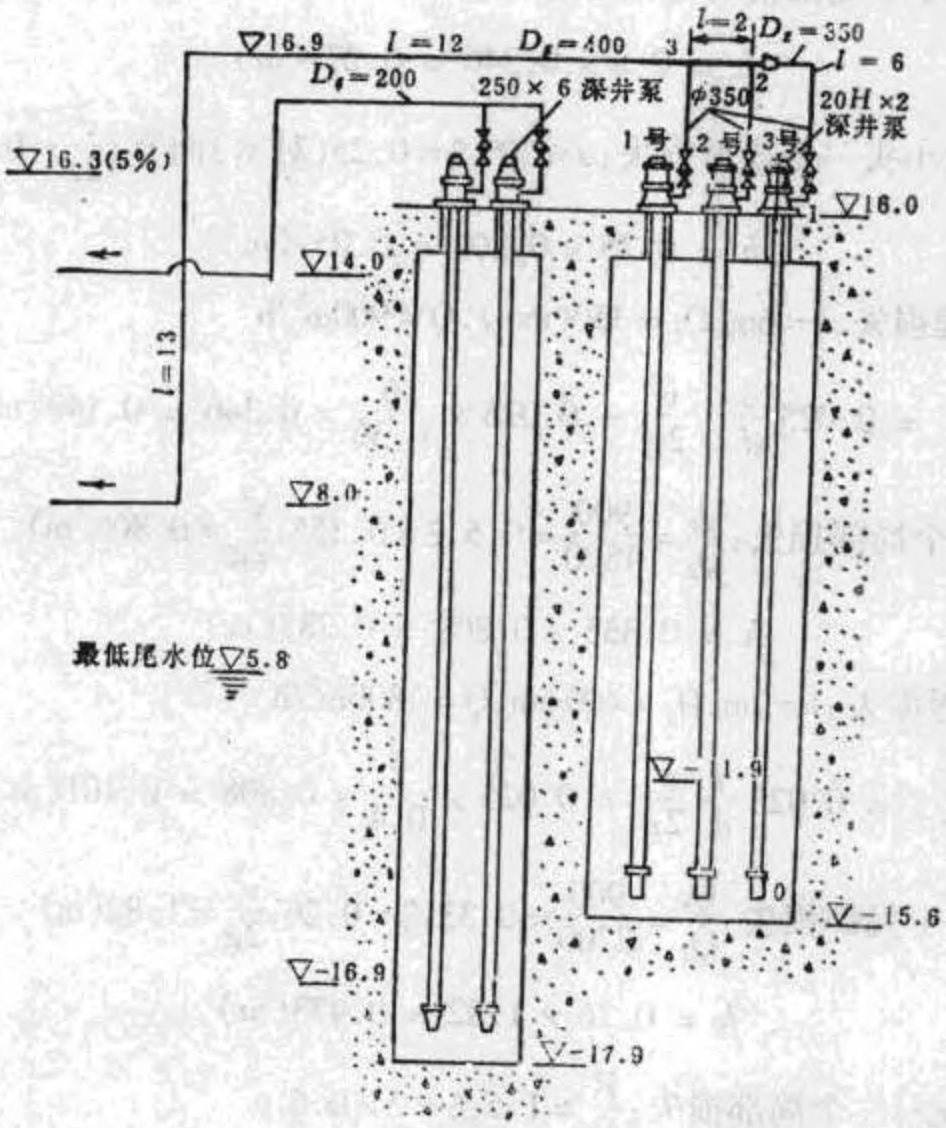


图4-2-6　排水系统水力计算算例简图

当吸水管直径 $D_g = 400mm$, $Q = 900m^3/h$,查《根据流量和管道直径确定流速水头的诺模图》,得$\frac{v^2}{2g} = 0.204m$,吸水管进口(0点)ξ取2.8,局部损失

$$h_0 = \xi \frac{v^2}{2g} = 2.8 \times 0.204 = 0.57(m);$$

吸水管沿程损失　$l = 29m$, $D_g = 400mm$(式中d用计算内径,下同)

$$h_{0-1} = 0.025 \frac{l}{d} \quad \frac{v^2}{2g} = 0.025 \times \frac{29}{0.4} \times 0.204 = 0.37(m)$$

D_g350mm弯头(90°)2个局部损失:由 $R/D = 1.5$ 查得 $\xi = 2 \times 0.6$;由 $Q = 900m^3/h$, $D_g = 350mm$,算出$\frac{v^2}{2g} = 0.346(m)$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$h = \xi \frac{v^2}{2g} = 2 \times 0.6 \times 0.346 = 0.416(m)$$

D_g350mm 止回阀 1 个局部损失:ξ取 1.3

$$h = \xi \frac{v^2}{2g} = 1.3 \times 0.346 = 0.45(m)$$

D_g350mm 闸阀 1 个局部损失:ξ取 0.8

$$h = 0.8 \times 0.346 = 0.277(m)$$

D_g350 - 400 大小头一个局部损失:$\theta = 30°$,$\xi = 0.25$(对 v_1)而言;$\frac{v^2}{2g} = 0.204$(m)

$$h = 0.25 \times 0.204 = 0.051(m)$$

1 - 2 管段沿程损失:$l = 6m$,$D_g = 350$(mm),$Q = 900m^3/h$

$$h_{1-2} = 0.025 \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0.025 \times \frac{6}{0.36} \times 0.346 = 0.149(m)$$

D_g400 三通一个局部损失:$\frac{Q_3}{Q_2} = \frac{900}{1800} = 0.5$,$\xi = 0.355$;$\frac{v^2}{2g} = 0.808$(m)

$$h = 0.355 \times 0.808 = 0.287(m)$$

2 - 3 管段沿程损失:$l = 2m$,$D_g = 400mm$,$Q = 1800m^3/h$

$$h_{2-3} = 0.025 \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} = 0.025 \times \frac{2}{0.4} \times 0.808 = 0.101(m)$$

D_g400 三通一个局部损失:$\frac{Q_3}{Q_2} = \frac{900}{2700} = 0.33$,$\xi = 0.26$;$\frac{v^2}{2g} = 1.82$(m)

$$h = 0.26 \times 1.82 = 0.473(m)$$

D_g400 弯头(90°)二个局部损失:$\frac{R}{D} = 1.5$,$\xi = 2 \times 0.6$

$$h = 2 \times 0.6 \times 1.82 = 2.18(m)$$

3 - 4 管段沿程损失:$l = 25m$,$D_g = 400mm$,$Q = 2700m^3/h$

$$h_{3-4} = 0.025 \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} = 0.025 \times \frac{25}{0.4} \times 1.82 = 3.35(m)$$

3 号泵进出水管总水力损失:

$$h = \sum h_{沿程} + \sum h_{局部} = 8.67(m)$$

5.排水管出口高程的确定

排水管出口高程受到最大真空度的限制。水泵排水管最高点允许最大真空度

$$P_{zmax} = A - P_{汽} - P_{裕}$$

水温为 25℃时,$A = 101kPa$,$P_{汽} = 3.1kPa$,$P_{裕}$ 取 10kPa

$$P_{zmax} = 101 - 3.1 - 10 = 87.9(kPa)$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

水泵排水管最高点(▽16.9)的弯头出口处为实际最大真空的可能产生点,故按一台运行的不利情况来考虑:

沿程损失 $h=0.025\frac{l}{d}\cdot\frac{v^2}{2g}=0.025\times\frac{12}{0.4}\times0.204=0.153(m)$

局部损失 D_g400 弯头(P_0')一个,$\xi=0.6$,

$$h_m=\xi\frac{v^2}{2g}=0.6\times0.204=0.122(m)$$

$$\Delta h=h_e+h_m=0.153+0.122=0.275(m)$$

排水管出口高程 $\nabla_{出口}=16.9-\frac{87.9}{9.8}-0.275=7.66(m)$

因此出口高程设在▽8.0m处.

6.水泵扬程校核

水泵实际所需最小扬程

$$\begin{aligned}H&=(\nabla_{最高}-\nabla_{吸})+\sum h-(\nabla_{最高}-\nabla_{排})\\&=16.9-(-11.9)+8.67-(16.9-8)\\&=28.57(m)\end{aligned}$$

当下游水位在二十年一遇的▽16.3m高程时所需扬程

$$H=28.8+8.67-(16.9-16.3)=36.9(m)$$

可见水泵扬程(H=34m)能满足正常情况下的排水要求。

三、厂房渗漏水排水系统的计算

根据水工组提供的资料,坝接头与厂房渗漏水量为55(m^3/h),考虑到其它排入渗漏集水井的少量漏水和排水扬程,预选250×6型水泵两台:Q=140(m^3/h),H=86(m),N=30(kW)。

1.集水井容积的确定

集水井有效容积按一台水泵工作10分钟(T=0.167h)计算:

$$V=T(Q-q)=0.167\times(140-55)=14.2(m^3)$$

根据实际布置的可能性,有效容积为$3\times2\times2=12(m^3)$

所以排水间隔时间 $T=\frac{12}{55}=0.218(h)=13(min)$

2.排水扬程的计算

集水井及水泵布置情况如图4-2-6,集水井最低水面与水泵排水管最高点的高程差

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$h = 16.9 - (-16.9) = 33.8(m)$$

管路损失(计算方法同前):$\sum h = 1.3(m)$

排水管出口高程:$\nabla_{出口}$按前面的方法计算,布置在▽8.00高程便可,但实际布置有困难,故设在▽14.00高程。

在正常情况下水泵所需扬程为

$$H = 33.8 + 1.3 - (16.9 - 14) = 32.4(m)$$

在二十年一遇洪水位▽16.3时

$$H = 33.8 + 1.3 - (16.9 - 16.3) = 34.5(m)$$

在百年一遇洪水位▽18.1时

$$H = 33.8 + 1.3 - (16.9 - 18.1) = 36.3(m)$$

可见,在上述情况下,水泵扬程能满足要求。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第三章　水电站给水系统设备安装工艺

第一节　供水设备的选用

一、水　　泵

水泵正好与水轮机相逆，前者靠其他原动机带动而作功，故叫水力工作机；后者利用水力作为原动力，故叫水力原动机。两者都属于水力机械的范畴。泵在工业，农业以及其他部门的应用非常广泛。它是水电站供排水系统非常重要的设备。下面就几个主要问题加以介绍。

(一)泵的类型及型号

泵的分类方法很多，按工作特点及习惯分：

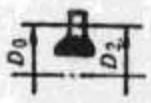
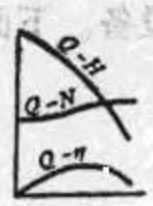
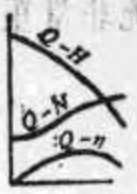
- 泵
  - 叶片泵
    - 离心式
      - 单级单吸型(如 IS.B 型)
      - 单级双吸型(如 S.Sh 型)
      - 多级单吸型(如 D.J 型)
    - 混流式
    - 轴流式
  - 容积泵
    - 往复式(如活塞泵、柱塞泵等)
    - 转子式(如齿轮泵、螺旋泵等)
  - 其它泵
    - 真空系
    - 射流泵
    - 水锤泵

离心式、混流式与轴流式泵根据叶型及比转数(n_s)的大小，划分范围及其特点见表 4-3-1。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 4-3-1　　比转数与叶轮形状和性能曲线形状的关系

泵的类型	离心泵			混流泵	轴流泵
	低比转数	中比转数	高比转数		
比转数 n_s	$30 < n_s < 80$	$80 < n_s < 150$	$150 < n_s < 300$	$300 < n_s < 500$	$500 < n_s < 1000$
叶轮形状					
尺寸比	$\frac{D_2}{D_0} \approx 3$	$\frac{D_2}{D_0} \approx 2.3$	$\frac{D_2}{D_0} \approx 1.8 \sim 1.4$	$\frac{D_2}{D_0} \approx 1.2 \sim 1.1$	$\frac{D_2}{D_0} \approx 1$
叶片形状	圆柱形叶片	入口处扭曲 出口入圆柱形	扭曲叶片	扭曲叶片	轴流泵翼型
性能曲线形状					
流量-扬程曲线特点	关死扬程为设计工况的 1.1~1.3 倍，扬程随流量减少而增加，变化比较缓慢			关死扬程为设计工况的 1.5~1.8 倍，扬程随流量减少而增加，变化较急	关死扬程为设计工况的 2 倍左右，扬程随流量减少而急速上升，又急速下降
流量-功率曲线特点	关死点功率较小，轴功率随流量增加而上升			流量变动时轴功率变化较少	关死点功率最大，设计工况附近变化比较少，以后轴功率随流量增大而下降
流量-效率曲线特点	比较平坦			比轴流泵平坦	急速上升后又急速下降

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

水电站常用水泵型号的意义，示例如下：

（1）IS 80—65—160A·D

- D——配套动电机降速为1450(r/min)
- A——可更换不同外径叶轮
- 160——叶轮外径名义尺寸(mm)
- 65——泵出水口径(mm)
- 80——泵进水口径(mm)
- IS——国际标准单级单吸离心泵

（2）150S—78A

- A——水泵叶轮外径第一次切割
- 78——水泵扬程（m）
- S——水泵型式（单级双吸型）
- 150——水泵进口直径（mm）

（3）10JD140×9

- 9——水泵叶轮个数
- 140——水泵设计流量（m^3/h）
- JD——水泵型式（多级井泵）
- 10——水泵适用的最小井径（此为10英寸，即250mm）

（二）离心系的工作原理及应用范围

从物理学中可知，当物体绕定轴旋转时，就要产生离心力(F)，其大小为

$$F = m\omega^2 r$$

式中　m——旋转物体的质量；

ω——物体旋转的角速度；

r——物体旋转的半径。

离心泵正是利用这个原理来抽水的。所4－3－1所示，当水泵的叶轮高速旋转时，产生很大的离心力，将叶轮内的水向外甩出，造成部分真空，进水池的水在大气压力作用下，进入水泵叶轮中心。进来的水，由于叶轮在不停地转动，又被甩出，于是进水池的水又进来补充。这样不断地工作下去，水就源源不断地被抽起来并通过叶轮获得能量后被送到需要的地方。

仿水轮机基本方程式的推导方法，据进出口速度三角形，可得离心泵的基本方程式

$$H = \frac{\omega}{g}(v_{u2} \cdot r_2 - v_{u1} \cdot r_1)$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

图 4-3-1 离心泵工作原理

$$\approx \frac{v_2 \cdot v_{u2}}{g}(\text{当径向流入时}, v_{u1} = 0)$$

$$\approx \frac{v_2^2}{2g}(\text{无铭牌时可用以近似计算})$$

式中 $v_{u1} \cdot v_{u2}$——分别为进出口绝对速度的切向分量(图 4-3-2);

$v_1 \cdot v_2$——分别为进出口处液体质点的圆周速度。

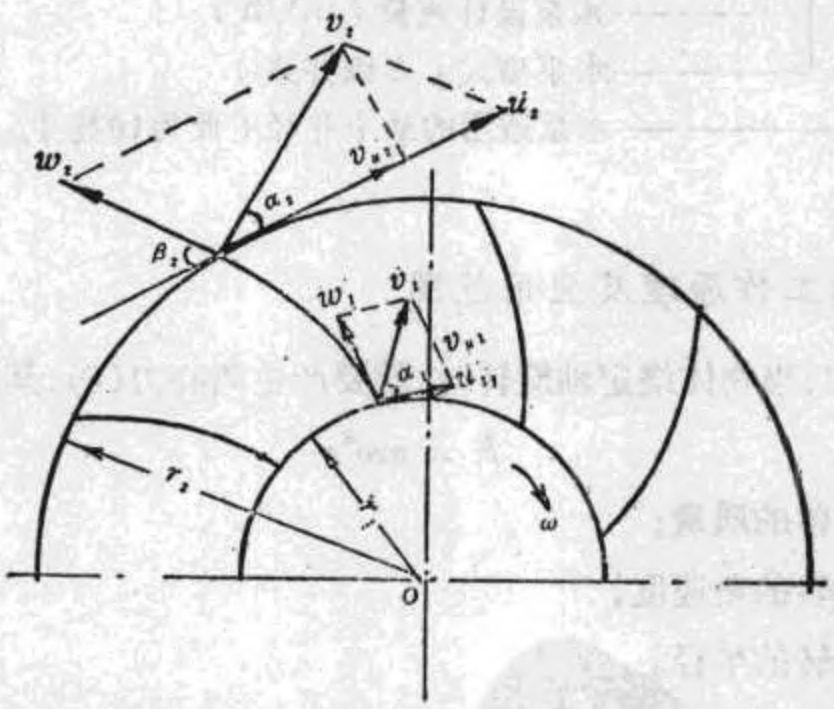


图 4-3-2 离心泵叶片进出口速度三角形

由离心泵基本方程式可以看出:叶轮叶片传递给液体的能量仅与液体在叶片入口和出口处速度的大小和方向有关,即只与液体的运动状态有关,与液体的种类无关。用同一台泵输送不同的流体,如空气、水或水银等,它所产生的扬程数值(H)是一样的。

水电站常用离心泵的应用范围如表 4-3-2。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表4-3-2　　电站常用离心泵应用范围

序号	水泵类型	型号		扬程范围(m)	流量范围(m^3/h)	注
		旧	新			
1	单级单吸离心泵	BA、B	IS	5～125	6.3～400	
2	单级双吸离心泵	Sh	S	10～140	144～11000	
3	多级单吸离心泵	DA	D	16～370	20～288	
4	深井泵	SD、SJ、JD	J、JC	10～130	10～490	
5	潜水泵	JQ、JQB		4.5～204	10～3300	

(三)离心泵的扬程及安装高程

1.扬程

单位重量的液体通过泵后所获得的能量称为扬程,又叫总扬程,用H表示,单位为m。卧式离心泵的扬程可按下式计算(见图4-3-3)。

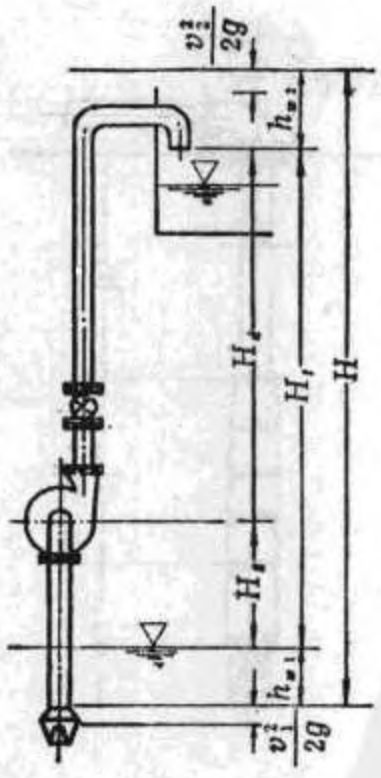


图4-3-3　卧式离心水泵装置示意图

$$H = H_t + h_w + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (m)$$

$$= H_g + H_d + H_{w1} + h_{w2} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (m)$$

式中　H_t——扬水地形总高度(简称净扬程),一般指进水池水面与出水池水面之间的垂

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

直高度。如出水管不是淹没在水面以下，则是指进水池水面至出水管管口中心的垂直高度；

h_w——管路中水头损失(简称损失扬程)，它包括吸水管中水头损失 h_{w1} 和压水管中水头损失 h_{w2} 两部分；

$\frac{V_2^2 - v_1^2}{2g}$——水泵出口与进口流速水头之差，常略去不计。

对于已运行的水泵，其实际扬程可按下式计算

$$H = H_z + H_y + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \approx H_z + H_y \quad (m)$$

式中 H_z——水泵进口处真空表指示的真空值换算至泵轴心线的真空度，以水柱计(m)；

H_y——水泵出口处压力表读数换算至泵轴心线的出水压力，以水柱计(m)。

计算立式深井泵的扬程(见图 4-3-4)时，应注意深井水泵特性曲线上的 H 值已包括了滤水网、进水管段 H_{B1}、泵体 H_{B2} 及泵座弯管的水头损失。因此在计算管路水头损失时，只需考虑井下扬水管 H_{B3} 段的水头损失和 B 点以外出水管路水头损失。井下扬水管 H_{B3} 段的水头损失，制造厂建议按管高的 3~5%计算。

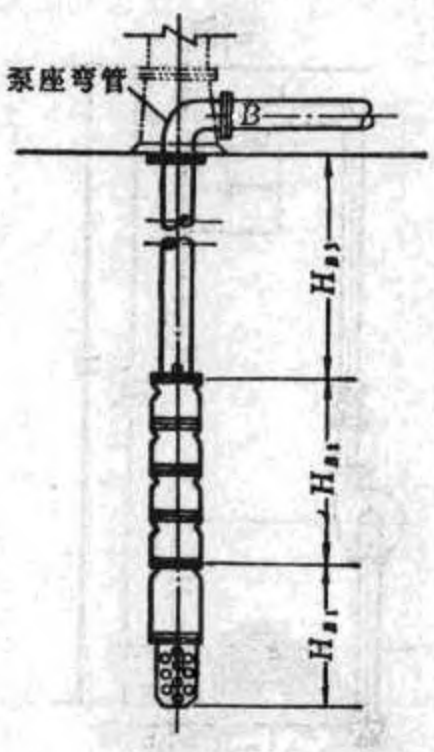


图 4-3-4 立式深井泵装置示意图

2.安装高程

水泵的安装高程($\nabla_{泵}$)可按下式计算(见图 4-3-5)

$$\nabla_{泵} = v_x + H_g \quad (m)$$

式中 ∇_x——最低吸水位高程(m)；

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

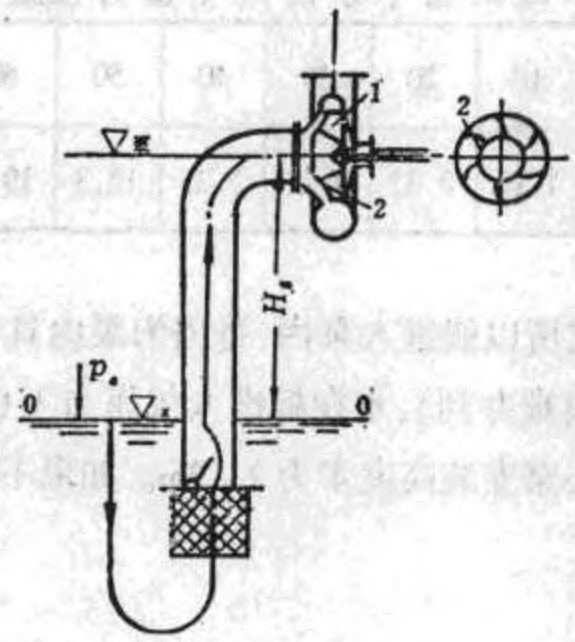


图 4-3-5 离心泵吸水高度示意图
1—叶轮的叶槽;2—叶轮的入口

H_g——水泵几何安装高度(m),吸上时取"+",灌注时取"—"。卧式离心泵的 H_g 等于叶轮轴线的高程和进水池最低吸水面高程之差。立式离心泵的 H_g 等于第一级叶轮出水边中心点的高程和进水池最低吸水面高程之差。

离心泵的几何安装高度应满足下式的要求

$$H_g \leqslant [H_g] - \left(\frac{v_1^2}{2g} + h_{w1}\right) \quad (m)$$

式中 $[H_s]$——样本或说明书上厂家给定的允许吸出高度(m);

v_1——水泵进口平均流速(m/s)。

其余符号的意义与式同。

样本或随机附送的说明书上所规定的$[H_s]$值,是在吸入水面为标准大气压(101kPa),水温为20℃的情况下,用清水作试验得出的。如果水泵装置地点大气压力和水的温度与上述条件不同,可按下式进行修正

$$\nabla_{泵} \leqslant \nabla_{*} + [H_s] + \left(\frac{A}{9.8} - 10.3\right) + \left(0.24 - \frac{P_{汽}}{9.8}\right) - \left(\frac{v_1^2}{2g} + h_{w1}\right) \quad (m)$$

式中 A——不同海拔高程的大气压力(kPa),见表4-3-3;

$P_{汽}$——水的汽化压力(kPa),见表4-3-4。

表 4-3-3 不同海拔高程的大气压力 A 值

海拔高程(m)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	2000	3000
A 值(kPa)	101	100	99.0	98.0	96.0	95.1	94.1	93.1	92.1	91.1	90.2	79.4	70.6

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表4-3-4 不同水温下水的汽化压力$P_{汽}$值

水 温 (℃)	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$P_{汽}$ (kPa)	0.88	1.18	2.35	4.21	7.35	12.3	19.9	31.1	47.2	70.0	101

应当注意:进水池的水之所以能进入泵内,是因为泵内具有部分真空。但是,即使泵内空气全部排尽(这实际上很难办到),水在标准大气压力下也只能上升10.33m,何况吸水管还有水头损失,所以离心泵安装高度多为2~7m。如果不经计算安高了,轻则发生汽蚀,重则根本抽不上水来。

3.功率和效率

离心泵在工作过程中,泵内能量损失主要表现在三个方面:一是水力损失,如液体与壁面摩擦损失,液体运动速度大小和方向变化时的漩涡损失、冲击损失等;二是容积损失,因结构上的需要,泵内转动部分与固定部分之间留有间隙,流出叶轮的液体有一部分从泵内高压区漏回低压区,并未排出泵外,引起排出流量减小;三是机械损失,如泵的轴封:轴承及叶轮圆盘摩擦损失等。因此,对于水泵的功率,我们必须明确以下三个概念;

(1)有效功率(N);水泵在单位时间内对流经该泵的水所做功的大小

$$N = \rho gQH \quad (kW)$$

式中 ρ——水的密度(t/m^3);

g——重力加速度(m/S^2);

Q——水泵的流量(m^3/S);

H——水泵的扬程(m)。

(2)轴功率(N_z);原动机传给泵轴的功率

$$N_z = \frac{N}{\eta} = \frac{\rho gQH}{\eta} \quad (kW)$$

式中 η——水泵效率;

其它符号与上式同。(3)配套功率(N_p):一台水泵应该选 配原动机的功率值。为防止原动机过载,配套功率数值可由轴功率乘以一个大于1的系数求得

$$N_p = KN_z \quad (kW)$$

式中 K——备用系数,用电动机作动力机的备用系数见表4-3-5。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 4-3-5　用电动机作动力机的备用系数 K 值

水泵轴功率(kW)	<5	5~10	10~50	50~100	>100
K	2.0~1.3	1.3~1.15	1.15~1.10	1.08~1.05	1.05

(4)水泵效率(η):为有效功率(N)与轴功率(N_z)之比

$$\eta = \frac{N}{N_z} \cdot 100\%$$

用试验的方法可以得出泵的总效率 η。如前所述,水泵功率损失主要表现在三个方面,因此,要提高水泵效率,不论设计、制造与使用,均应从提高泵的水力效率(η_h)、机械效率(η_m)和容积效率(η_v)三个方面予以注意。总效率与表示泵内各种损失大小的水力效率、机械效率和容积效率的关系如式

$$\eta = \eta_h \cdot \eta_m \cdot \eta_v$$

(四)离心泵的性能及调节方法

1.性能

水泵在额定转速下,用流量 Q 为横坐标,扬程 H、轴功率 N、效率 η 及允许吸上高度[H_s]为纵坐标表示的关系曲线,称为水泵的工作特性曲线(如图 4-3-6)。水泵工作特

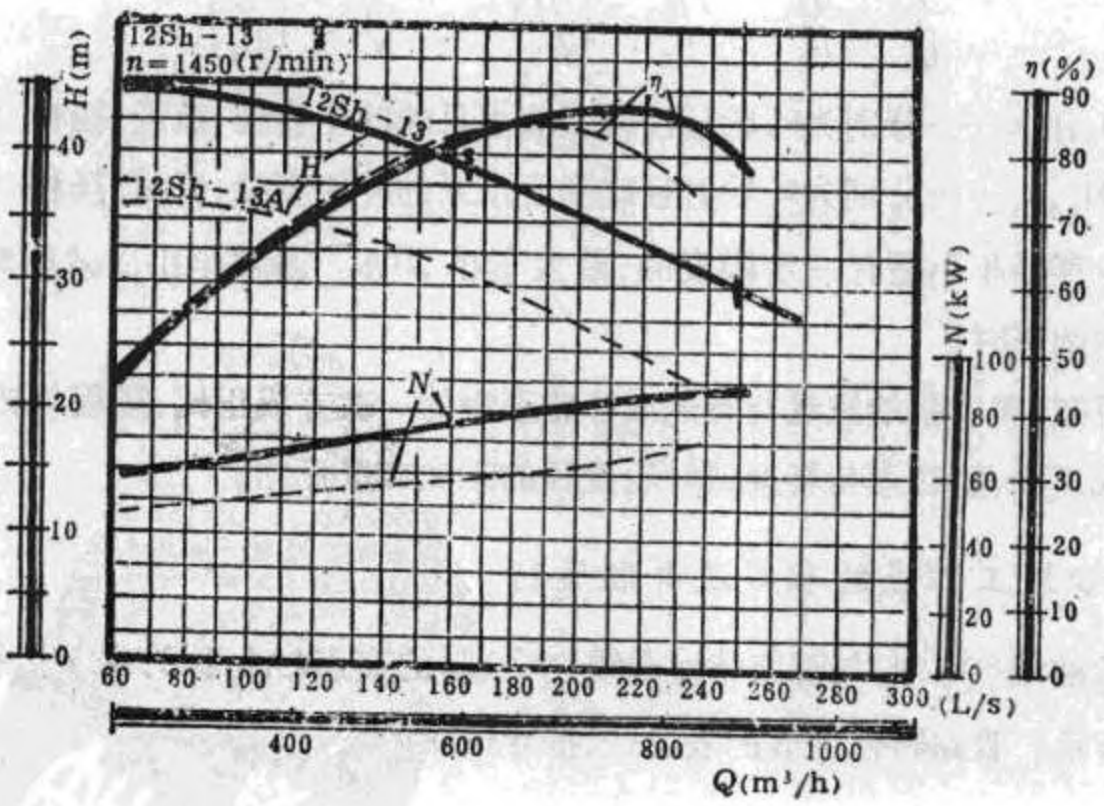


图 4-3-6　水泵特性曲线示例

性曲线由制造厂按 JBI040 标准,在标准大气压和 20℃清水条件下试验得来的。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

离心泵工作特性曲线的用途是：了解水泵性能的变化规律，以便按实际要求选用合适的水泵；由工作特性曲线与管路特性曲线可以确定水泵的工作点，由此可求得水泵工作时实际的流量及扬程大小；根据功率曲线的变化规律，核对配套功率是否够用，正确的选择水泵起动方式（如中低比转数的较大型离心泵，应在关闭出水阀的情况下起动，这时 Q = 0，由特性曲线可知轴功率最小，但关闭时间不宜超过 2 ~ 3min）。

在水泵样本或产品目录中，每个型号的泵都给出了三组数，这是推荐的效率较高的最佳使用范围。在此区间工作，泵的效率下降不会超过最高效率的 5 ~ 7%。通常在特性曲线（H—Q）上用符号"ξ"标出最优工作范围，选用水泵时，应使实际工作点落在此范围内。

2. 调节方法

离心泵运行时如需调节流量等项，可采用下列办法：

(1)变阀调节——把水泵压水管上的闸阀关小，流量使减小。这种方法简单，但很不经济，可用于暂时调节。

(2)变速调节——水泵转速改变后，其流量、扬程、功率也随之而变，可按下式计算

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{n}{n_1} \qquad \frac{H}{H_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^2 \qquad \frac{N}{N_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^2$$

式中　n、Q、H、N——分别为转速变化前的水泵转速、流量、扬程和功率；

n_1、Q_1、H_1、N_1——分别为转速变化后的水泵转速、流量、扬程和功率。

(3)变径调节——把水泵叶轮车小或买水泵时准备一个小的备用叶轮，也可达到调节的目的。计算公式如下

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{D}{D_1} \qquad \frac{H}{H_1} = \left(\frac{D}{D_1}\right)^2 \qquad \frac{N}{N_1} = \left(\frac{D}{D_1}\right)^2$$

式中　D、Q、H、N——分别为叶轮直径改变前水泵的叶轮直径、流量、扬程、功率；

D_1、Q_1、H_1、N_1——分别为叶轮直径改变后水泵的叶轮直径、流量、扬程、功率。

水泵叶轮直径车小是有一定限度的，最大车小 20%。通常车小后效率略有下降，此法可用在长期调节时。

由上述可知，离心泵的流量与转速或叶轮直径的一次方成正比；扬程与转速或叶轮直径的二次方成正比；轴功率与转速或叶轮直径的三次方成正比。

(五)离心泵工作点的确定及并联运行

水泵特性曲线（Q - H）与管路特性曲线（Q - h_w）的交点（A），称为水泵运行工作点，如图 4 - 3 - 7 所示。管路特性曲线的表达式，推导过程如下

$$H_Q = H_t + h_w + \frac{v^2}{2g}$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

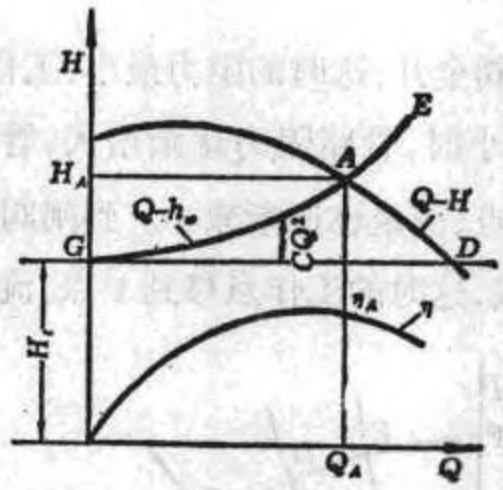


图 4-3-7 管路特性曲线

$$= H_t + \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi\right)\frac{v^2}{2g} + \frac{v^2}{2g}$$

$$= H_t + \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi\right)\frac{1}{2g}\left(\frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4}}\right)^2 + \left(\frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4}}\right)^2 \frac{1}{2g}$$

$$= H_t + CQ^2$$

$$C = \frac{\left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta + 1\right)(4/\pi d^2)}{2g}$$

若出口动能已在$\sum\xi$中考虑，则

$$C = \frac{0.083\left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta\right)}{d^4}$$

式中 H_G——输水管路所需要的总扬程(m)；

H_t——扬水地形总高度(m)；

Q——水泵输水量(m^3/s)；

C——管路阻力系数，当管路直径、长度及管路上附件的种类和数量已知时，C 为常数。

管路特性曲线的绘制方法如下(见图 4-3-7)：在 Q~H 坐标图上画一条平行于 Q 轴而距该轴的距离为 H_t 的直线 GD，在 H_t 之上增加相当于各 Q 值的水头损失 h_w(阀全开时)与出口处的流速水头之和，得到抛物线 GE(通常，先算出 C 值，设若干个 Q 值，可求得若干个相应的 H_G 值，在坐标图上将这些点连成一条光滑曲线即可)，GE 即为管路特性曲线，它表示在任意流量下管路系统所需要的总扬程，由工作点(A)可知：水泵在具体的管路系统工作时需要的总扬程和流量，正好与水泵所能提供的扬程和流量相平衡，因而能稳定地运行。

水泵的工作点在实际运行中是会变动的。下面我们分析几个工作点变动的实例：

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

1.管路阻力变化的影响

在作水泵试验时，先将闸阀全开，这时的阻力最小，工作点在图4-3-8的A点，其流量Q_A为最大。当阀门逐渐关小时，管路阻力逐渐增大，管路特性曲线就逐渐变陡，工作点逐步地由A移到B、C、D、E点，流量也逐渐减小。到闸阀全关时，阻力增加到无限大，管路特性曲线变成了一条垂直线，这时的工作点移到F点，流量Q也就变为零了。

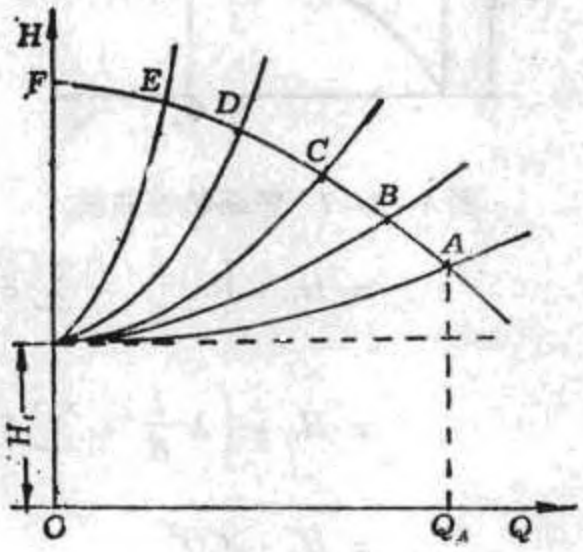


图4-3-8 管路阻力变化的影响

2.水位变化的影响

如图4-3-9所示。当进水池(或集水井等)的水位降低(或升高)时，扬水地形总高度H_t将增大(或减小)，管路特性曲线由S_1升到S_2的位置，工作点由原来的A点移到B点，流量由Q_A减小到Q_B。又如水泵在向水塔打水时，会发现水塔逐渐装满，水泵的流量在逐渐减小，也是同样的道理。

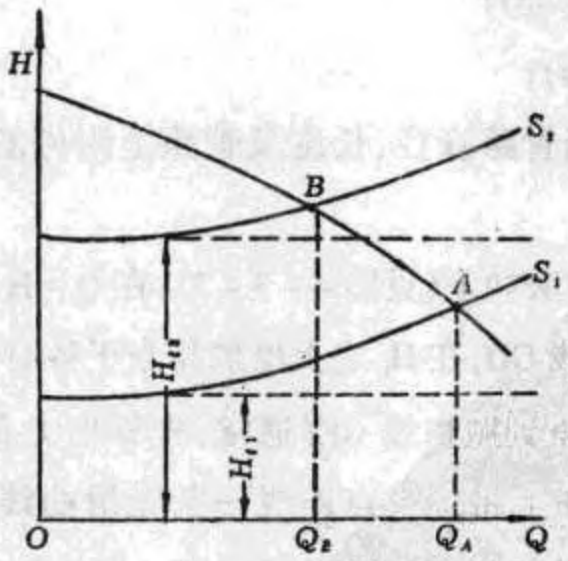


图4-3-9 水位变化的影响

3.水泵的并联运行

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

并联运行是指几台水泵向一条公共的压力水管供水。并联运行的水泵最好是型号相同的，并力求在汇合点前各台泵的管路特性一致。两台同型号的水泵并联运行时，只需在Q—H坐标图中将一台泵在同一扬程(纵坐标)下的流量加倍，再把各点连接起来，即得并联运行的特性曲线，如图4－3－10所示。图中点3为一台泵单独工作时的工作点，点1为两台泵并联运行时的工作点，点2为并联运行时每台泵的工作点。

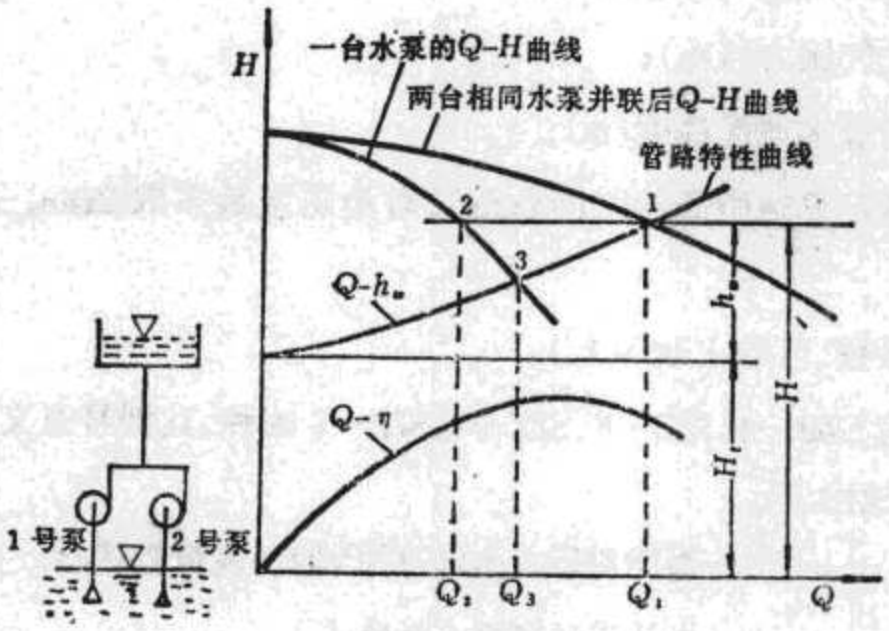


图4－3－10　两台泵并联运行特性曲线

从图中可见，并联运行时两泵扬程相等，总流量可以增加，但 $Q_2 < Q_3$，所以两台泵并联运行时的合成流量小于水泵各自独立工作时的流量之和。

多台水泵并联时工作点的确定方法与两台泵并联时工作点的确定方法相同。在管路特性曲线较陡的场合，三台或更多台水泵并联工作将是不利的。为防止水泵发生汽蚀，并联运行时一般只把水泵的出水管并联起来，每台泵仍有其独自的吸水管，这时，并联后的管路特性曲线应该略为平缓些。

(六)水泵起动前的充水

除自吸式离心泵和叶轮浸没在水中的离心泵(如深井茶与潜水泵等)外，其他型式的离心泵起动前均需充水。常用的充水方法有以下几种：

(1)设置底阀。对于口径在150mm以下的小型水泵，可在水泵吸水管的入口端装设底阀，首次起动前须从水泵上部用漏斗注水或用出水池的水倒注充水。底阀实际上是一个逆止阀，水泵停止后靠一个小灌水阀补充底阀漏水，下次起动不必再充水。因底阀水头损失很大，且注水时间较长，较大的泵不宜采用此法；

(2)用真空泵充水。对于口径在350mm以上的水泵，可用真空泵(或其它排气装置)从泵的顶部排除空气。水泵充水时的平均抽气量可按下式计算

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$Q_z = \frac{(V_1 + V_2)H_a}{T_z\left(\frac{P_a}{9.8} - H_g\right)}K_t \quad (m^3/min)$$

式中 Q_z——真空泵的抽气量(m^3)；

V_1——泵内空气体积(m^3)；

V_2——吸水管内的空气体积(m^3)；

P_a——当地大气压力(kPa)；

H_g——水泵的吸水地形高度(m)；

T_z——形成额定真空所需的时间(min)，对消防泵最多取 2min，一般水泵可取 3～5min；

K_t——漏气系数，可取 1.05～1.1。

常用的真空泵有 SZB—4、SZB—8、SZZ—4、SZZ—8 四种，其型号意义如下：

SZB—8
- 8：当绝对压力为69.1kPa时的流量值(L/s)
- SZB：水环式真空泵（悬臂式）

SZZ—4
- 4：当绝对压力为69.1kPa时的流量值(L/s)
- SZZ：水环式真空泵（直联式）

(3)用压流法充水。将水泵布置在吸水水面以下，此法可使水泵随时起动，但水泵安装位置低，须注意电机防潮、防淹问题，故采用较少。

深井泵起动前虽不用向水泵叶轮内充水，但须向橡胶轴承内灌注清水，防止起动时烧坏橡胶瓦。待水泵起动运行正常后，方可停止供水。一般深井泵在起动后约 1/4～11/4 分钟才开始出水。为了安全，外供的轴承润滑水在泵起动后至少保持 2 分钟才能切断。

(七)水电站常用泵的结构和特点

1.单级单吸离心泵

单级是指一台水泵只有一个叶轮，单吸是指水只从叶轮的一侧吸入泵内。这种泵的特点是体积小，重量轻，结构简单，使用维修方便，性能可靠。其中 IS 型按国际标准设计制造，是我国单级单吸离心泵的最新一代产品。IS 型与 B 型、BA 型相比，还具有效率高、电耗低、检修方便等优点。单级单吸离心泵因受吸程的限制，其装设位置较低，需注意防潮防淹。

IS 型泵的泵体和泵盖部分，是从叶轮背面处剖分的，即后开式结构，检修时不动泵体及管路系统就能拆卸。B 型与 BA 型系前开式结构，检修时须将水泵进口处的吸水管拆

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

下。没有 IS 型检修方便。

B 型是 BA 型的改进产品，它与 BA 型差别不大。只是 B 型泵在结构上稍有一些改变，如轴承采用黄油润滑。取消了 BA 型托架的油室，因而托架比较轻巧；泵轴的转向从联轴器方向看为顺时针方向旋转，这与 IS 型相同，与 BA 型相反。

根据不同泵型轴向力的大小，采用叶轮前、后设密封环，叶轮后盖板上设平衡孔或平衡筋的方式平衡轴向力。有些泵的轴向力不大，叶轮背面未设密封环或平衡孔。

单级单吸离心泵的结构，新老产品分别以 IS 型和 B 型为例，如图 4－3－11 和图 4－3－12 所示。

离心泵的主要零部件为叶轮、泵壳、承磨环、填料函、轴与轴承、泵体、泵盖及托架等，现择要介绍如下：

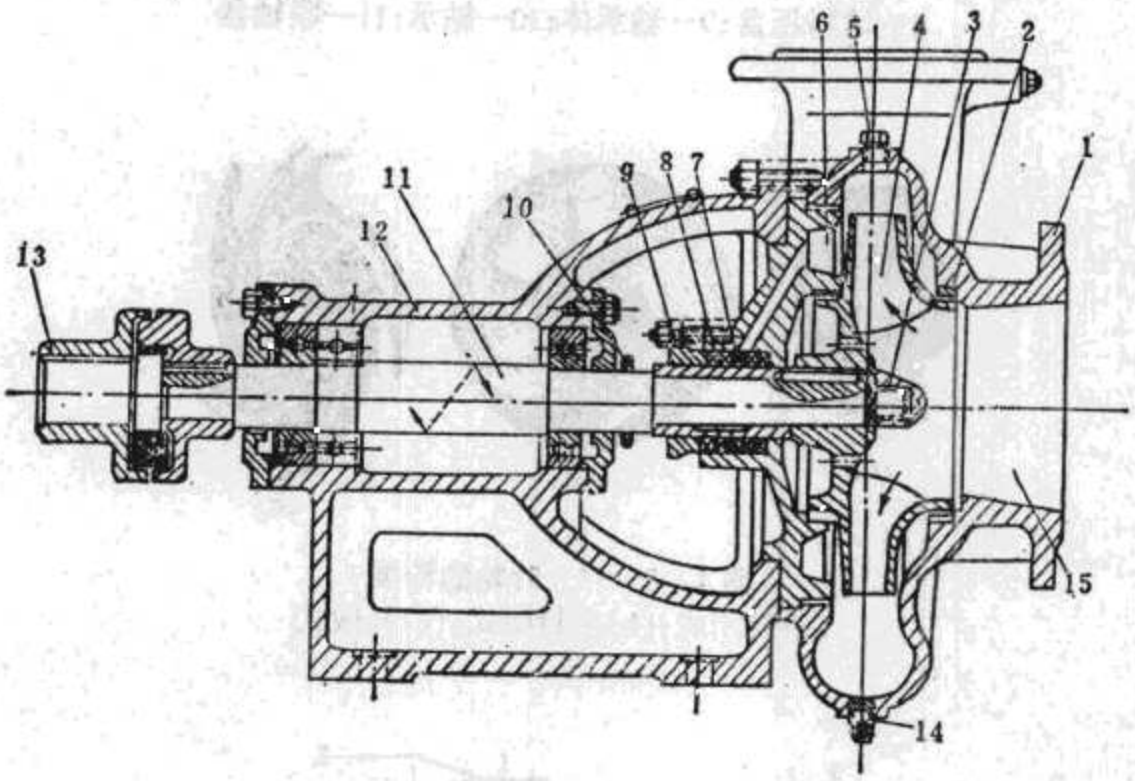


图 4－3－11　B 型泵结构图

1—系体；2—密封环；3—叶轮固定螺母；4—叶轮；5—放气螺塞；6—后盖；7—水封环；8—填料；9—填料压盖；10—挡水圈；11—泵轴；12—托架；13—联轴器；14—放水螺塞；15—吸入室

(1)叶轮

叶轮的作用是传递能量。把原动机的机械能变成液体的压能和动能。其型式有封闭式、半封闭式和开敞式三种，如图 4－3－13 所示。最常用的是封闭式，效率较高，半封闭式和开敞式叶轮，适用于提取含有杂质和泥沙的污水，效率较低。叶轮的材料一般为铸铁，青铜虽具有良好的耐磨、抗腐蚀性能，但因价格贵而少用。叶轮是水泵的主要部件，它的形状、尺寸、所用材料及加工工艺等，对水泵性能有决定性的作用。

(2)泵壳

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

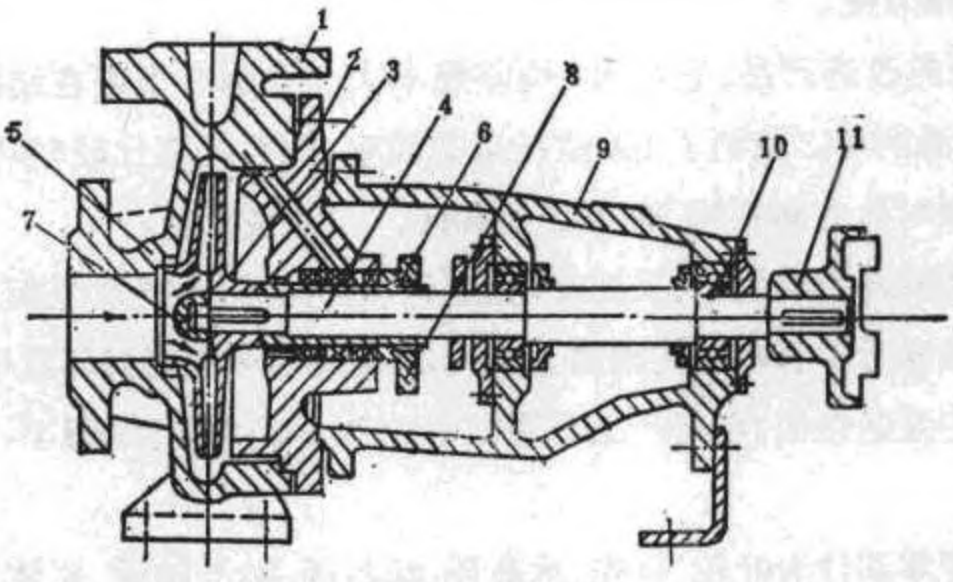


图 4－3－12　IS 型泵结构图
1—泵体；2—泵盖；3—叶轮；4—泵轴；5—密封环；6—轴套；7—叶轮螺母；
8—填料压盖；9—轴承体；10—轴承；11—联轴器

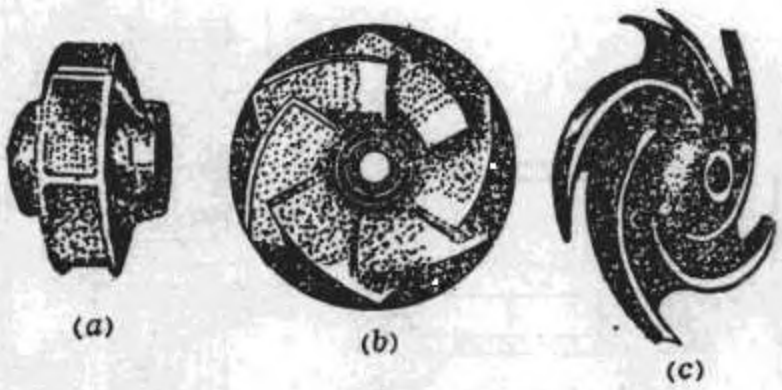


图 4－3－13　叶轮的种类
(a)封闭式；(b)半封闭式；(c)开敞式

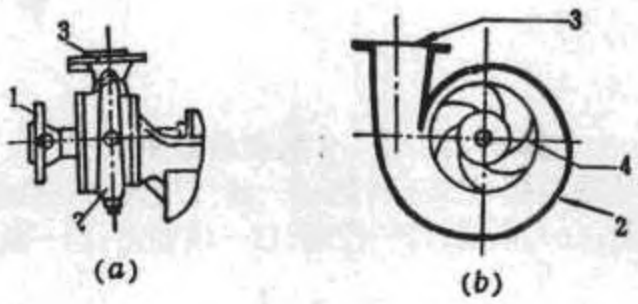


图 4－3－14　泵壳
1—进水接管；2—壳体；3—出水接管；4—叶轮

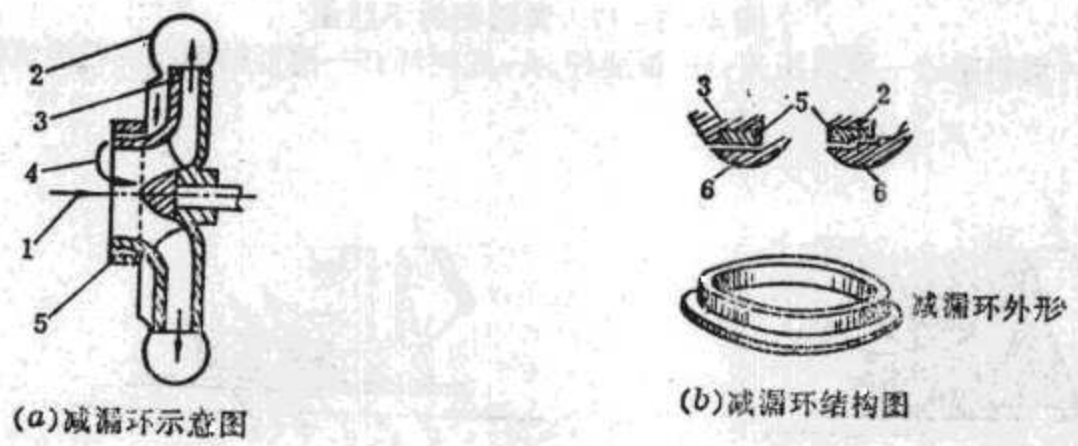
泵壳由进水接管、壳体和出水接管三部分组成，如图 4－3－14。进水接管的主要作用是把水引向叶轮，其形式为一渐缩的锥形管。壳体的形状象蜗牛壳，其主要作用是汇集由叶轮甩出的水，并借助壳体断面的不断增大，以保持壳体中水流速度基本不变。出水接管是断面逐渐扩大的锥形管，其作用是将出水接管中水流的部分动能转化为压能，以减小水力损失。壳体一般用铸铁制造。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(3)减漏环

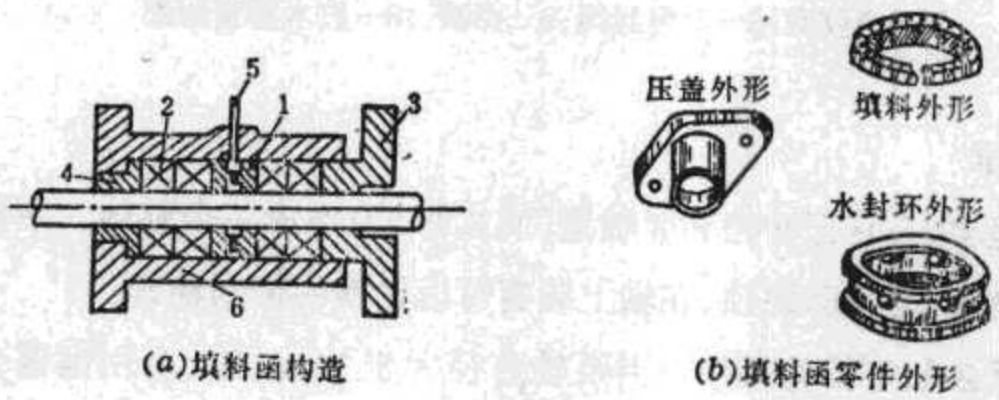
减漏环又叫承磨环,俗称口环。它除了能够挡住高压水漏回到吸水口外,还起承受磨损的作用。减漏环安装的位置及形式如图 4－3－15 所示。减漏环与叶轮之间的间隙一般为 0.1～0.5mm。间隙太小,摩擦力加大,功率损失也将增加;间隙太大,内部回流量加大,水泵效率降低。减漏环常用铸钢车削而成,加工精度要求较高,一般用平头螺钉装在泵盖内壁与叶轮进口外线相对应的位置上,磨损严重时,可以更换。



(a)减漏环示意图　　(b)减漏环结构图

图 4－3－15　减漏环

1—叶轮进口;2—泵壳;3—叶轮出口;4—漏水流向;5—减漏环;6—叶轮



(a)填料函构造　　(b)填料函零件外形

图 4－3－16　填料函示意图

(a)填料函构造,(b)填料函零件外形

1—水村环;2—填料;3—填料压盖;4—底衬环;5—水封管;6—填料座

(4)填料函

填料函又叫盘根簿、填料箱。它由填料座、填料、水封环、填料压盖和水封管等组成,如图 4－3－16。填料涵的主要作用是密封泵轴穿出泵壳处的缝隙,防止空气进入泵内以及泵内的水流出泵外。水封环位于填料中间,环上开有小孔,该孔正对水封管。BA 型水封管在泵壳内,外面看不见.泵内高压水经水封管流到水封环,在泵轴与泵盖之间进行水封。填料一般用石棉绳编制,用石蜡浸透后再压成方形截面,外表涂上黑铅粉。它具有耐磨、耐高温和既刚又柔的特性,一般填塞 5～6 圈即可。填料塞的松紧程度、可通过填料压盖上的螺钉来调整,通常调整到从填料中每分钟滴水 50～100 滴为宜。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

为延长填料的使用寿命和改善工作状况，近年来已有采用黄油密封的填料函(图 4－3－17)以及采用橡胶环或机械密封的填料函(图 4－3－18)。

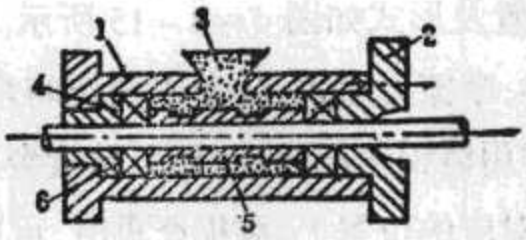


图 4－3－17 黄油密封示意图

1—填料座；2—堆料压盖；3—黄油杯；4—底衬环；5—槽形轴套；6—石棉填料

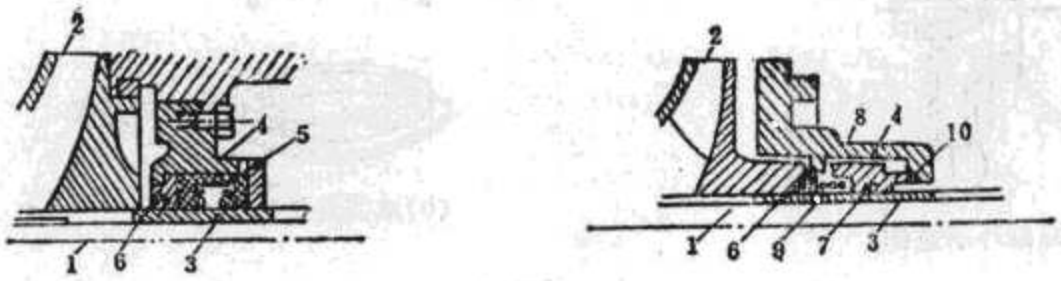


图 4－3－18 橡胶环和机械密封示意图

(a)橡胶环密封；(b)机械密封

1—泵轴；2—叶轮；3—轴套；4—密封座；5—橡胶环密封圈；6—挡圈；7—橡胶圈；8—动密封圈；9—弹簧；10—胶木静密封圈

(5)泵轴与轴承

泵轴用以传递动力，它把叶轮和联轴器(或皮带轮)连成一个整体。泵轴用中碳钢车削而成，为防止泵轴的磨损和腐蚀，在轴上装有可以更换的钢制轴套。

轴承用以支承泵轴等转动部件。当泵轴直径大于 75mm 时，多用铜锡合金或塑料制成的滑动轴承；泵轴直径小于 60mm 时，多用单列或双列的滚珠轴承。

(6)托架

托架是整个水泵的支架。托架用生铁铸成，用以固定泵壳并设有轴孔以安装轴承等部件。托架底部可通过固定螺钉安装在基础座上。

B 型泵轴承采用黄油润滑，取消了 BA 型托架的油室，因而托架比较轻巧。

2.单级双吸泵

双吸泵，水从叶轮两侧吸入，相当于两个单吸叶轮背靠背地装在一根轴上并联工作。这种泵常用的是 S(Sh)型，其特点是流量比较大(当叶轮直径给定时，吸水量比 B 或 BA 型大一倍)，而且因两边进水，能自动平衡轴向力，不必设减压孔，泵体水平中开，检修方便(泵盖卸开，不用拆吸水管，便可检查修理内部)，轴承装在叶轮两侧，工作可靠，维护方便。但泵轴穿过吸水室，对水流进入叶轮有不良影响。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

Sh 型泵的结构如图 4－3－19 所示，各主要部件的作用与单级单吸泵相同。

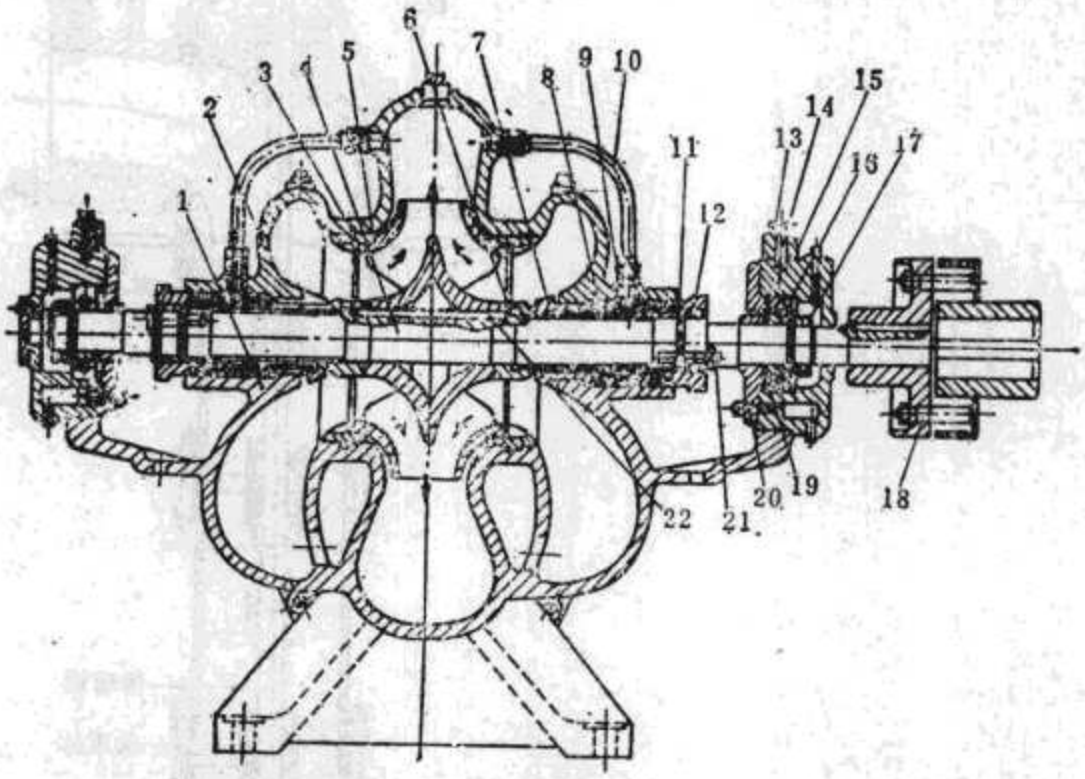


图 4－3－19　Sh 型甲式泵结构图

1—泵体；2—泵盖；3—叶轮；4—轴；5—减漏环；6—轴套；7—填料套；8—填料；9—填料环；10—水封管；11—填料压盖；12—轴套螺母；13—固定螺钉；14—轴承体；15—轴承体盖；16—单列向心球轴承；17—圆螺母；18—联轴器组件；19—轴承挡套；20—轴承端盖；21—双头螺栓；22—键

3.深井泵

深井泵种类较多，水电站常用的有 J(SD)型、JC(JD)型。其特点是电动机安装在井上，位置高，无受潮被淹的危险；叶轮在水下，不受吸程限制；结构紧凑，占地面积小；工作比较可靠。但因轴长井深，安装、检修及调整较麻烦；造价高，比普通水泵贵 2～3 倍。

(1)深井泵的组成及原理

深井泵由三部分组成(图 4－3－20)。

①泵体部分。包括叶轮、导流壳、叶轮轴、橡胶轴承、带滤网的吸水管等，起吸水和提水作用。

②带传动轴的输水部分。包括联管器、传动轴、轴承支架、橡胶轴承、联轴节等，起传递动力和导水的作用。

③井上传动装置部分。包括泵座、电机支架、轴承箱体、电动机、联轴器等，起提供动力、承受水泵轴向力、支承输水管和泵体重量的作用。

深井系的工作原理是。从电动机传来的动力，通过传动轴驱动水泵叶轮旋转，因叶轮在水下，叶轮内的水被甩出后在其进口处形成真空，吸入井水。叶轮的旋转使水的压力和速度同时增加，然后通过导流壳流入下一级叶轮入口。这样逐次流过所有的叶轮和导流壳，水获得的能量越来越多，水流的压力也就逐级增加，再经输水管引到地面。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

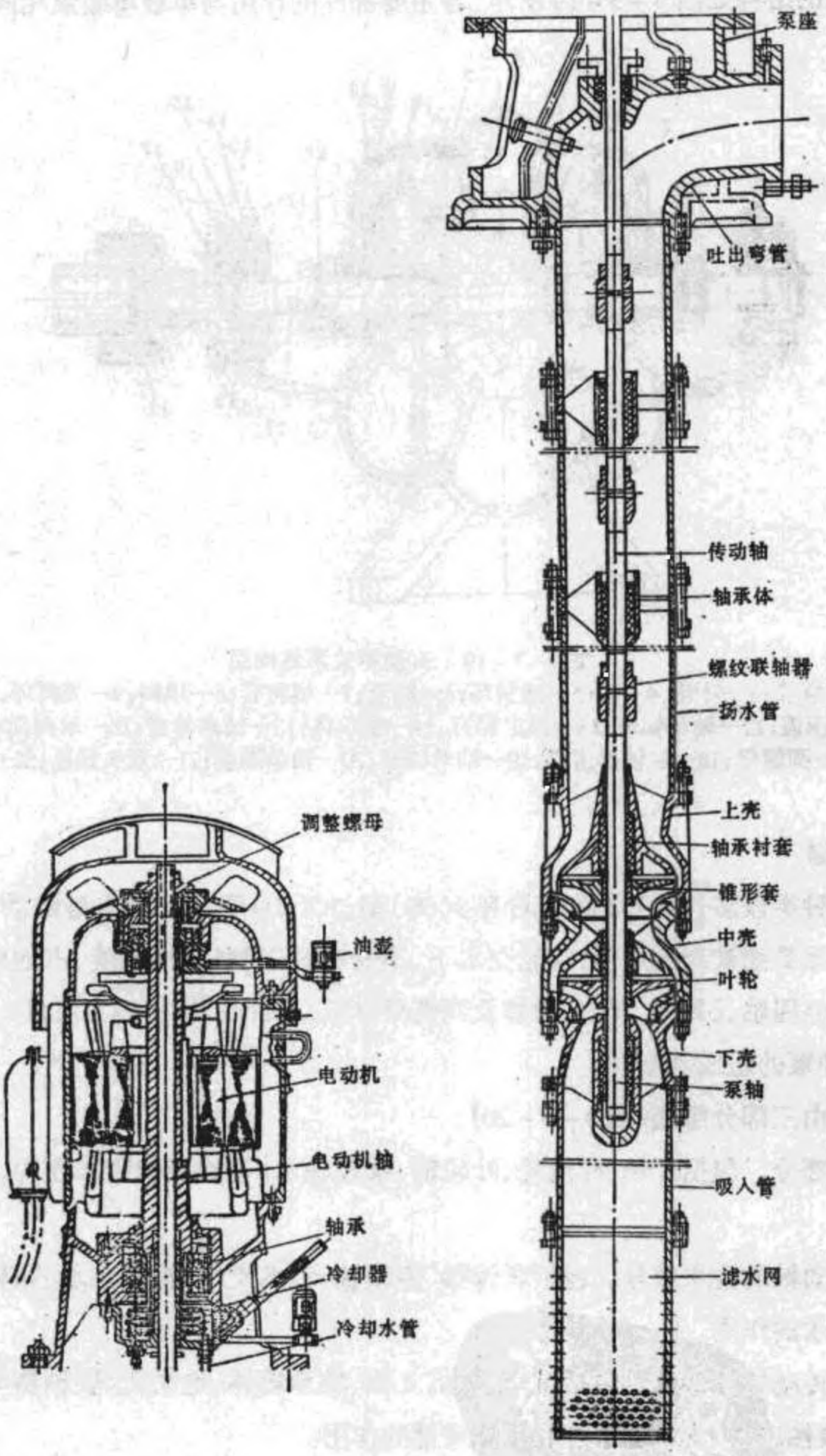


图 4-3-20 深井泵结构图

(2)主要零部件及其动作过程

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

下面以 JD 型为例，将深井泵的主要零部件由下而上作一介绍：

①带有滤网的进水管：滤网用来防止井中的杂物进入泵内，其形状有多种。由于通过滤网的水流具有不规则的流动，因而进水管应有一定长度，以便稳定水流，如图 4－3－21 所示。

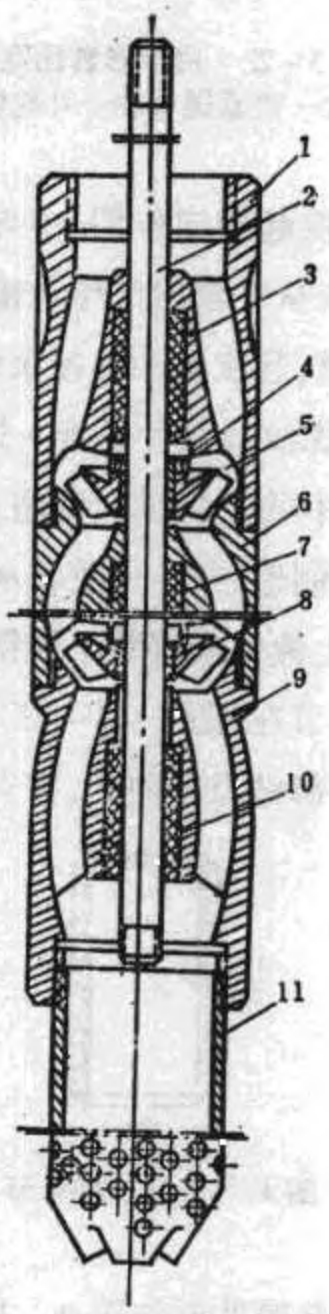


图 4－3－21　JD 型深井泵泵体部分

1—上导流壳；2—叶轮轴；3—上导流充橡胶轴承；4—锁紧螺母；5—叶轮；6—中导流壳；7—中导流壳橡胶轴承；8—锥形套；9—下导流壳；10—下导流壳橡胶轴承；11—滤网吸水管

②叶轮和叶轮轴：叶轮常为离心式、用铸铁、青铜或塑料制成。扬程越高，级数（叶轮个数）越多，目前国产深井泵最多可达 26 级。

叶轮轴用不锈钢或中碳钢加工后镀铬制成。为了能将叶轮拉近导流壳，叶轮轴下端车有螺纹，以便定位。

叶轮在叶轮轴上的固定，大多利用锥形套和锁紧螺母来实现，如图 4－3－22 所示。

③导流壳：深井泵的导流壳系铸铁制造，分上、中、下三段，用螺纹或法兰连接（图 4－

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

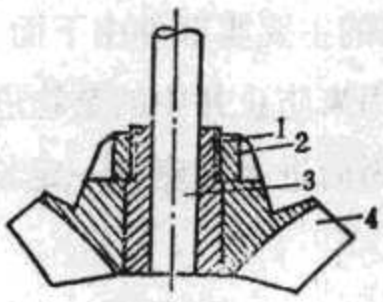


图 4-3-22 用锥形套固定叶轮
1—锥形套;2—锁紧螺母;3—叶轮轴;4—叶轮

3-21)。下导流壳在水流进入叶轮前起导向作用;中导流壳将水从前一级叶轮出口引向下一级叶轮的进口;上导流壳将水流从叶轮出口导入输水管。

④输水管:它是输送水流的通道,起支承和连接泵体的作用。输水管可采用水煤气管或焊接钢管,每段长约 2~2.5m,用螺纹或法兰连接。螺纹连接处容易锈蚀,使拆卸困难。

⑤传动轴:它把动力传给泵体中的叶轮轴。和输水管一样,也是由长约 2~2.5m 的若干段组成。传动轴用冷轧中碳钢制造,在与橡胶轴承配合部分,为防止其过早磨损或因此处锈蚀而损坏橡胶轴承,常在轴上镀铬或镶装不锈钢套、镀铬钢套、铜套等。

各段传动轴用具有螺纹的联轴节在(图 4-3-23)连接。为避免连接处松动脱落,轴端均采用左旋细牙螺纹。联轴节中部钻有径向孔,在安装时起定位排气作用。

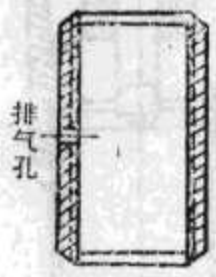


图 4-3-23 联轴节

⑥轴承支架和橡胶轴承:轴承支架外形如图 4-3-24 所示,内装橡胶轴承。主要作用是支承和稳定传动轴,防止传动轴左右摇摆而引起水泵振动。轴承支架用球墨铸铁或硬质塑料整体铸造,在满足强度的情况下,筋条不宜太厚,且迎水面为流线型,以加大过流断面和减小水流阻力。轴承支架安装在联管器中部位置。

每台深井泵有四种橡胶轴承:

A.支架橡胶轴承,安装在传动轴轴承支架的座孔中,其数量与传动轴的段数相同;

B.中段橡胶轴承,安装在中导流壳中心座孔内,其数量与中导流壳个数相同;

C.进水橡胶轴承,安装在下导流壳中心座孔内,每台泵一个;

D.出水橡胶轴承,安装在上导流壳中心座孔内,每台泵一个。

C、D、两种轴承因受力较大,因此比前两种长。橡胶轴承的内表面有轴向沟槽(图 4-

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

图 4－3－24　轴承支架外形

3－25)，在运行中靠流过的水润滑和冷却。橡胶轴承与导流壳之间一般用胶固接。橡胶轴承具有耐磨、减振和成本低廉等优点，国内深井泵普遍采用。

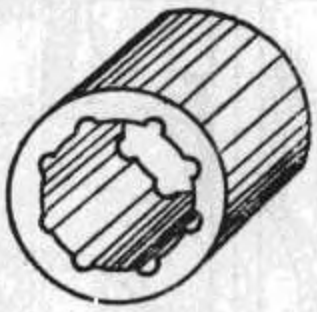


图 4－3－25　橡胶轴承

⑦泵座：泵座和出水弯管用铸铁铸成一个整体(图 4－3－26)，用螺钉固定在井口的基础上。泵座下面有一个具有内螺纹的法兰盘，用以和最上一节输水管连接。泵座中心有填料函，还设有黄油杯，将黄油注入填料函下部的环形缝隙中，起润滑和油封作用。另外还设有予润滑水管，以便在水泵起动前灌水润滑橡胶轴承。

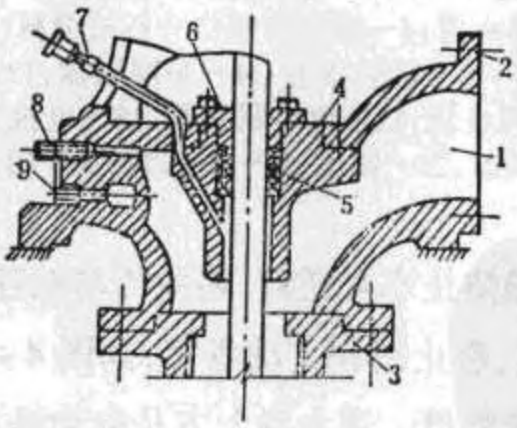


图 4－3－26　泵座

1—出水弯管；2—出水口法兰盘；3—底座下法兰盘；4—填料箱；5—填料；6—压盖；7—黄油杯；8—预润滑水管；9—排水管

⑧轴承箱：轴承箱用来承受旋转部分的重量及水泵工作中产生的轴向力和径向力。常由单列向心球轴承、单列向心推力球轴承以及润滑、冷却装置等组成。轴承用黄油或机

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

油润滑(见图 4－3－27)。

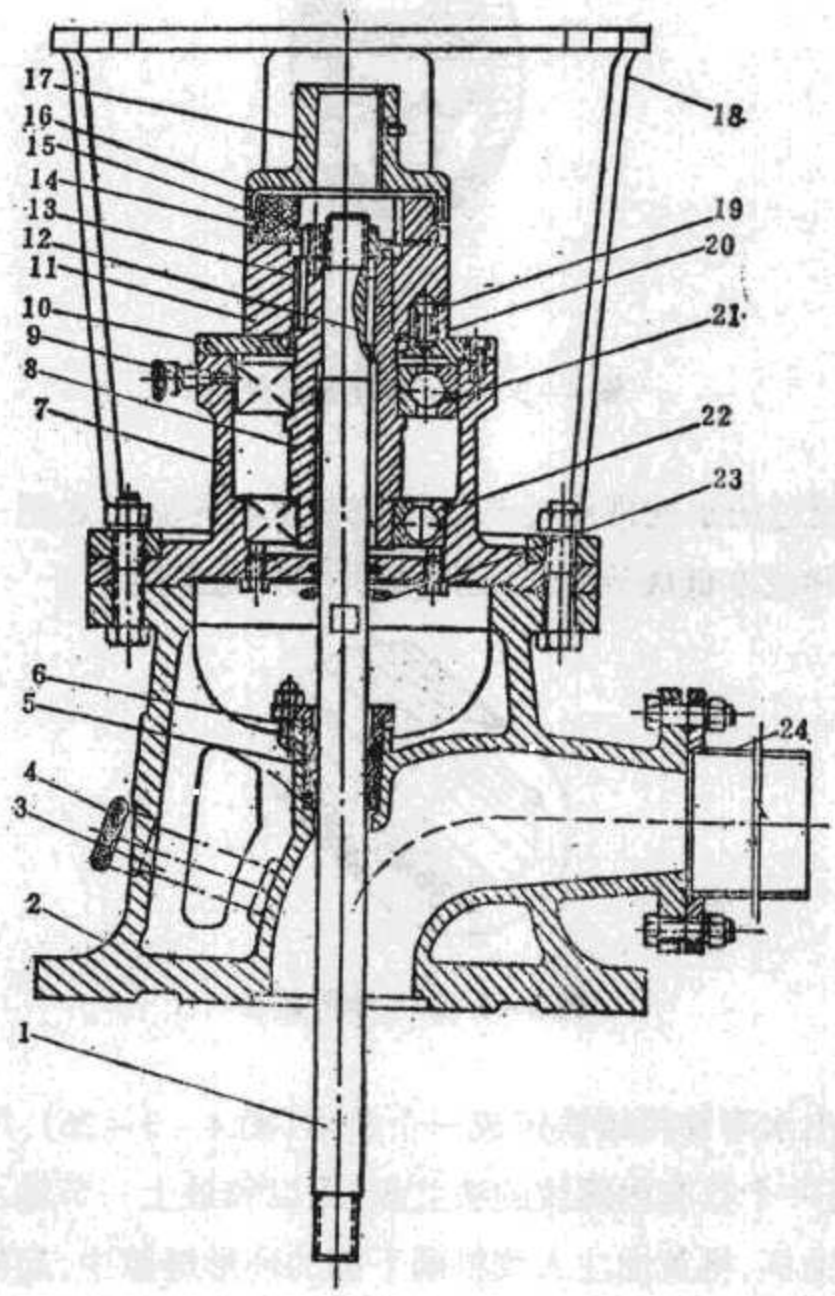


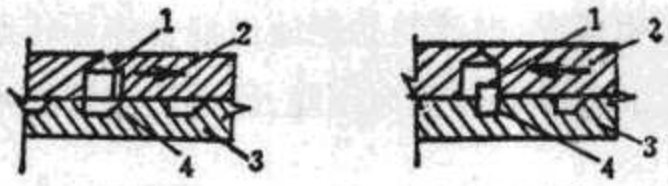
图 4－3－27 黄油润滑的轴承箱

1—上传动轴;2—泵座;3—灌水管;4—灌水管帽;5—石棉填料;6—填料压盖;7—轴承箱;8—传动套;9—旋盖黄油杯;10—轴承压盖;11—泵联轴器;12、13—键;14—调节螺母;15—定位螺钉;16—弹性块;17—电机联轴器;18—电机支架;19—逆止套;20—逆止销;21、22—轴承;23—挡水圈;24—出水管组件

⑨逆止装置:逆止装置用来防止水泵逆转,避免传动轴各段之间的螺纹连接松动而发生事故。其主要零件有逆止盘、逆止销和主动盘等,如图 4－3－28 所示。逆止盘就是轴承压盖,它的上表面加工有坡齿形槽。逆止盘上方是电动机主动盘或联轴器,主动盘上有 3～4 个孔;孔内装有可上下自由活动的逆止销。当电动机以规定的转向运动时,随主动盘旋转的逆止销在离心力作用下上升,紧靠在孔内,与坡齿形槽互不接触,不发生任何作用[图 4－3－28a]。在起动或停泵的瞬间,电动机转速很低,逆止销不足以升起,而在坡齿形槽上滑过,这时可听到咯咯的响声;如电动机反向转动,逆止销就被坡齿形槽阻止[图 4－3－28b],实现逆止作用。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网



(a)正转时　　(b)反转时

图 4－3－28　逆止装置
(a)正转时;(b)反转时
1—逆止销;2—主动盘;3—逆止盘;4—坡齿形槽

⑩轴向间隙调节螺母:在水泵传动轴的最上端有螺纹配合的调节螺母(图 4－3－20),其作用是调节水泵的轴向间隙。

轴向间隙是指叶轮与导流壳之间的间隙,如图 4－3－29 所示。轴向间隙太大,水泵内部回流增大,降低水泵效率;间隙太小,将引起叶轮与泵壳之间的摩擦。

当拧紧调节螺母时,可把水泵整个长轴提起,使轴向间隙增大。反之,下降水泵长轴,则间隙减小。间隙调好后,用定位螺钉锁住调节螺母。

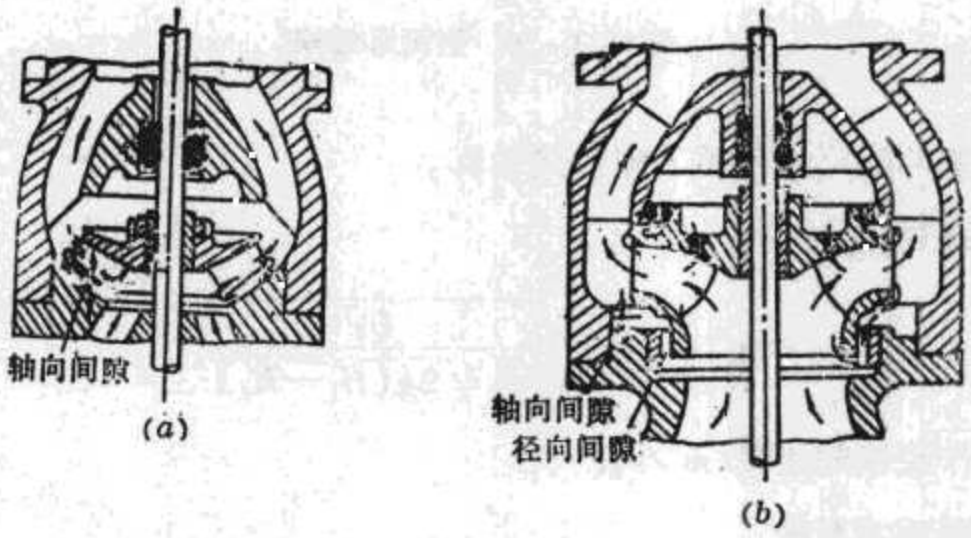


图 4－3－29　井泵间隙和回流示意图
(a)半封闭式叶轮中的间隙和回流;(b)封闭式叶轮中的间隙和回流

⑪动力机:在水电站,深井泵普遍采用立式电动机,通过联轴器直接带动水泵工作。电动机顶部设有防护罩。

4.射流泵

射流泵是利用高速喷射流体的动能而工作的一种提水设备。它的特点是结构简单,工作可靠,安装、操作方便,除可抽清水外,还可抽取含沙量较大的井水。但射流泵能量损失大,效率低(一般只有 15～35%)。

射流泵目前尚无定型产品,需自行设计计算。其结构如图 4－3－30 所示。工作时,高压水流从喷嘴高速射出(通常流速大于 30m/s),将混合室 2 内的空气(或水)带走,室内压力降低形成真空。被抽的水在大气压力作用下,沿吸水管 5 进入吸水室 4。吸入水流

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

和高速射流在混合室中互相掺混，射流的动能通过混合作用传给被吸的水，混合水流再流入扩散室，流速渐减，把大部分动能转变为压能，通过出水管把水排走。

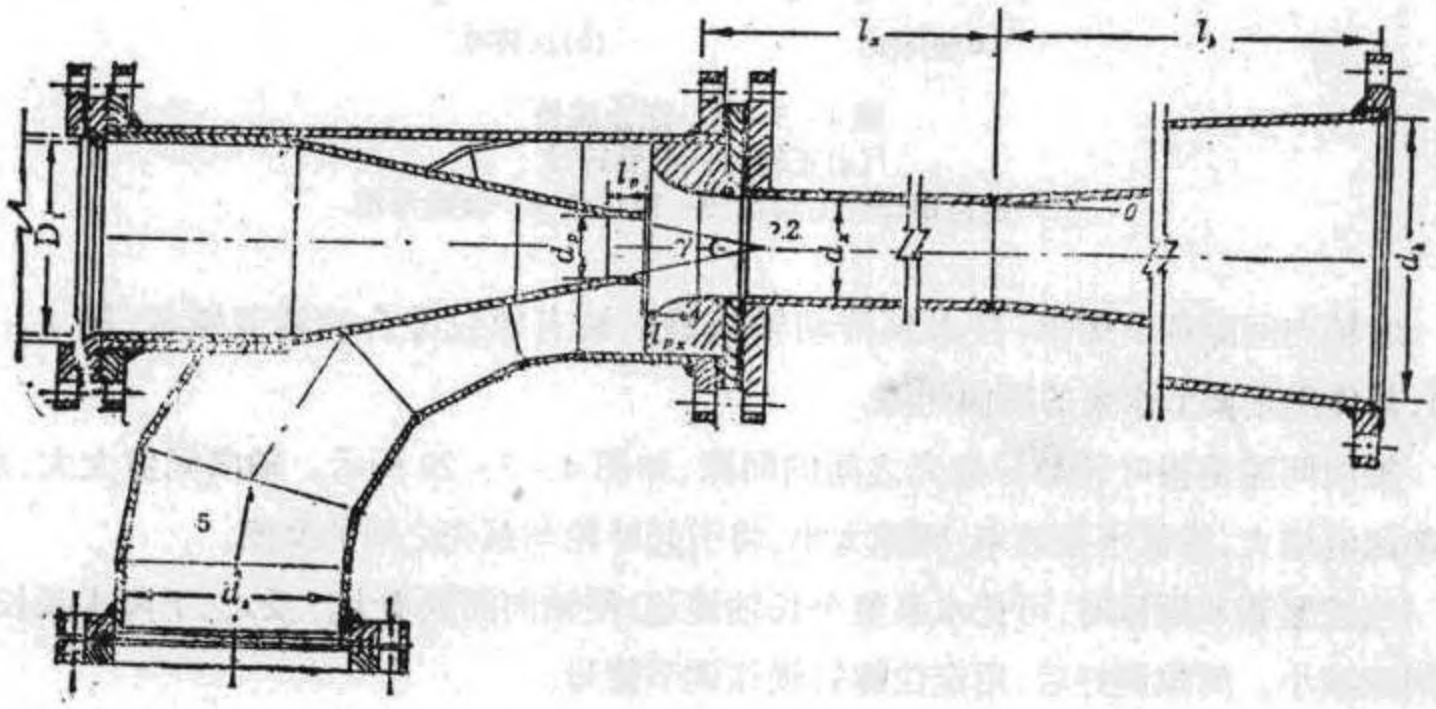


图 4-3-30 射流泵结构

射流泵过流部件的尺寸可按下列各式估算。

①喷嘴出口直径(d_p)

$$d_p = 1.13\sqrt{\frac{Q_1}{\varphi_1\sqrt{2g(H_1-H_2)}}}$$

式中 Q_1——工作流体的流量(m^3/s)；

φ_1——喷嘴流速系数；

H_1——工作流体总水头(m)；

H_2——引射流体总水头(m)。

②混合管出口直径(d_x)

$$d_x = \sqrt{f}d_p$$

式中 f——面积比 $f=\frac{F_3}{F_1}$；

F_3——混合管入口工作流体与引射流体截面积之和(m^2)；

F_1——喷嘴出口工作流体截面积(m^2)。

③扩散管出口直径(d_k)

$$d_k = (2.5 \sim 3)d_x \quad \text{(取标准直径)}$$

④吸水管出口直径(d_s)

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$d_s = (1.5 \sim 2)d_x \quad \text{（取标准直径）}$$

⑤喉嘴距长度(l_{px})

$$l_{px} = (1 \sim 2)d_p \quad (H_1 \text{ 高时取大值})$$

⑥混合管长度(l_x)

$$l_x = (6 \sim 8)d_x \quad (H_1 \text{ 高时取大值})$$

⑦扩散管长度(l_k)

$$l_k = (10 \sim 12)d_x$$

⑧喷嘴平直段长度(l_p)

$$l_p = (0.25 \sim 0.5)d_p$$

⑨喷嘴锥角(γ)

$$\gamma = (13^\circ \sim 15^\circ)$$

⑩扩散管锥角(θ)

$$\theta = (8^\circ \sim 10^\circ)$$

5.真空泵

真空泵实际上是一合空气压缩机。我们使用它时不是把大气打入贮气筒中去，而是要把被抽的空气打到大气中去。水电站使用真空泵主要是为水泵起动时抽气充水，通常把真空泵的吸气管接在水泵的顶部，就可以把吸水管和泵体内的空气抽走，因而进水池的水在大气压力作用下才能进入泵体内，这样就具备了卧式离心水泵起动的基本条件。利用真空泵执气，不仅可省去笨重的底阀，而且利于水泵实现自动化操作。

常用的水环式真空泵，其内部结构如图 4－3－31 所示。它主要由圆筒形的外壳 1 和具有辐向叶片的叶轮 2 所组成。叶轮的旋转中心和外壳的圆心是不重合的。在启动前。真空泵内要注入少量的水[如图中(a)]，叶轮转动后，水被叶片所拨动，形成和外壳同心的水环[如图中(b)]，由于这个水环和叶轮是偏心的，因而每两个叶片之间的空间，在右半边是逐渐增大的，到了正下方达到最大容积，而在左半边则是逐渐减小的。这样，若在外壳的端盖上开两组开口[图中(c)]，叶轮转动时就能从右半边的开口 3 把气吸进来，而从左半边的开口 4 排出去。当水泵中的空气被抽完后，真空泵就会吸进水来，但不会使其结构受到损伤。

(八)离心泵的常见故障及处理方法

离心泵的故障，与设计、安装和运行维护不善有关。对于已投入运行的水泵，尤需注意表 4－3－6 列出的各种故障中的前面几项。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

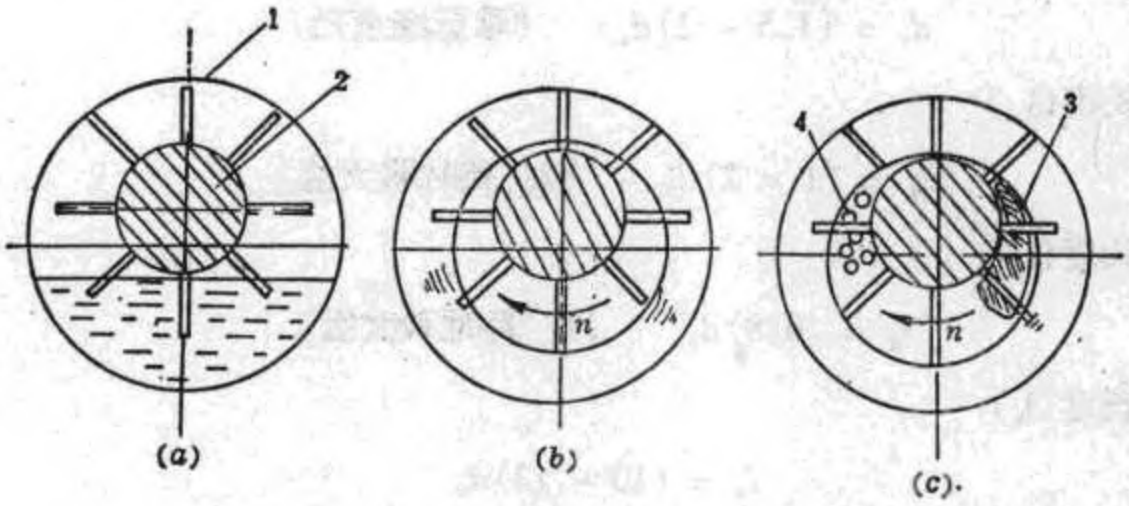


图4-3-31 水环式真空泵

表4-3-6

故障现象及产生原因	排除方法
1.水泵起动后不出水或出水不足	
(1)泵内水未灌满或空气未抽尽	(1)继续灌水或抽气
(2)进水管路或填料函漏气	(2)检查进水管路,堵塞漏气处;拧紧填料压盖,必要时在填料上涂一点黄油以增强效果
(3)底阀堵塞或漏水	(3)清除杂物或修理
(4)水面产生漩涡将空气带入泵内	(4)加大进水管口的淹没深度或采取防止漩涡产生的措施
(5)水泵转速太低	(5)检查电压是否太低,使水泵达到额定转速
(6)水泵的转向不对	(6)改变旋转方向
(7)叶轮进水口及流道堵塞	(7)清除杂物
(8)减漏环磨损过大,叶轮前盖板磨穿	(8)更换减漏环,更换叶轮
(9)吸水管内或泵内上部存有空气	(9)改进吸水管路布置,排除空气
(10)底阀不能开启或开度太小	(10)检查修理底阀
(11)水泵扬程不够	(11)更换扬程高的水泵
(12)水泵安装高程不当或吸水阻力太大,水泵发生汽蚀	(12)降低水泵安装高度,减小吸水损失扬程
(13)键损坏	(13)检查键槽及键,进行修理或更换
2.水泵不能起动或起动后轴功率过大	
(1)填料压得太紧	(1)松一点填料压盖
(2)电压太低	(2)查明原因,提高电压
(3)泵轴弯曲;轴承磨损或损坏	(3)矫直泵轴;更换轴承
(4)平衡孔堵死;多级泵中回水管堵死	(4)清除杂物;疏通回水管
(5)两联轴器之间间隙不小,运转时两轴相顶	(5)调整两联轴器之间的间隙

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

故障现象及产生原因	排除方法
(6)叶轮螺母或轴承压盖没有拧紧,使叶轮前盖板和口环与泵体相磨	(6)拧紧叶轮螺母和轴承压盖
(7)转速过高	(7)降低转速
(8)流量太大,超出使用范围	(8)提高水泵扬程或关小出口闸阀
3.水泵振动大,声音不正常	(1)矫直或更换泵轴,找正两联轴器同心度
(1)泵轴弯曲,两联轴器不同心	(2)更换轴承
(2)轴承损坏或磨损过大	(3)查明原因并清除
(3)泵内旋转部件与静止部件有严重摩擦	(4)加固基础;拧紧地脚螺栓
(4)基础不良或地脚螺栓没有拧紧	(5)检查并将其拧紧
(5)联轴器的小圆螺母没有拧紧	(6)防止吸入空气或在存留空气处加排气阀
(6)泵内或出水管内存留空气	(7)降低水泵几何安装高度;减小吸水损失扬程
(7)水泵进口真空度超过允许吸出真空度	
4.运行中突然停止出水	
(1)进水管路突然被杂物堵塞	(1)停泵后清除堵塞物
(2)进水管口吸入大量空气	(2)加大淹没深度
(3)叶轮被吸入杂物打坏	(3)停泵后更换叶轮
5.轴承发热	
(1)轴承缺油	(1)加油到规定量
(2)泵轴弯曲或联轴器设有找正好	(2)矫直或更换泵轴;找正联轴器
(3)油质不良	(3)更换合格的润滑油
(4)轴承损坏或甩油环不起作用	(4)更换轴承;放正油环位置或更换油环
(5)轴承安装不当或间隙小配合不当	(5)正确安装;调整轴与轴承配合间隙
(6)叶轮平衡孔堵塞,泵的轴向力不平衡	(6)清除堵塞的杂物,保持水泵轴向力平衡
6.填料处发热,漏水过少或没有	
(1)填料压得太紧	(1)调整填料压盖的松紧,维持每分钟 50 ~ 100 滴为宜
(2)水封管堵塞	(2)疏通水封管
(3)水封环装的位置不对	(3)调整水封环的位置,使之正好对准水封管口
(4)填料室和轴不同心	(4)改正不同心的地方
(5)轴承磨损过大	(5)更换轴承
(6)填料压盖位置不正,磨轴	(6)调整压盖位置,使之不磨轴

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

二、供水系统水力计算及主要设备选择

(一)供水系统的水力计算

1.水力计算的任务

供水系统水力计算的任务主要是:确定管网中各段的管径及各段的水头损失;校核管网水量是否满足要求以及水压是否符合规定;合理选择供水系统的元件及设备。

2.水力计算的步骤

(1)准备基本资料。主要有机型、台数、容量、水头、流量、上下游水位、水温以及制造厂提供的冷却器进口水压、耗水量等。

(2)绘制管路系统计算草图,根据主机与辅助设备的布置情况,模拟管路的实际走向,绘制供水管路系统计算草图,具体要求如下。

①编定管路系统各节点号码,标明水流方向;

②注明各管段长度、管径及流量值;

③注明各冷却装置的高程。

(3)列表计算管路水力损失.

(4)校核管路压力。总计管网所需流量及水头,校核各用水设备所需的压力或水泵的扬程能否满足要求。

3.水力计算的方法

(1)管径的选择计算

管网中各管段的内径 d,应按管中的计算流量和允许的计算流速来确定,最后选取与其相近的标准直径。如已知流量和流速,管径可在图 4-3-32 诺谟图中查出,也可按下式计算

$$d=\sqrt{\frac{4Q_j}{\pi v_j}}=1.13\sqrt{\frac{Q_j}{v_j}}\quad(m)$$

式中 d——管子内径(m);

Q_j——计算流量(m^3/s)

v_j——计算流速(m/s)。

建议供水系统计算流速取 2~7m/s;排水系统出水管内流速取 2~3m/s;水泵吸水管内流速取 0.5~2m/S。

对于埋设部分的排水管,管径不宜过小,以防阻塞。

注意:常在图中标注的管子公称直径(D_g)既不代表外径;也不代表内径,见表 4-3-7。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

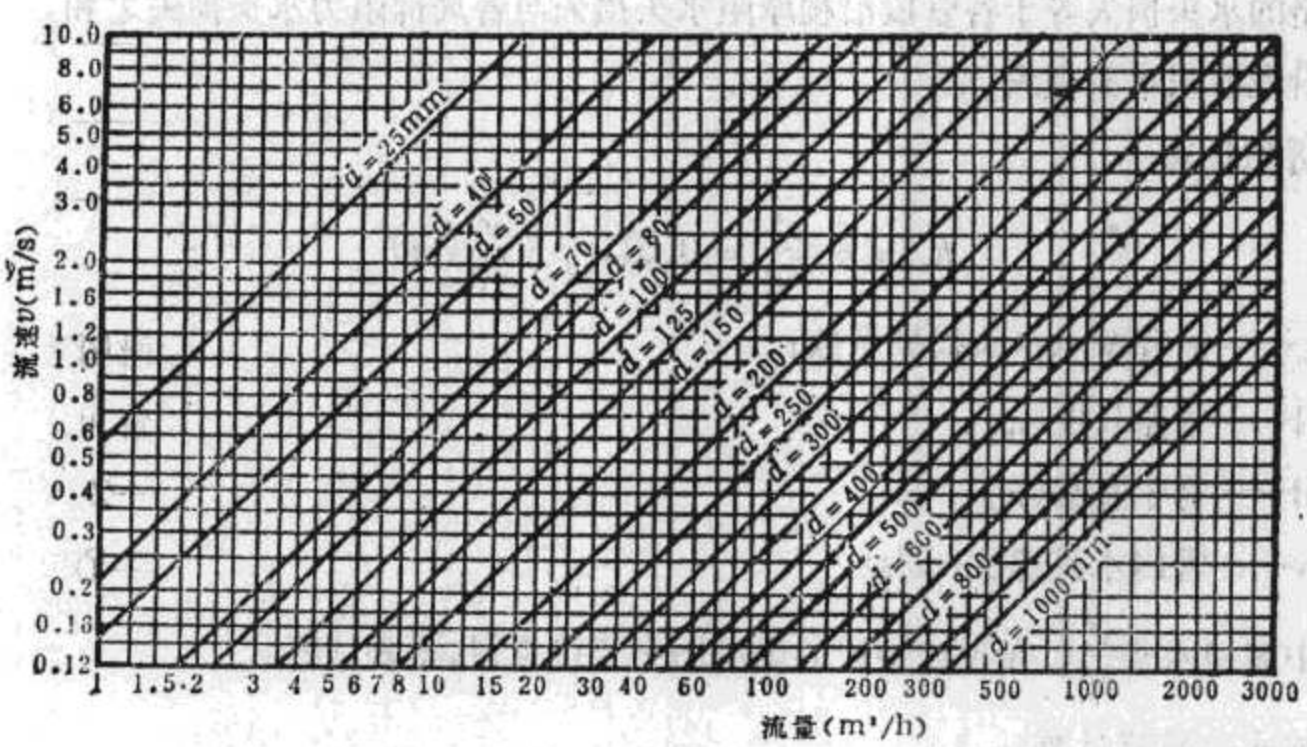


图 4－3－32　根据流速和流量确定管路直径的诺漠图

表 4－3－7　　管道计算内径尺寸

钢管 (mm)											铸铁管 (mm)	
普通水煤气管				中等管径				大管径				
公称直径 D_g	外径 D_H	内径 D	计算内径 D_j	公称直径 D_g	外径 D_H	内径 D	计算内径 D_j	公称直径 D_g	外径 D_H	计算内径 D_j	内径 D	计算内径 D_j
8	13.50	9.00	8.00	125	146	126	125	400	426	406	50	49
10	17.00	12.50	11.50	150	168	148	147	450	478	458	75	74
15	21.25	15.75	14.75	175	194	174	173	500	529	509	100	99
20	26.75	21.25	20.25	200	219	199	193	600	630	610	125	124
25	33.50	27.00	26.00	225	245	225	224	700	720	700	150	149
32	42.25	35.75	34.75	250	273	253	252	800	820	800	200	199
40	48.00	41.00	40.00	275	299	279	278	900	920	900	250	249
50	60.00	53.00	52.00	300	325	305	305	1000	1020	1000	300	300
70	75.50	68.00	67.00	325	351	331	331	1200	1220	1200	350	350
80	88.50	80.50	79.50	350	377	357	357	1300	1320	1300	400	400
100	114.00	106.00	105.00					1400	1420	1400	450	450
125	140.00	131.00	130.00								500	500
150	165.00	156.00	155.00								600	600
											700	700
											800	800
											900	900
											1000	1000

* 壁厚为 10mm 的管道。

(2)水头损失的计算

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

管路的水头损失等于各管段沿程摩阻水头损失与各局部阻力水头损失之和。

①沿程摩阻水头损失(h_e)

A.近似计算

$$h_e = \xi_e \frac{v^2}{2g} = 0.025 \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}(m)$$

式中 ξ_e——沿程摩阻水头损失系数;

l——管路长度(m);

d——管子直径(m);

v——管内水流速度(m/s);

式中流速水头$\frac{v^2}{2g}$可在设计手册的诺漠图中直接查得,不必计算。

B.按水力坡降计算

$$h_e = il(m)$$

式中 l——管路长度(m);

i——水力被降,即单位管长的水力损失。

对旧钢管和铸铁管的水力坡降:

当 $v \geqslant 1.2m/s$ 时,$i = 0.00107 \frac{v^2}{d_j^{1.3}}$

当 $v < 1.2m/s$ 时,$i = 0.00912 \frac{v^2}{d_j^{1.3}}\left(1 + \frac{0.867}{v}\right)^{0.3}$

式中 d_j——管子计算内径(m);

v——管内水流速度(m/s)。

C.按比阻计算

$$h_e = il = AQ_j^2 l(m)$$

$$A = \frac{i}{Q_i} = \frac{0.001735}{d_j^{5.3}}$$

式中 A——比阻值;

Q_j——计算流量(m^3/s)。

D.查图表计算;当已知直径和流量时,可直接从设计手册的诺模图中迅速查得沿程摩阻水头损失,省去繁杂的计算。

(2)局部阻力水头损失(h_m)

①常用公式计算

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}(m)$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

式中　ζ——局部阻力系数(查手册);

v——管中水流速度(m/s)。

②当量长度法计算

$$h_m = il_m(m)$$

式中　i——水力坡降;

l_m——局部阻力当量长度(查手册)。

(二)主要设备选择

供(排)水系统的主要设备有水泵及阀门。

1.水泵的选择

(1)选择水泵的一般原则

所选水泵应在各种工作情况下都能满足用水设备的要求;保证水泵工作点经常处在较高的效率区内;尽可能选择真空度较大、比转速较高及价格较低的水泵;保证运转安全可靠,在不同扬程下均有较好的汽蚀性能和工作稳定性。

2.选择水泵的步骤及方法

①根据供(排)水系统对流量与扬程的要求以及运行方式,初步确定水泵的台数与型号。

确定水泵台数时,既要有利于运行检修,又要力求经济合理,通常以2~4台为宜。台数太多,将给运行维护带来不便,同时占地面积大,土建投资增加,自动控制结线也相应复杂化。

水泵台数确定后,由下式可确定每台泵的流量(Q

$$Q = \frac{\sum Q_i}{Z}(m^3/s)$$

式中　$\sum Q_i$——各用水设备所需供水流量之和(m^3/s);

Z——水泵台数。

为了可靠,Q可加大10%后再作为选型的流量.

水泵扬程可由下式确定

$$H = H_t + h_w + H_0(m)$$

式中　H_t——扬水地形总高度(m);

h_w——管路中水头损失(m);

H_0——用水设备要求的进水压力(对于排水系统,此项不存在).

为了可靠,H值可加大10%后再作为选型的扬程。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

由每台泵的流量和扬程，可查水泵型谱表或水泵样本，即可找到水泵型号。对最常用的 BA、Sh、IS 型泵，可从表 4－3－8 中快速查出。

有时能满足流量及扬程要求的水泵有几种，这就需要参照水泵选择的原则，根据水泵在供(排)水系统中的任务进行综合考虑。一般在技术供水系统中，常用卧式离心泵，其优点是价格低廉，结构简单，运行可靠，维护方便；缺点是占地位置较大，起动前需要充水，且受吸程的限制，水泵的安装位置较低。如果选用深井泵(立式多级离心泵)，其优点是结构紧凑，管道短，占地较省，可布置于机旁，运行检查方便，且起动不需要充水；不受吸程限制，无水淹泵房的危险；但结构复杂，检修不大方便，价格较昂贵，故多用于电站集水井排水系统中。为便于维护检修，工作泵与备用泵一般选用同型号水泵。

②校核所选水泵在不同工作扬程下运行时，其流量和效率是否符合要求。方法如下：

A.按管路情况计算并绘制不同 H_t 的管路特性曲线($Q-h_w$)：

B.从 Q－H 曲线与管路特性曲线($Q-h_w$)的交点找出在不同总扬程下运行的流量和效率；

C.核核水泵吸上高度是否满足要求.

2.阀门的选择

电站常用阀门有以下几种：

(1)闸阀(图 4－3－33)

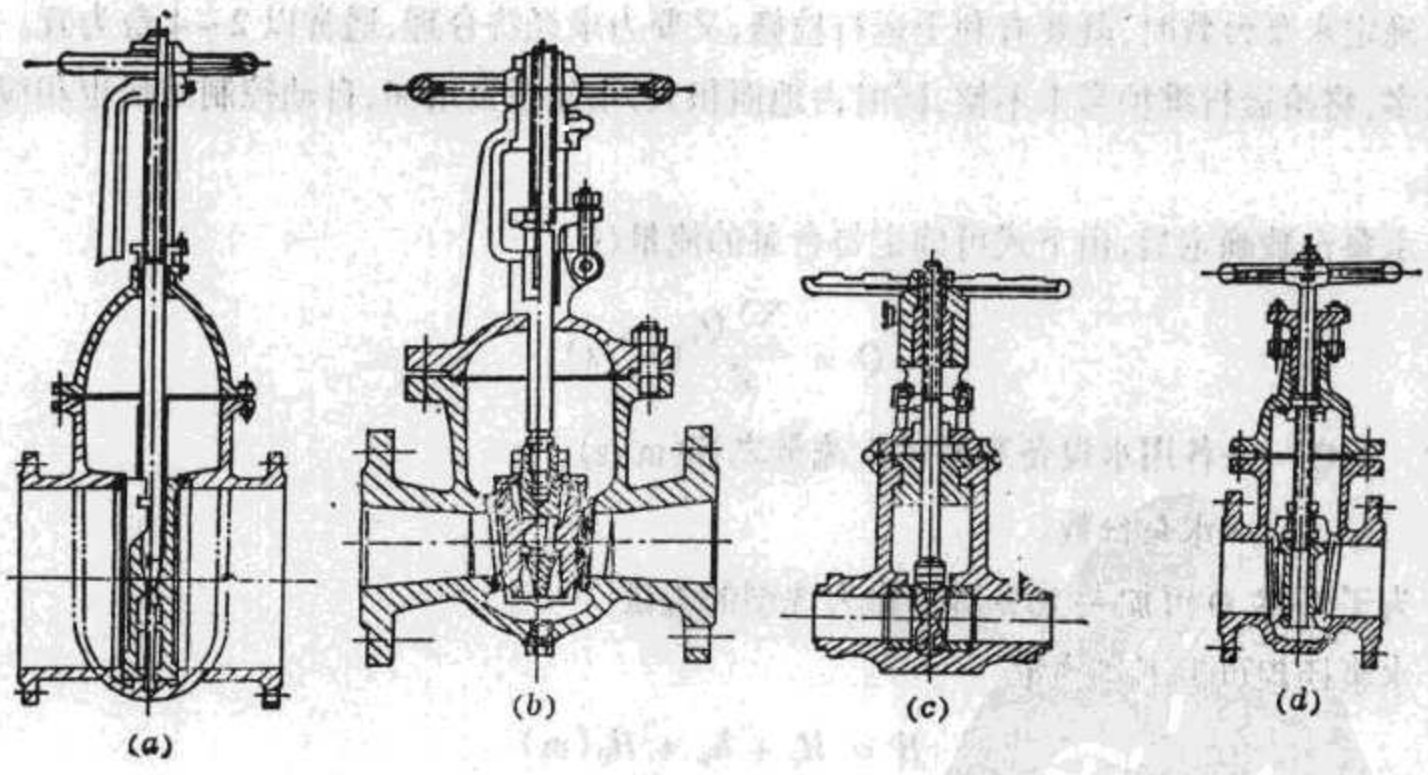


图 4－3－33 闸阀

(a)明杆平行式双闸板闸阀；(b)明杆楔式双闸板闸阀；(c)明杆弹性闸阀；(d)暗杆模式双闸板闸阀

按照闸板的构造可分为平行式闸阀和楔式闸阀两类，按照闸杆的构造可分为明杆式

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

和暗杆式两种。平行式闸阀中，以带推力楔块的为最普遍，它适用于低压，公称直径为50～400mm。楔式闸阀中分单闸板、双闸板和弹性闸板三种。双闸板模式闸阀应用很广，它的优点是不易卡住，对密封面角度的加工精度要求也较低；缺点是上下挡板锈蚀后闸板易脱落。弹性楔式闸阀具有单闸板楔式闸阀的结构简单、使用可靠的优点，它还能产生微量的弹性变形来弥补密封面加工过程中产生的偏差，改善了工艺性，因此被大量采用。明杆闸阀的阀门启闭程度明显易见，阀杆螺母在闹盖或支架上，对阀杆的润滑有利。暗杆闸阀须另设开度指示装置，阀杆和螺母在阀体内直接与介质接触，容易损蚀，阀杆螺纹无法润滑，但这种结构可使阀杆高度保持不变，适用于大口径或安装空间受限制的地方。

表4－3－8　BA、Sh、IS型常用泵快速选型表

扬程(m)	流量(1/s)					注
	3～8	5～20	13～40	25～55	40～100	
11～20	2BA-6A 2BA-9 2BA-9A·B IS65-40-200D IS80-50-200D	3BA-13 3BA-13A IS100-65-200D	4BA-18 4BA-18A 4BA-25 IS100-80-125A IS125-100-200D IS125-100-250D	6BA-12 6BA-12A 6BA-18 IS150-125-250A	8BA-18 8BA-18A 8BA-25 IS200-150-250A	1)B型与BA型性能相同，型号表示方法不同。如2BA－9即2B－19型号中："9"代表比转数的1/10；"19"代表扬程 2)S型与Sh型性能相同型号表示方法不同，如8Sh－9即200S63型号中： "8"代表泵进口直径（英寸）； "200"代表泵进口直径（毫米）； "9"代表比转数的1/10； "63"代表扬程
21～30	2BA-6A·B IS50-32-16A·B IS65-40-250D IS65-50-160A·B	3BA-9 3BA-9A IS80-65-160A·B	4BA-12 4BA-12A 4BA-18 IS100-80-125 IS100-80-160A·B	6BA-8 6BA-8A·B 6BA-12 IS150-125-250	8BA-12 8BA-12A IS200-150-250	
31～40	2BA-6 IS50-32-160 IS65-40-200A IS65-50-160	3BA-6A 6BA-9 IS80-65-160 IS100-65-315D	4BA-8A 4BA-12 IS100-80-160	6BA-8 6Sh-9A IS125-100-200B	8Sh-13 8Sh-13A IS150-125-315D IS200-150-315D	
41～50	IS50-32-200A IS65-40-200A	3BA-6 IS80-50-200A·B	4BA-8 4BA-8A IS100-65-200A·B	6Sh-9 6Sh-9A IS125-100-200A	8Sh-13 8Sh-13A IS125-100-200 IS150-125-400 IS200-150-400D	
51～60	IS50-32-200 IS50-32-250B IS65-40-200	3BA-6 IS80-50-200 IS80-50-200A	4BA-8 IS100-65-200 IS100-65-200A	6Sh-6A 6Sh-9 IS125-100-200	8Sh-9 8Sh-9A IS125-100-250B IS200-150-400	
61～80	IS50-32-250 IS50-32-250A	IS65-40-250A·B IS80-50-200	4BA-6A IS100-65-200	6Sh-6 6Sh-6A IS125-100-250A·B	8Sh-9 IS125-100-250A	
81～100	IS65-40-250A	IS65-40-250 IS80-50-315B	4BA-6 IS100-65-315B	6Sh-6 IS125-100-250	8Sh-6 IS125-100-250	

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(2)截止阀(图 4-3-34)

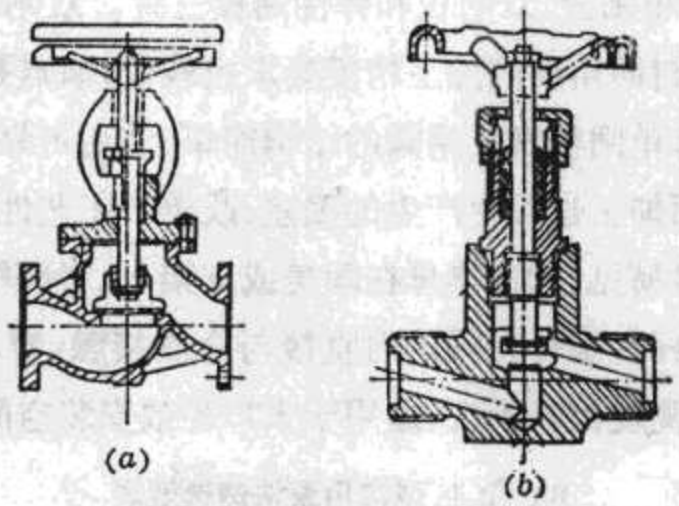


图 4-3-34 截止阀
(a)上螺纹阀杆截止阀;(b)下螺纹阀杆截止阀

按照阀杆上螺纹的位置可分为上螺纹阀杆截止阀与下螺纹阀杆截止间两种。前者阀杆螺纹在介质外面,不受介质侵蚀,便于润滑,后者则相反。截止阀阻力系数约为闸阀的5~10倍,结构长度较大,但操作灵活,止水情况好,多用于小口径管路上。

各种截断阀门的比较如表 4-3-9。

表 4-3-9 截断阀的类型和特点比较表

类型	结构	流体阻力	启闭扭矩	启闭时间	密封性能	应用范围
闸阀	结构复杂,零件较多,结构长度比截止阀短,但高度较高	较小	小	长	密封面间有相对摩擦,易损伤。全开时密封面受冲击较小	压力、温度、通径使用范围较宽(P_g 为 100~16000kPa, D_g 为 50~1800mm, t≤550℃)
截止阀	结构比闸阀简单,但结构长度比闸阀长,开启高度比闸阀小	最大	大	较长	密封面相对摩擦小,密封性能好,全开时阀瓣经常受冲击	压力、温度使用范围较宽,但通径受限制(P_g 为 600~32000kPa, D_g 为 3~200mm, t≤550℃)
旋塞	结构简单,外形尺寸小	小	大	短	密封面大,易卡损,高温易产生变形而被卡住	一般用于低压小口径管道,温度不宜过高或过低(P_g 为 600~1600kPa, D_g 为 15~150mm, t≤100℃)
蝶阀	结构简单,外形尺寸小	较小	较小	短	密封圈材料一般采用橡胶、塑料、密封性能好,但密封圈受冲刷腐蚀	多用于低压和中、大口径的管道(D_g 为 250~1000kPa, P_g 为 100~300mm, t≤50℃)

(3)止回阀(图 4-3-35)

止回阀是依靠介质本身的流动而自动开、闭闭瓣,防止介质倒流的风已常用的有升降式和旋启式两种。升降式止回阀的阀瓣沿阀体垂直中心线移动。图 4-3-35(a)只能装在水平管路上,图(b)装于水泵吸水管底部(又称底阀),旋启式止回阀[图(c)]的阀瓣绕阀

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

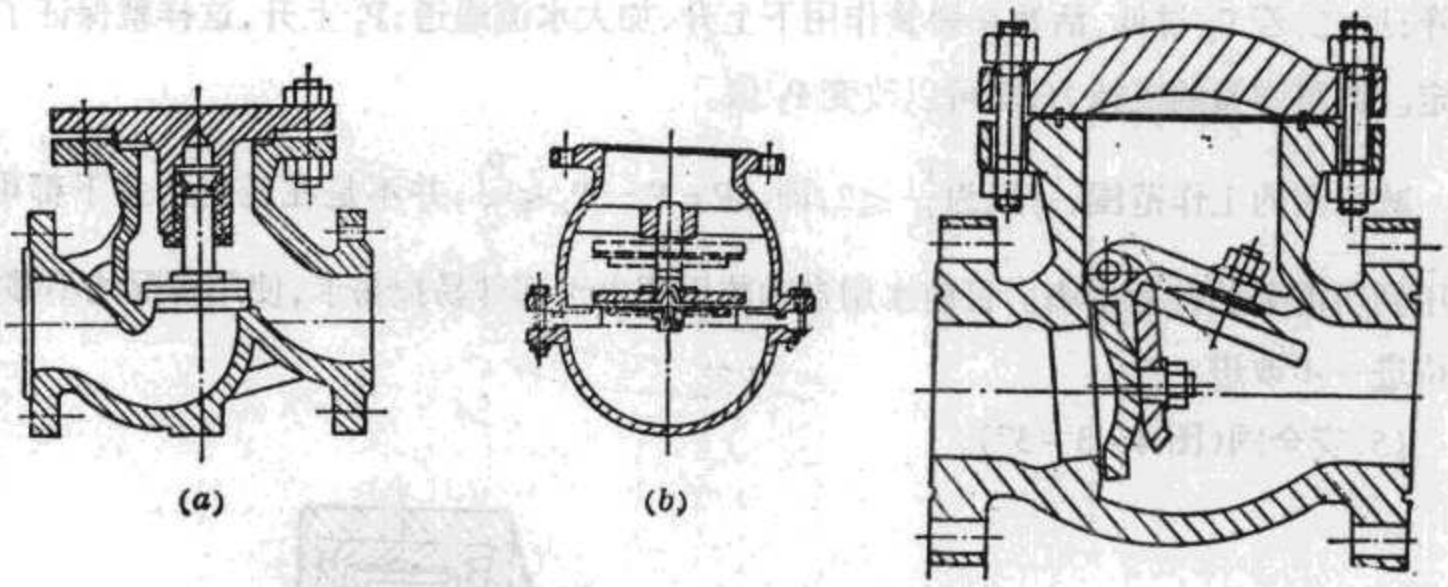


图 4－3－35　止回阀
(a)升降式;(b)底阀(升降式);(c)旋启式

座外的销轴旋转,多用于 D_g50～500mm 的管道。

(4)自动减压阀(图 4－3－36)

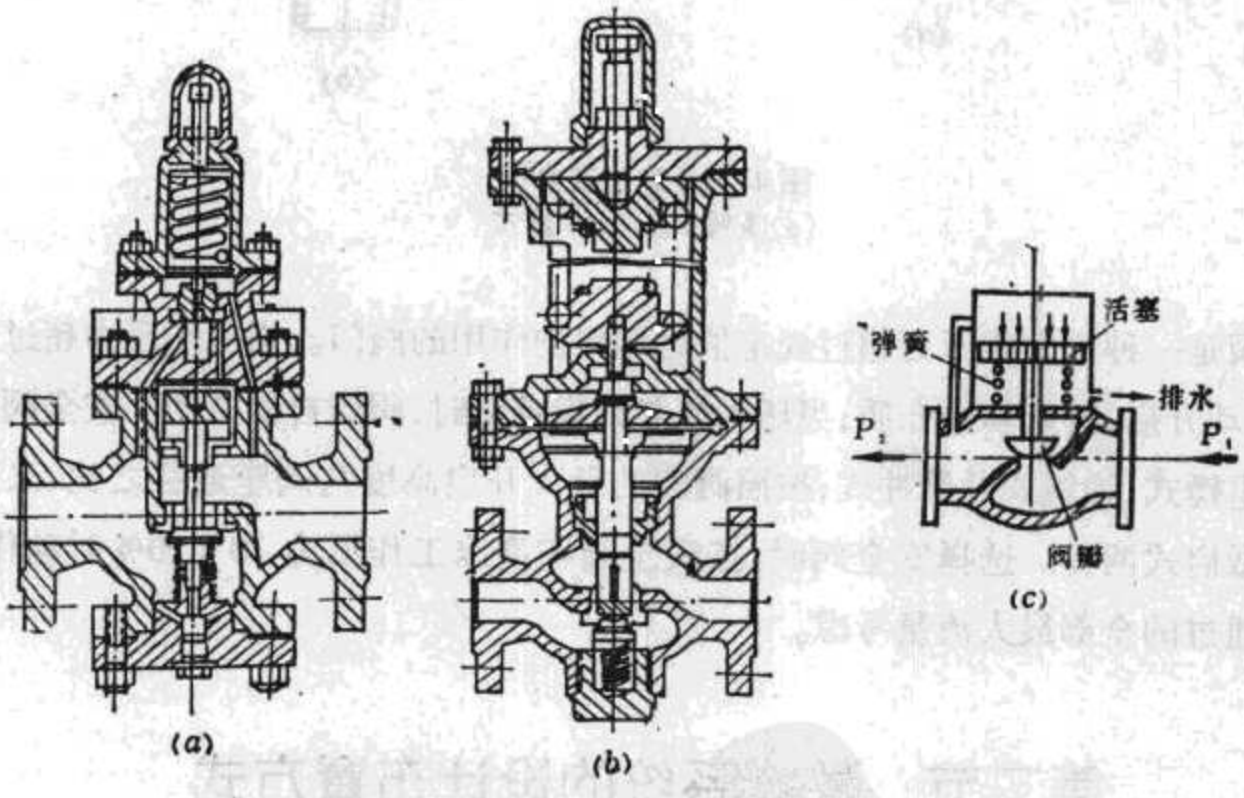


图 4－3－36　自动减压阀
(a)活塞式;(b)薄膜式;(c)工作原理示意图

自动减压阀用来减小液体压力,并使间后流体压力自动保持在一定范围内。自动减压阀有直接作用式和间接作用式两种。直接作用式是利用流体本身的能量来控制所需的压力;间接作用式是利用外力(如电磁力或外部气压、液压等)来控制所需压力。图(c)为活塞式减压阀的工作原理示意图,当间后压力 P_2 过高时,活塞下降,减小水流通道,使 P_2

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

下降;反之,若 P_2 过低,活塞在弹簧作用下上升,加大水流通道,P_2 上升,这样就保证了 P_2 恒定。调整弹簧的支持力,就可以改变 P_2 值。

减压阀的工作范围,一般为$\frac{P_1}{P_2} \leqslant 2$,即 $\Delta P = P_1 - P_2 \leqslant \frac{P_1}{2}$,并不是在任何水头下都可以减压到所需要的使用水头。目前水用自动减压阀由于部件易损易卡,使用情况均不够好,有待进一步改进。

(5)安全阀(图 4-3-37)

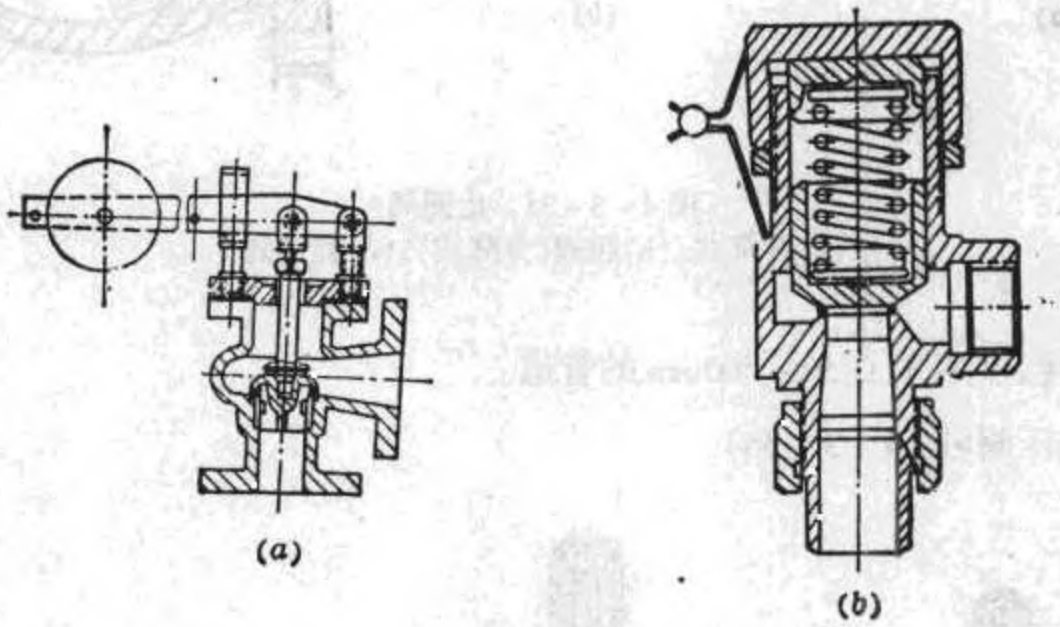


图 4-3-37 安全阀
(a)重锤式;(b)弹簧式

安全阀是一种当介质压力超过规定值时起保护作用的阀门。当工作压力超过规定值时,阀门自动开启,排走多余介质;当压力恢复到规定值时,阀门自动关闭。安全阀按照结构可分为重锤式、弹簧式及脉冲式;按照阀瓣的最大开启高度与阀座通径之比,又可分为全启式或微启式两种。选择安全阀时,按安全阀在高出工作压力 10~20%时动作,泄放管内可能通过的全部最大流量考虑。

第二节 供水系统的设计布置方式

一、供水方式

通常,供水方式按水电站水头范围确定。目前常用的供水方式有:

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(一)自流供水

水头在15~40m的电站,当水温、水质符合要求时,一般采用自流供水。水压由水电站的自然水头来保证。这种方式简单可靠,操作方便,易于维护。

水头大于40~50m的电站采用自流供水时,为了保证各冷却器进口水压符合制造厂的规定,应通过减压装置减压。削减掉一部分多余水压,实际上是能量的浪费。当水头大于80~90m时,由于减压,过多地增加了水能损耗,这就需要把浪费的水能和装设水泵供水时耗用的电能及设备费用等进行比较,以确定经济合理的供水方式。国内已运行的电站。有的水头已达130m,由于库容小,溢流机率多,仍采用自流减压供水。

(二)水泵供水

当电站水头低于15m时,自流供水水压难以满足要求;当电站水头高于80~90m时,采用自流减压供水往往不经济。因此,在这两种情况下,一般都采用水泵供水。

水泵供水有单元供水与集中供水两种。单元供水即每台机组各有一台(组)工作水泵,每台机组或2~3台机组共用一台备用水泵。这种方式虽然所用水泵可能多些,但运行灵活,可靠性较高,便于自动控制。集中供水是几台机组或全厂共用一组水泵。这种方式水泵台数少,便于维护管理,但自动控制复杂,且在运行机组台数改变时会引起供水水压波动。

电站水头为80~170m时,为减少自流供水水能的损失,可采用射流泵供水。这种供水方式宜用单元供水并用自流减压供水做为备用。射流泵供水方式设备简单,便于操作维护,但工作范围较窄,目前尚无定型产品。

(三)混合供水

当电站最高水头大于15m,而最低水头又不能满足自流供水水压要求,或电站最低水头低于80m而最高水头采用减压装置又不经济时,可考虑自流和水泵混合供水方式。

在确定供水方式时,除水头条件外,还应考虑水质和水温等因素的影响。例如当水中含沙量较大需进行水处理时,则应根据水处理的方法和要求来选择相应的供水方式。

二、技术供水系统设计的原则和基本要求

技术供水系统的优劣,可按运行可靠、操作维护方便,网路简单经济,能自动可靠地进行监测与控制等原则来衡量。设计时应做到下列各项:

(1)取水至少应有两路。从上游取水时,通常自本机蜗壳或压力管道引水作主供水,从坝前引水作备用水;也可将几台机组的主供水管连接起来互为备用。当主供水中断时,

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

备用水能及时投入。如采用水泵供水又无其它备用水源时,应有并联且能自动起停的备用泵。

(2)贯穿全厂的供水总管可为单管、双管及环管。双管和环管较单管供水可靠性高,但管路复杂,多占场地,可根据机组台数及电站在电力系统中的重要程度而定。总管应设分段隔离阀,以利安全并便于检修维护,一般每台(或两台)机组设一个。按供水备用要求,分段隔离阀可为常开或常闭。

(3)对含沙量较大或有防水生物要求的供水系统,为使泥沙或水生物不易积存在管路和用水设备中,可采用反冲管路的设计方案。反冲管路上的示流器应为双向式。

(4)每台机组的总供水管应设自动启闭的阀门,该阀门的上游侧应设检修断水阀。滤水器一般设在自动给水阀的后面.滤水器的进出水管上通常装有压力表或差压继电器。当进出水压差达到一定值时,发出信号以便随时清污。旋转式滤水器通常只设一个,当过水量大于 $1000m^2/h$,可并联设置两个。固定式滤水器一般设两个,互为备用,也可在一个滤水器前后设置带隔离阀的旁路管作为备用通路。

(5)对设有减压阀或射流泵的供水系统,在减压阀(或射流泵)后应配有安全放水措施,并在减压阀(或射流泵)前后装设监视用的接点压力表或压力信号器。

(6)机组各冷却器的进出水管口附近应设阀门及压力表(当出水管有可能出现负压时,则应设压力真空表),以便调节水压和分配水量.各机组进水总管上以及各冷却器出口处设温度计。

(7)各轴承油冷却器的排水管上应设示流继电器。如需测定各用水设备所通过的水量,可在有关管路合适的管段上装设流量计或留出装设流量计的位置。

(8)在技术供水系统的机组总排水管末端,一般不设阀门,以防误关闭造成事故。但有时为了调节排水管真空度或尾水位较高必须设置时,方可装设,并应调节到需要的开度,且有防止误操作的措施。

(9)采用水泵供水方式时,水泵应能自动起停。水泵出水管应装有逆正阀和闸阀,水泵吸水管侧和压水管侧应分别装设真空表和压力表。

(10)水轮机导轴承润滑水,主轴密封润滑水以及推力轴承水冷瓦的冷却水应有可靠的备用水源。进水管路应装有示流继电器和压力表。备用水能自动投入。

(11)水冷变压器的进口水压有严格限制,因此须有可靠的减压和安全措施。当电站尾水位较高,妨碍变压器冷却器正常排水时,应另考虑排水出路。冷却器进水口应有自动启闭的阀门和监视水压的接点压力表;排水管应设示流继电器。

(12)水冷空压机进水管上的给水阀门宜自动启闭,阀后设压力表,排水管上有示流继电器。

(13)取水口应设拦污栅(网),并附有吹气清污的管接头或采取其它清污措施。为检

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

修或更换取水口后第一个阀门,可采用插板、法兰盖或其它措施临时封堵取水口,以防造成事故。。

三、设备、管件及管路的布置

(一)设备及管件的布置

1.水泵布置

(1)相邻两水泵机组突出基础的净距或机组突出部分与墙壁之间的净距,应能拆卸水泵轴或电动机转子。当电动机容量小于 55kw 时,其净距不小于 0.8m;电动机容量大于 55kw 时,其净距不小于 1.2m。

(2)电站建有水泵房时,房内主要通道宽为 1.0~1.2m。

(3)真空泵可布置在它所服务的卧式水泵附近。

当采用水泵单元供水方式时,应尽可能将水泵布置在各机组段内,以缩短管路,减少水力损失,便于运行和检修。当采用水泵集中供水时,则根据电站具体情况,可将水泵集中布置在水泵房内。当采用立式深井泵时,其平面位置可根据集水井可能开挖的部位及可以起吊水泵进行检修的条件来确定;其高程应考虑电动机防潮并便于检查维护,大多布置在水轮机层。采用卧式离心泵,应按其吸程要求确定位置。当电站无专设的排水廊道时,常将检修排水泵室布置在两台水轮机尾水管之间偏上游侧的地方。水轮机顶盖排水泵可布置在水轮机顶盖上、机坑壁龛内或水轮机层机墩附近。

射流泵本身无转动部件和电气元件,布置时除在安装高程上要考虑汽蚀条件的限制外,只要便于操作、检修,可与管路管件同样敷设。

如水泵台数较多,容量较大,在泵房内应安排拆修的场地。水泵房内一般在房顶埋设吊环,当水泵台数较多且单件重量大于 2000N 时,可考虑设置起重设备,以便水泵的安装和检修.

2.阀门布置

布置阀门时应注意以下几点:

(1)经常操作的阀门应布置在便于操作和拆卸的地方;高于地面 2m 以上的操作阀门,其下方应设有固定式或移动式操作平台。对电动操作阀门要考虑防潮问题;对液压操作阀门应尽量缩短液压操作管路。这两种阀门一般设在水平管路上。。

(2)旋启式止回阀可水平或垂直安装。安装在垂直管路时,其水流方向应自下而上。升降式止回阀只能装在水平管路上。

(3)减压阀装设时,应分清高低压侧,其安全阀应设在低压侧。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(4)阀门一般不应倒置。大口径(300mm 以上)闸阀或长柄盘形阀附近应有足够的操作和拆装场地。

3.滤水器的布置

滤水器应布置在操作、检查方便的地方,其排污阀在操作时应不受支墩或支架的防碍。为便于就地进行检修,附近要有足够的场地。

4.伸缩节的布置

由于温度的变化引起管路胀缩,使管壁产生应力。当管壁应力因揭庵亦化而超过管材允许应力时,则应设伸缩节。常见的有Π形、L形、Z形(图 4-3-38)及套管式伸缩节(图 4-3-39)。在水系统明设管路中以单向套管式伸缩节较为常用,它适用于公称直径 50~400mm 的供排水管路。直径小于 100mm 的管路可采用Π形、L形或Z形伸缩节。套管式伸缩节有占地面积小,易于布置的优点,但填料需要及时更换和维修,以防渗水。

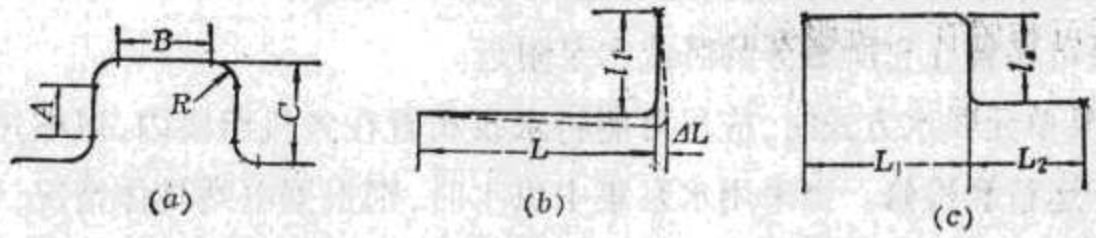


图 4-3-38 Π形、L形及Z形伸缩节示意图
(a)Π形伸缩节;(b)L形伸缩节;(c)Z形伸缩节

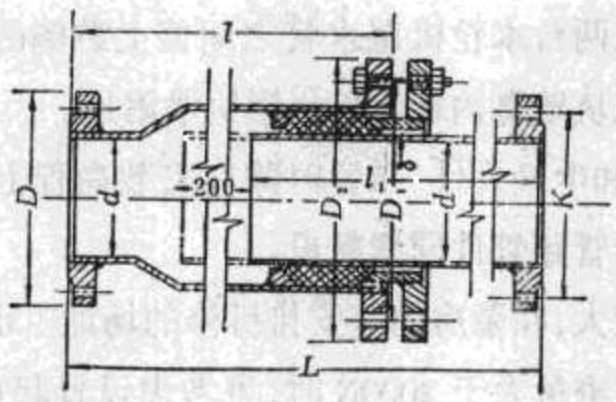


图 4-3-39 套管式伸缩节

(二)管路布置

1.水泵吸水管的布置

水泵一般设有各自的吸水管,当三台水泵合用吸水管时,吸水管不得少于两条。在连通管上应装设阀门,如一条吸水管发生故障,另一吸水管仍能满足吸水要求。为防止吸水管内存气使水泵运行发生故障。当水泵吸程为正值时。吸水管应有向水泵方向不断上升的坡度($i>0.005$);当水泵吸程为负值时,吸水管应按反坡度要求布置。吸水管在集水井

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

的布置要求见图 4－3－40 和图 4－3－41，注意水泵附近的管路及管件重量不宜由泵体承受。

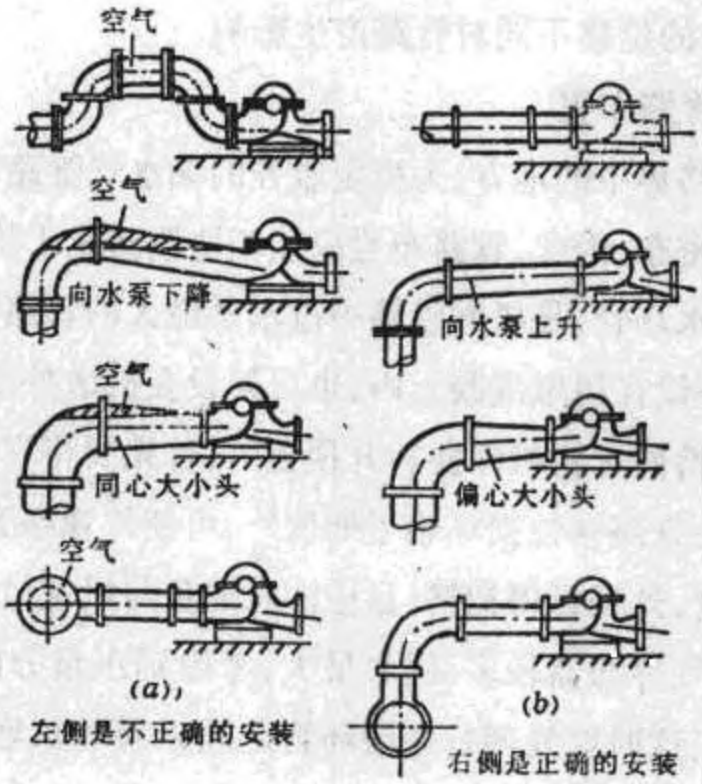


图 4－3－40　卧式离心泵与吸水管的连接方法

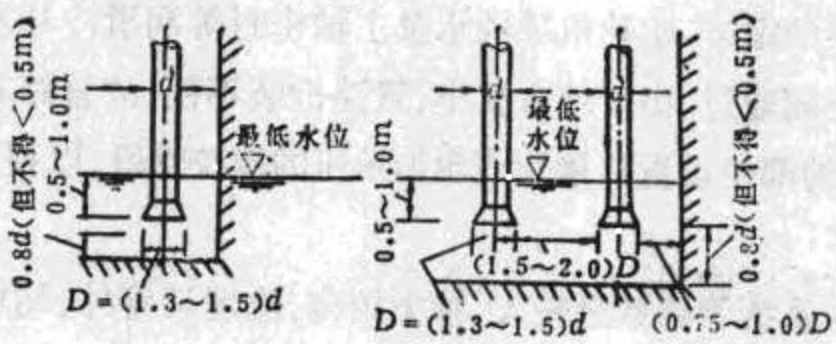


图 4－3－41　吸水管在集水井中的布置要求

2.厂内供(排)水总管布置

从水库引水或钢管取水的技术供水管，在厂内连成全厂技术供水总管，一般布置在主厂房水轮机层上游侧，有时为了不与电气母线及其他电气设备发生干扰，也可将贯通全厂的供水总管布置在下游侧。从机组引出的总排水管，一般均直通到下游。

供水总管应尽可能明设，如因布置上的要求必须设在沟内时，应符合如下条件：

(1)管沟的宽度和深度应满足检修的需要，管与沟底的净距应不小于 300mm。

(2)沟底应有 0.001～0.005 的坡度，坡向排水口或集水井。

(3)管沟应有活动盖板。

互相平行敷设的管路，布置要紧凑，但应拆修方便，沿墙布置的管路、管件和墙间的净

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

距不小于100mm,管与管之间的净距不小于25mm(当管壁外包有隔热防结露层时,应将隔热材料包扎厚度计算在内)。跨越混凝土浇筑分缝处的埋设管路,在分缝的两侧管段应设弹性垫层,以防浇筑分块的位移不同对管路产生影响。

3.机墩附近供排水管路布置

主机机墩附近是管路集中的地方,为机组服务的油水气管路均在这里进出,同时机墩钢筋和基础螺栓等在此密布,因此,管路布置应互相协调防止干扰。

空气冷却器的供排水环管,是机墩管路中过水量最大的管路,一般可布置在下机架下面的机坑内壁面上,或埋设在机墩混凝土内,也可架设在机墩外围。设在机坑内壁面上的环管、支管及阀门,每当检修水轮机需要拆开顶盖时,首先要将它拆下,颇感不便。埋设在机墩混凝土内的环管,除管路锈蚀损坏难于处理外,可使外观整齐并避免了管子结露等问题,在机墩外围架设环管,外观显得拥挤,且应注意避免与机坑进人门互相干扰。

大容量机组因其空气冷却器较多,用水量大,考虑到水量分配的均衡问题,应先由半环管分两路和环管相接,这时要处理好各层环管之间以及和机墩钢筋等埋设件之间的干扰问题。

推力及上、下导轴承油冷却器供排水管一般沿机架进出,大部分为明设。发电机上部的水管如有结露情况,应考虑在管路上包敷隔热防结露层.管路上的示流器、压力表、温度计等布置在容易观察的地方.水轮机导轴承及主轴密封等润滑冷却水管从机坑脚踏板与水轮机顶盖之间的空间通过,由于地方狭小,管路拆装不便,故管路布置时应尽量减少坑内安装量,可在必要的部位设置活接头或耐油承压的橡胶管段,以利于管路的连接.

4.管路的支承

电站技术供排水系统管路数量较大,种类较多,除埋设管外,均应设置适当的支架或吊架妥善地支承。

管路支架的间距,一般可由表4-3-10查取。

表4-3-10 管路主梁间距

公称通径(mm)	管子规格(外径×壁厚)(mm)	支架间距(m)		公称通径(mm)	管子规格(外径×壁厚)(mm)	支架间距(m)	
		无隔热层	有隔热层			无隔热层	有隔热层
5	18×3	2.5	1.5	100	108×4	6.5	4.5
20	25×3	3	2	125	133×4	7	5
25	32×3.5	4	2	150	159×4.5	8	6
32	38×3.5	4.5	2.5	200	216×6	9	7.5
40	45×3.5	5	3	250	273×8	10	9

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

公称通径 (mm)	管子规格 (外径×壁厚) (mm)	支架间距(m)		公称通径 (mm)	管子规格 (外径×壁厚) (mm)	支架间距(m)	
		无隔热层	有隔热层			无隔热层	有隔热层
50	57×3.5	5	3	300	325×8	11	9.5
65	73×4	6	4	350	377×9	11.5	10
80	83×4	6	4	400	425×9	12	10.5

常用的管路支架有滑动支架和固定支架,如图4-3-42所示。滑动支架是当管路温度变化引起膨胀或收缩时,管子能够在支架上滑动;固定支架是为了均匀分配伸缩管间的管路膨胀(或收缩)量而设置的.吊架在管子沿棚顶下方敷设而又没有墙柱等支靠物时采用,它分固定高度式和可调高度式两种,如图4-3-43。

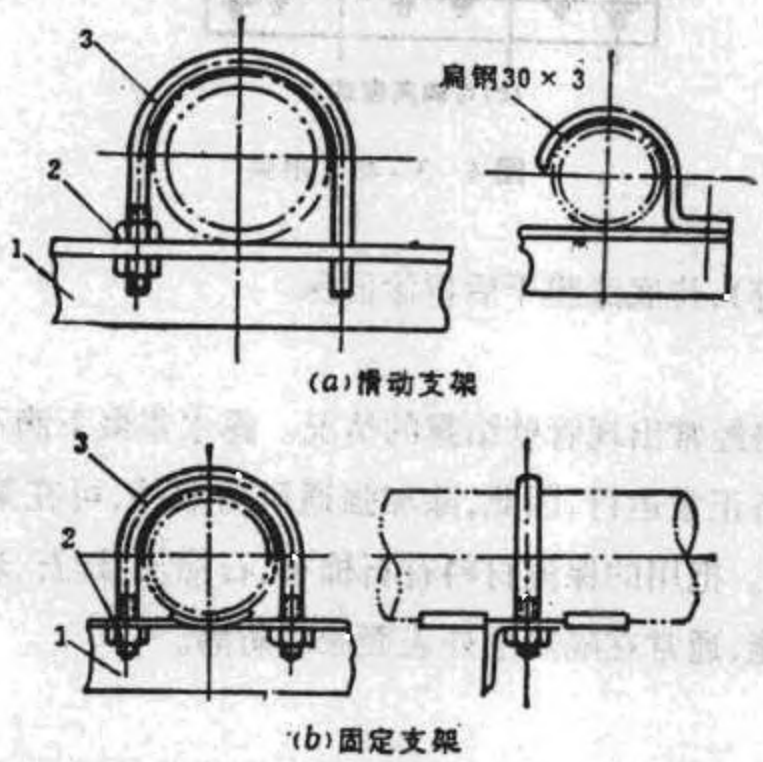


图4-3-42 管路支架
1—支架横梁;2—螺母;3—管卡

(三)水管路的防腐蚀及防结露措施

1.水管路的防腐蚀措施

供排水管路大多采用普通钢管,少量埋设的排水管路也有采用铸铁管的。钢管的防锈措施通常是在钢管外表面涂防锈漆,防锈漆有底漆和面漆两层。底漆常用红丹漆,对经常处于水下的管路宜用$L_{44}-1$型铝粉沥青船底漆.面漆是在保护底漆的同时又起到装饰与色彩标志的作用,常用调合漆或磁漆。

对于经过简单清扫还带有少量氧化皮,锈蚀不太深的钢管,可直接涂刷带锈涂料(如

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

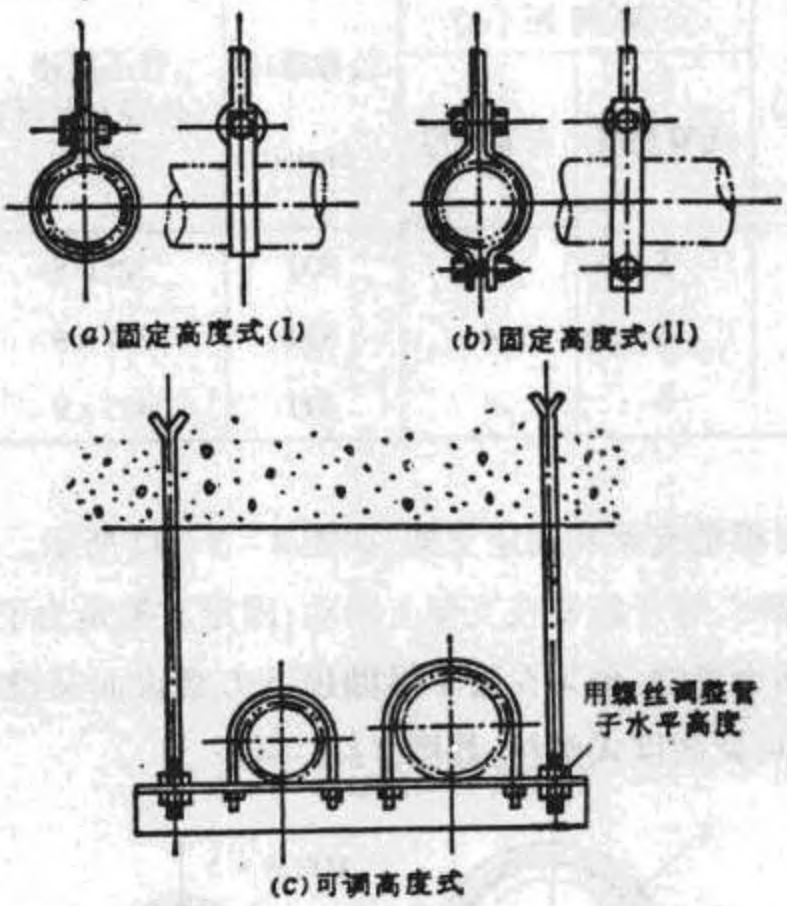


图 4－3－43 吊架

7148 稳定型带锈底漆等)，待底漆膜干后再涂面深。

2.防结露措施

水电站供排水管路经常出现管壁结露的情况。露水集聚下滴不仅造成地面积水而且有碍自动化元件和设备正常运行，因此，除加强通风防潮外，可在某些水管路上采取隔热措施，使其表面不结露。把用的保温材料有石棉布、石棉灰、蛭石、玻璃棉等。为防止潮气侵入影响保温材料性能，通常在隔热层外表面涂漆防潮。

第三节 供水系统安装流程图

根据水电站的特点、机组台数、机型以及各种可供选用的取水与供水方式，按照用水设备对水质、水温、水压与水量的要求，遵循供水系统设计的基本原则，便可拟定适合具体情况的技术供水系统图。

技术供水系统图用单线绘制，不按比例，但应将相对位置表示清楚。图中要标明管径，绘出阀门，有关设备及量测控制元件。

下面就自流供水、水泵供水及混合供水各举一例以简介之。

图 4－3－44 为自流供水系统图实例。

每台机组西冷却用水及水导轴承的润滑水，分别由每台机组蝴蝶阀上游侧的进水钢

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

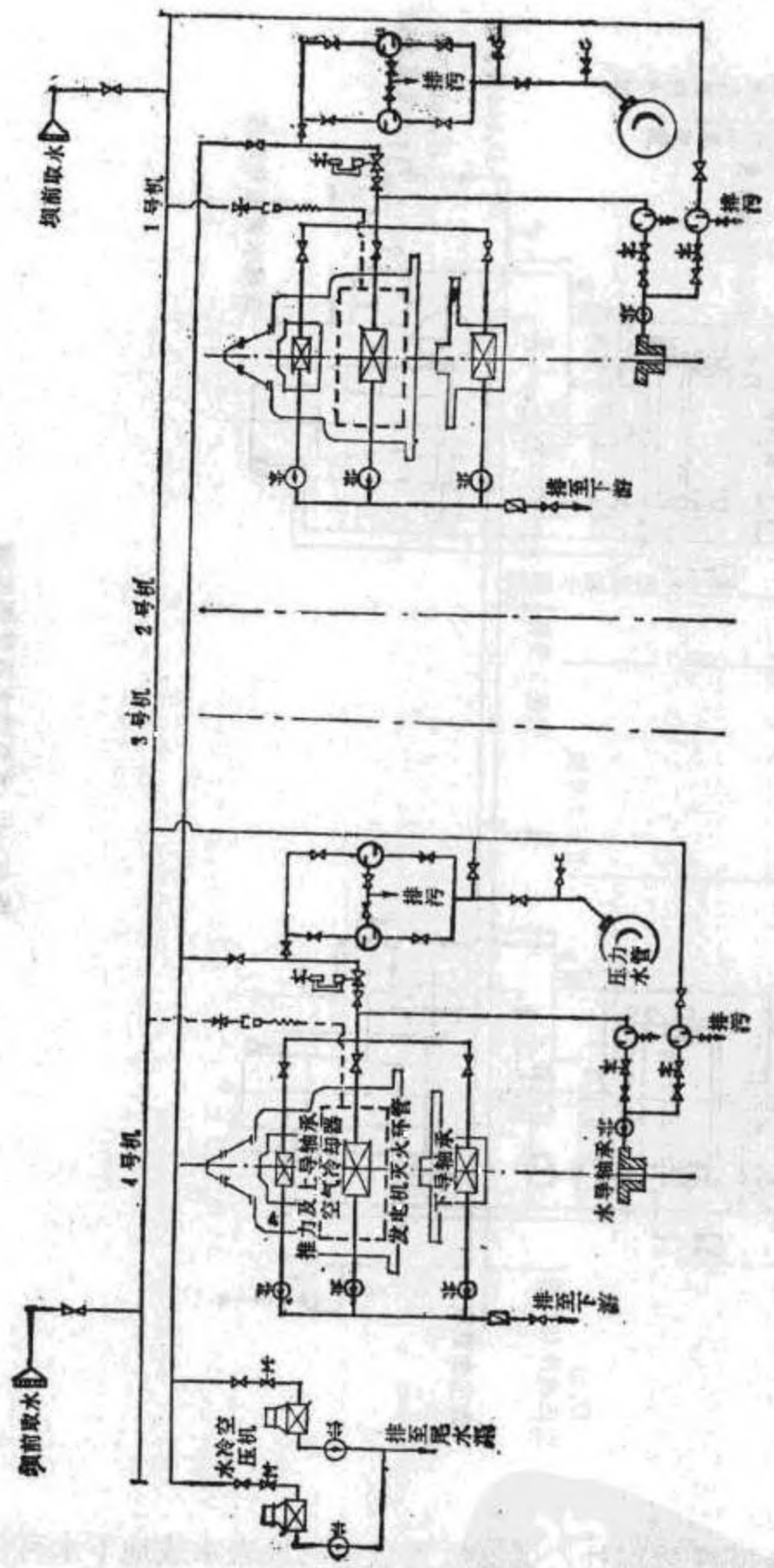


图4-3-44　自流供水系统图示例

管引来。坝前水源作为备用.为使供水可靠及清洗方便,每台机的滤水器设有两个,互为备用,可根据需要灵活切换。这种供水方式适用于水头为20~40m的中型水电站.

图4-3-45为单元水泵供水系统图实例。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

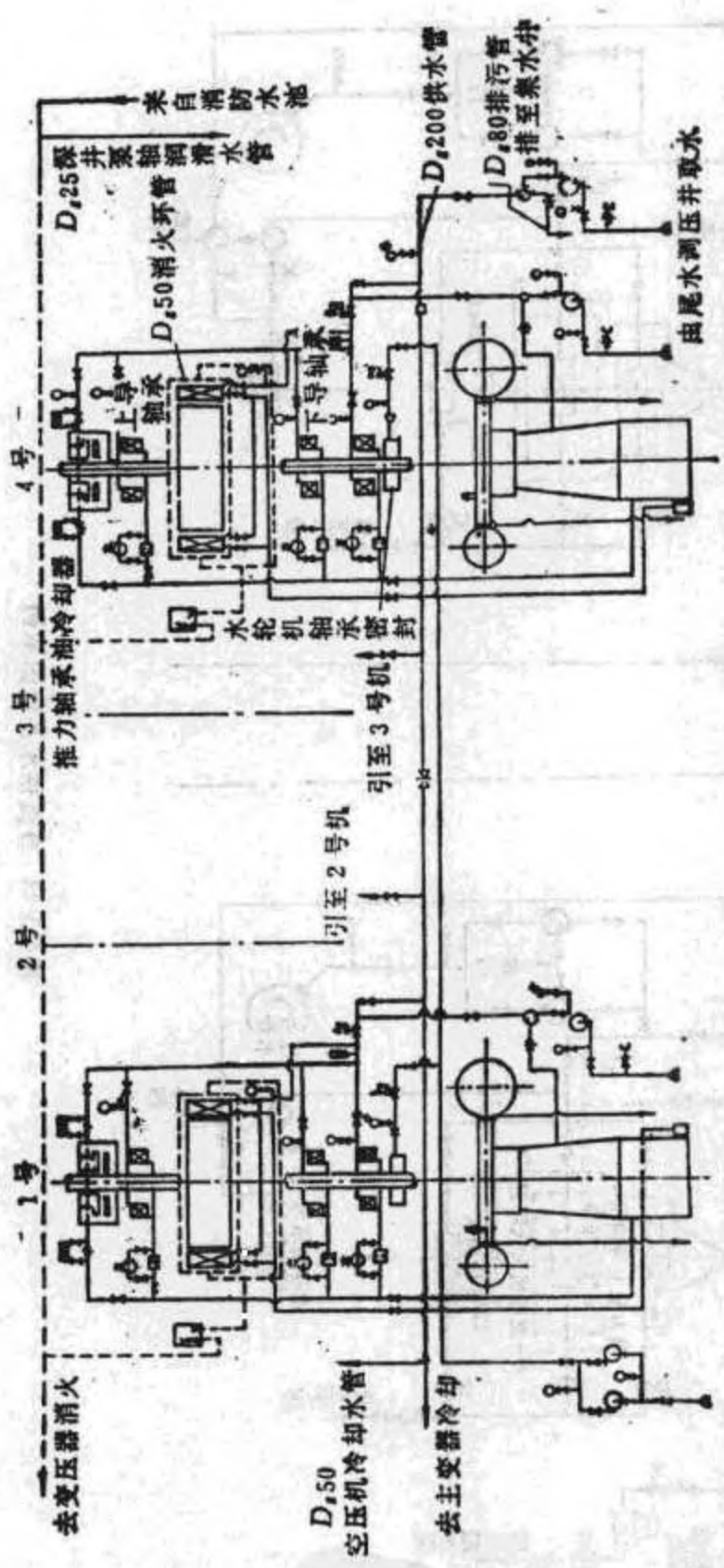


图4-3-45 水泵供水系统图实例

因电站水头高达300余米，且厂区附近无合适的地表水或地下水可供利用，故采用水泵从下游尾水调压井取水。每台泵可供一台机组用水，4台主供水泵和一台备用泵由供水干管连成一个系统，必要时可相互切换，提高了供水的可靠性。考虑到水中泥沙对水轮机主轴密封损害严重，故另用水泵抽地下水作主轴密封润滑水(同时还引至水泵填料密封等处)。发电机上下灭火环管供水系统在图中是用虚线表示的。

图4-3-46为自流和水泵互为备用的混合供水系统图实例。电站装机5台。这个系统的特点是可以换向运行，由两组电动阀门来实现换向操作。每组设两个阀门交换启

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

闭，改换进排水方向。有些电站冷却水源夏天水质较差，利用换向运行，实现反冲，可以将堵塞在供水管路阀门等处的杂物带走，有助于提高冷却效果。

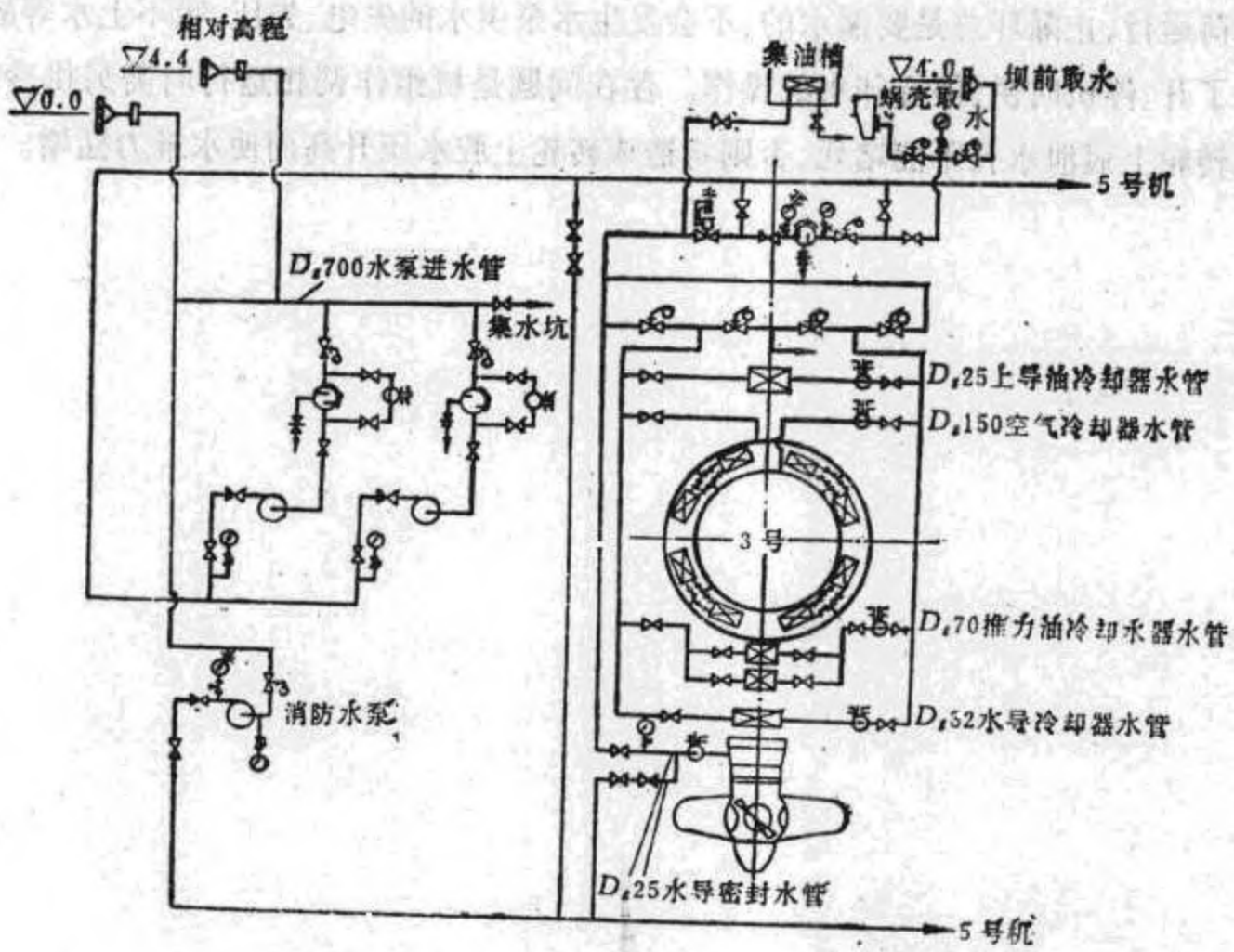


图 4－3－46　自流和水泵混合供水系统图实例

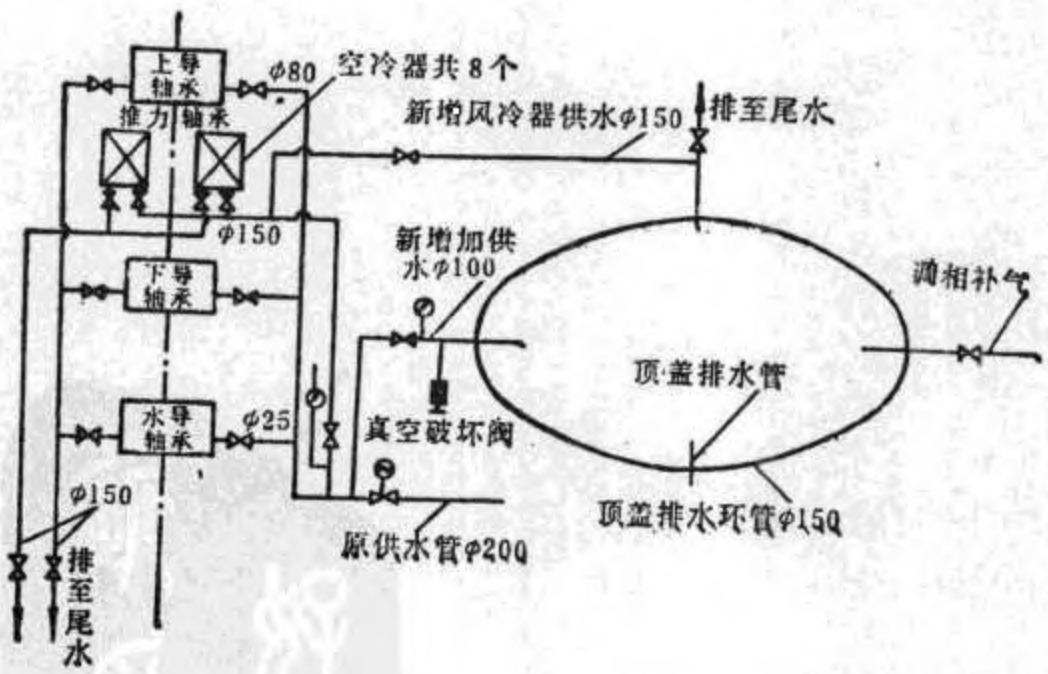


图 4－3－47　由顶盖排水管供给冷却水系统简图

近年来，西洱河一级电站将原设计的水泵供水方式改为用顶盖排水作为主供水（图 4－3－47）。这种方式节约了厂用电（原来供水泵的耗电量约占厂用电的$\frac{1}{3}$），比较经济；

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

供水水质清洁，无需装滤水器（因梳齿间隙仅 1 ~ 1.3mm，稍大的杂物通不过），且水温适宜，水量足够（根据实验，顶盖排水除供冷却水外还有剩余）；供水安全可靠（水轮机从空载到满负荷运行，止漏环总是要漏水的，不会发生水泵供水的失电、失压、吸不上水等故障），且省去了开、停机时供、停冷却水的操作。存在问题是机组作调相运行时需另供冷却水；水轮机转轮上冠泄水孔不能堵死、否则将造成转轮上腔水压升高而使水推力猛增。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第四章　水电站的水文监测系统装置安装工艺

第一节　压力计的选用

水力测量中的主要仪表为压力测量仪表。压力测量仪表简称压力表或压力计。常用压力计根据其转换原理的不同，可分为以下四种：

(1)液柱式压力计；将被测压力转换成液柱高度进行测量；

(2)弹簧式压力计；将被测压力转换成弹性元件弹性变形的位移进行测量；

(3)活塞式压力计：将被测压力转换成活塞上所加平衡法码的重量进行测量；

(4)电气式压力计：将被测压力转换成电量或电参数的变化，并以电量显示或数字显示进行测量.

一、液柱式压力计

液柱式压力计是以液体静力学原理为基础的，它用于测量气体或液体的压力、真空和压差。其工作液体可分为水、水银、四氯化碳或其他液体。通常液柱式压力计的内径应不小于 8mm。

(一)U 型管压力计与差压计

U 型管压力计的形状很简单，它通常是一个两端开口的 U 型玻璃管[图 4－4－1(a)]。压力计的一端与被测压力相连，另一端通大气 P_a。U 型管中充有密度为 ρ_2 的工作液体，其高度为 U 型管高的 1/2 或 2/3，被测管路中的液体密度为 ρ_1。

当压力 P_1 未接入压力计时，两侧管中的液面处在 0－0 水平位置。压力 P_1 接入后，当 $P_1 > P_a$ 时，根据液体静力学原理得

$$P_1 + \rho_1 gZ + \frac{1}{2}\rho_1 gh = P_a + \rho_2 gh$$

由此得表压力

$$P = P_1 - P_a = \rho_2 gh - \rho_1 gZ - \frac{1}{2}\rho_1 gh$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

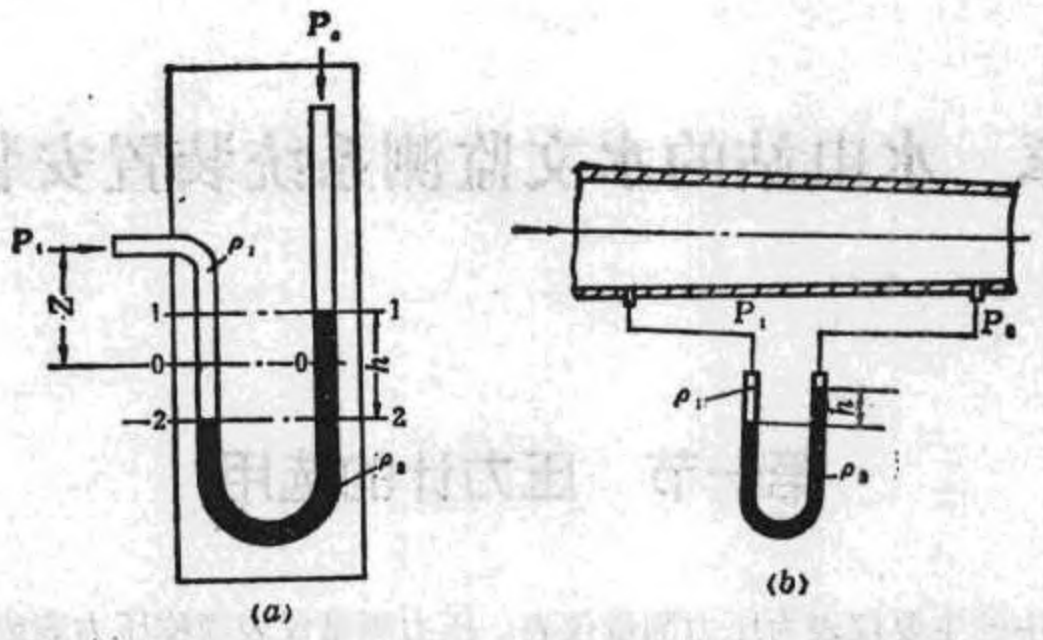


图 4-4-1 U 型管压力计和差压计

式中 P_1——被测压力点的压力；

P_a——大气压力；

Z——被测压力点至压力计 0-0 断面的垂直距离

h——左右两管中液面高度差。

将上式等号两侧各除以 $\rho_1 g$，可改写为

$$\frac{P}{\rho_1 g} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - \frac{1}{2}\right) h - Z$$

由式可知。当 Z 为一定值时，U 型管内两侧液面高度差 h 与被测压力的表压力值成正比。

U 型管差压计与 U 型管压力计结构相同但接法不同，差压计的两个端头分别接至两个测压点，这样可直接测出两测点之间的压力差值。图 4-1-1(b)表示一个连接在水平管路两点上的 U 型差压计。

很显然，两点的压力差为

$$P_1 - P_2 = (\rho_2 - \rho_1) gh$$

当水头很高时，如 H > 30m，此时单管水银压力计的水银柱高超过 2m，读数很不方便。为此可以采用双 U 型管或多 U 型管水银压力计，如图 4-4-2 所示。

假设 U 型管的数目为 N 个，水管中心 A 处的压力是

$$P_A = P_C - \rho_{水} g(h' - h)$$

式中 P_C——U 型管中 C 点的压力，显然

$$P_C = 2h(\rho_{汞} - \rho_{水}) gN = 247hN(kPa)$$

$$P_A = 247hN - \rho_{水} g(h' - h)(kPa)$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

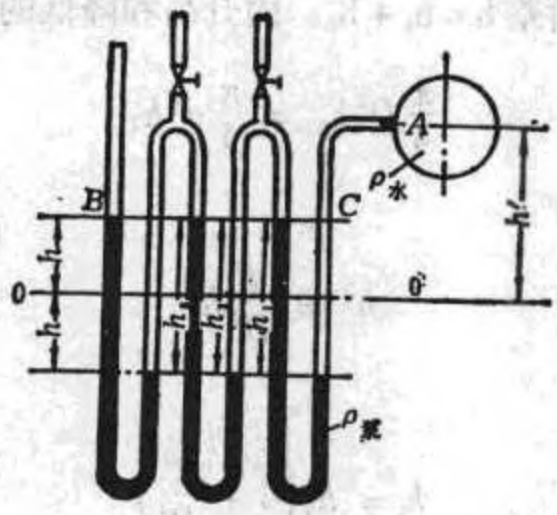


图 4-4-2　多 U 型管水银差压计

当管内的流速为 v 时，则此时的水头为

$$H = \frac{P_A}{\rho_{水} g} + \frac{v^2}{2g} = 25.2hN-(h'-h) + \frac{v^2}{2g}(m)$$

对于反击式水轮机，B 端接尾水，A 端接蜗壳；对于冲击式水轮机，B 端接通大气，A 端接进水管。

实际测量时往往各个 U 型管的压差难以相等，此时

$$H = 12.6(h_2 + h_2 + \cdots + h_n)-(h'-h) + \frac{v^2}{2g}$$

(二)单管式液柱压力计

如果把 U 型管压力计的一根管子用一个直径较大的杯代替，则成为单管式压力计，如图 4-4-3。

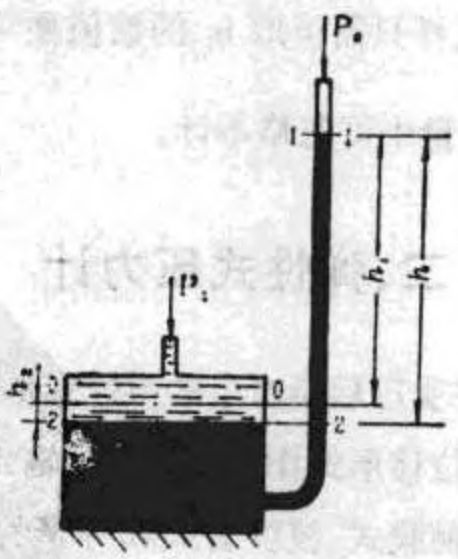


图 4-4-3　单管式液柱压力计

当压力计接入被测压力 P_1 时，若 $P_1 > P_a$，杯内的工作液体下降 h_2，而管子中路工作液

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

体升高 h_1，这样就形成了液面差 $h = h_1 + h_2$。固升高和降低的容积相等，故有

$$\frac{\pi}{4}D^2 h_2 = \frac{\pi}{4}d^2 h_1$$

得

$$h^2 = \frac{d^2}{D^2}h_1$$

于是

$$h = h_1\left(1 + \frac{d^2}{D^2}\right)$$

此时的表压力 P 等于

$$P = P_1 - P_a = (\rho_1 - \rho_2)gh$$

式中 P_a——大气压；

P_1、P——被测液体的绝对压力和表压力；

ρ_1、ρ_2——工作液体和被测液体的密度；

D、d——杯的直径和玻璃管的直径。

将代入可得到单管压力计的基本方程式如下

$$h_1 = \frac{P_1 - P_a}{(\rho_1 - \rho_2)g\left(1 + \frac{d^2}{D^2}\right)} = KP$$

式中 $K = \frac{1}{(\rho_1 - \rho_2)g\left(1 + \frac{d^2}{D^2}\right)}$。

由于 $D \gg d$，$K \approx \frac{1}{(\rho_1 - \rho_2)g}$，这样只需读取 h_1 的数值便可测出被测压力的数值。h_2 的数值与 h_1 相比其值甚小，一般测量中可忽略不计。

二、弹性式压力计

弹性式压力计是以弹性元件受压后所产生的弹性变形作为测量基础的。在力的平衡原理基础上，以弹性变形的机械位移形式作为转换后的输出信号。根据测量范围的不同，所用的弹性元件也不同，可分为薄膜式、波纹管式和弹簧管式.前两种多用于微压和低压测量，后一种用于高、中、低压以及真空度的测量.

(一)弹簧管式压力表

通常所用的压力棒是单圈弹簧的压力表，其工作原理如图 4-4-4 所示。弹簧管的

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

截面为扁形或椭圆形，其长轴与图面垂直。弹簧管被弯成包角约270°的圆弧形。管子封闭的一端为自由端，即位移输出端。管子开口的一端为固定端，它被固定在表壳上，被测压力由此端引入管内。在引入压力的作用下，椭圆形截面的弹簧管发生变形，使得圆弧形的弹簧管产生向外扩张的移动，因而其自由端产生由B到B′的位移，如图上双点划线所示。此时圆弧形弹簧管的包角φ也是有所变化的。即减小了Δφ。根据弹性变形的原理可知，包角的相对变化值$\frac{\Delta\varphi}{\varphi}$是与被测压力P成正比的。

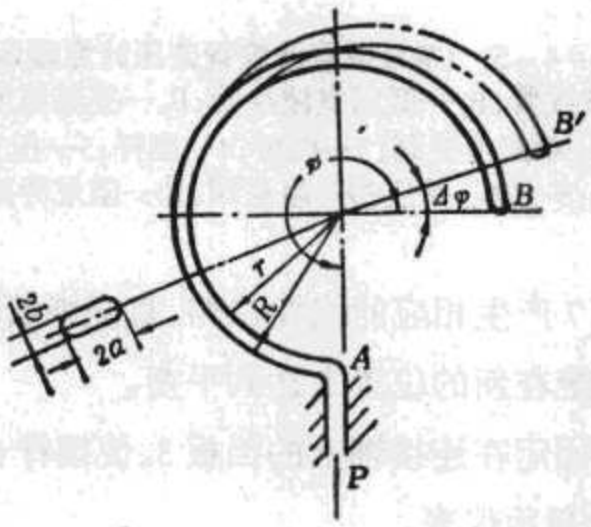


图4-4-4　单圈弹簧圈的工作原理

为了保证弹性元件能在弹性变形的安全范围内可靠地工作，在选择压力表量程时必须考虑留有足够的余地。通常在被测压力较稳定的情况下，被测压力的最大值应不超过压力表刻度满量程的3/4；当被测压力波动较大时，最大压力值应不超过压力表刻度满量程的2/3。被测压力最小值应不低于压力表刻度全量程的1/3，以便保证测量精度。

(二)波纹管式差压计

水机测试中常用的波纹管式差压计多数是双波纹管差压计。它可以用于测量压差、正压及负压，大多数情况下是用以测量节流装置前后的压差，由此而测出流量。

双波纹管差压计的种类很多，图4-4-5是CWD型双波纹管差压计的原理示意图。

双波纹管差压计是根据弹性波纹管受拉伸产生位移的原理来测量压差的。

在中心基座8上的两侧装有波纹管B_1和B_2，两端用连接轴1连接起来。波纹管B_3连通在波纹管B_1的外侧，进行工作液体的温度补偿。中心基座内腔、波纹管B_1、B_2、B_3之间都充满工作液体，并将其长期封闭起来。被测压力P_1及P_2通过导管引入高压室和低压室。若$P_1 > P_2$，所测压差$\Delta P = P_1 - P_2$作用在波纹管B_1上，波纹管B_1则被压缩，容积缩小，但其内部填充的工作液体由于不可压缩而体积一定，因而此时波纹管B_1的部分工作液体将通过阻尼环11的周围环隙和阻尼旁路10流向波纹管B_2。与此同时，连接轴1也

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

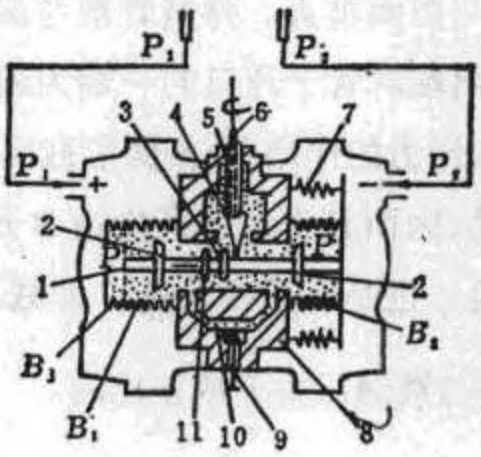


图 4-4-5 CWD 型双波纹管差压计原理示意图

B_1—高压室波纹管；B_2—低压室波纹管；B_3—充液温度补偿波纹管；
1—连接轴；2—单向保护阀；3—挡板；4—摆杆；5—扭力管；6—心轴；
7—量程弹簧；8—中心基座；9—阻尼阀；10—阻尼旁路；11—阻尼环

从左向右移动，使量程弹簧 7 产生相应的线性拉伸，直至弹簧的变形力与压差值所形成的测量力平衡时为止，于是系统在新的位置上达到平衡。

当连接轴右移时，通过固定在连接轴上的挡板 3，使摆杆 4 扭动扭力管 5 动作，经心轴 6 以扭力管同样的扭角输给显示仪表。

输出扭角与波纹管位移量成正比，亦即与仪表压差测量值 ΔP 是成正比的。

三、活塞式压力计

活塞式压力计是以液体静压平衡原理为基础的一种测压计。根据使用要求的不同，活塞式压力计又分普通活塞式压力计和旋转活塞式压力计两种。下面只介绍普通活塞式压力计。

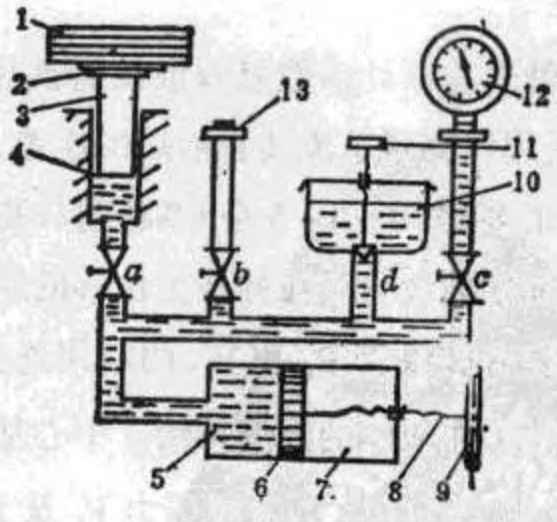


图 4-4-6 活塞式压力计原理图

1—法码；2—托盘；3—测量活塞；4—活塞缸；5—工作液体；6—工作活塞；7—手摇压力泵；
8—丝杠；9—手轮；10—油杯；11—进油阀杆；12—被校验的压力表；13—压力表接头

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

普通活塞式压力计主要用来校验标准压力表、普通压力表及其它各类型压力测量仪表。图4-4-6为活塞式庄力计工作原理。

活塞3所受到的重力 G_1 和加在活塞上的专用法码1所受到的重力 G_2 作用在活塞截面积F上，所产生的压力P与液压容器内所产生的压力相平衡，这样便可以测定被校验仪表的压力大小，即

$$P = \frac{G_1 + G_2}{F}$$

为了便于计算，通常取 $F = 1cm^2$ 或 $10mm^2$，后者用于高压情况。

压力计由压力泵(压力发生系统)和活塞部分(压力测量系统)两部分组成。

压力泵包括手摇压力泵7、油杯10、进油阀d及三个针形阀a、b、c，在针形阀b、c上装有接头，用来连接被校验的压力表。

活塞部分是由经过精密研磨的具有精确截面的活塞3、活塞缸4及与活塞直接相连的承重托盘2、托盘上边的法码1所组成。

四、电气式压力计

将压力转换为电量而加以测量的压力仪表统称为电气式压力计。下面介绍带DBC型电动差压变送器的力平衡式电气压力计。

DBC型电动差压变送器又称为矢量机构力平衡式差压变送器，它是新型自动化仪表DDZ-Ⅲ型电动单元组合仪表中的一个主要变造单元。它可以用于测量介质的压差、压力、流量、液位等物理量，并可将被测参数转换成4~20(mA)直流统一讯号输出，作为显示、记录和控制仪表的输入讯号，以实现对上述参数的显示、记录及自动控制。

DBC型电动差压变送器的工作原理如图4-4-7所示。差压变造器主要由两部分组成：测量部分及转换部分。测量部分包括测量室、初量元件(膜盒)、测量杠杆；转换部分包括主杠杆、矢量机构、副杠杆、反馈机构、差动变压器、调零装置及放大器等。

差压变送器是根据力平衡原理工作的。当被测的压差信号分别作用在膜盒两侧时，在膜盒的连接处产生一集中力，此力通过支点为H的杠杆传到矢量机构6，矢量机构将力 F_1 分解为 F_2 和 F_3，其中 F_2 又通过具有十字支点M的副杠杆传到反馈动圈的E点变为 F_4。F_4 与反馈动圈内原有反馈力相比较，其差值 ΔF 作用于E点产生位移 ΔL_1，该位移又经过副杠杆传到衔铁片之D点，使D点产生位移 ΔL_2，即衔铁片(检测片)位置改变，致使差动变压器输出发生变化，再经放大器放大为4~20(mA)直流统一输出讯号，输出电流流过永久磁场内的反馈动因，反馈动圈在永久磁钢的作用下产生一个与测量力相平衡的补偿力 F_5，当 F_5 趋于 F_4 时，变送器便达到一个新的稳定状态，此时的输出电流即为变送器

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

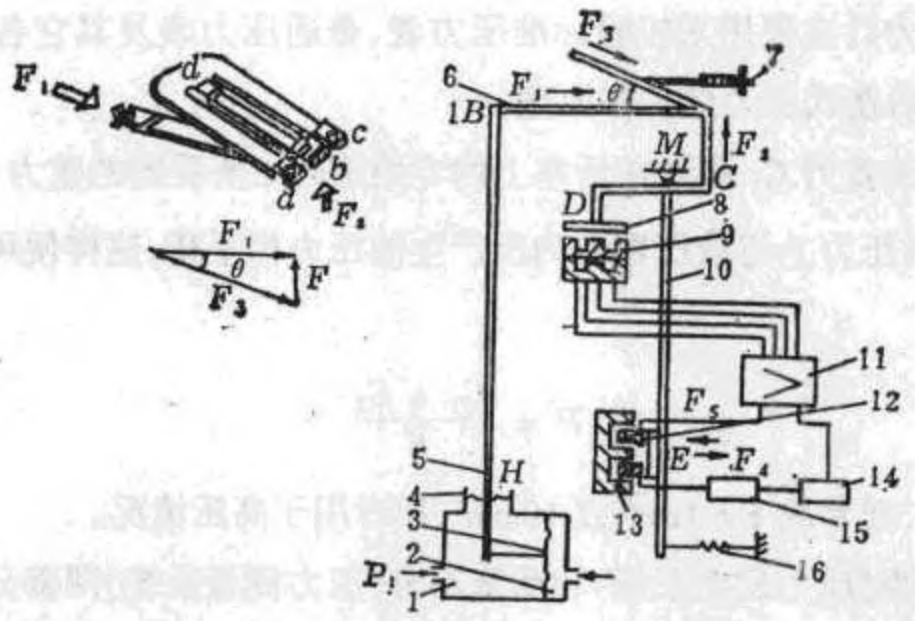


图 4-4-7 DBC 型差压变送器工作原理图

1—低压室;2—高压室;3—测量元件(膜盒、膜片);4—轴封膜片;5—主杠杆;6—矢量机构;7—量程调整螺钉;8—检测片;9—差动变压器;10—副杠杆;11—放大器;12—反馈动圈;13—永久磁钢;14—电源;15—负载阻抗;16—调零弹簧

的输出电流,它与被测压差成正比,变换后由数字电压表显示。

图 4-4-7 左上角为矢量机构的示意图。a、c 为矢量机构的固定部位,b 处与副杠杆相连。当主杠杆将力 F_1 传至矢量机构时,矢量机构以 d 点为支点而转动,它将力 F_1 分解为 F_2、F_3 两分力。F_3 消耗在支点上,F_2 在副杠杆上产生一个向上的拉力。

用量程调整螺钉 7 可以改变矢量机构的 θ 角,由此就可以实现测量范围的调整,作用原理如下。

由图 4-4-7 可以看出

$$F_2 = F_1 \mathrm{tg}\theta$$

当 F_2 不变而改变 θ 角时,若要满足上式则必须改变 F_1。由于 F_1 与被测压差 ΔP 呈线性关系;所以改变 θ 角就能使 ΔP 范围发生变化,这样即可调整量程。

第二节 水轮机流量测量

一、水轮机流量测量的目的

水轮机流量测量对于实现水电站经济运行有着特殊的重要意义。所谓水电站的经济运行即要设法使机组在进行能量转换时效率最高。目前真机效率值都是根据模型试验换算而来的。实践证明,安装后的真机效率由于各种原因与用模型效率换算出来的数值存

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

在较大的差异，因此，机组投入运行后应该进行效率试验。为了使真机效率有较高的准确度，就必须用比较精确的方法测定水轮机的流量，这是目的之一。

目的之二是通过不同工况的真机效率试验，测出机组或电站在各种不同出力情况下的效率与耗水量值，籍以绘制总效率曲线和总耗水量曲线，制定机组之间或电站之间的负荷合理分配方案。

此外可根据机组或电站在某一时段的耗水量，推求水库的漏水量；还可以针对水库现存水量进行有规律的调度。

综合上述，水轮机流量的测量是水电站生产过程中不可缺少的组成部分，不但要有经常性的流量测量装置，而且还要为进行试验性的精密流量测量预留测试仪表的装设位置。

目前水电站在具有蜗壳的情况下，都毫无例外地采用蜗壳测流法实现经常性的流量测量。在做真机效率试验时，通常采用水锤测流法和流速仪测流法。

下面对这三种测流法的原理、计算及其仪表装置分述之。

二、蜗壳测流法

(一)测流原理

蜗壳中的水流是按“面积定律”分布的，即在蜗壳任一断面上其 vR = 常数。因此，蜗壳任一断面上距机组中心不同的两点间存在着压力差。蜗壳测流原理就是利用差压计测出蜗壳各不同流量下蜗壳内、外缘两点的压力差，并从压差与流量的关系来测定通过水轮机的流量。

如图 4-4-8 所示，假定在流量为 Q 时，点 1 和点 2 处的压力水头等于 P_1 及 P_2，该两点的流速分别为 v_1 和 v_2。而当流量为 Q′时，相应的压力水头为 P'_1 及 P'_2，其流速为 v'_1 及 v'_2。若不考虑局部损失；则当流量为 Q 时有下列等式

$$P_1 + \frac{v_1^2}{2g} = P_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

由此得

$$h = P_1 - P_2 = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$$

同样，当流量为 Q′时有下列等式

$$P'_1 + \frac{v'^2_1}{2g} = P'_2 + \frac{v'^2_2}{2g}$$

由此得

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$h' = P_1' - P_2' = \frac{v_2'^2 - v_1'^2}{2g}$$

根据水流相似条件有

$$\frac{v'_1}{v_1} = \frac{v'_2}{v_2} = \frac{Q'}{Q} = c$$

由此得 $v'_1 = cv_1$；$v'_2 = cv_2$；$Q' = cQ$

将得到的 v'_1 及 v'_2 代入式

得出

$$h' = \frac{(cv_2)^2}{2g} - \frac{(cv_1)^2}{2g} = c^2\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} = c^2 h$$

$$\frac{h'}{h} = c^2 \text{ 及 } \frac{Q'}{Q} = c$$

$$\frac{Q'}{Q} = \sqrt{\frac{h'}{h}} \text{ 或 } Q = K\sqrt{h}$$

式中 K——待定的系数。

由上式可知，只要利用其它方法测得一个流量值，同时由差压计测得一个相应的压差值，就可以利用 $K = \frac{Q}{\sqrt{h}}$ 算出此测量装置的比例常数 K（又叫蜗交流量系数），有了 K 值，只要将该差压计的表盘改为按 $Q = K\sqrt{h}$ 的关系来刻度，即可直接指示出水轮机的流量。

国内外许多水电站的现场试验证明：无论是高流速的圆形金属蜗壳，或是低水头的Γ形混凝土蜗壳，式中流量 Q 相当准确地正比于不同半径上两点压力差 h 的平方根；蜗壳流量系数 K 对某一蜗壳上两个固定测压孔而言是一常数，当然对不同机组蜗壳或同一蜗壳不同测压孔而言 K 是另一常数。

许多电站现场试验又证明：蜗壳流量系数 K 在不同水头下几乎不变，仍保持为一常数值。只是在水头不大于 10m 的低水头水电站，流量与压差有时可能不符合平方根的关系，所以低水头水电站利用 $Q = K\sqrt{h}$ 关系时要修正。

由于 K 是一常数，故通过水轮机的流量 Q 与蜗壳压差 h 的平方根关系曲线是一根通过坐标原点的直线。

（二）测压孔的布置

测压断面应选在蜗壳的前半部当水流转角为 45°～90°的地方，如图 4－4－8 所示。因该处水流已能基本符合等速度矩定律（面积定律），并有较大的流量通过断面。

测压孔可以布置在同一径向断面上，也可以布置在蜗壳的任意两点，只要能符合所希望得到的压差值即可。为了获得较大的压差，低压测压孔应尽可能靠近水轮机旋转轴线，

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

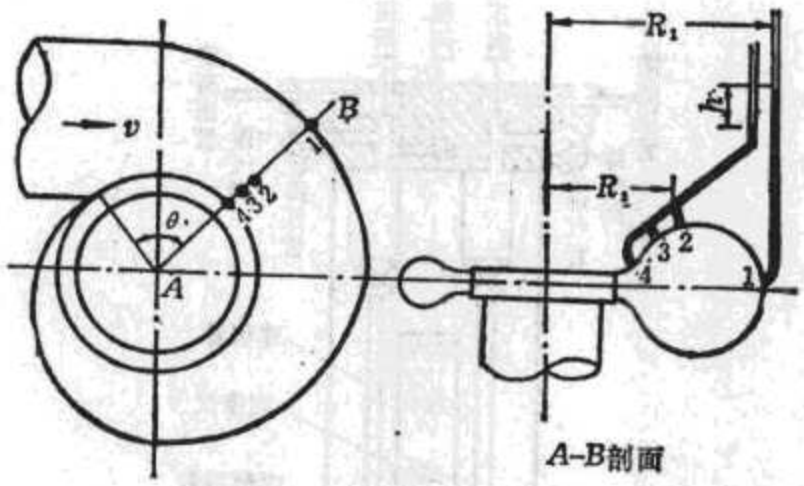


图 4-4-8　蜗壳测压断面和测压孔的布置

高压测压孔应设在离旋转中心最远的地方。

压差的大小还取决于水轮机的水头及通过的流量，为适应水头、流量的变化，通常在蜗壳内缘设置 2～3 个低压孔，如图 4-4-8 中的 2、3、4 孔。测量时根据仪表量程和水头、流量变化范围选择其中一个低压孔，以保证得到希望的压差。但应注意，当选用不同低压孔时，应按另一行刻度（即另一个比例常数 K 所确定的流量）读数。

（三）蜗壳压差的测量

蜗壳测压系统的压差，可用 U 型水银差压计进行测量，也可采用其它精度较高的差压仪表（如 DBC 差压变送器配合显示仪表）进行。在进行效率试验时，一般用 U 型水银差压计来测定蜗壳内外缘两点间压差。U 型水银差压计的结构如图 4-4-9。

要使压差 h 值测量比较精确，关键在于：

（1）正确选择蜗壳内缘低压孔；

（2）测压管路中增设稳压装置，如图 4-4-10 所示；

（3）管路不允许漏水，不允许积存空气。

三、水锤测流法

（一）水锤测流法的基本原理

在导水机构前的平直管段，选择两个测压断面。当导叶迅速关闭时，由于管内流速随时间而减小，因此引起了两断面间水体动量的变化，水流的动量转变为冲量，使管内压力突增，产生水锤现象，从而在两断面间形成压力差。如导叶关闭时间愈短，水流速度变化就愈快，因而压差也就愈大。如能测出两断面间压差变化与过程，就可推算出水流速度，从而可求得导叶关闭前通过水轮机的流量，这就是水锤测流法。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

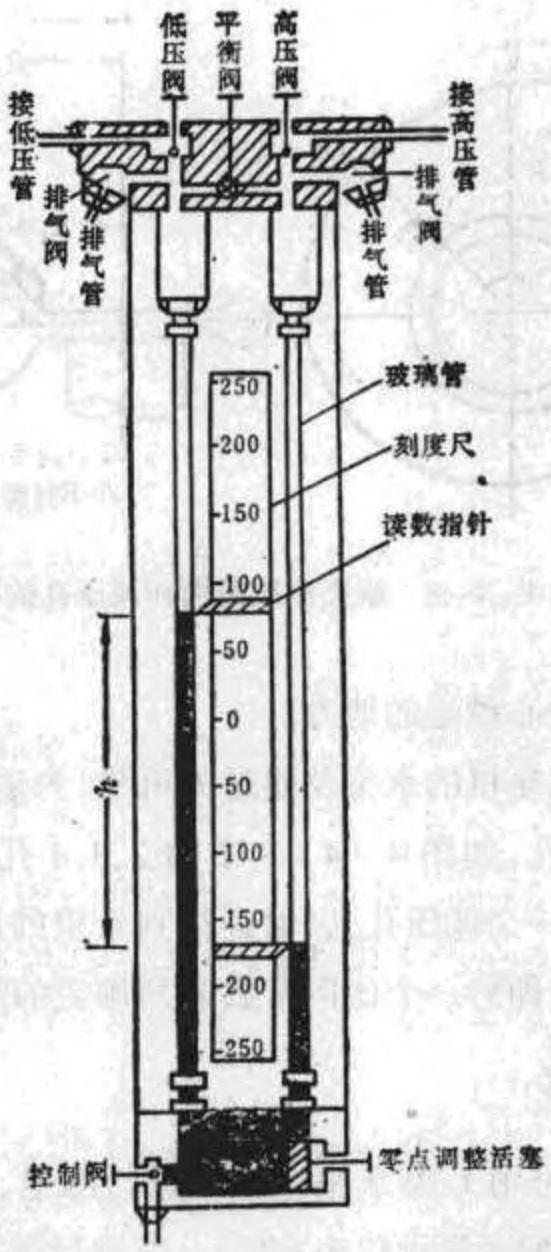


图 4-4-9 U型水银差压计结构示意图

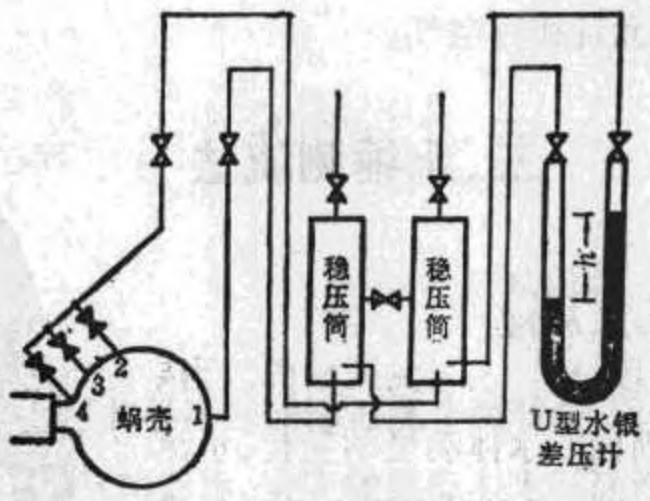


图 4-4-10 测压管系统中的稳压装置

由上述可知，水锤测流法的基本原理，就是牛顿第二运动定律的运用，即动量与冲量

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

方程式

$$m(v_0 - v) = \int_0^{T_S} F\Delta P dt$$

式中 m——长度为 L 的测量管段内所存水的质量；

V_0——导叶关闭前管中水流速度；

v——导叶关闭后因漏水等引起的管中流速；

T_s——导叶关闭时间；

F——测量管段的断面面积；

ΔP——随时间 dt 而变化的压差值。

由于 $m = \rho LF$；流量 $Q—Fv_0$；漏水流量为 $q = Fv$。将以上三式代入可得

$$Q = \frac{Fg}{L}\int_0^{T_S}\frac{\Delta P}{\rho g}dt + q$$

在上述求 Q 值的表达式中，$\frac{gF}{L}$为已知数；q 为导叶关闭时的漏水量，可通过实测法求得；$\int_0^{T_S}\frac{\Delta P}{\rho g}dt = A$，此面积 A 代表压差随时间的变化曲线与水头恢复曲线间所包围的有效面积，如图 4－4－11 中的阴影面积，此图称为水锤压差示波图。可见水锤测流法，实际上就是用压差传感器与示波器配合录制水锤压差过程线，然后经过计算而得出 Q 值。

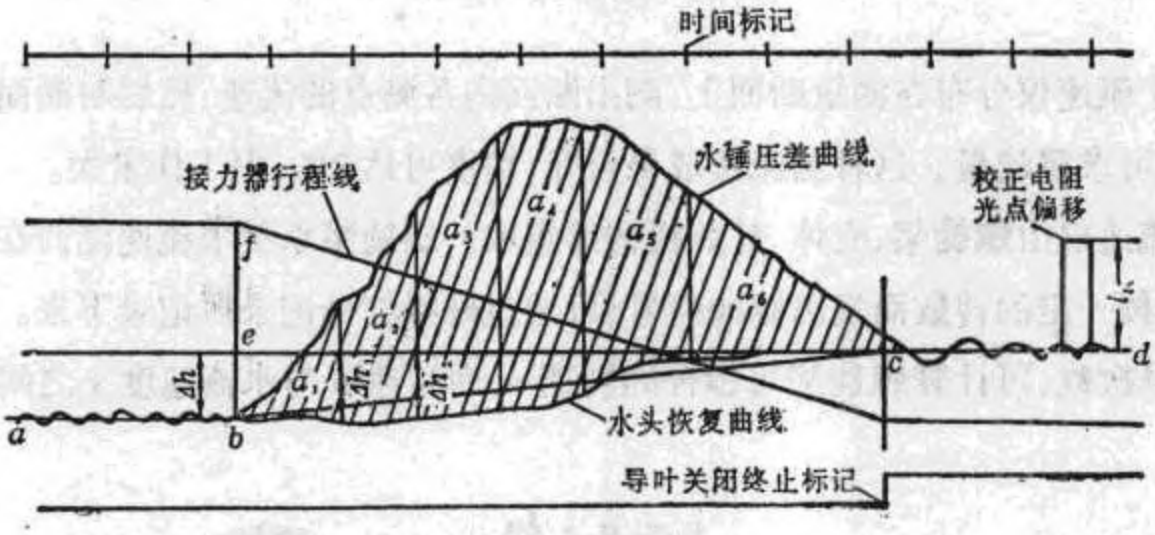


图 4－4－11 水锤压差示波图

依据式，通过水轮机的流量为

$$Q = g\frac{F}{L}A\frac{M_p}{M_t} + q$$

式中 g——重力加速度（m/s^2）；

A——水锤示波图的有效面积（cm^2）；

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

M_p——示波图的压力水头比例尺(m/cm);

M_t——示波图的时间比例尺(cm/s)。

(二)水锤压差示波图的分析

对录制下来的水锤压差示波图 4-4-11 须进行分析,确定示波图的有效面积 A 的边界范围,以便计算流量。分析的一般程序如下:

(1)确定导叶关闭的起点。根据接力器行程曲线上的起动点 f,确定关闭的起始点 b,水锤压差曲线在 b 点之后应有明显的上升趋势。

(2)确定导叶关闭终点。根据导叶关闭终止标记,确定导叶关闭的终止点 c,过此点作一垂线,此线为示波图有效面积 A 的右边边界线。

(3)确定两测压断面间水头损失。找出导叶关闭前后稳定状态下运行线 ab 和静压线 cd,ab 与 cd 两平行线间之距离 Δh 即表示在导叶关闭前稳定状态下流速为 v_0 时两测压断面间水头损失。

(4)定水头恢复线。将 b、c 两点连一直线,则直线 bc 可视为水头恢复线,以此线作为示波图面积的下限线。实际的水头恢复线为 bc 曲线,可用逐出逼近法求取。但为简化计算,在实际应用时可将直线 bc 当作水头恢复线。

四、流速仪测流

将若干个流速仪分布在测量断面上,测出断面内各测点的流速.然后对断面流速分布进行积分,就可求得流量。这种测流法成果可靠,精度可达 2%,但工作量大。

螺旋桨流速仪由螺旋桨、壳体、计数机构等组成。螺旋桨承受水流速度而在转轴上旋转,计数机构按一定的转数而发出脉冲信号,可通过外接信号记录器记录下来。根据记录时间内的讯号次数,可计算螺旋桨每秒钟的转速 n,而转速 n 与水流速度 v 之间存在下列关系

$$v = a + bn$$

式中 a——流速仪开始转动的起始流速(m/s);

b——流速仪校正系数。

根据每台流速仪转速,就可求出测量断面各测点的流速,进而可算出流量.

(一)流速仪的布置及信号记录

国际规程规定:在矩形断面上至少需布置 25 个测点,分布在 5 条水平线与 5 条垂直线的交点上;对国断面的压力钢管,至少需有 13 个测点(包括 1 个圆心测点),一般不超过

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

37 个。

在圆形断面上测点常布置在通过断面国心的直径测杆上，且对称于圆心。流速仪之间的距离用等面积法布置，即等面积的圆环内测点数相同。在圆心处必须布设一台流速仪以测取圆心处流速。

每个半径支臂上测点数按下式确定

$$4\sqrt{R} < Z_R < 5 < \sqrt{R}$$

式中　R——管道半径(m)。

各测点上安装的流速仪用多股电缆与记录器相连接。流速仪发出的脉冲信号，可用多台光线示波器共同工作来记录，也可采用自制脉冲信号记录器(图 4－4－12)记录，它由感光灯、指示灯、感光纸带转动机构和时间记录装置所组成。

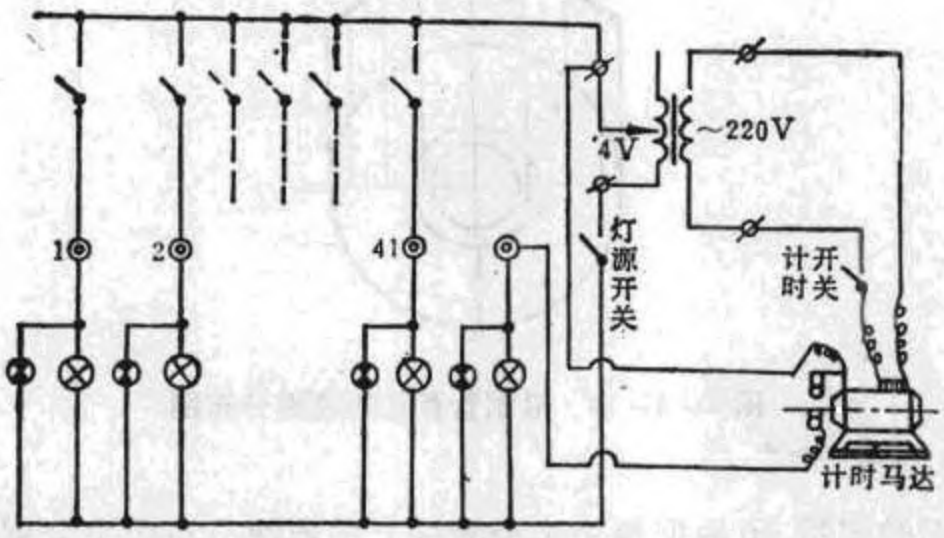


图 4－4－12　41 线流速仪脉冲信号记录器电路结线图

图 4－4－13　流速仪脉冲信号记录图

脉冲信号记录器是这样工作的：每当流速仪螺旋桨转动 10 或 20 圈，流速仪电触头接点就接通一次，于是记录器的感光灯与指示灯同时亮一次；另一方面，时间记录装置接点每秒接通一次，使时间感光灯和指示灯也随着每秒亮一次。由于感光纸带随转动机构以一定速度向前转动，这样就可把感光灯工作过程在纸带上感光而记录下来，记录图形如图 4－4－13。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(二)流速分布图的绘制与流量的计算

在感光纸带上选取记录信号最清晰的一段(图 4-4-13),其持续时间不少于 2~3 分钟。统计此时段 t 内每根点线的脉冲数 m,若流速仪信号每接通一次螺旋桨需转动 K 圈(一般 K = 10 或 20),则流速仪转速 n(r/min)为

$$n = \frac{Km}{t}$$

可应用式将转速换算成流速 V。

求出某一导叶开度下断面内各测点的流速后,就可绘制流速分布图,对圆形断面可绘制沿半径的流速分布图,如图 4-4-14。

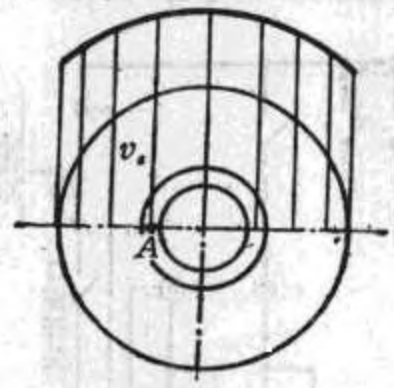


图 4-4-14 沿钢管直径的流速分布图

通过圆形断面的流量,可根据每个半径测杆上的流速分布图来分别求得,然后取它们的算术平均值作为最终结果。

在计算中假定:半径测杆上任一点,如图 4-4-14 的 A 点所测得的流速为 v_a,则 A 点所在整个环形截面上流速值都是一样的。根据这一假定,则通过圆形断面的流量为

$$Q' = 2\pi\int_0^R vrdr$$

此积分式可用图解法求得。首先根据所绘制的半径测杆上的流速分布图,将各测点处流速 v 乘上各该点到圆心的距离 r,然后将所得之积 vr 标在该点下方,再通过 vr 值的端点作平滑曲线,如图 4-4-15 所示。用求积仪量出图上的阴影面积,再乘以 2π 和比例尺,即得上述积分式所表示的流量值 Q′。

如果每个支架是两根互相垂直(一般与水平面成 45°)的测杆,则按上述方法分别对四个半径求出流量 Q'_{I}、Q'_{II}、Q'_{III}、Q'_{IV},取其算术平均值作为计算结果,则通过该断面之流量为

$$Q = \frac{1}{4}(Q'_{\mathrm{I}}、Q'_{\mathrm{II}}、Q'_{\mathrm{III}}、Q'_{\mathrm{IV}})$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

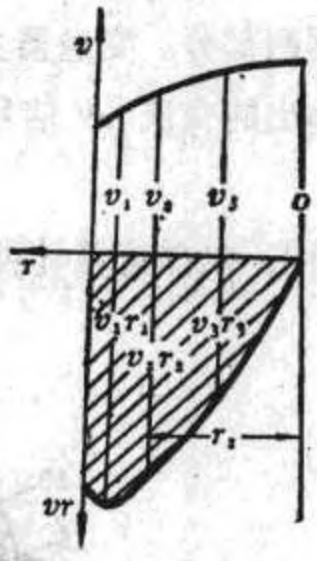


图 4-4-15 圆形测流断面计算流量的图解法

五、其它近代测法就简介

近代测流法有电磁流量计测流、超声波测流、激光测流等.

(一)用电磁流量计测流

电磁流量计的计算依据是法拉第电磁感应定律。工作原理如图 4-4-16 所示。在位于两磁极之间的管道中流过导电液体,它的方向垂直于磁力线的方向。在磁场力作用下,液体中的离子以一定的方式移动,并把自己的电荷传至测量电极,在电极上产生与液体流速 V 成正比的电势 E,即

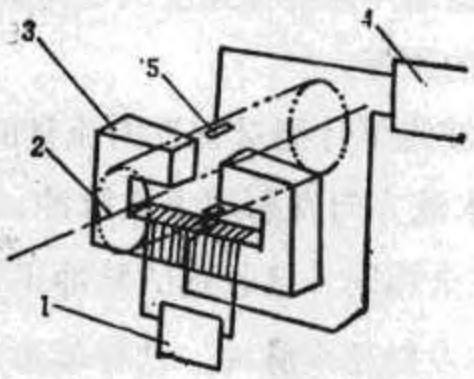


图 4-4-16 电磁流量计的工作原理
1—电源;2—管路;3—磁铁芯;4—转换放大器;5—电极

$$E = Bvd \quad (V)$$

式中 B——磁极间的磁感应强度(T);

v——液体流速(m/s);

d——管道内径(m)。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

当 B 与 d 为某定值时，就可依据 E 而测得流量 Q。

电磁流量计包括变送器和转换器两部分。变送器主要是磁路系统、流量导管、电极、外壳及引线等。转换器是将变送器输出的交流 mV 信号转换成 0 ~ 10mA 直流电流，以便输入显示仪表。

图 4 - 4 - 17 为电磁流量计结构图。电磁流量计可用于管径从 ϕ25mm ~ ϕ2400mm 中的流量测量。

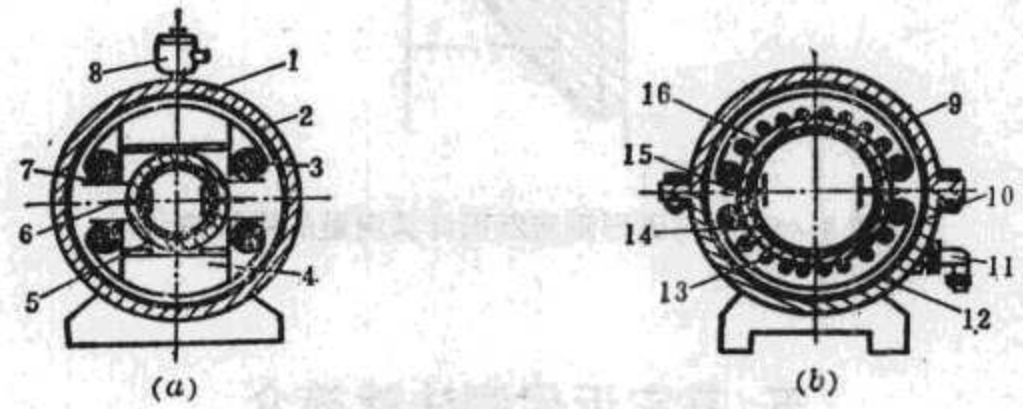


图 4 - 4 - 17 LD 型电磁流量计结构图

(a)集中绕组式；(b)分段绕组式

1—外壳；2—磁轭；3—励磁线圈；4—极靴；5—导管；6—电极；7—衬里；8—接线盒；9—上壳；10—下壳；11—插头；12—磁轭；13—励磁线圈；14—衬里；15—电极；16—导管

(二)超声波测流法

目前超声波测流法有三类五种，其中频差法应用范围广，测量精度高，下面简介此法。

频差法是利用超声波在流动的水体中传播速度与在静止水体中传播速度的不同，其变化与水流速度有关，因此可根据超声波传播速度的变化来推求水流的速度，从而计算出流量，这就是频差法超声波测流的原理。

图 4 - 4 - 18 是频差法超声波流量计测量钢管内流量的原理图。在管壁外面斜置一对超声波换能器，由探头 P_1 顺水流方向发射超声波脉冲，经水中传播的脉冲，由探头 P_2 接收。探头 P_1 和 P_2 在构造上完全相同。接收到的脉冲讯号经电路放大后，立刻返回去触发发射电路，使 P_1 再次向水体发射超声脉冲。这样就形成了脉冲系列(脉冲群)，它们按探头 P_1→水体→探头 P_2→放大电路一探头 P_1 的路径来回循环，所以频差法又叫声环法。上述脉冲在声环系统中一个来回所需时间叫声环周期，它基本上由超声波在水中传播时间 t_1 来决定。它的倒数 $\frac{1}{t_1} = f_1$ 称为声环频率。

经一定时间后，用切换器切换声环方向，即由探头 P_2 逆水流方向发射超声脉冲，而由探头 P_1 来接收。这样逆流方向的声环频率为 $f_2 = \frac{1}{t_2}$。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

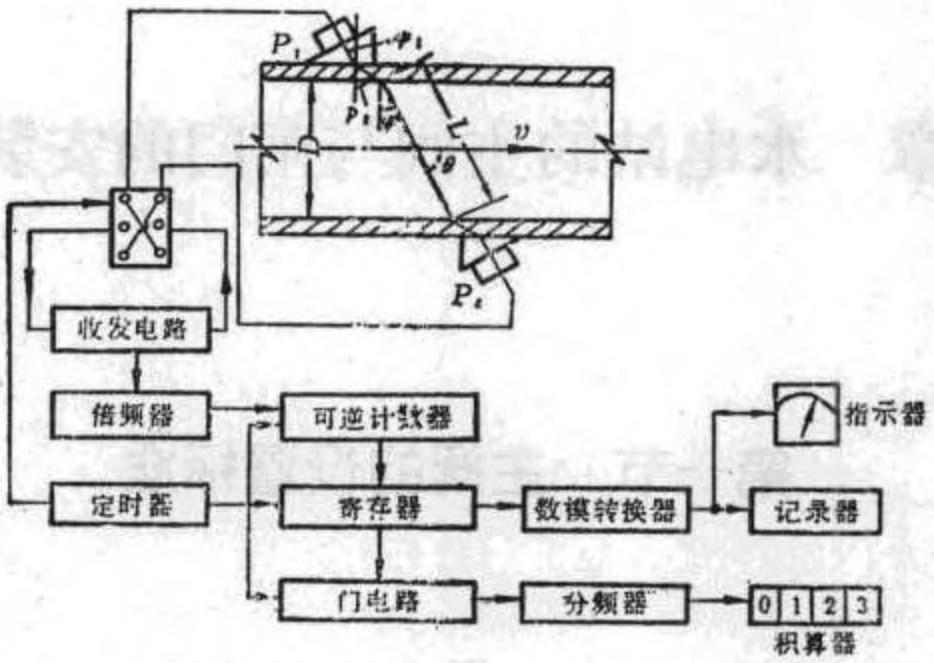


图 4－4－18　单通道有折射频差式超声波流量计原理图

设静止水体中声速为 c，水流速度为 v，则由图 4－4－18 可得

$$t_1 = \frac{L}{c + v\cos\theta}$$

$$t_2 = \frac{L}{c - v\cos\theta}$$

由此得

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{2v\cos\theta}{L}$$

即

$$v = \frac{L}{2v\cos\theta}\Delta f$$

由式可知，在频差法中流速 v 与声波在顺流和逆流中传播的频率差 Δf 成比例，因此测得其频差 Δf 就可测知流速。

式中未考虑管壁对声波传播的影响，如果考虑在管壁处存在折射面，因而计入固定延迟时间 τ，则式应改为

$$v = \frac{D\left[1 + \frac{1}{D}\tau c\sin\theta\right]^2}{\sin 2\theta}\Delta f$$

式中　D——管道直径，D = Lsinθ。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第五章 水电站的主阀与闸门的安装工艺

第一节 主阀的设置标准

一、主阀的作用

(1)岔管引水的水电站,构成检修机组的安全工作条件。当一根输水总管给几台机组供水时,若停机检查或检修其中某台水轮机,关闭该机主间即可从事检修工作而又不影响其它机组正常运行。

(2)停机时可减少机组漏水量和缩短重新起动时间。机组较长时间停机时截断水流,以减少导叶漏水及因漏水造成间隙气蚀损坏,还可避免机组长期运行后,因导叶漏水量增大而不能停机的问题。机组停机时,往往不希望关闭引水管进水闸门,以便引水管保持经常充水,使机组能随时接受负荷,具备运行的灵活性和速动性。

(3)防止飞逸事故的扩大。当机组和调速系统发生故障时,可以在动水中紧急关闭主阀,截断水流,防止机组飞逸时间超过允许值,避免事故的扩大。

二、设置条件

基于以上目的,设置主阀是必要的。但因其投资昂贵,安装工作量又大,设置主阀一般应符合下列条件:

(1)由一根输水总管向几台机组供水时,每台水轮机前均应装设进水主阀。

(2)水头高于120m或引水管道较长的单元供水的水轮机前,应考虑装设进水主阀。因为这种电站压力管道较长,充水时间也就长;此外,电站水头越高导叶的漏水越严重,因此能量损失也越大。高水头水电站也可装设两个阀门,一个装在压力钢管的始端,另一个装在水轮机前,分别做为压力钢管和机组的保护装置。

(3)对于最大水头小于120m,长度较短的单元输水管,例如坝后式水电站;一般装置快速闸门。若装置主阀则应有充分的论证。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

三、对主阀的技术要求

(1)结构简单,工作可靠,操作方便。

(2)尽可能减小外形尺寸,减轻重量。

(3)应有严密的止水装置,减少漏水,以便在阀后的钢管和水轮机内进行检修工作,同时可避免冬季因漏水造成管内的结冰现象。

(4)阀门本身及其操作机构的结构和强度应满足运行的要求。能在动水压力下按时关闭,关闭时间,应满足发电机飞逸转速允许的持续时间和压力管道允许的水锤值的要求。仅做检修机组截断水流用的主阀,阀门的关闭是在静水中进行的,启闭时间可由运转方案来确定,一般为 2 ~ 5min。

主阀通常只有全开或全关两种情况,不宜做部分开启来调节流量,以免造成过大的水力损失和影响水流稳定。

主阀不允许在动水情况下开启,因为这样需要更大的操作力矩。

第二节　主阀的类型及其选用

水电站采用较广泛的主阀有:蝴蝶阀、球阀、闸阀等。

一、蝴蝶阀

蝴蝶阀主要是由圆筒形的阀体和可在其中绕轴转动的活门以及其它附属部分组成.

阀门关闭时,活门的四周与圆筒形阀体接触,封闭水流的通路;阀门开启时,水流绕活门两侧流过。

1.立轴与卧轴蝴蝶阀的比较

蝴蝶阀的装置型式分卧轴(图 4 - 5 - 1)和立轴(图 4 - 5 - 2)这两种蝴蝶阀都得到广泛采用。在水力性能上这两种阀没有明显差别,各制造厂往往根据自己的经验和传统的习惯决定布置型式。

根据国内运行经验,立轴和卧轴蝴蝶阀各有优缺点:

(1)分瓣组合的立轴蝴蝶阀,其组合面大多在水平位置上,在电站安装及检修时装拆比卧轴蝴蝶阀方便(图 4 - 5 - 3)。

(2)立轴蝴蝶阀结构紧凑,所占厂房面积较小,蝴蝶阀操作机构位于阀的顶部,有利于防潮和运行人员维护检修,但它需要有一个刚度很大的支座固定在间体上,在下端轴承端

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

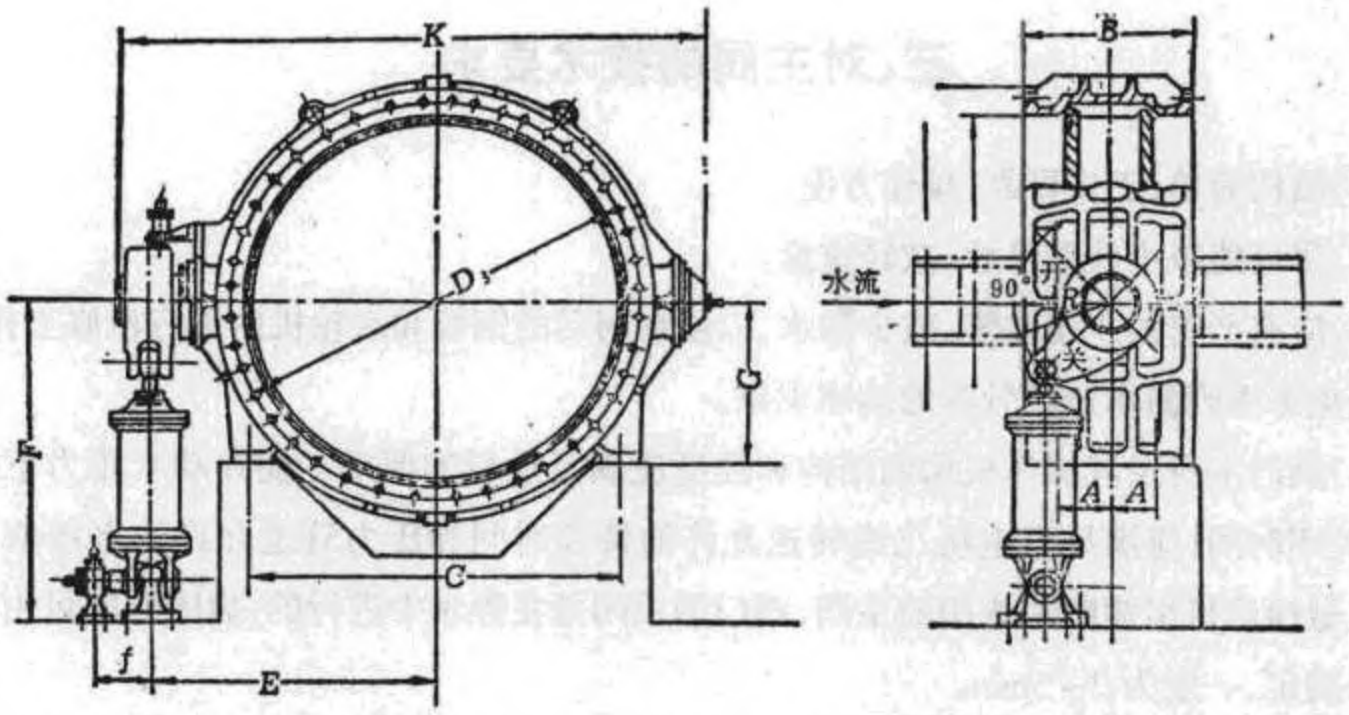


图 4-5-1 双平板活门蝴蝶阀

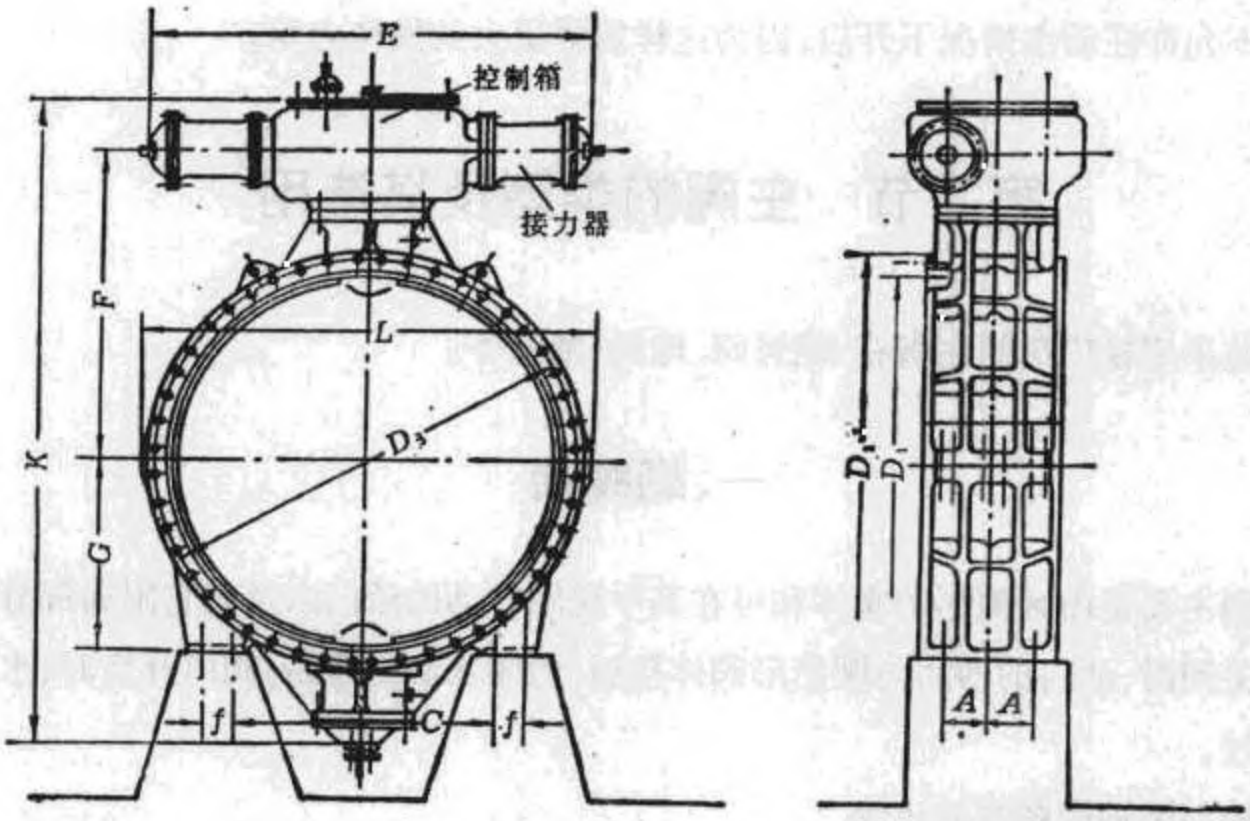


图 4-5-2 立轴式蝴蝶阀

部需装一个推力轴承，以支持活门的重量，结构较为复杂。卧轴蝴蝶阀不需支持活门的推力轴承，其操作机构可以放在阀的一侧或两侧，利用混凝土地基作基础，结构比较简单。

(3)作用在卧轴蝴蝶阀活门上的水压力中心在阀轴以下，同时动水力矩也是趋向于使活门关闭，故当活门离开中间位置时，受有利于关闭的水力矩。

(4)立轴蝴蝶阀的下部轴承容易沉积泥沙。要定期清洗，否则下部轴承容易磨损，甚至引起活门下沉，影响封水性能。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

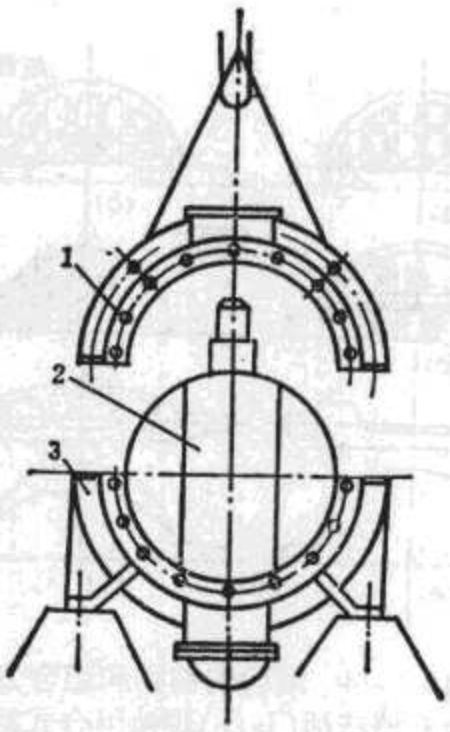


图 4-5-3　立轴蝴蝶阀的装拆
1—上阀体;2—活门;3—下阀体

从以上两种蝴蝶阀比较中,立轴蝴蝶阀下部轴承泥沙沉积问题很难防止,因此在一般情况下宜优先选择卧轴蝴蝶阀。

2.阀体、活门和轴承

阀体是蝴蝶阀的主要部件,水流由其中通过,承受水压力,支持蝴蝶阀的全部重件,承受操作力和操作力矩,因此要有足够的刚度和强度。

直径较小、工作水头不高的阀体,可采用铸铁铸造,大中型阀体多采用铸铁或钢板焊接结构。阀体的分瓣与否决定于运输、制造和安装条件。当活门与阀轴为整体结构或不易装拆时,则可以采用两瓣组合。直径在 4m 以上的阀体,受运输条件限制,也须做成两瓣或四瓣组合。

活门在全关位置时承受全部水压,在全开位置时处在水流中心,因此不但要有足够的强度和刚度,而且要有良好的水力性能。

为了改善蝴蝶阀的密封性能,近年来采用了双平板和整圆平板的活门结构,活门的封水面与转轴不在同一平面上,密封设在上游平板的外缘,密封性能好、制造简单、维修方便。但由于活门不便做成分瓣组合的结构,一般用在直径 4m 以下的活门。

直径大于 4m 的活门都做成分件组合结构,组合方式见图 4-5-4。

把阀轴与活门做成整体的或装配的结构,在制造上各有特点,设计时应粮据制造厂的具体情况选定。

活门的转轴由装在阀体上的轴承支持。卧轴蝴蝶阀由左、右两个导轴承支持活门的重量;立轴蝴蝶阀除上、下两个导轴承外,在下端有推力轴承支持活门的重量。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

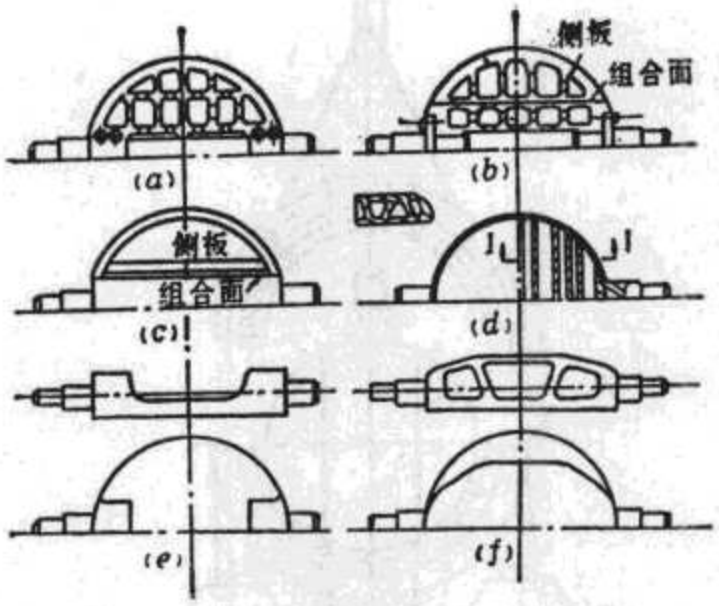


图 4-5-4 活门的结构和组合方式
(a)整铸活门;(b)组合式铸造活门;(c)焊接组合式活门;(d)双平板活门;
(e)整铸整圆平板式活门;(f)焊接或铸造整圆平板式活门

阀轴轴承的轴瓦,一般采用锡青铜铸造,轴瓦压装在钢套上,钢套用螺钉固定在阀体上,以便于检修铜瓦。

3.密封装置

阀门在关闭后有两处易漏水,一是活门和阀轴连接处的活门端部,另一处是活门外缘。在这些部位都应装设密封装置。

端部密封的形式很多,效果较好的有青铜涨圈式端部密封,如图 4-5-5 所示,它适用于直径较小的蝴蝶阀;橡胶围带式端部密封,如图 4-5-6 所示,适用于直径较大的蝴蝶阀,围带的结构与周圈密封相同。

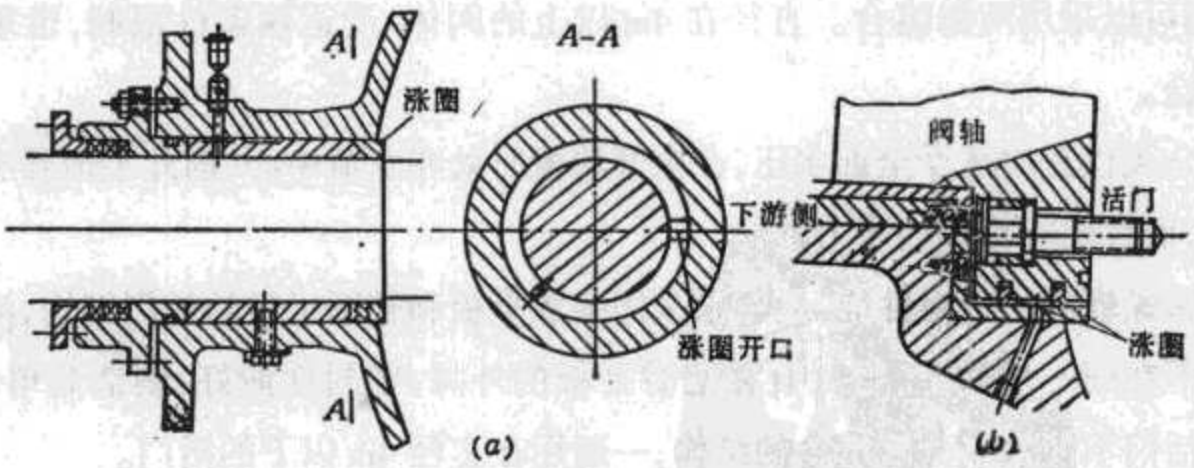


图 4-5-5 涨圈式端部密封

周圈密封有两种,一种是当活门关闭后,依靠密封体本身膨胀,封住间隙。使用这种结构时活门全开至全关转角为 90o,常用的结构是橡胶园带,如图 4-5-7 所示。

橡胶围带装在阀体或活门上,当活门关闭后,围带内充入压缩空气,围带膨胀,封住周

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

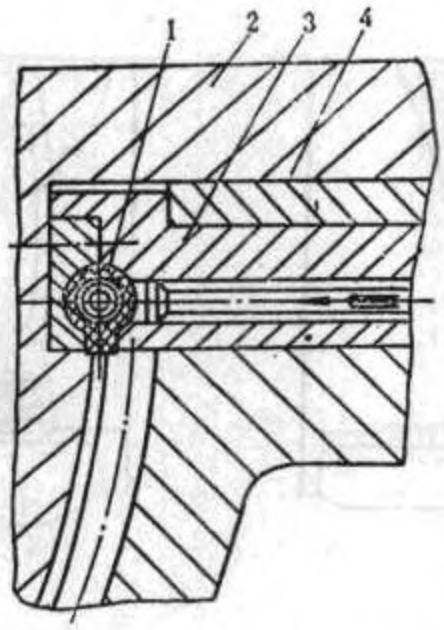


图 4-5-6 围带式端部密封
1—轴端密封围带;2—活门;3—钢套;4—铜瓦

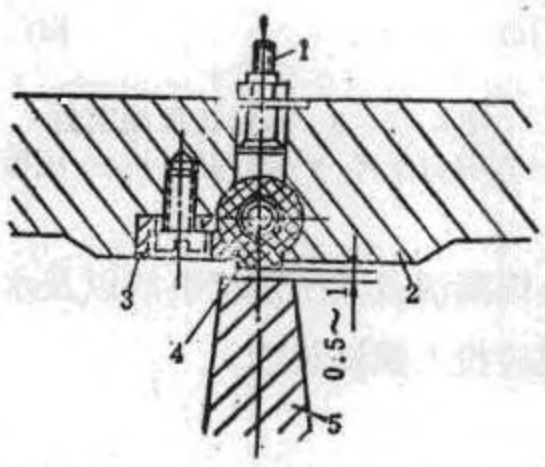


图 4-5-7 围带式周圈密封
1—围带嘴;2—阀体;3—镶条;4—橡胶围带;5—活门

围间隙。活门开启前应先排气,围带缩回方可开启活门。围带内的压缩空气压力应大于最高水头所形成的压力(不包括水锤升压值)200~400kPa,不受气压时,围带与活门间隙为 0.5~1mm。

另一种是依靠关闭的操作力将活门压紧在阀体上,这时活门由全开至全关的转角为 80°~85°。密封的结构如图 4-5-8 所示。密封环采用青铜板或硬橡胶板制成,阀体和活门上的密封接触处加不锈钢板。

由于端部密封的结构较为复杂,而且封水性能都不很好,而双平板型活门的明显优点之一,就是这种活门结构使周圈密封移到阔轴以外,形成一个整圈,不需要再装端部密封,漏水量大为减少。双平板型活门转角为 90°。

4.锁锭装置

由于蝴蝶阀活门在稍离全开位置时即有自关闭的水力矩,因此在全开位置须有可靠

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

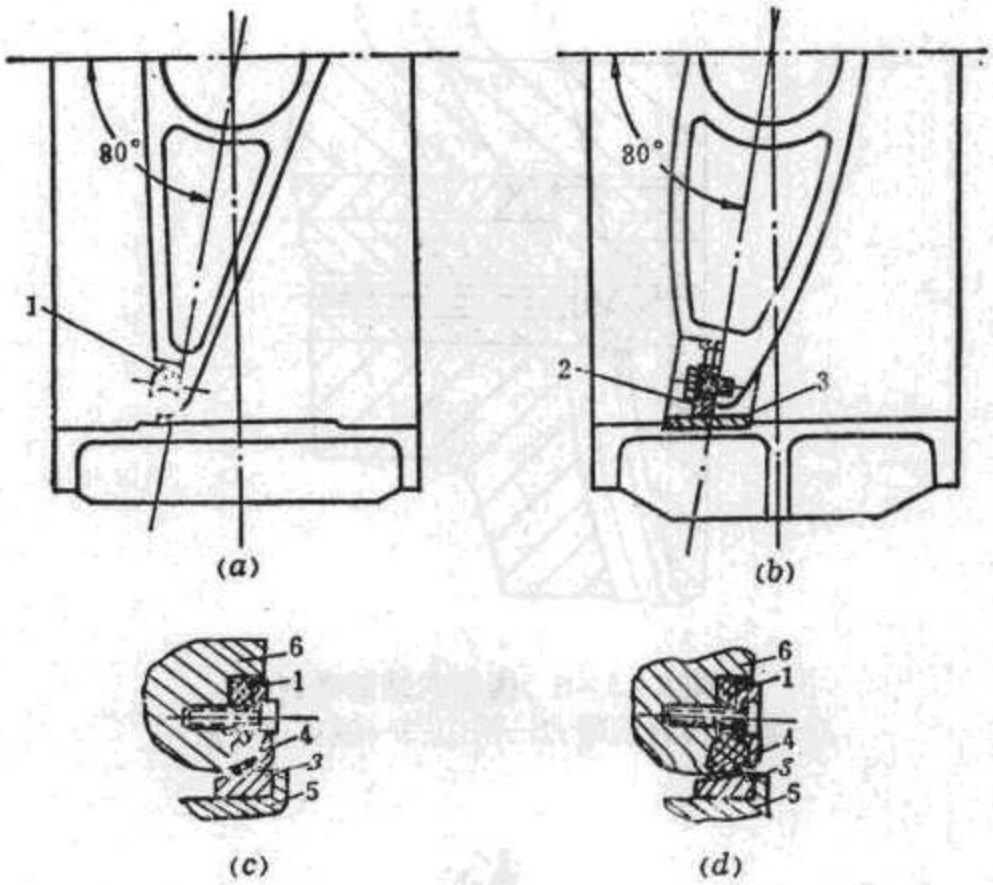


图 4-5-8 压紧式周圈密封

1—橡胶封水环;2—青铜封水环;3—不锈钢衬;4—压板;5—阀体;6—活门

的锁锭装置。同时,为了防止因漏油或液压系统事故以及水的冲击作用而引起误开或误关,一般在全开或全关位置都应投入锁锭装置。

5.附属部件

(1)旁通阀和旁通管:它们装于阀门两侧钢管上。蝴蝶阀开启前先打开旁通阀,将活门上游侧的压力水引入活门下游侧,待两侧压力趋近于平衡时再开启活门,这样可避免蝴蝶阀在动水中开启时产生的振动,同时也可减少操作力矩。从运用上讲,只要求蝴蝶阀在事故情况下动水关闭,而没有动水开启的要求。旁通管的断面积,一般取蝴蝶阀过流面积的 1~2%,经过旁通管的流量,必须大于导叶漏水量。

(2)空气阀:位于主阀下游侧的钢管顶部。当开启旁通阀向下游充水或打开排水阀放空压力钢管和蜗壳内的积水时,空气阀自动开启,以排气或充气。

图 4-5-9 为空气阀的结构型式之一。该阀有一个空心浮筒悬挂在空心活塞之下,空心浮筒浮在蜗壳或管道中的水面上。当管道和蜗壳充满水时,浮筒上浮至极限位置,以防止水流外溢。

(3)伸缩节:装在主阀的上游或下游侧,在安装或检修时使主阀能沿管道方向移动一定距离,以便于阀门的装拆。

目前世界上已制成的蝴蝶阀最大直径达 8.23m,已制成的蝴蝶阀中最高水头达 300m。一般情况下,蝴蝶阀的最高使用水头不宜超过 200m,更高水头时,应和球阀作选型

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

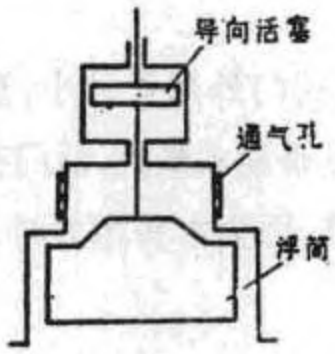


图 4-5-9　空气阀原理示意图

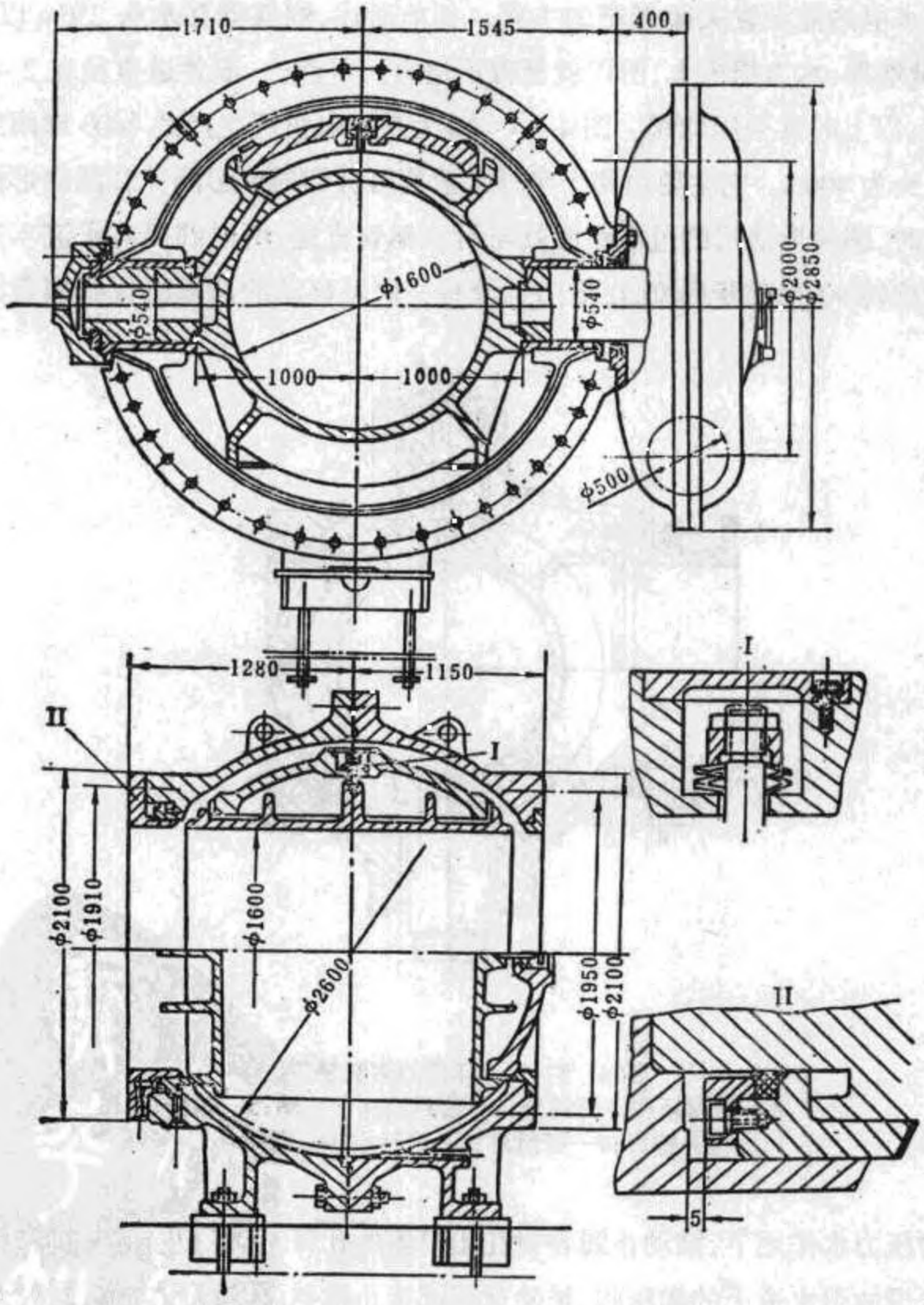


图 4-5-10　φ1.6m 球阀

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

比较。

蝴蝶阀的优点是比其它型式的阀门外形尺寸小，重量轻，结构简单，造价低，操作方便，而且有自行关闭的趋势。其缺点是漏水量大，活门在水流中造成一定的水力损失和引起汽蚀现象，这在高水头时尤为明显，因为水头增大时，活门的厚度和水流速度也相应增大。

二、球阀

高水头水电站需设置关闭严密的主阀。如前所述，蝴蝶阀在水头 250m 以上时结构渐笨，漏水量增加，水力损失大，所以就显得不适宜。目前，一般管道直径在 2～3m 以下，水头在 250m 以上时常采用球阀。图 4－5－10 为东方电机厂生产的 φ600 球阀结构图，该阀的使用水头为 400m。它主要由两个半球组成的可拆卸的球形阀体和圆筒形活门组成。在开启位置时，圆筒形活门的过水断面就与引水钢管直通，所以阀门对水流不产生阻力．关闭时活门旋转 90°来截断水流，在活门上设有一块可移动的球面圆板止漏盖，它在由其

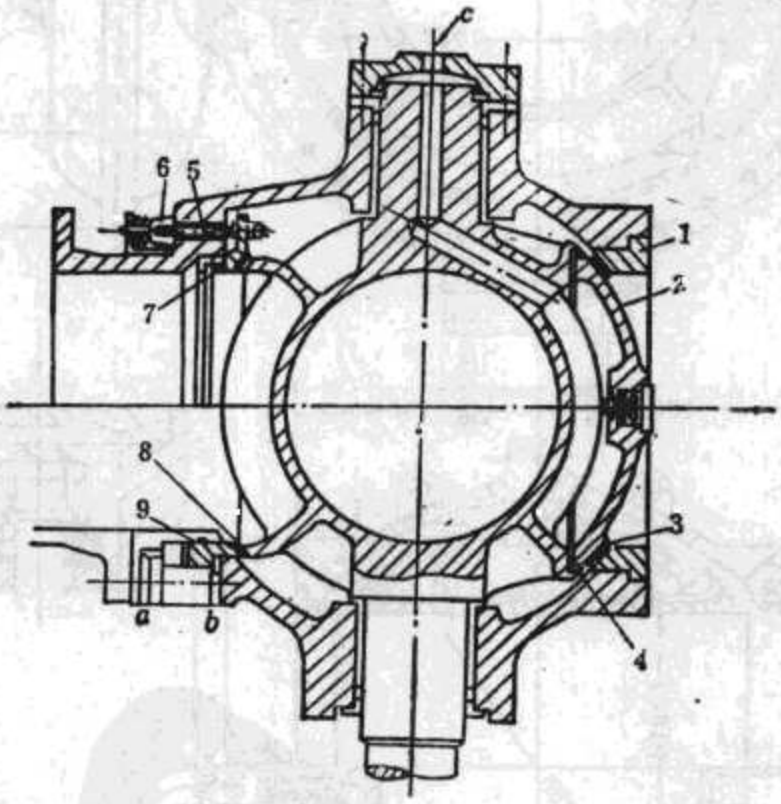


图 4－5－11 球阀的密封装置
1—密封环；2—密封盖；3—密封面；4—护圈；5—螺杆；
6—螺母；7—密封环；8—密封面；9—密封环

间隙进入的压力水作用下，推动止漏着封住出口侧的孔口。阀门开启时，须先打开装在活门转轴内专设的引水道上的卸压阀，排除球面圆板止漏盖内腔的压力水，同时开旁通阀使球阀后充水，活门的球面圆板止漏盖，在弹簧和阀后水压力的作用下，脱开与阀体的接触，

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

这样就使球阀容易转动。

以前球阀都采用单侧止漏装置，这样在高水头水电站通常需设置两个球阀，一个为工作球阀，另一个为检修球阀。近年来采用了双重止漏结构的球阀，即在同一台球阀上前后各带一个密封结构，前面的检修时用，后面的正常工作用。其结构如图 4－5－11 所示。当检修密封投入时，就能快速检修和调整工作密封、轴端密封和接力器等。

检修密封有用机械操作的，也有用水压操作的。图 4－5－11 中左上侧为机械操作的密封。利用螺杆和螺母调整密封环，压紧密封面。这种结构零件既多，也容易由于周围螺杆作用力不匀，造成偏卡，动作不灵，现已为水压操作所代替。水压操作的密封结构如图 4－5－11 左下侧所示，当打开密封时，孔 b 接通压力水，孔 a 接通排水，密封环后退，密封口张开；反之，孔 b 接通排水，孔 a 接通压力水，密封环前伸，密封口贴合。

球阀的优点是：关闭严密，漏水极少；球面圆板止水环在活门转动时不受摩擦，不易磨损；全开时水力情况良好，几乎没有水力损失；阀门操作力矩很小，动水操作时水阻力矩只有摩擦力矩的 5%左右，有利于动水紧急事故关闭。缺点是体积大，结构复杂，重量大，造价高。

球附一般都装有数个液压阀。一个作为旁通阀；一个作为卸荷阀，装设在轴头；还有一个作为排污阀，装在阀体底部。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第六章 水电站厂房布置工艺设计与设备的选用工艺

第一节 机墩与风罩的结构设计

机墩是立式水轮发电机的支承结构，底部团结于大体积混凝土或蜗壳顶板，顶部与风罩或发电机楼板连接。机组设备与发电机层楼板的部分荷载通过机墩传至基础。在机组正常运行、机组事故、飞逸及机组制动时，机墩均受到扭矩、水平推力、轴向力及振动荷载的作用，结构应具有足够的强度、刚度及抗震能力，应进行静力计算与动力计算。

一、风罩与发电机层楼板连接的方式

生产实践中常见的连接方式有三种：

(1)整体式。机墩或风罩顶部与发电机层楼板整体浇筑，成刚性连接。如图4-6-4所示。整体式连接可增加机墩抗扭和抗水平力刚度，改善机墩受力条件，应用最广。但机墩的振动及混凝土的干缩会造成楼板裂缝，并使楼板上仪表设备正常工作受到影响。

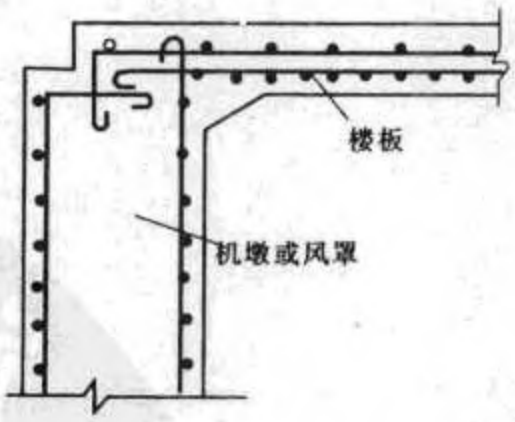


图4-6-1 机墩与楼板的整体式连接

(2)简支式。发电机层楼板搁置在风罩墙顶部或机墩挑出的悬臂牛腿上，支座处设置弹性防震垫层，减轻机墩震动对楼板的影响，如图4-6-2所示。这种机墩支座处构造较复杂，机墩抗扭、抗震性能较差，应用较少。

(3)分离式。发电机层楼板与机墩或风罩墙完全分离，各自独立工作，互不影响。楼

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

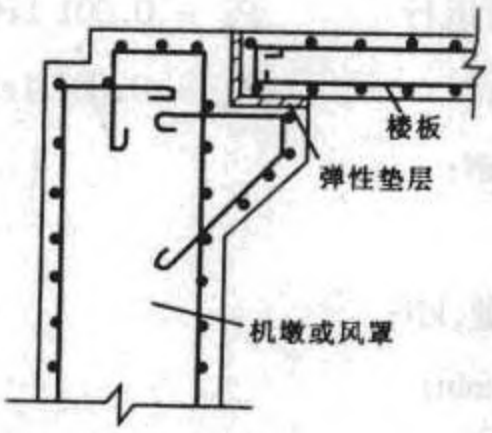


图 4-6-2 机墩与楼板的简支连接

板荷载通过设在机墩或风罩周围的梁系传给主梁与立柱，再传至块体结构，不传给机墩，如图 4-6-3 所示。这种连接方式的优点是楼板施工与上面的设备安装均可在机墩施工前进行，可加快施工速度，广泛应用于中小型水电站厂房中。

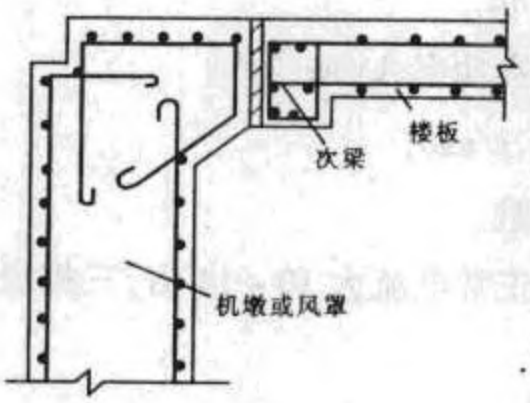


图 4-6-3 机墩与楼板的分离式连接

二、机墩荷载与荷载组合

(一)机墩荷载

机墩荷载应根据水轮发电机的型式和结构及传力方式分析确定，一般有以下几种：

(1)垂直静荷载 A_1。包括结构重及发电机层楼板传给风罩墙的均布荷载，集中作用的发电机固定部分重(定子、空气冷却器及其他附属设备重、上下支架重)，通过定子机座基础板作用于机墩顶部。

(2)垂直集中动荷载 A_2。包括发电机带轴转子重、励磁机转子重、水轮机带轴转轮及轴向水推力，通过推力轴承传给机架再传至机墩。

(3)中心水平动荷载 A_3。由于机组安装偏差或转动部分质量不匀造成的转动部分质量中心与机组偏心距 e 引起的水平离心力，通过导轴承传给机墩，按下式计算

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

正常运行 $P_m = 0.001\,1eGn_0^2$

飞逸 $P_{mp} = 0.001\,1eGn_p^2$

式中 $P_{m(mp)}$——水平离心力，kN；

e——偏心距，m；

G——机组转动部分重量，kN；

n_0——机组额定转速，r/min；

n_p——机组飞逸转速，r/min。

(4)扭矩荷载 A_4。转子磁场对定子磁场的引力使定子受到切向力的作用，通过定子机座基础板固定螺栓传给机墩形成扭矩，由下式计算

$$M_n = 9.75\frac{N\cos\varphi}{n_0}$$

式中 M_n——正常扭矩，kN·m；

N——发电机额定视在功率，kVA；

n_0——机组额定转速，r/min；

$\cos\varphi$——发电机功率因数。

发电机三相短路电流比正常电流大 10～14 倍，三相短路扭矩比正常扭矩大 3～5 倍按下式计算

$$M'_n = 9.75\frac{N}{n_0 X_z}$$

式中 M'_n——短路扭矩；

X_z——发电机暂态电抗，一般为 0.18～0.33，由厂家提供；

其他符号含义同前。

(二)荷载组合

机墩荷载组合，按表 4－6－1 采用。

表 4－6－1 荷 载 组 合 表

荷载组合	计算情况	荷载名称					
		A_1	A_2	A_3		A_4	
				正 常	飞 逸	正 常	飞 逸
基本组合	正常运行	√	√	√		√	
特殊组合	1.短路时	√	√	√			
	2.飞逸时	√	√		√		

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

三、圆筒式机墩结构计算

(一)机墩静力计算

1.垂直荷载作用下轴向正应力的计算

(1)结构计算简图。圆筒式机墩顶部风罩墙与发电机层楼板连接,不论采用什么连接方式,计算中均假定圆筒顶部为自由端,不考虑楼板刚度的作用,除分离式连接外,楼板荷载都传递到机墩顶部。静力计算中,圆筒底部假定固结于蜗壳顶板,不考虑蜗壳顶板的变形。对悬式发电机,机墩顶部的楼板荷载、风罩自重及机组设备荷载均假定为均布,然后把各荷载按实际作用位置分别换算为沿相当圆筒中心圆周上的垂直均布静荷载、动荷载。如图4-6-4所示。

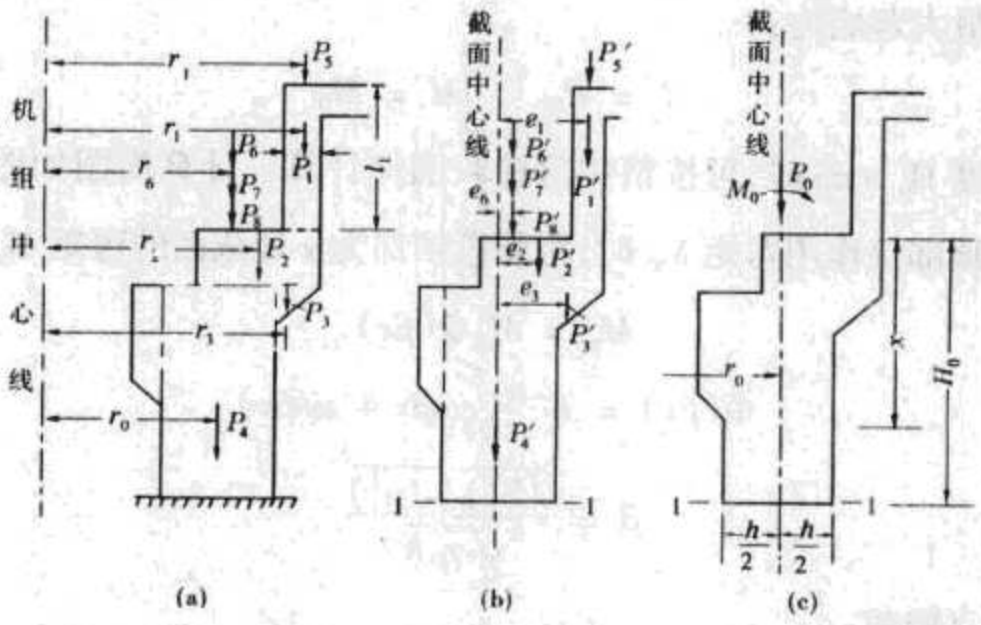


图4-6-4　圆筒式机墩垂直荷载作用下计算简图的确定

(2)荷载计算。分动、静荷载两种。

①垂直静荷载。机墩自重 P_1、P_2、P_3、P_4(不计牛腿自重及进人孔),见图4-6-4(a);楼板传来的荷载 P_5 按一个机组段楼板总荷载的一半均布作用于风罩墙;发电机固定部分设备传来的荷载 P_6,均布作用于定子机座基础板。

②垂直动荷载。机组转动部分设备传来的荷载 P_7,均布作用于定子机座基础板,包括发电机带轴转子重、水轮机带轴转轮重、励磁机转子重等,该荷载乘以动力系数后按静荷载考虑;轴向水平推力 P_8,均布作用于定子机座基础板。

以上各荷载实际作用位置所在的圆周长与所要计算的机墩截面中心所相当的圆筒周长不一致,二者存在偏心距 e,如图4-6-4(b)所示,须将各荷载 P_i 换算成该相当单宽圆

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

筒上的荷载 P'_i，按下式计算

$$P'_i = P_i \frac{r_i}{r_0}$$

式中 P'_i——相当单宽圆筒上的荷载；

r_i——各荷载 P_i 实际作用位置离开机组中心线的距离，m；

r_0——相当圆筒半径，m。

将荷载 $P_0 = \sum P'_i$ 作用于相当圆筒顶部周长后，同时亦形成了弯矩 $M_0 = \sum P_i e_i$ 作用于机墩截面形心，计算简图如图 4-6-4(c)所示。

(3)正应力计算。分两种情况：

①当圆筒高度 $H_0 < \pi S$ 时($S = \sqrt{r_0 h}/\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}$，$r_0$ 意义同上，h 为圆筒壁厚，μ 为泊桑比)，可沿圆周取单位宽度按上端自由、下端固定的偏心受压柱计算，则单宽圆筒固定端截面最大轴向力及最大弯矩为：

$$T = P_0 \qquad M = M_0$$

②当圆筒高度 $H_0 > \pi S$ 时，可按整体薄壁长圆筒计算。计算简图如图 4-6-4(c)所示。当单宽圆筒顶部仅作用弯矩 M_0 时，距圆筒顶部为 x 处截面的弯矩 M_x 按下式计算

$$M_x = M_0 \Phi(\beta x)$$

$$\Phi(\beta x) = E^{-\beta x}(\cos\beta x + \sin\beta x)$$

$$\beta = \frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{r_0 h}}$$

式中符号含义同前。

式中 $\Phi(\beta x)$ 函数可根据(βx)值由表 4-6-2 查得，从而作出弯矩图，如图 4-6-5 所示。

表 4-6-2　　$\Phi(\beta x)$ 函数表

βx	$\Phi(\beta x)$	βx	$\Phi(\beta x)$	βx	$\Phi(\beta x)$
0	1.000 0	1.8	0.123 4	13.6	-0.036 6
0.1	0.990 6	1.9	0.093 2	3.7	-0.034 1
0.2	0.965 1	2.0	0.066 7	3.8	-0.031 4
0.3	0.926 7	2.1	0.043 8	3.9	-0.028 6
0.4	0.878 4	2.2	0.024 4	4.0	-0.025 8
0.5	0.823 1	2.3	0.008 0	4.1	-0.023 1
0.6	0.762 8	2.4	-0.005 6	4.2	-0.020 4

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

βx	Φ(βx)	βx	Φ(βx)	βx	Φ(βx)
0.7	0.699 7	2.5	-0.016 6	4.3	-0.017 9
0.8	0.635 3	1.6	-0.025 4	14.4	-0.015 5
0.9	0.571 2	2.7	-0.032 0	4.5	-0.013 2
1.0	0.508 3	2.8	-0.036 9	4.6	-0.011 1
1.1	0.447 6	2.9	-0.040 3	4.7	-0.009 2
1.2	0.389 8	3.0	-0.042 2	4.8	-0.007 5
1.3	0.335 5	3.1	-0.043 1	4.9	-0.005 9
1.4	0.284 9	3.2	-0.043 1	15.0	-0.004 6
1.5	0.238 4	3.3	-0.042 2	15.1	-0.003 3
1.6	0.196 0	3.4	-0.040 8	15.2	-0.002 3
1.7	0.157 6	3.5	-0.038 9	15.3	-0.001 4

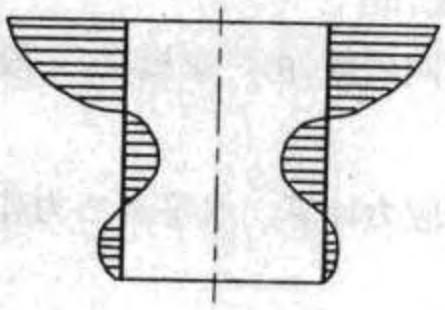


图4-6-5　长圆筒M图

按上述圆筒(或长圆筒)求出内力M、T后,即可求出单位圆周长机墩距机墩顶部为x处截面上的正应力σ_x为

$$\sigma_x = \frac{T}{F} \pm \frac{M_z}{J}$$

式中　T——作用于计算截面上的轴向力;

F——单位圆周长度机墩的截面积;

M——作用于计算截面的弯矩;

Z——计算截面上的应力计算点到截面形心轴的距离;

J——计算截面惯性矩,m^4,$J = \frac{1 \times h^3}{12}$。

2.扭矩及水平离心力作用下的切应力τ的计算

(1)扭矩作用下的切应力计算。扭矩作用下在水平截面上产生环向切应力为:

正常扭矩:　$\tau_{x1} = \frac{M_n r \eta}{J_\rho} \varphi$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

短路扭矩：$\tau_{x2} = \dfrac{M'_n r\eta'}{J_\rho}$

$$J_\rho = \frac{\pi}{32}(D^4 - d^4)$$

$$\eta' = 2 \times \frac{1 + \frac{T_a}{t_1}(1 - e^{\frac{t_1}{T_a}})}{1 + e^{\frac{0.01}{T_a}}}$$

$$t_1 = \frac{30}{n_{03}}$$

式中 φ——疲劳系数，通常取 $\varphi = 2.0$；

η——动荷系数；

η'——冲击系数；

n_{03}——扭转自振频率，次/min；

J_ρ——圆断面极惯性矩，m^4；

d、D——计算圆环内、外直径，m；

T_a——发电机定子绕组时间因数，由厂家提供，一般为 0.15～0.45s；

其他符号含义同前。

(2)水平离心力作用下的切应力计算。水平离心力作用在水平截面上产生环向切应力

$$\left.\begin{aligned} &\text{正常运行} \quad \tau_{x3} = \frac{P_m \eta\varphi}{F} \\ &\text{飞逸} \quad \tau_{x4} = \frac{P_{mp} \eta\varphi}{F} \end{aligned}\right\}$$

式中 F——圆环截面积，m^2。

3.机墩强度校核

按第三强度理论进行校核。机墩内、外壁主拉应力 $\sigma_{主}$ 和最大切应力不应超过混凝土的强度允许值，一般控制 $\sigma_{主}$ 不超过允许值，以免布置斜向钢筋，否则应加大机墩尺寸。

$$\sigma_{主} = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau^2})$$

式中 σ_x——机墩内外壁计算点的正应力；

τ——机墩内外壁计算点的切应力，正常运行时 $\tau = \tau_{x1} + \tau_{x3}$，三相短路时，$\tau = \tau_{x1} + \tau_{x2} + \tau_{x3}$，飞逸时 $\tau = \tau_{x4}$。

若 $\sigma_{主} \leqslant R_L/K_h$/($R_L$ 为混凝土抗拉强度，K_h 为抗拉强度安全系数，参照设计规范采用)，可不配置斜向钢筋。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

4.孔边局部应力

机墩上开有进人孔及接力器孔，孔周将产生应力集中，一般可不计算，只需在孔周局部配置加强钢筋。对于高薄机墩，可将圆筒展开，按无限大平面上孔口近似计算孔周应力，据以配筋，具体计算方法可参考有关书籍。

(二)机墩动力计算

1.概述

机组运行过程中，有时会产生强烈的噪音和振动，严重妨碍电站的正常运行。设计中必须重视。除机组制造、安装、布置及运行管理过程中的必要措施外，结构设计中应严格防止机墩在动力荷载作用下发生共振与振幅过大现象，验算动力系数是否超过允许值，这些必须通过动力计算采取相应结构措施解决。

2.共振计算及校核

(1)垂直强迫振动频率。水轮机转轮叶片数比导叶数目少，机组转动过程中，水轮机流道与导水叶孔口每一次交汇都会造成一次水力跳动，产生水力不平衡动力荷载。这种水力跳动呈周期性变化，频率取决于两种叶片每分钟交汇的次数，按下式计算

$$n_1 = \frac{n_0 z_0 z_1}{z}$$

式中 n_1——垂直强迫振动频率；

z_0、z_1——导水叶叶片数及转轮叶片数；

z'——I_0 和 I_1 最大公约数；

其他符号含义同前。

(2)水平强迫振动频率。机组转动部分的质量偏心使机组在运行中产生水平离心力 P_m 或 P_{mp}，使机墩发生水平向的强迫振动，磁场磁拉力产生的扭矩 M_n、M'_n 引起机墩水平向扭转强迫振动。两种振动频率都为机组转速 n_0 或 n_p，即

正常运行 $n_2 = n_0$

飞逸 $n_3 = n_p$

此外，机组转动部分重量和轴向水推力会引起机墩垂直向振动，水击脉动压力及水轮机中的涡带和气蚀，也会引起机墩振动。由于难以正确计算，频率较低，共振计算中不予考虑。

实际机墩是一个多自由度体系，为便于计算，按照结构动力学的振动理论，将机墩混凝土的全部质量乘以 0.35 系数后移置在没有重量的机墩顶端，底端与蜗壳顶板连接构成一个弹性系统。为简化设计，在蜗壳进口断面处沿径向切取单宽圆筒与单宽顶板，并以单宽顶板作水平梁，梁的外端团结于蜗壳边墙，内端铰接于座环。研究这个单自由度系统无

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

阻尼的弹性振动问题，可求出机墩垂直向、水平向及扭转自振频率。

(3)垂直自振频率 n_{01}，按下式计算

$$n_{01} = \frac{60}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{G_1\delta_1}} = \frac{30}{\sqrt{G_1\delta_1}}(r/min)$$

$$G_1 = \sum P'_i + G_0 + G_S$$

$$G_S = tL_a\gamma_b\frac{r_a}{r_0}$$

$$\delta_1 = \delta_P + \delta_S$$

$$\delta_P = \frac{H_0}{E_hF}$$

$$\delta_S = \frac{1}{6E_{hm}J_a}\left[\frac{a^2}{2L_a^2}(3-\frac{a}{L_a})(3L_a^2d-d^3)-3a^2d\right]$$

式中 G_1——作用于单宽机墩顶端全部垂直荷载加上机墩自重及蜗壳顶部自重，N；

$\sum'_i$——作用于单宽机墩顶端的全部垂直荷载，N；

G_0——单宽机墩自重，N；

G_S——单宽蜗壳顶板重，N；

δ_1——单位垂直力作用下的变位(包括单宽机墩压缩变位及单宽蜗壳顶板垂直变位)，m/N；

δ_P——单位垂直力作用下单宽机墩垂直变位，m/N；

δ_S——单宽蜗壳顶板在单位垂直力作用下的挠度，计算简图见图 4-6-6，m/N；

E_h——混凝土受压弹性模量，C15 混凝土，$E_h = 22.54\times10^6$ kPa；

t——蜗壳单宽顶板厚度，m；

F——单宽机墩水平截面积，m^2；

H_0——单宽机墩高度，m；

γ_b——钢筋混凝土重度，N/m^3；

E_{hm}——混凝土受弯弹性模量，C15 混凝土，$E_{hm} = 14.21\times10^6$ kPa；

J_a——单宽蜗壳顶板截面惯性矩，m^4；

r_0、r_a 如图 4-6-6 所示，m；

其他符号含义见图 4-6-6。

(4)水平横向自振频率 n_{02}。将机墩作为下端固接、顶端自由的悬臂圆筒，断面形状为圆环，则

$$n_{02} = \frac{30}{\sqrt{G_2\delta_2}}$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

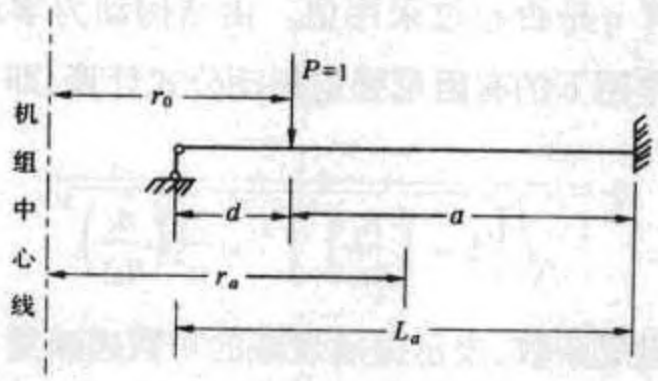


图 4-6-6　蜗壳顶板挠度计算简图

$$G_2 = \sum P'_i + 0.35G_0$$

$$\delta_2 = \frac{H_0^3}{3E_{hm}J_\rho}$$

式中　G_2——相当于集中在机墩顶端的当量荷载，N；

δ_2——机墩顶端在单位水平横向力作用下的水平变位；

J_ρ——机墩圆环截面对中注轴的惯性矩，$J_\rho = \pi(D^4 - d^4)/64$。

(5)水平扭转自振频率 n_{03}。下端固接、顶端自由的悬臂圆筒扭转自振频率为：

$$n_{03} = \frac{30}{\sqrt{J_\phi \phi}}$$

$$J_\phi = \sum P_i r_i^2 + 0.35G_0 r^2$$

$$\phi = \frac{H}{E'_h J_\rho}$$

式中　J_ϕ——集中作用于机墩顶端的全部垂直荷载的绕轴惯性矩；

r_i——机墩各部分荷载的旋转半径，m；

ϕ——机墩顶端在单位水平扭矩作用下的扭角，rad/(N·m)；

J_ρ——机墩圆环断面极惯性矩，$J_\rho = \pi(D^4 - d^4)/32$；

E'_h——混凝土剪切弹性模量，$E'_h = 0.425E_h$，kPa。

(6)共振核核，为避免发生共振，n_2 与 n_{0i}；应有足够的差额，须满足下列条件：

$$\left|\frac{n_{0i} - n_i}{n_{0i}}\right| > (20\% \sim 30\%)$$

或

$$\left|\frac{n_i - n_{0i}}{n_i}\right| > (20\% \sim 30\%)$$

3.动荷系数验算

机墩静力计算中，除轴向水推力外的所有动荷载，应乘以动荷系数后作为静荷载考

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

虑。机墩动力计算中应验算 η 是否超过采用值。由结构动力学理论知，η 可按单自由度系统在简谐变化动力荷载作用下的有阻尼强迫振动公式计算，即

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{n_i}{n_{0i}}\right)^2\right]^2 + \frac{\gamma_0^2}{\pi^2}\left(\frac{n_i}{n_{0i}}\right)^2}}$$

式中 γ_0——机墩的对数阻尼系数，表示振动衰减的对数递减量，由原型测定。钢筋混凝土结构可取 $\gamma_0 = 0.25 \sim 0.40$。$n_i$ 与 n_{0i} 的采用应是对应同一方向（垂直、水平、扭转）的频率。

当 n_i 与 n_{0i} 相差在 30% ~ 50% 以上时，阻尼影响可忽略不计，η 按下式计算

$$\eta = \frac{1}{1-\left(\frac{n_i}{n_{0i}}\right)^2}$$

由上式可知，当 n_i 接近于 n_{0i} 时，η 接近于无穷大，出现共振；当 $n_i \gg n_{0i}$ 时，$\eta < 1$，表明振动可由结构本身吸收。一般希望 $n_{0i} > n_i$。当机组转速高或采用轻型结构时，往往出现 $n_{0i} < n_i$，此时应注意在机组启动或停机过程中可能出现的短时共振问题。

4.振幅验算

为保证机墩正常工作，机墩振动最大振幅必须受到限制。垂直振幅应不大于 0.10 ~ 0.15mm；水平横向与扭转振幅之和应不大于 0.15 ~ 0.20mm。机墩在动力荷载作用下的振幅计算如下：

(1)垂直振幅 A_1。考虑阻尼影响，由一次自由度的结构有阻尼的振动方程求得垂直振幅为

$$A_1 = \frac{P_{\gamma 1}}{\frac{G_1}{g}\sqrt{(\lambda_1^2-\omega_1^2)^2 + 0.2\lambda_1^2\omega_1^2}} \quad (m)$$

$$\lambda_1 = \frac{2\pi n_{01}}{60} = 0.104\,7 n_{01}$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi n}{60} = 0.104\,7 n$$

$$\omega_{1p} = 0.104\,7 n\,p$$

式中 $P_{\gamma 1}$——作用于机墩上的垂直动荷载，N；

λ_1——机墩垂直振动自振圆频率，即 2π 秒内的振动次数，1/s；

ω——机墩垂直振动的强迫振动圆频率，1/s。

(2)水平横向振幅 A_2。机墩在水平横向力作用下的水平横向振幅为

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$A_2 = \frac{P_{y2}}{\frac{G_2}{g}\sqrt{(\lambda_2^2 - \omega_2^2)^2 + 0.2\lambda_2^2\omega_2^2}} \quad (m)$$

$$\lambda_2 = \frac{2\pi n_{02}}{60} = 0.104\,7n_{02}$$

$$\omega_2 = 0.104\,7n$$

式中 P_{y2}——作用于机墩上的水平振动荷载即离心力，按式计算，N；

λ_2——机墩水平振动自振圆频率，1/s；

ω_2——机墩水平振动的强迫振动圆频率，按式计算，1/s。

(3)水平扭转振幅 A_3。机墩在水平扭矩作用下的振幅为

$$A_3 = \frac{M_n R}{\frac{J_\phi}{g}\sqrt{(\lambda_3^2 - \omega_3^2)^2 + 0.2\lambda_3^2\omega_3^2}}$$

$$\lambda_3 = \frac{2\pi n_{03}}{60} = 0.104\,7n_{03}$$

$$\omega_3 = 0.104\,7n$$

式中 M_n——正常扭矩或短路扭矩，N·m；

R——机墩外半径，m；

λ_3——机墩水平扭转自振圆频率，1/s；

ω_3——机墩水平扭转强迫振动圆频率，按式计算，1/s。

以上公式中的 n 应分别以正常转速及飞逸转速代入计算。

(4)振幅校核。

垂直振幅 $A_1 \leqslant 0.10 \sim 0.15$mm

水平振幅 $A_2 + A_3 \leqslant 0.15 \sim 0.20$mm

(三)圆筒式机墩的配筋构造

圆筒式机墩一般采用 C15 混凝土，Ⅰ级钢筋，沿圆筒周围配置竖向钢筋、水平环向钢筋、孔口钢筋。一般不布置斜向钢筋。

(1)竖向受力钢筋。竖向受力钢筋数量由单宽圆筒偏心受压柱计算确定，除受力外，还起架立筋作用。钢筋按内力最大截面的需要配置，沿机墩内外壁各均匀布置一层，一般沿机墩高度不予切断。若机墩厚度较大，也可按少筋混凝土理论计算配筋。竖向钢筋直径一般不小于 16mm，间距不大于 30cm，与风罩的竖向受力钢筋应协调布置，以便连成整体钢筋骨架。弯入机墩顶部的竖向筋在定子基础板螺栓部位可局部加密。经验证明，圆筒式机墩的计算结果，往往按构造配筋。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(2)水平环向钢筋。水平环向钢筋起固定竖向钢筋和抵抗温度应力、混凝土收缩应力及环向力作用。由于机墩水平环向截面大,环向力相对较小,一般均按构造在机墩内外壁各布置一层。直径一般不小于12mm,间距不大于30cm,但在机墩顶部可适当加密。

(3)孔口一般不配置加强钢筋,大孔口应根据孔口应力计算结果,按应力大小在孔口布置环向钢筋。

四、风罩结构计算

机墩顶部为风罩。风罩墙内为发电机风道。小型机组的风罩墙可不进行结构计算,根据经验确定尺寸,按构造配筋,也满足动力计算要求。单机容量500kW或稍大的机组,风罩墙厚一般为0.15~0.20m;单机容量3000kW的机组,风罩墙厚度可为0.30m,钢筋间距不超过0.2~0.3m。竖向内外层钢筋常采用10~16mm,一般不超过16mm,钢筋间距0.20~0.30cm以下。孔洞周边按构造规定配筋。若孔口较大,孔周应配置加强钢筋。容量较大的机组,应通过结构计算,进行强度校核与动力计算。

(一)计算简图

风罩墙为钢筋混凝土有限长薄壁圆筒,下端团结于机墩顶部,上端与发电机层楼板连接。当为整体式或简支式连接时,均按铰接处理,若为分离式时按自由端计算。作用在风罩墙顶部的所有荷载均假定沿圆周均布。其他假定及要求与圆筒式机墩相同。

(二)荷载及荷载组合

荷载主要有风罩墙自重A_1、发电机层楼板传来的荷载A_2、风罩墙内外壁温差引起的温度荷载A_3、发电机上机架千斤顶推力A_4及施工荷载A_5。

风罩墙荷载组合按表4-6-3采用。

表4-6-3　荷载组合表

荷载组俣	计算情况	荷载名称				
		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
基本组合	正常运行	√	√		√	
特殊组合	1.正常运行+温度影响力	√	√	√	√	
	2.施工期	√	√			√

(三)风罩墙结构计算

(1)静力计算。将风罩墙作为有限长薄壁圆筒,沿径向切取单位圆周长度的竖条,按

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

下端固接，上端铰接或自由的直立梁计算内力。

(2)动力计算。计算方法与机墩机同，中小型机组一般不进行单独计算。

【例1】 某引水式水电站地面厂房装设2台立轴机组，单机容量4000kW，采用圆筒式机墩，试进行机墩结构计算。

解：

计算内容及步骤如下。

1.设计假定和计算原则

(1)水电站装机容量 $N_{装}=2\times4000kW$，机墩按Ⅵ级建筑物设计。

(2)机墩按下端固定、上端自由的圆筒计算。

(3)发电机层楼板传给风罩墙的荷载按一台机组楼板上全部荷载的一半计算，均匀分布在机墩顶部的圆周上。

(4)静力计算中，除轴向水推力外，其他动荷载均乘以动力系数 η，先假定 $\eta=1.5$。

(5)机墩垂直自振频率计算中，蜗壳顶板在垂直荷载作用下的变形，取蜗壳进口断面计算。

(6)共振验算时，机墩自振频率与强迫振动频率之差应大于20%～30%；动力荷载引起的水平向振幅不应大于0.15～0.20mm，垂直向振幅不应大于0.10～0.15rum。

(7)不考虑混凝土温度和收缩应力的影响。

2.基本资料

(1)水轮机基本数据(厂家资料)。

带轴转轮重(其中轴重20.68kN)	39.2kN
轴向水推力	463.15kN
转轮叶片数	15
导水叶数	16

(2)发电机基本数据(厂家资料)。

发电机额定容量	4000kW
发电机额定转速	300r/min
发电机飞逸转速	660r/min
发电机总重	450kN
发电机带轴转子重	232.65kN
发电机定子重	117.60kN
发电机上机架重	66.64kN
发电机下机架重	14.70kN

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

励磁机总重 37.83kN

励磁机转子带轴重 19.60kN

发电机附属设备重 20.58kN

推力轴承负荷(带轴转子 + 带轴转轮 + 励磁机转子 + 轴向水推力) 754.60kN

顶起转子时下机架总负重(只在停机时或启动时产生,包括下机架重、带轴转子重、带轴转轮和部分水推力) 294kN

正常运行时定子基础总负重(包括发电机除下机架外的总重、水轮机带轴转轮、轴向水推力) 980kN

机组转动部分质量偏心距 e 0.0005m

(3)机组其他资料。

正常运行时定子基础所受扭矩 127.4kN·m

短路时定子基础所受扭矩 796.25kN·m

制动时下机架基础所受扭矩 7.71kN·m

(4)机墩型式和尺寸。

圆筒式机墩的型式和尺寸,根据设备布置及结构构造要求,并参照其他实际工程经验,经拟定如图 4-6-7 所示。

3.荷载计算

(1)机墩自重。取单位圆周长度计算(忽略牛腿及进人孔面积部分重)

$$P_1 = 0.3 \times (1.255 + 0.07) \times 24.5 = 9.74(kN/m)$$

$$P_2 = 1.1 \times 0.505 \times 24.5 = 13.61(kN/m)$$

$$P_3 = 1.0 \times 1.97 \times 24.5 = 48.27(kN/m)$$

(2)发电机层楼板传下的荷载。取一台机楼板总荷载(包括楼板活荷载及楼板自重)的一半均匀作用于机墩风罩墙顶,按单位圆周长度计算:

楼板活荷载 11.76kN/m^2,一台机楼板总面积为 7×11.6m^2,则一台机楼板传下的荷载为

$$11.76 \times (7 \times 11.64 - \frac{1}{4}\pi \times 5^2) \times \frac{1}{2} = 362.06(kN)$$

楼板自重(楼板折算厚度 17.5cm)

$$0.175 \times (7 \times 11.6 - \frac{1}{4} \times \pi \times 5^2) \times \frac{1}{2} \times 24.5 = 132(kN)$$

发电机层楼板传下的总荷载为

$$362.06 + 132 = 494.06(kN)$$

作用在机墩部单位圆周长度上的荷载

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

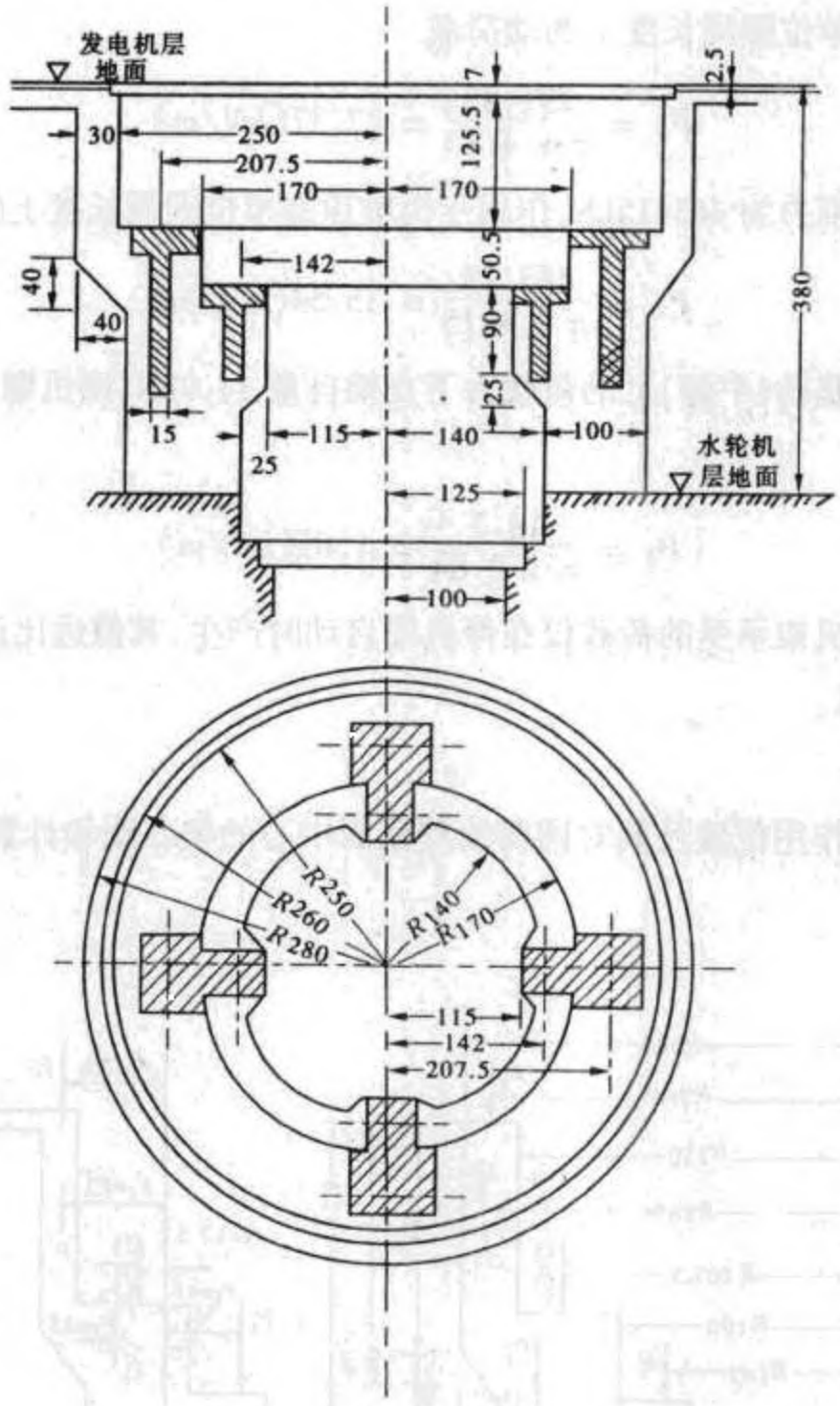


图 4-6-7　圆筒式机墩构造尺寸(单位:cm)

$$P_4 = 494.06(\pi \times 5.3) = 29.69(kN/m)$$

(3)机组设备荷载。作用在上机架和定子基础板上的荷载力机组固定设备重(上机架重+定子重+励磁机定子重+附属设备重)

$$P' = 66.64 + 117.60 + 18.23 + 20.58 = 223.05(kN)$$

则作用于机墩顶部单位圆周长度上的荷载

$$P_5 = \frac{223.05}{\pi \times 4.15} = 17.12(kN/m)$$

机组转动部分荷载(带轴转子重+励磁机转子重+带轴转轮重)

$$P'' = 232.65 + 19.60 + 39.20 = 291.45(kN)$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

则作用于机墩顶端单位圆周长度上的动荷载

$$P_6 = \frac{291.45}{\pi \times 4.15} = 22.37(kN/m)$$

水轮机轴向水推力为463.15kN,作用于机墩顶部单位圆周长度上的动荷载

$$P_7 = \frac{463.15}{\pi \times 4.15} = 35.54(kN/m)$$

作用在下机架基础(牛腿)上的荷载为下支架自重14.7kN,则机墩单位圆周长度上的荷载

$$P_8 = \frac{14.7}{\pi \times 2.84} = 1.65(kN/m)$$

顶起转子时下机架承受的荷载仅在停机或启动时产生,其值远比正常运行时小,不起控制作用,不予计算。

4.静力计算

各荷载的实际作用位置及其对圆筒筒壁截面中心的偏心距和计算简图,如图4-6-8所示。

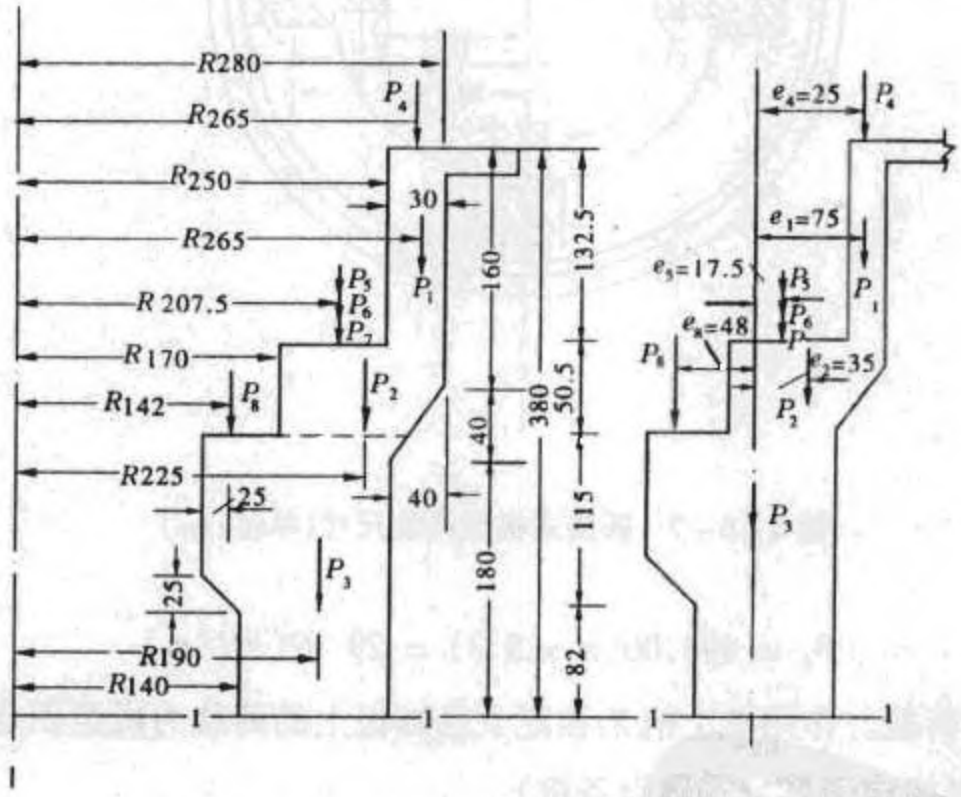


图4-6-8 机墩计算简图(尺寸单位:cm)

将机墩上的各荷载换算为相当圆筒圆周上(机墩壁中心周长)的单位圆周长荷载:

相当圆筒直径取机墩壁截面中心线直径,D=3.8m,壁厚h=1.0m。计算成果见表4-6-4。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表4-6-4 化引荷载计算表

荷载名称		实际作用线圆周直径(m)	化引荷载P′计算(kN)	化引荷载 P'_i (kN)	偏心距 e_i (m)	弯矩 M=(4)×(5) (kN·m)
(1)		(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
机墩自重	P_1	5.3	9.74×5.3/3.8=13.58	13.58	0.75	10.185
	P_2	4.5	13.61×4.5/3.8=16.12	16.12	0.35	5.642
	P_3	3.8	48.27	48.27	0	0
楼板传来荷载	P_4	5.3	29.69×5.3/38=41.41	41.41	0.75	31.06
机组设备荷载	固定部分重 P_5	4.15	17.12×4.15/3.8=18.70	18.70	0.175	3.272
	转动部分重 P_6	4.15	22.37×4.156.8=24.43	24.43×1.5=36.645	10.175	6.41
	水推力 P_7	4.15	35.54×4.15/3.8=38.81	38.81	0.175	6.792
	下支架重 P_8	2.84	1.65×2.84/3.8=1.23	1.23	-0.48	-0.592
Σ				214.765		62.769

根据机墩高度 H=2.475m,计算 πS,判断计算方法。已知混凝土 $\mu=0.167$,$r_0=1.90$m,h=1.0m,则

$$S=\sqrt{r_0h_0}/\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}=\sqrt{1.9\times1.0}/\sqrt[4]{3(1-0.167^2)}=1.055$$

πS=3.14×1.055=3.31>H=2.475m,机墩为圆筒,切取单位圆周长度按偏心受压柱计算。根据式可得机墩底部截面正应力

$$\sigma_x=\frac{P_0}{F}\pm\frac{M_0z}{J}=\frac{214.765}{1\times1}=\frac{62.769\times0.5}{1\times1^3\times1/12}=\begin{matrix}+591.379\\-161.849\end{matrix}\quad(kPa)$$

在圆筒底部截面内缘出现拉应力161.849kPa,因应力不大,按构造配筋。

5.动力计算

(1)动力荷载强迫振动频率。

①垂直向强迫振动频率:

$$n_1=\frac{n_0z_0z_1}{z'}=\frac{300\times16\times15}{1}=72000(次/min)=1200Hz$$

②水平强迫振动频率:

$$n_2=n_0=300次/min$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$n_3 = n_p = 660\text{次}/min$$

(2)机墩自由振动频率。

①垂直自振频率：

$$n_{01} = 30/\sqrt{G_1\delta_1}(\text{次}/min)$$

G_1 按式计算

$$G_1 = \sum P'_i + G_0 + G_S = P'_1 + P'_4 + P'_5 + P'_6 + P'_7 + P'_8 + P'_2 + P'_3 + G_S$$

蜗壳顶板厚 0.80m，长 2.0m，故

$$G_S = tL_a\gamma_b r_a/r_0 = 0.8 \times 2 \times 24.5 \times 2.4/1.9 = 49.52(kN)$$

故

$$G_1 = 13.58 + 41.41 + 18.70 + 24.43 + 38.81 + 1.23 + 16.12 + 48.27 + 49.52$$
$$= 252.07(kN)$$

$$\delta_1 = \delta_P + \delta_S$$

$$\delta_P = \frac{H}{E_h F} = \frac{2.475}{22\,540 \times 10^6 \times 1} = 1.098 + 10^{-10}(m/N)$$

δ_S 根据式计算，计算简图如图 4-6-9，具体计算如下

$$\delta_S = \frac{1}{6 \times 14\,210 \times 10^6 \times 1 \times 0.8^3/12}\left[\frac{1.5^2}{2 \times 2^2}\left(3 - \frac{1.5}{2}\right)(3 \times 2^2 \times 0.5 - 0.5^3)\right.$$
$$\left. - 3 \times 1.5^2 \times 0.5\right] = 9.423 \times 10^{-11}(m/N)$$

$$\delta_1 = 1.098 \times 10^{-10} + 0.9423 \times 10^{-10} = 2.0403 \times 10^{-10}(m/N)$$

$$n_{01} = \frac{30}{\sqrt{252\,070 \times 2.040\,3 \times 10^{-10}}} = 4\,183(\text{次}/min)$$

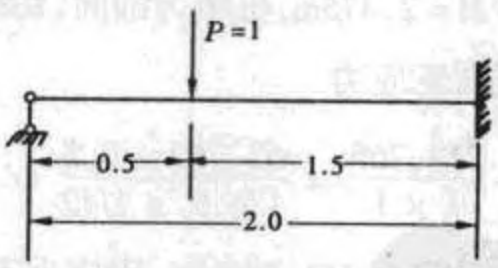


图 4-6-9 蜗壳顶板挠度计算简图
(单位：m)

②水平横向自振频率：

$$n_{02} = 30/\sqrt{G_2\delta_2}(\text{次}/min)$$

$$G_2 = \pi D G'_2$$

$$G'_2 = \sum P'_i + 0.35G_0$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$= P'_1 + P'_4 + P'_5{}' + P'_6 + P'_7 + P'_8 + 0.35(P'_2 + P'_3)$$

$$= 13.58 + 41.41 + 18.70 + 24.43 + 38.81 + 1.23 + 0.35 \times (16.12 + 48.27)$$

$$= 160.697(kN)$$

故

$$G_2 = \pi \times 3.8 \times 160.697 = 1\,917.44(kN)$$

$$\delta_2 = \frac{H_0^3}{3E_{hm}J_\rho} = \frac{2.475^3}{3 \times 14\,210 \times 10^6 \times \pi \times (4.8^4 - 2.8^4)/64}$$

$$= 1.54 \times 10^{-11}(m/N)$$

得

$$n^{02} = 30/\sqrt{1\,917\,440 \times 1.54 \times 10^{-11}} = 5\,521(\text{次}/min)$$

③水平扭转自振频率：

$$n_{03} = 30/\sqrt{J_\phi \Phi}(\text{次}/min)$$

J_ϕ 按式计算，见表 4－6－5。Φ 按式计算如下

$$\Phi = \frac{2.475}{0.425 \times 22\,540 \times 10^6 \times \pi \times (4.8^4 - 2.8^4)/32}$$

$$= 0.05601 \times 10^{-10}[rad/(N \cdot m)]$$

$$n_{03} = 30/\sqrt{9\,919\,740 \times 0.560\,1 \times 10^{-10}} = 4\,021.5(\text{次}/min)$$

表 4－6－5　　J_ϕ 计算表

荷载名称	P''_i 荷载计算(kN)	r_i (m)	r_i^2 (m^2)	$P_i r_i^2$ ($kN \cdot m^2$)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
风罩墙自重 P_1	$P''_1 = 9.74 \times \pi \times 5.3 = 162.10$	2.65	7.02	1 137.9
楼板传来荷载 P_4	$P''_4 = 29.69 \times \pi \times 5.3 = 494.10$	2.65	7.02	3468.6
机组固定设备重 P_5	$P''_5 = 17.12 \times \pi \times 4.15 = 223.10$	2.075	4.31	961.52
机组转动部分重 P_6	$P''_6 = 22.37 \times \pi \times 4.15 = 291.50$	2.075	4.31	1 256.38
轴向水推力 P_7	$p''_7 = 35.54 \times \pi \times 4.15 = 463.12$	2.075	4.31	1 996.06
下支架重 P_8	$P''_8 = 1.65 \times \pi \times 2.84 = 14.72$	1.42	2.02	29.72
机墩自重 $P_2 + P_3$	$0.35P_2 = 0.35 \times 136 \times \pi \times 4.5 = 67.26$ $0.35P_3 = 035 \times 48.27 \times \pi \times 38 = 202.10$	2.25 1.90	5.06 3.61	340.33 729.23
$J_\phi = \sum P_i r_i^2$				9 919.74

(3)共振校核。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

①垂直方向：

$$n_1 = 72\,000\text{次}/min, n_{01} = 4\,183\text{次}/min$$

$$\left|\frac{n_{01} - n_1}{n_1}\right| = \left|\frac{4\,183 - 72\,000}{72\,000}\right| = 0.941\,9 > 0.2 \sim 0.3$$

②水平方向：

$n^2 = 300$ 次/min，$n_{02} = 5\,521$ 次/min；$n_3 = 660$ 次/min，$n_{03} = 4\,021.5$ 次/min

$$\left|\frac{n_{02} - n_1}{n_{02}}\right| = \left|\frac{5\,521 - 300}{5\,521}\right| = 0.95 > 0.2 \sim 0.3$$

$$\left|\frac{n_{03} - n_3}{n_{03}}\right| = \left|\frac{4\,021.5 - 660}{4\,021.5}\right| = 0.836 > 0.2 \sim 0.3$$

计算结果均大于规定值，不会发生共振。

(4)动力系数验算。计算结果表明，机墩强迫振动频率与机墩自振频率相差较大，故动力系数验算中忽略阻尼影响。动力系数计算如表 4-6-6 所示。可见，计算所得动力系数均很小，原设计采用值 1.5 偏于安全。

表 4-6-6　　动力系数 η 计算表

振动方向	垂直方向	水平方向			
		横向		扭转	
$\frac{n_i}{n_{0i}}$	$\frac{72\,000}{4\,183}$	$\frac{300}{5\,521}$	$\frac{660}{5\,521}$	$\frac{300}{4\,021.5}$	$\frac{660}{4\,021.5}$
$\eta = \frac{1}{1-\left(\frac{n_i}{n_{0i}}\right)^2}$	-0.003 387	1.002 96	1.014 5	1.005 6	1.027 7

(5)振幅验算。

①垂直振幅 A_1 计算：A_1 按式计算。垂直向动力荷载 $P_{v1} = P'_6 + P'7 = 24.43 + 38.81 = 63.24$(kN)。前已求得 $G_1 = 252.07$kN，故

$$\lambda_1 = 0.1047 n_{01} = 0.1047 \times 4183 = 437.96(1/s)$$

$$\omega_1 = 0.1047 n = 0.1047 \times 300 = 31.41(1/s)$$

$$\omega_{1p} = 0.1047 n_p = 0.1047 \times 660 = 69.10(1/s)$$

$$A_1 = \frac{63\,240}{\frac{252\,070}{10} \times \sqrt{(437.96^2 - 31.41^2)^2 + 0.2 \times 437.96^2 \times 31.41^2}}$$

$$= 0.000\,013\,14(m) = 0.013\,14(mm)$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$A_{1p} = \frac{63\,240}{\frac{252\,070}{10} \times \sqrt{(437.96^2 - 69.10^2)^2 + 0.2 \times 437.96^2 \times 69.10^2}}$$

$$= 0.000\,013\,38(m) = 0.013\,38(mm)$$

②水平横向振幅 A_2 计算:按式计算,前已求得 $G_2 = 160.697kN$。

正常运行 $P_{v2} = 0.001\,1 \times 0.000\,5 \times 291.45 \times 300^2 = 14.43(kN)$

飞　逸 $P_{v2p} = 0.001\,1 \times 0.00\,5 \times 291.45 \times 660^2 = 69.43(kN)$

$$\lambda_2 = 0.1047 n_{02} = 0.1047 \times 4183 = 578.05(1/s)$$

$$\omega_2 = 0.1047 n = 0.1047 \times 300 = 31.41(1/s)$$

$$\omega_{2p} = 0.1047 n_p = 0.1047 \times 660 = 69.10(1/s)$$

$$A_2 = \frac{14\,430}{3.8\pi \times \frac{160\,697}{10} \times \sqrt{(578.05^2 - 31.41^2)^2 + 0.2 \times 578.05^2 \times 31.41^2}}$$

$$= 0.226 \times 10^{-6}(m) = 0.000\,226(mm)$$

$$A_{2p} = \frac{69\,830}{3.8\pi \times \frac{160\,697}{10} \times \sqrt{(578.05^2 - 69.1^2)^2 + 0.2 \times 578.05^2 \times 69.1^2}}$$

$$= 1.103 \times 10^{-6}(m) = 0.001\,103(mm)$$

③水平扭转振幅 A_3 计算:按式计算,前求得 $J_\phi = 9919.74kN \cdot m^2$,机墩外半径 $R = 2.40m$。

正常扭矩 $M_n = 127.40kN \cdot m$;短路扭矩 $M'_n = 796.25kN \cdot m$。

$$\lambda_3 = 0.1047 n_{02} = 0.1047 \times 4021.5 = 421.05(1/s)$$

$$\omega_3 = 0.1047 n = 0.1047 \times 300 = 31.41(1/s)$$

$$\omega_{3p} = 0.1047 n_p = 0.1047 \times 300 = 69.10(1/s)$$

$$A_3 = \frac{127\,400 \times 2.40}{\frac{9\,919\,740}{10} \times \sqrt{(421.05^2 - 31.41^2)^2 + 0.2 \times 421.05^2 \times 31.41^2}}$$

$$= 1.74 \times 10^{-6}(m) = 0.001\,74(mm)$$

$$A_{3p} = \frac{796\,250 \times 2.40}{\frac{9\,919\,740}{10} \times \sqrt{(421.05^2 - 69.1^2)^2 + 0.2 \times 421.05^2 \times 69.1^2}}$$

$$= 1.114 \times 10^{-5}(m) = 0.0111\,4(mm)$$

4)振幅校核。

垂直振幅 $A_1 = 0.013\,14mm < 0.15mm$;$A_{1p} = 0.013\,38mm < 0.15mm$。

水平振幅 $A_2 + A_3 = 0.000\,226 + 0.001\,74 = 0.001\,966mm < 0.15mm$;

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$A_{2p} + A_{3p} = 0.001\ 103 + 0.011\ 14 = 0.012\ 243\text{mm} < 0.15\text{mm}。$$

由上知，振幅校核均满足要求。

6.机墩配筋

经过计算，强度与振动均满足要求。钢筋配置按结构要求确定，具体配筋见图 4－6－10。

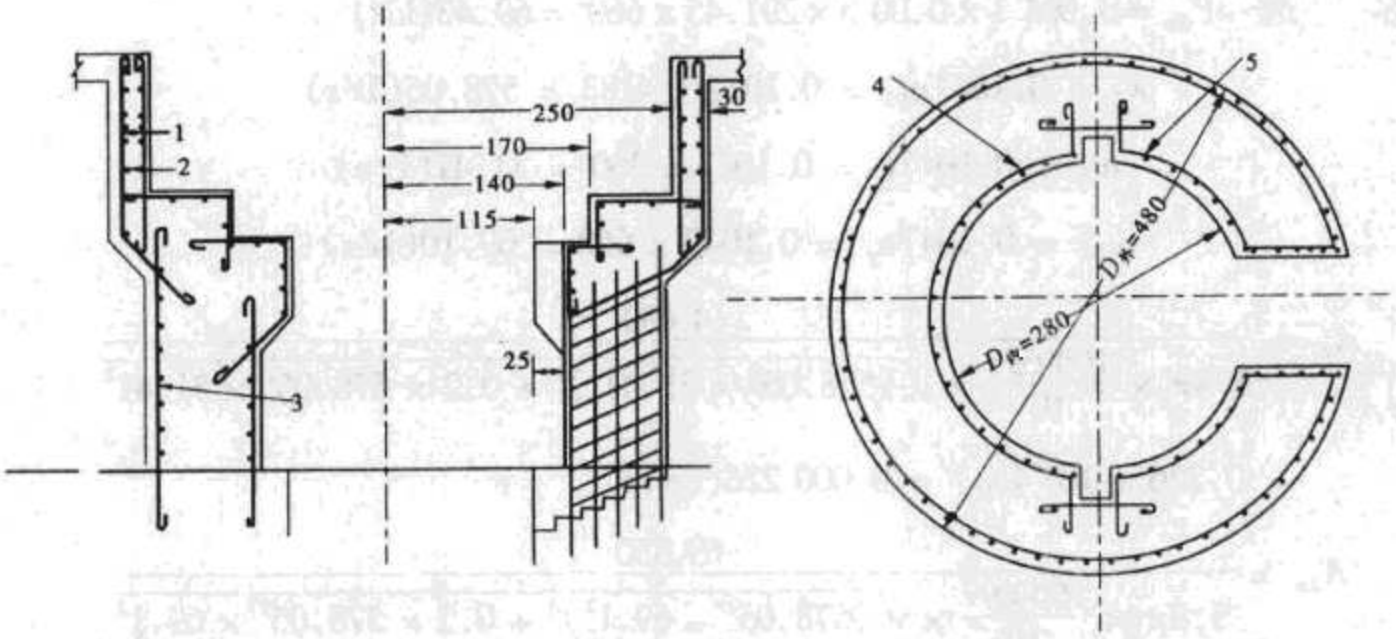


图 4－6－10 某机组圆筒式机墩配筋图(尺寸单位：cm)
1—竖向钢筋 ϕ16@25；2—水平环向钢筋 ϕ12@25；
3—竖向钢筋 ϕ16@25；4—竖向钢筋；5—水平环向钢筋

第二节 厂房的设备选用

厂房的设备布置主要是厂房内机电设备的布置。水轮发电机组(简称机组)是厂房中最重要的设备，它对厂房的尺寸、结构与布置影响最大，所以，在厂房设计时，大都从机组的布置入手。厂房的设备布置往往要有一个由粗到细的过程，当选定了水电站的主要参数及水利枢纽的布置方案后，根据选用的机组型式，结合当地的地形、地质和水文等条件，确定水轮机的安装高程，布置机组的位置并粗定厂房的轮廓尺寸，然后再分层进行各种设备的布置，进而研究细部结构尺寸，如此反复进行。下面就分层介绍各种设备的布置，对细部结构尺寸不进行研究。

一、发电机层的设备布置

发电机层是主厂房内宽敞、明亮，工作条件最好的场所，是运行值班人员集中的地方。所以，需要经常监视和操作机组的设备均应布置在此层。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(一)发电机的布置方式

1.开敞式布置

这种布置方式,发电机定子露在发电机层地面之上,如图4-6-11(a)所示。在我国用得较少。

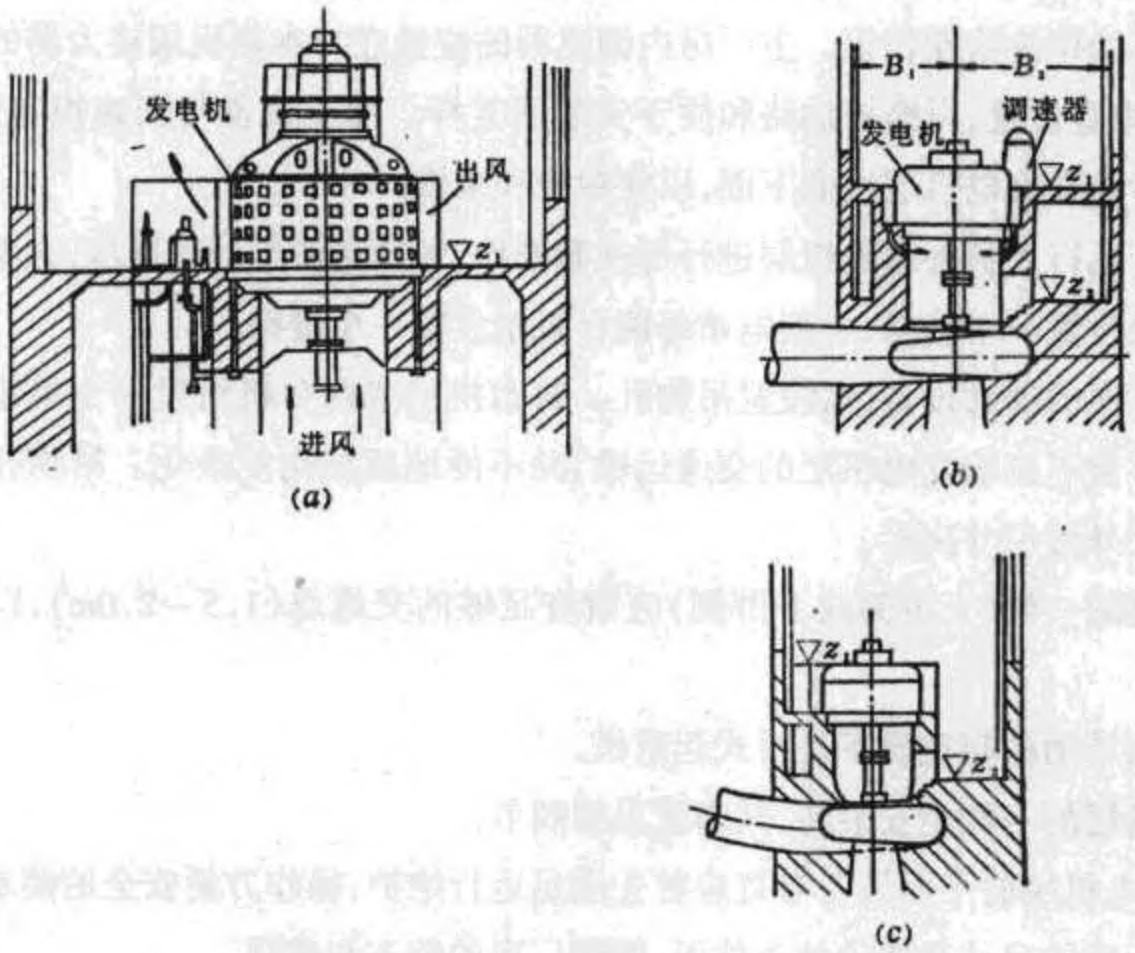


图4-6-11　发电机的布置方式示意图
(a)开敞式布置;(b)埋入式布置;(c)半岛式布置

2.埋入式布置

埋入式布置方式,发电机定子埋设在发电机层地面之下,如图4-6-11(b)所示。采用这种布置方式,发电机层比较宽敞,便于控制设备的安装、维护,发电机通风冷却效果较好(不适用于开敞式冷却通风)。在多数情况下,抬高发电机层地面,有利于采光、通风和对外交通联系。我国许多电站都采用这种布置方式。

3.半岛式布置

半岛式布置方式,发电机的一侧埋入地板,另一侧没有发电机层,如图4-6-11(c)所示。在埋入一侧可布置发电机引出线,也可布置川流式通风道。这种布置的优点是,调速器布置在低侧层,接近水轮机。但厂房显得拥挤,机组安装、检修均不方便,故采用较少。

(二)发电机层布置的主要设备

发电机层布置的主要设备,除发电机及其励磁装置外,还有机旁盘、调速器的操作柜

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

和油压装置、起重设备、上下交通用楼梯和吊物孔等。

机旁盘通常有3~4块盘面，布置在上游或下游一侧靠近墙壁光线柔和处，并尽可能靠近调速器操作柜和油压装置，三者之间应留有大于1m的空间，以便运行人员监视。如发电机层较空，励磁盘也可以布置在此层。

调速器通常包括操作柜、油压装置和导叶接力器三部分。接力器布置在水轮机层，通过回复杆将其动作传给操作柜。主厂房内调速器的位置应与水轮机层接力器的布置相对应，有相应的垂直位置，可缩短油路和便于安装回复杆。油压装置与调速柜布置在一起，其间连接油管设在发电机层地面下面，以便检查和维修。

为了便于运行人员去水轮机层进行巡视和操作，尤其是便于处理事故，大型电站常常在每一机组段设置一个楼梯，中型电站每两台机组设置一个楼梯。

为吊运下层的辅助设备，需设置吊物孔。每台机组或两台机组设一个吊物孔。布置吊物孔时应尽量不影响发电机层的交通运输，并不使地板结构复杂化。吊物孔尺寸由被吊设备的最大外形尺寸决定。

发电机层的一侧(上游侧或下游侧)应留有足够的交通道(1.5~2.0m)，以使运送小件设备。

主厂房内常用的起重设备是桥式起重机。

在发电机层的一端是安装间，其布置见第四节。

总之，发电机层的平面设备布置应首先满足运行维护，操作方便安全的要求，其次，还要在不增加厂房的尺寸和造价的条件下，照顾厂房的整齐和美观。

图4-6-12为某水电站厂房发电机层布置图。厂内装置7500kw立式水轮发电机组四台，发电机采用埋入式，风罩上部盖板与地面齐平。调速器的操作柜与油压装置装在一起，布置在机组的正上游侧。机旁盘四块，在上游侧靠墙处与调速器并列。由于下层设备集中在1号、2号机组段，故只在它们之间设有1.5×1.2m吊物孔一个。两台机组设一通往下层的楼梯，位于两台机组之间。由于利用下游侧吊运水轮机转轮，故留的通道较宽。纵剖面见图4-6-15。

图4-6-16为发电机层布置的另一实例。该电站装有75MW水轮发电机组两台，发电机机墩为圆筒式。机旁盘和电液调速器(DT-100)布置在上游侧，油压装置布置在机组间空位处靠近调速器一侧。下游侧两机组间设有两个吊物孔(2×2m)，专供吊运下层的深井水泵。为吊运下层的辅助设备，在1号机下游侧设有3×3m吊物孔一个。在端机组段上游侧和1号机下游侧(副厂房内)各设有通往水轮机层的楼梯一个。图4-6-17为该电站厂房的横剖面图。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

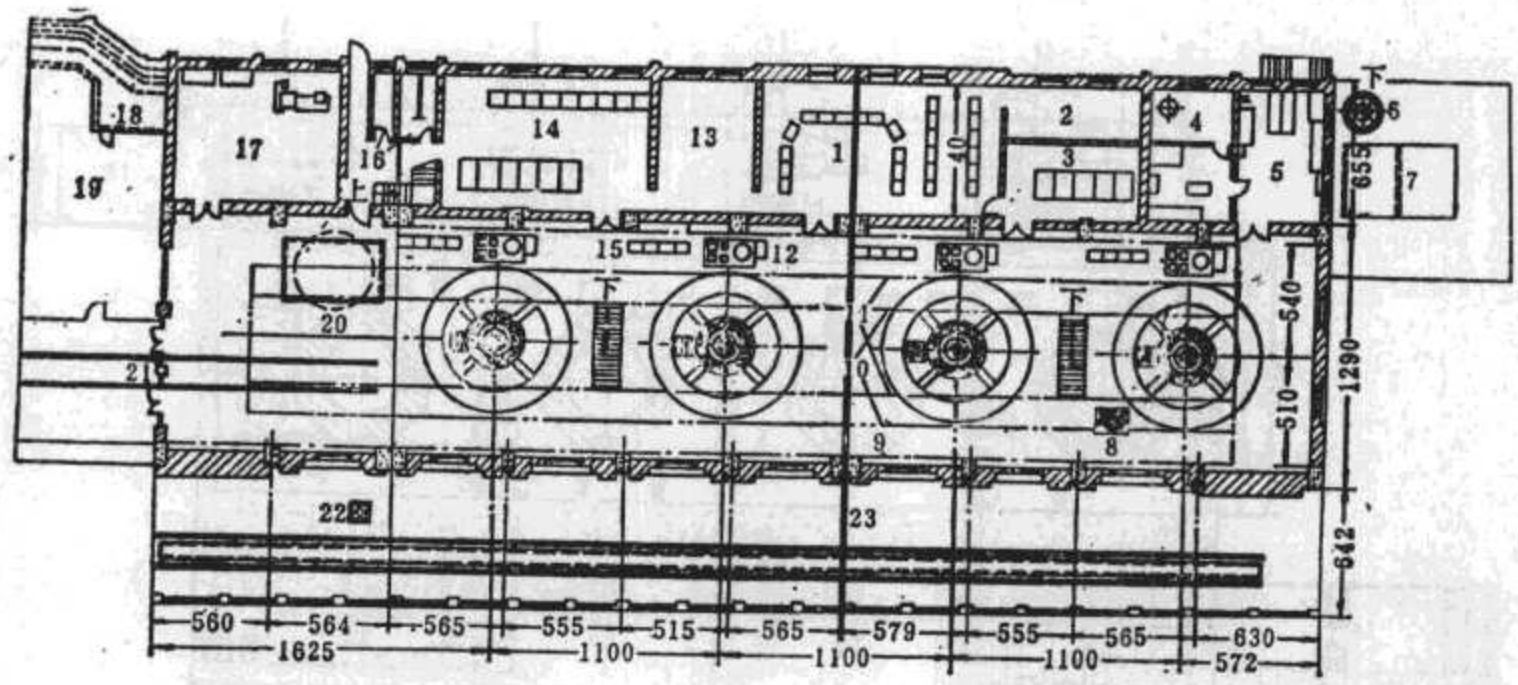


图 4－6－12　发电机层平面布置图

（▽94.5）

1—中控室；2—载波电话室；3—开关室；4—高压室；5—仪表试验室；6—转梯；7—蝶阀吊井；8—吊物孔；9—吊车轨道中心线；10—副钩极限工作线；11—主钩极限工作线；12—调速器；13—值班室；14—开关及厂用配电室；15—机旁盘；16—男、女厕所；17—机电修理室；18—母线道；19—升压站；20—变压器、转子检修坑；21—变压器进厂轨道；22—进人孔；23—分缝

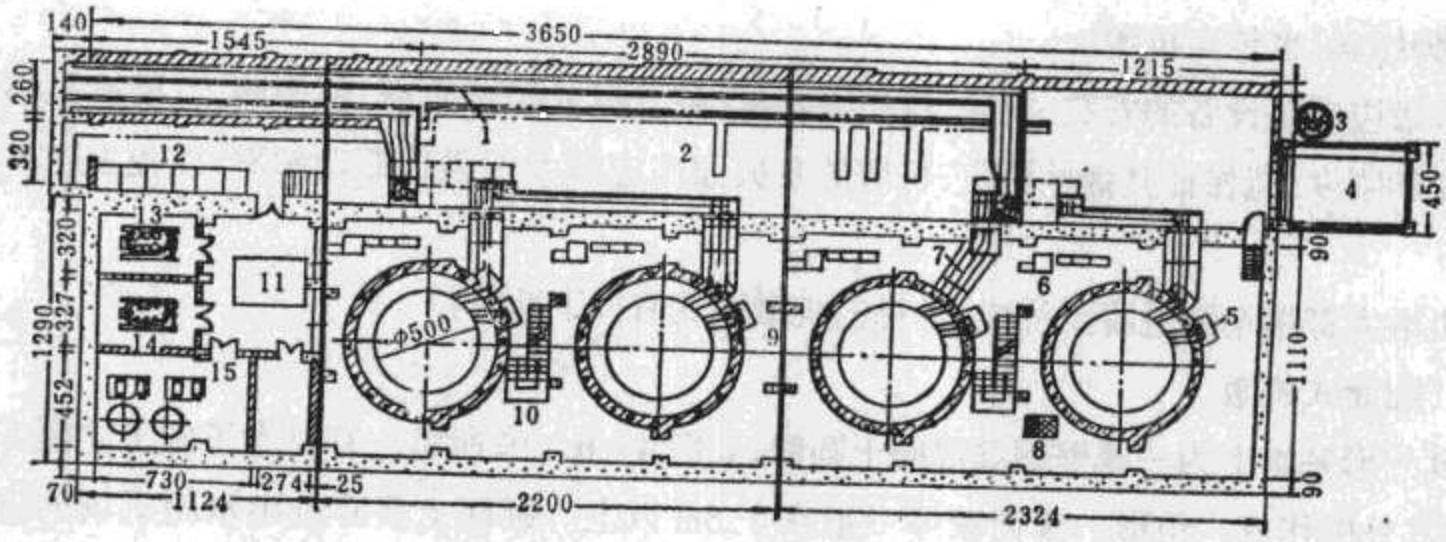


图 4－6－13　出线夹层平面布置图

（▽90.8）

1—母线道；2—电缆层；3—转梯 z4—蝶阀吊井；5—发电机中性点；6—励磁盘；7—出线；8—吊物孔；9—伸缩缝；10—楼梯；11—试重块；12—近区配电室；13、14—厂变；15—空压机室

（三）发电机的机墩

水轮机层的净空面积与发电机支承结构型式和尺寸关系很大。发电机的机墩承受着机组的巨大荷载，水轮机、发电机转动部分的重量和作用在转轮上的轴向水推力，都传递至机墩，其数值大到几百甚务上千吨，且动荷载占很大比重。机墩还承受转动扭矩，发生事故时的短路扭矩比正常运行时的水平扭矩要大好几倍。扭矩通过发电机定子的固定螺

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

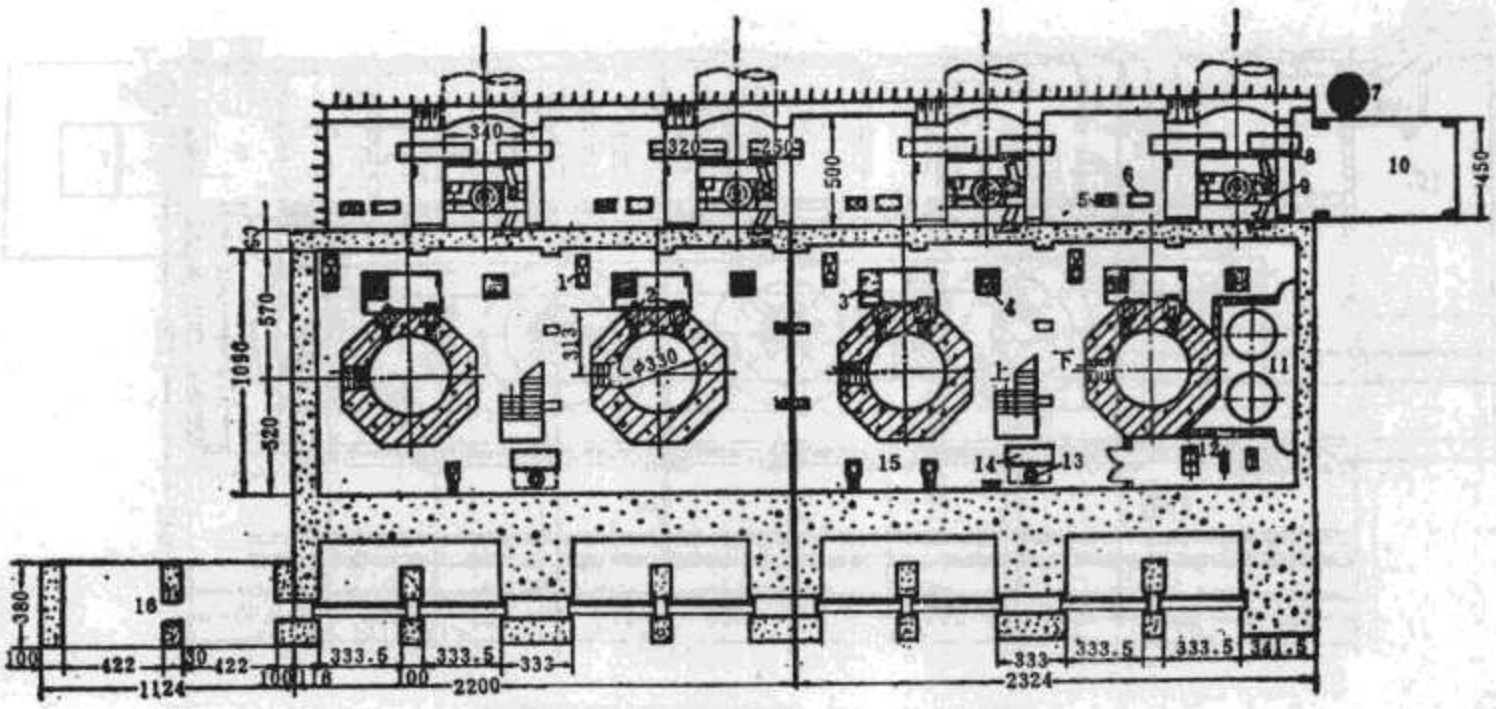


图 4-6-14 水轮机层平面布置图

(▽87.1)

1—高压空压机;2—接力器;3—尾水管进人孔;4—蜗壳进人孔;5—油泵;6—蝶阀控制柜;7—转梯;8—伸缩节;9—蝶阀;10—蝶阀吊井;11—贮油室;12—油处理室;13—深井泵;14—集水井;15—供水泵;16—闸门间

栓(底脚螺丝)也传至机墩。

机墩应满足设备的安装、检修、维护等要求;要求尺寸经济合理,便于施工;要有足够的强度和刚度,能保证其弹性稳定;机墩的自振频率应远大于强迫振动频率,以免发生共振。

机墩大都用钢筋混凝土浇成,常见的机墩型式有以下几种:

1.圆筒式机墩

其外形基本上为一厚壁钢筋混凝土圆筒,如图 4-6-19 所示。有时为了施工立模方便,将其外围作成八角形。圆筒壁厚一般在 1.5m 以上。圆筒上要开进出水轮机坑的进人门,宽 1.0~1.2m,高 1.8~2.0m。进人门通常开在蜗壳断面较小的部位,以免过多削弱蜗壳外围混凝土结构。

圆筒式机墩的优点是,刚度大、抗扭抗振性能好、结构简单、施工方便,我国大中型电站广为采用;缺点是混凝土用量较多,水轮机坑空间较小,对水轮机安装、检修和运行维护不大方便,管道埋设较复杂。

2.平行墙式机墩

机墩由建筑在蜗壳顶部的两道平行钢筋混凝土墙及横跨于此垂直墙上的二平行梁所组成,如图 4-6-20 所示。这种机墩的刚度及抵抗水平力的性能较圆筒式机墩差,但施工方便,造价较低,对设备布置和水轮机安装、检修均极有利。目前国外很多大中型水电站采用这种机墩,但国内还很少采用。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

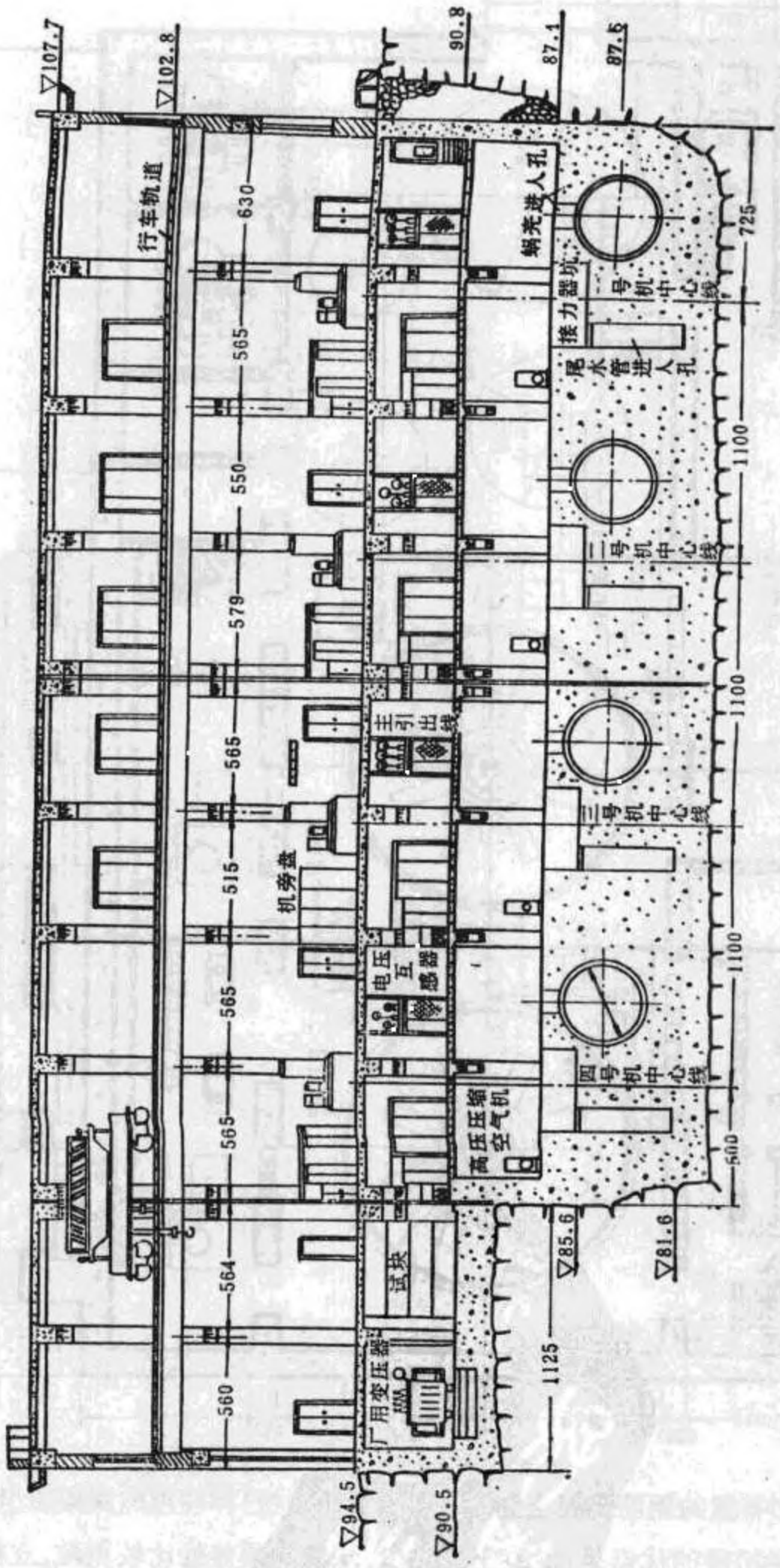


图4-6-15 主厂房纵剖面图

3.环形梁式机墩

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

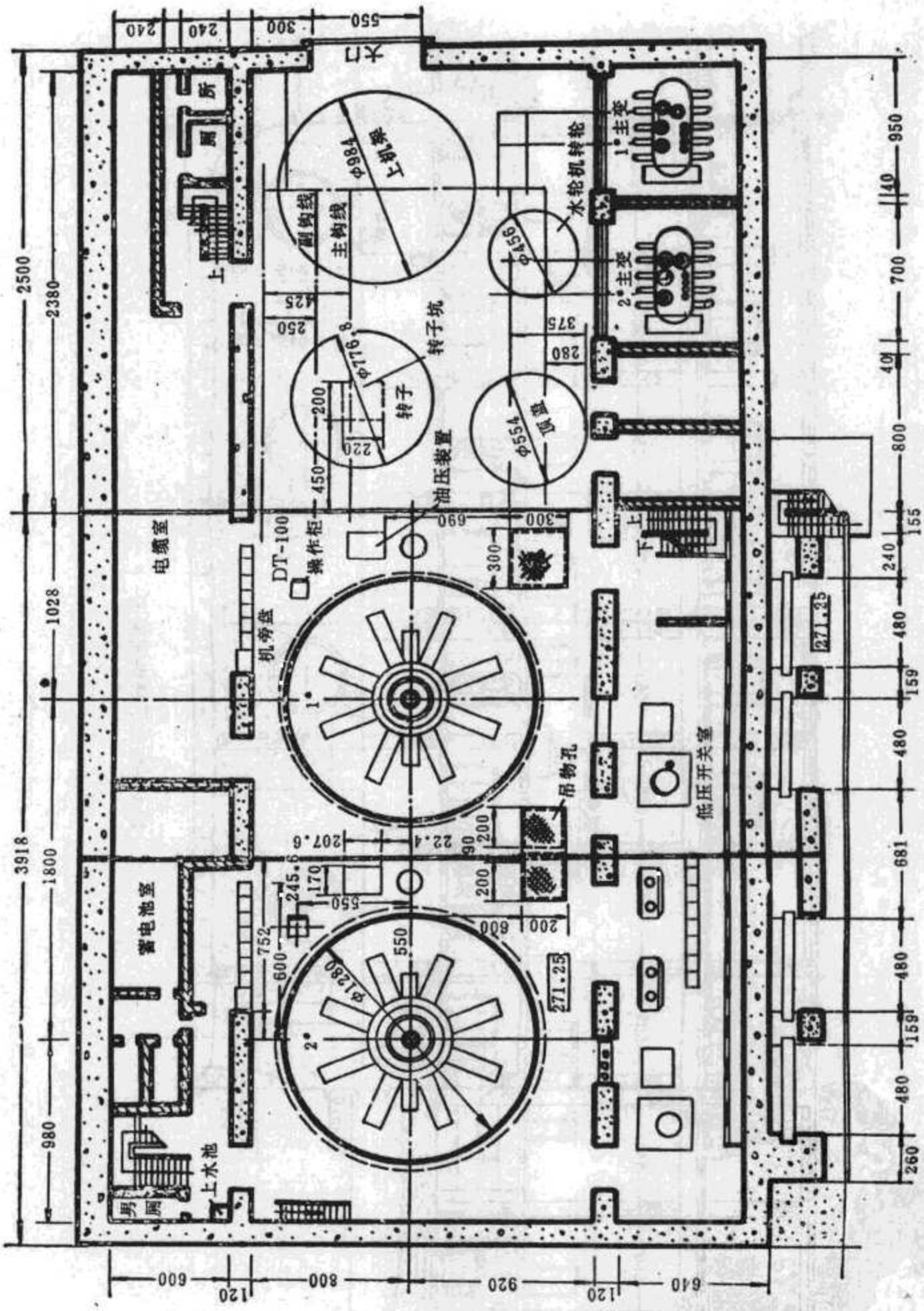


图4-6-16 某水电站主厂房发电机层平面布置图（示例）

机墩由环形布置的钢筋混凝土立柱(一般为4~6根)和柱顶的圈梁所组成,如图4-6-21所示。这种机墩的优点是:混凝土用量少,水轮机顶盖处比较宽敞,立柱间的净空对设备的布置、发电机的出线、机组安装、检修均较方便;但机墩的刚度、抗扭抗振性能差,一

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

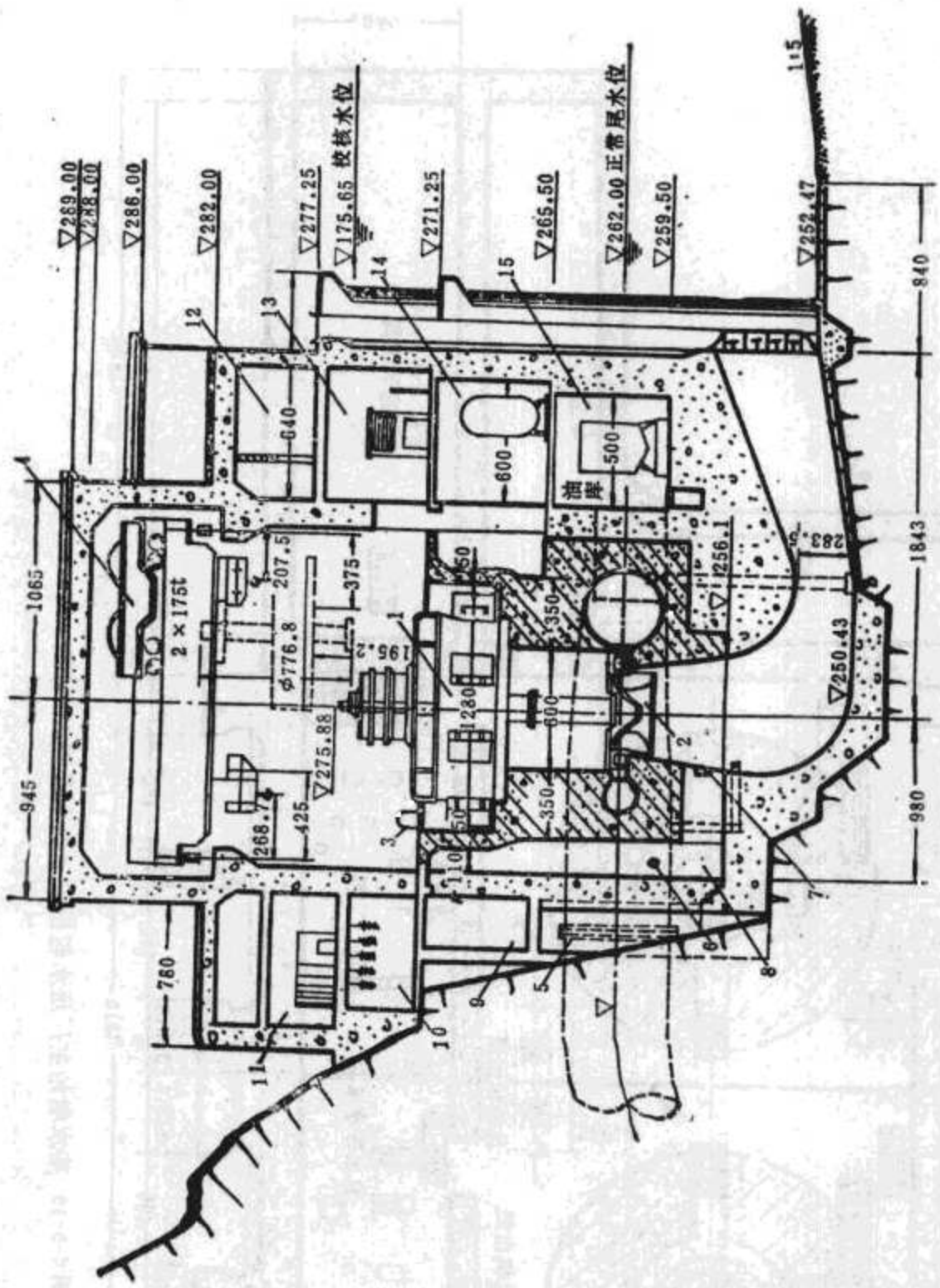


图 4-6-17　某水电站主厂房横剖面图（示例）

1—发电机；2—水轮机；3—调速器；4—吊车；5—钢管伸缩节室；6—蜗壳进人孔；7—尾水管进人孔；8—检修廊道；9—油气水管道室；10—电缆室；11—中控室；12—油化验室；13—开关室；14—压气机室；15—油库

般适用于中型机组。

4.框架式机墩

机墩由两个钢筋混凝土架和两根横梁所组成，如图 4－6－22 所示。该种机墩的优点是：节省材料，施工简单，造价较低，构架下面的空间便于布置管路等辅助设备，机组安装、检修均较方便；但刚度和抗扭抗振性能较差，我国中小型水电站采用较多。

5.矮机墩

机墩为位于蜗壳顶板上的若干矮小混凝土墩座，它们与蜗壳顶板连成一体，如图 4－6－23 所示。这种机墩的刚度很大，抗扭抗振性能很好，并可减低机组高度；但混凝土用

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

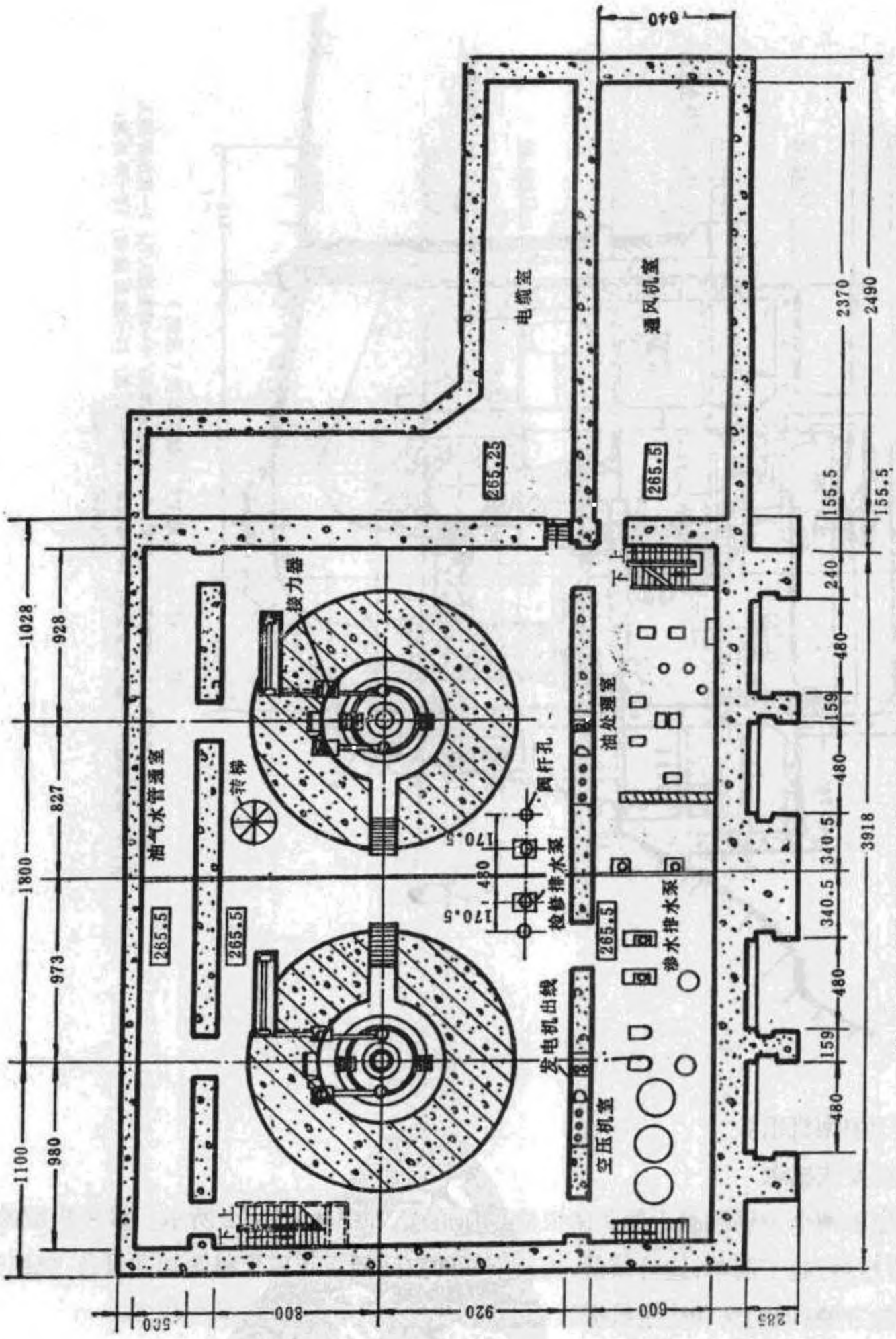


图 4-6-18 莱水电站主厂房水轮机层平面布置图（示例）

量大，还要另设廊道进入水轮机坑及布置辅助设备，给施工和运行带来不便。一般用于大容量的伞式发电机和将推力轴承置于水轮机顶盖上的新型伞式发电机。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

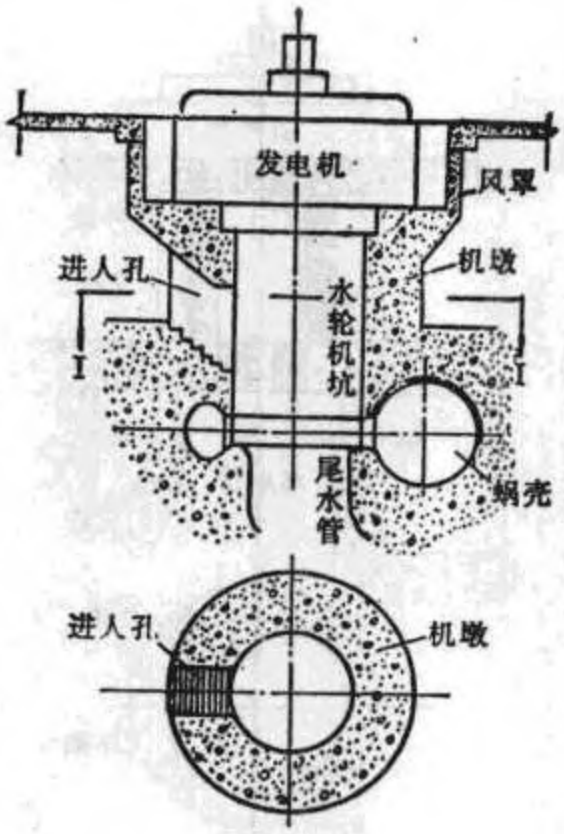


图 4－6－19　圆筒式机墩

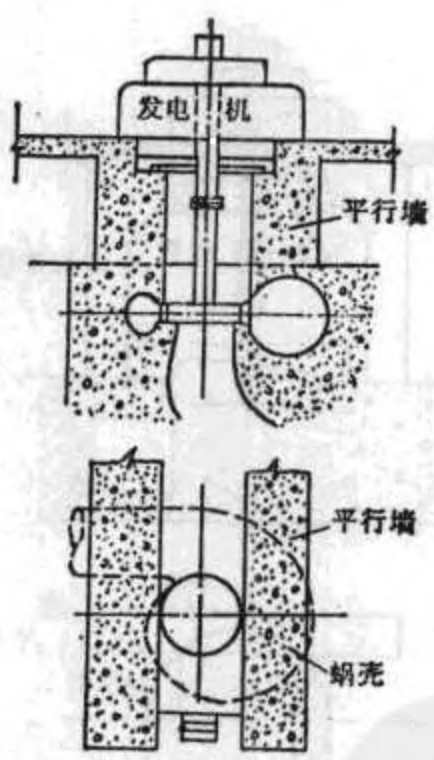


图 4－6－20　平行墙式机墩

二、水轮机层(包括出线层)的布置

水轮机层通常用来布置电气辅助设备和机械辅助设备。主要有发电机引出线、中性

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

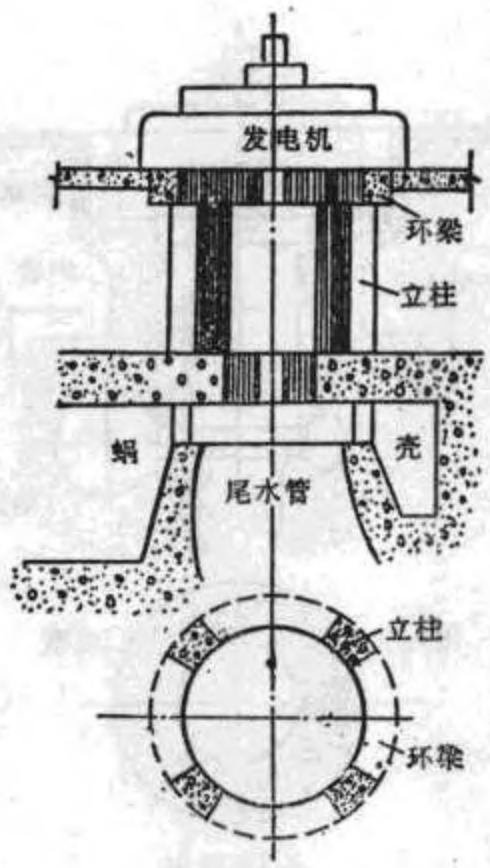


图 4-6-21 环形梁式机墩

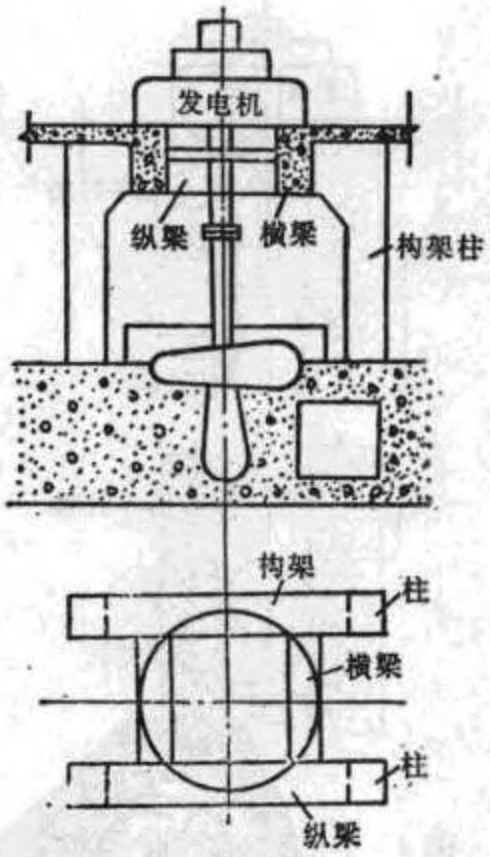


图 4-6-22 框架式机墩

点、励磁盘等；调速系统的接力器和回复杆；油、气、供水、排水系统等。此外，若在主厂房内设有蝴蝶阀及蝴蝶阀的操作设备。由于机墩四周的机电设备既多又杂，布置时应尽量避免电气设备和线路与水力机械辅助设备和管道相互交叉。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

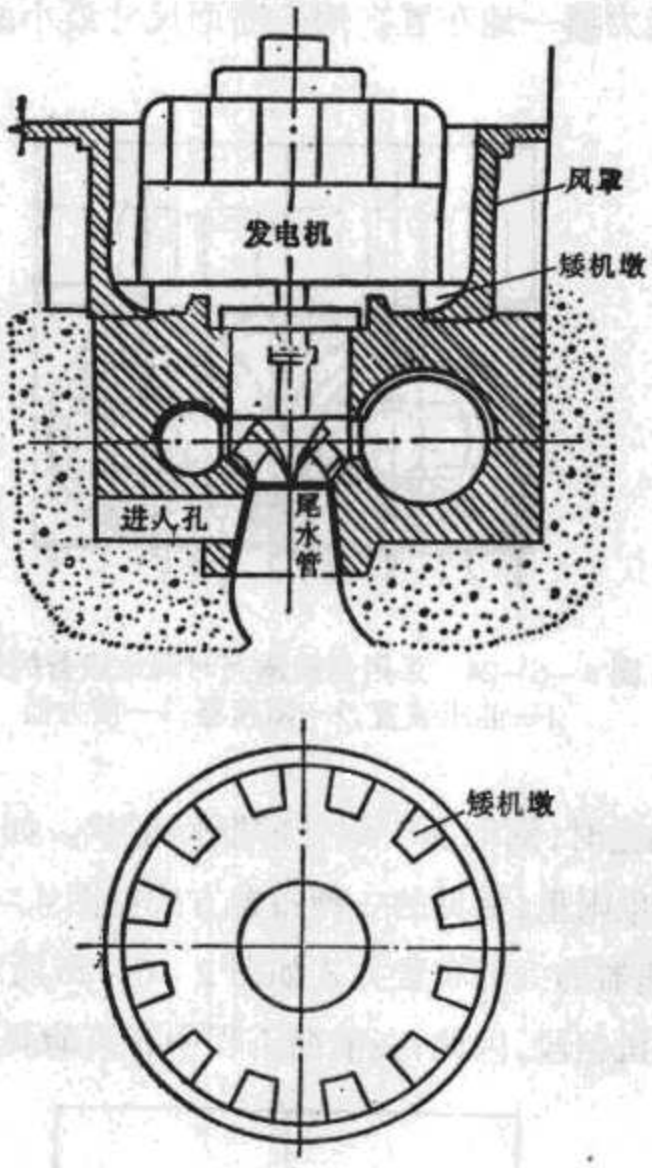


图 4－6－23　矮机墩

当机组主轴较长时，可在水轮机层与发电机层之间增设一出线夹层，将发电机主引出线和中性点引出线（包括它们的电压互感器和电流互感器等）以及发电机的励磁设备布置在出线层，而将油库和油处理室、供水泵及其管道、排水泵、高低压压气机等布置在夹层下面的水轮机层（包括安装间下层），如图 4－6－14 所示。这种分层布置基本上可避免机械和电气设备之间的交叉和拥挤，因而比较有利。

当主厂房无专门的出线层时，机电设备最好分侧布置。例如，将调速器和油、气、水管路系统布置在上游侧，而将发电机引出线和副厂房内发电机电压配电装置；布置在下游侧。若按实际情况难于做到上下游分侧布置时，应榜机组中心线所划的四象限分区布置。

图 4－6－18 为某水电站厂房的水轮机层平面布置图（图 4－6－16 和图 4－6－17 为核电站厂房的发电机层平面图和厂房横剖面图）。从图中可以看出，上下游侧均有水机和电气辅助设备（包括两侧副厂房内），调速器和油压装置布置在上游左侧（顺水流方向看机组中心线的左右），发电机引出线布置在下游右侧，电缆道和管路系统虽有干扰，但并不严重，因为电缆可敷设在天花板高处，而其它管路则沿墙或地面布置。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

采用金属蜗壳时，接力器一地布置在蜗壳断面尺寸最小的上游侧，如图 4－6－24 所示。

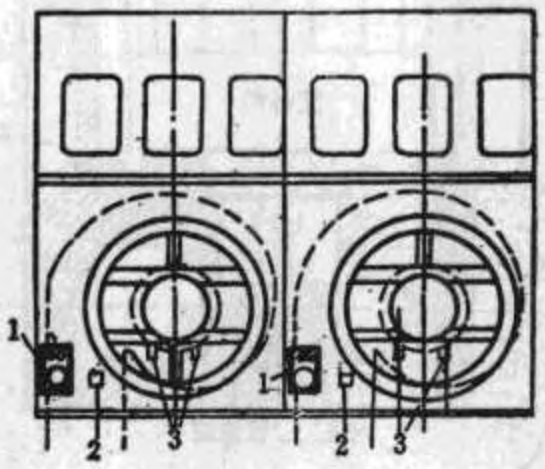


图 4－6－24 采用金属蜗壳时调速设备的布置
1—油压装置；2—调速器；3—接力器

采用钢筋混凝土蜗亮时，则取决于蜗壳的断面形状。如果蜗壳为 Γ 型断面，接力器可以布置在机坑内任何象限里，常见的一种布置方式如图 4－6－25 所示。如果采用梯形断面蜗壳，接力器和调速器的一种布置方式如图 2－6－25 所示。这种布置方式的缺点是油压装置和调速器要跨机组段，因此，在前期工程中有可能要增加临时设施。

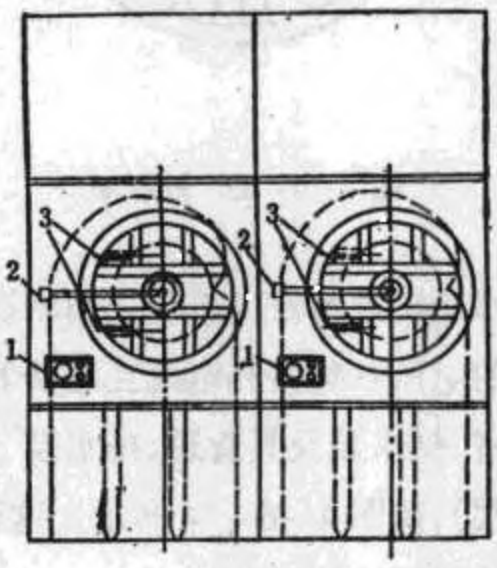


图 4－6－25 采用 Γ 形断面混凝土蜗壳时调速设备的布置
1—油压装置；2—调速器；3—接力器

在布置接力器和发电机引出线时，应考虑水轮机坑进人门的位置，使三者错开，以免影响运行维护人员进入机坑。图 4－6－18 的布置方式比较合理。

三、水下部分各种廊道、地下室和进人孔的布置

水轮机层以下一般均为大体积混凝土，埋设水轮机水流系统的设备。蜗壳前的钢管

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

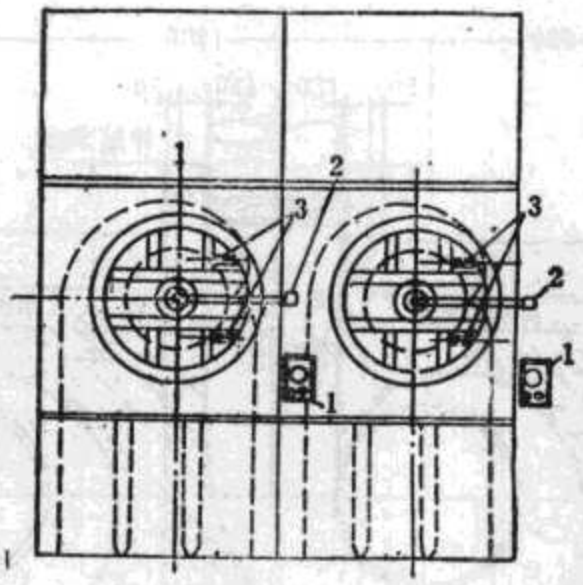


图 4－6－26　采用梯形断面混凝土蜗壳时调速设备的布置
1—油压装置；2—调速器；3—接力器

段应有一伸缩节，有时装有蝴蝶阀，需设专用房间，并附有排水廊道。厂房排水泵和集水井通常都布置在块体结构中的空间处。此外，为维护、检修水下部分的各种设备以及进入地下室，必须设置廊道和各种进人孔。

在很多电站，为了安装、检修和运行管理上的方便，常常把蝴蝶阀布置在主厂房内，这样可利用厂内起重机，但要增加厂房的宽度。当电站水头较高，压力水管末端水压力较高时，为防止蝴蝶阀发生事故而危及厂房安全，可将其移至主厂房以外的专用房间内。有时为了减少厂房跨度和充分利用厂房上游侧的空间，而将蝴蝶阀布置在厂外专门阀室内。水电站的蝴蝶阀就属于这种布置（平面位置见图 4－6－14）。蝴蝶阀室底开排水沟，并有排水管道通集水井。阀室高度应满足专用起重机吊运蝴蝶阀的要求。

蜗壳进人孔直径不小于 60cm（进人孔通道尺寸不小于 1×1m），通常都设在进口处的钢管上，该处断面最大，曲率最小，易于布置闷头（进人孔的金属封盖），开孔对蜗壳整体的影响也较小。至于进人孔是布置在蜗壳或钢管顶部还是侧面，需视具体情况而定。一般蜗壳尺寸大时侧面进入较方便安全（见图 4－6－17 和图 4－6－27），蜗壳尺寸较小时也可以从顶部进入（见图 4－6－14）。

尾水管进人孔一般都开在圆锥段上，因该段为钢板衬砌，易于开孔，并且还便于检查水轮机的转轮。由于尾水管高程低，利用水下部分的各种廊道或地下室（蝴蝶阀坑、钢管伸缩节室、检修廊道、接力器坑等）来布置尾水管进人孔比较方便且合理。图 4－6－17 所示电站在接力器坑设尾水管进人孔，而图 4－6－17 所示某电站则利用上游侧的检修廊道来布置尾水管进人孔，均比较紧凑合理。

由图 5－6－17 可以看出，该电站由于在厂房上游侧设置了纵向贯通的检修廊道，因而进入伸缩节室、蜗壳进人孔、尾水管进人孔均较方便，蜗壳排水控制阀、渗漏排水管以及

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

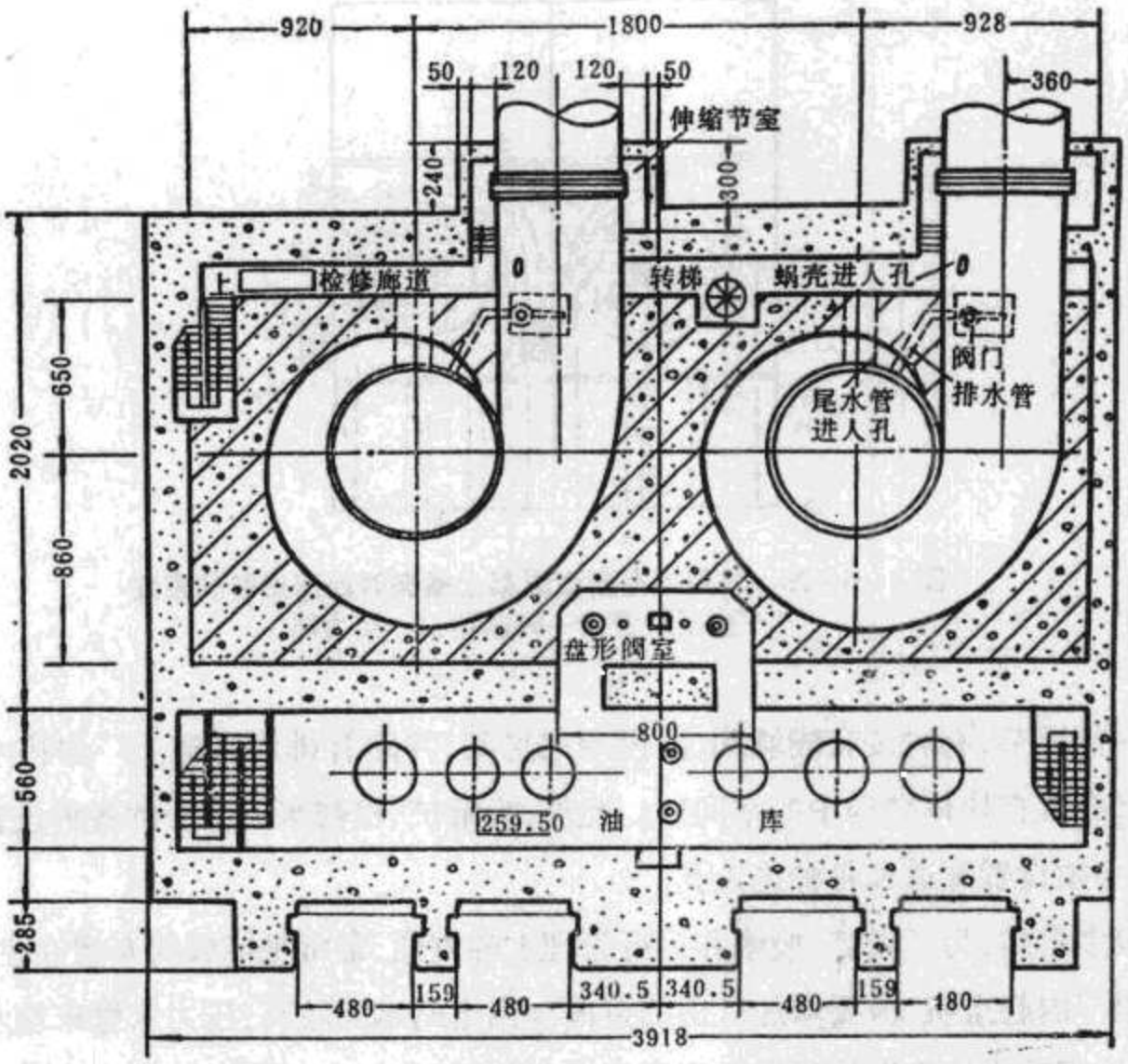


图 4-6-27 某水电站主厂房蜗壳层平面布置图(参见图 4-6-17)

与水轮机层之间的交通楼梯和转梯等布置紧凑、运行方便,显示出它的合理性。图 4-6-27 所示为该电站厂房蜗壳平面布置图。

厂房排水倾向于采用立式深井水泵,因其装置高程高,可以布置在水轮机层,不易倒灌受淹。其下面的集水井很深,是厂房最低部位,要通过水下廊道才能进入。厂房排水较少采用卧式离心泵,因其泵房位置低,易发生倒灌受淹事故,若采用卧式决心系,则应设置专用的楼梯通向泵房。至于集水井的进人孔,多数用垂直爬梯,由泵房直接进入。

第三节 尾水管与蜗壳的工艺设计

一、蜗壳的结构设计原理

本节主要介绍金属蜗壳外围混凝土结构及梯形断面混凝土蜗壳的结构设计原理。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(一)金属蜗壳外围混凝土结构的设计

1.设计荷载及组合

(1)作用在蜗壳外围混凝土上的荷载

①结构自重 A_1；

②机墩传来的垂直荷载 A_2；

③水轮机层的活荷载及设备重 A_3；

④温度及混凝土收缩应力 B。

(2)荷载组合

①基本荷载组合(正常运行时)为：$A_1 + A_2 + A_3$

②特殊荷载组合(正常运行 + 温度)为：$A_1 + A_2 + A_3 + B$

(3)内力计算

金属蜗壳的外围结构是指蜗壳外围水轮机层以下二期混凝土范围内的结构，是一个整体性较强的空间结构，体形复杂，宜用三维有限元法计算其空间应力状态。目前在设计中使用比较多的还是用结构力学法计算内力。

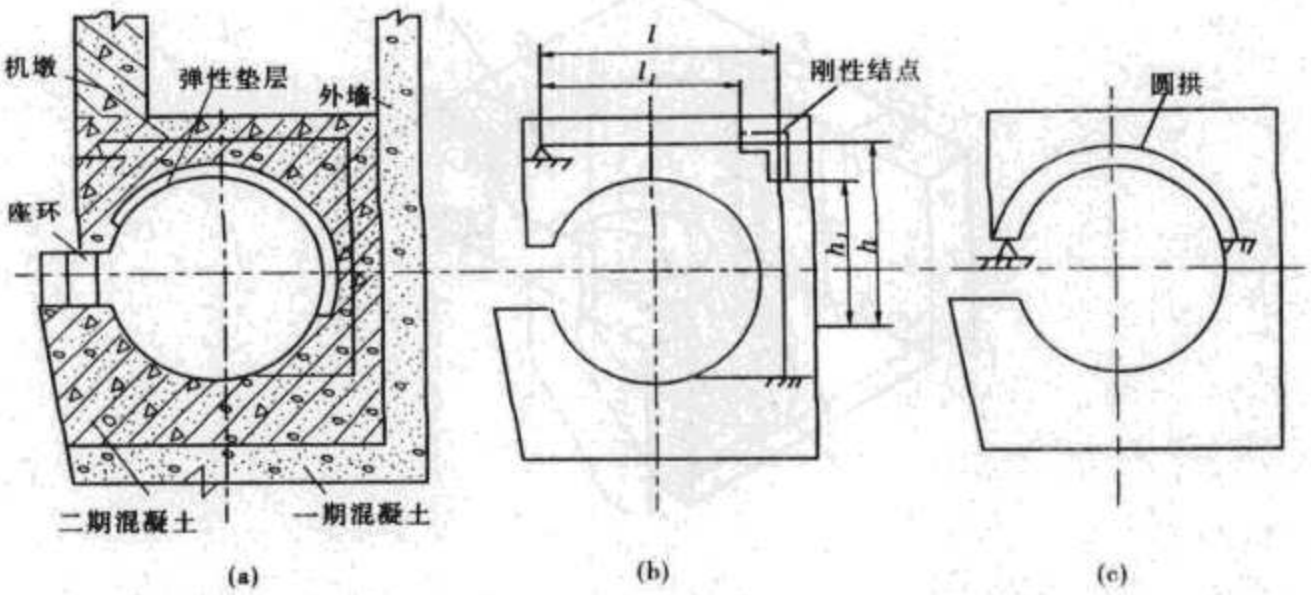


图 4-6-28　金属蜗壳外围结构计算简图

用结构力学方法计算内力时，为便于计算，工程中常近似地沿径向切取单宽按平面 Γ 形框架的杆件系统进行静力计算，且不考虑框架的环向应力及框架间的剪应力。Γ 形框架的下端用结在蜗壳底部高程，框架上端与座环连接，因座环刚度较小，可视为铰接。如图 4-6-28(a)、(b)所示。按等截面框架分析内力时，一般取横梁和立柱截面的中心线即 l 和 h 进行计算，但杆件高跨比(杆件截面最小厚度与其计算跨长之比)大于 1/5 时，应考虑刚性节点和剪切变形的影响。为了简化计算，可在计算跨中弯矩时，采用杆件中心线长度 l 及 h，而在计算结点弯矩时。则采用净跨长 l_1 及 h_1，见图图 4-6-28(b)。对小型电

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

站也可按净跨 l_1 和 h_1 构成的Γ形框架进行内力计算，而不考虑刚性节点的作用。

由于蜗壳尺寸和外围混凝土厚度各处不同，故一般选择蜗壳进口（包角为 ϕ_0）和机组轴线处2~3个控制断面，切取平面Γ形框架计算。对小型电站则可只取蜗壳最大断面进行计算并结合构造要求配筋。

如果蜗壳外侧混凝土较厚，或相邻两机组段间不设永久缝，当其刚度比顶板大6~8倍时，也可将顶板看做一端铰支于座环而另一端固结于边墙的梁或圆拱（如图4-6-28(c)）进行计算。

根据计算简图和荷载，即可用结构力学方法求出杆件内力，然后进行配筋。蜗壳顶板接受弯构件配筋，受力筋为径向辐射布置，分上、下两层，其下层沿蜗壳表面布置。环向则配置构造筋及温度筋。蜗壳边墙按偏心受压构件配筋。受力筋为垂直布置，也分内、外两层，同时在环向布置构造筋及温度筋。金属蜗壳外围混凝土允许开裂，但要校核其裂缝开展宽度是否符合要求。

（二）钢筋混凝土蜗壳结构设计原理

图4-6-29所示为钢筋混凝土蜗壳结构的立体图，图上未表示蜗壳顶板。

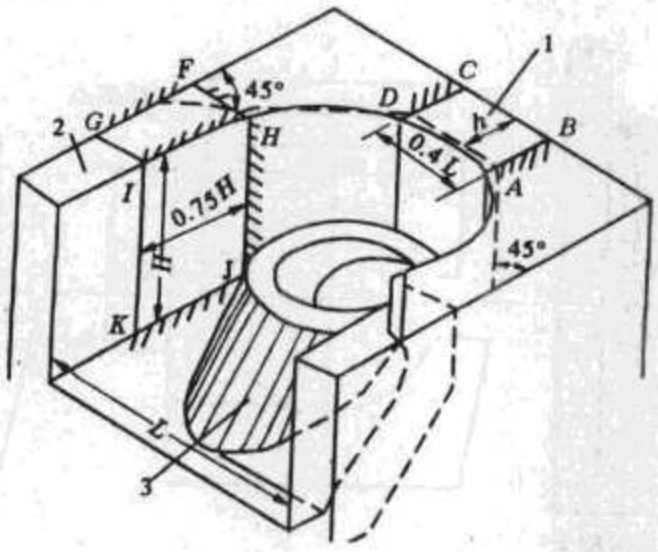


图4-6-29 钢筋混凝土锅壳立体目（不包括顶板）
1—下游边墙；2—侧向边墙；3—尾水管锥体

钢筋混凝土蜗壳的流道由蜗壳顶板、蜗壳边墙、尾水管锥体以及蜗壳底部结构等围成。钢筋混凝土蜗壳结构是指蜗壳顶板和边墙。一般钢筋混凝土蜗壳的底部为块体混凝土结构。当蜗壳下面设有泄水底孔时，蜗壳底部为泄水孔顶板，这时蜗壳结构计算应与泄水孔结构一起考虑。

下面主要叙述一般钢筋混凝土蜗壳顶板和边墙的结构设计原理。

1.荷载与荷载组合

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(1)荷载

钢筋混凝土蜗壳结构直接承受内水压力,其设计荷载有:

①结构自重 A_1;

②机墩传来的荷载 A_2;

③蜗壳顶板上(即水轮机层地板)的设备及活荷载 A_3;

④胡壳内水压力(包括水击压力)A_4;

⑤由永久缝中传来的侧向水压力 A_5(是否存在与止水的布置位置有关);

⑥渗水压力 A_6;

⑦温度荷载 A_7。

(2)荷载组合

①基本组合(正常运行):$A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6$。

②特殊组合:

A.正常运行+温度:$A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7$。

B.蜗壳放空时:$A_1 + A_2 + A_3 + A_5$。

C.校核洪水运行时:$A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6$。

2.内力计算

钢筋混凝土蜗壳结构与金属蜗壳外围结构一样,是一个整体性强的空间结构。设计中目前大多仍采用结构力学法或弹性理论法,只有对大型厂房才应用有限元法计算。

(1)平面框架法

平面框架法的原理与金属蜗壳外围混凝土结构中所述相同。蜗壳断面如图4-6-30所示,取等截面Γ形框架计算,某些断面边墙的弯曲刚度很大,则顶板可按梁计算。

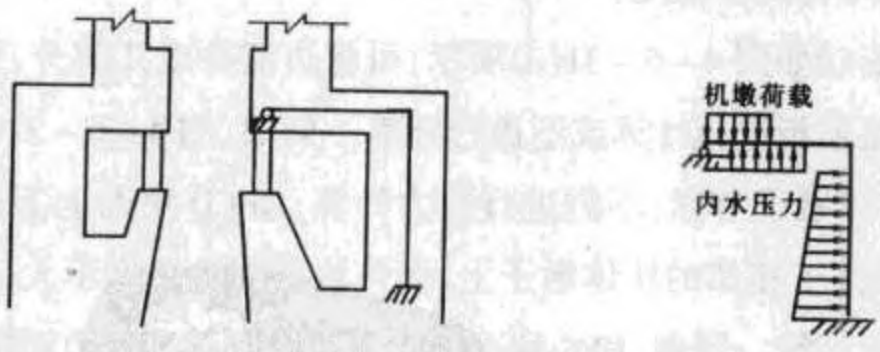


图4-6-30　钢筋混凝土蜗壳断面

选择计算断面时,将整个蜗壳结构在平面上分成若干区,见图4-6-31(a),对每个区选择典型的断面为计算断面。

平面框架法考虑了顶板和边墙的联合作用,没有考虑顶板和边墙环向的联合作用。

(2)环形板墙法

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

环形板墙法认为蜗壳的顶板和边墙的连接为团接，因而蜗壳顶板和边墙可分别进行计算。

对于顶板来说，可将整个顶板分成Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ三块，每一块按其尺寸作环形板计算。如图4-6-31(b)所示，图上虚线圆为计算块Ⅰ内力所用的环形板的外周，其内周即为水轮机井壁。环形板的外周边为固接、内周边为铰支或固接，或外周边为固接、内周边为自由的环形板，板上受均布垂直力作用，板内周边上受均布垂直力作用和均布弯矩作用时，板内周边的垂直线变位和角变位，可利用弹性理论方法或图表分别求得。根据所拟定的蜗壳顶板内周边的约束条件，可以确定环形顶板受均布垂直力作用时内周边上的支承力和弯矩，从而可以求出蜗壳顶板的内力。

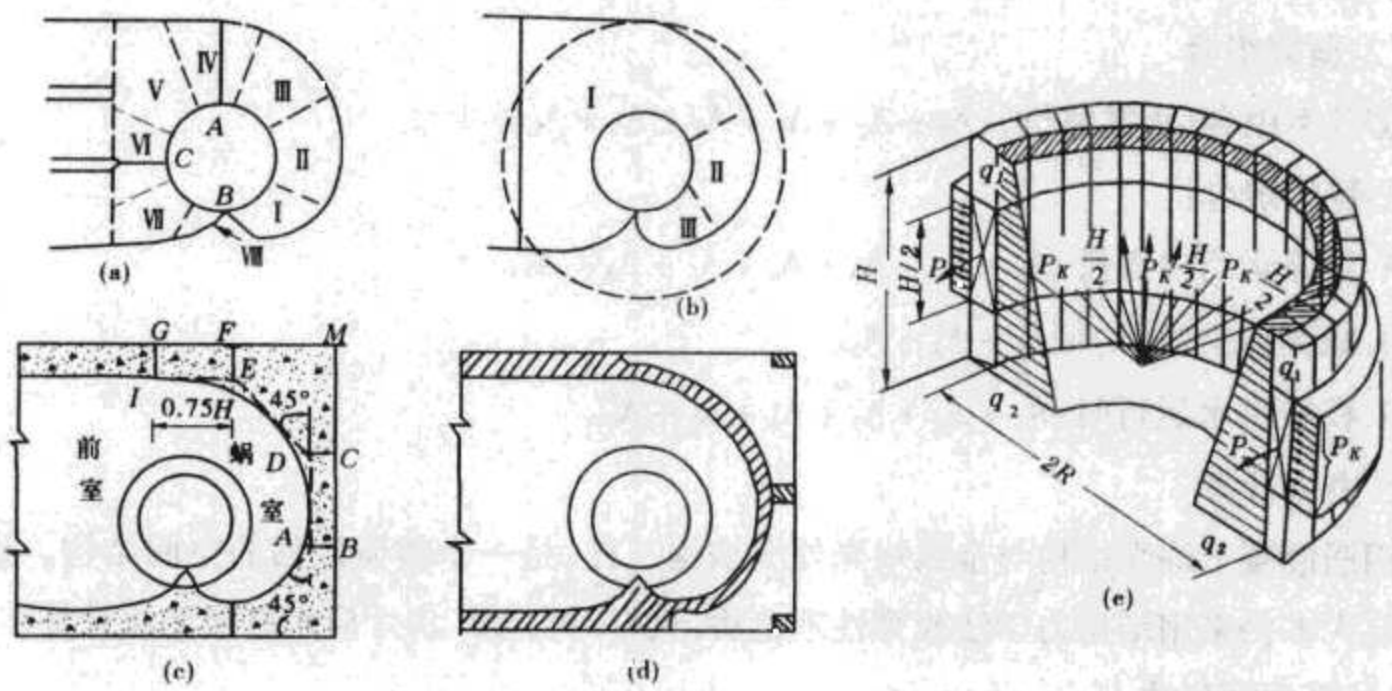


图4-6-31 钢筋混凝土蜗壳结构计算简图

对于边墙来说，可有两种情况。

如边墙的平面形状如图4-6-31(c)所示，可将边墙分成几部分，每一部分根据其结构特点选择一定的矩形板进行计算或不进行计算。例如，图4-6-31(c)上的CDHFM块截面尺寸大，可按块体墩子考虑，不需进行内力计算；ABCD块的上下边固接于蜗壳顶板和蜗壳底，两边则固接于相邻的块体墩子上，如该块截面的厚度不大，则ABCD块可作四边固接的等厚矩形板计算。同理，HFG块可作上下两边固接、HF边固接而IG边自由的等厚矩形板计算。至于位于HFG块上游的前室边墙，则可按上下游端固接的竖梁考虑。边墙分块的方法还可见图4-6-29，图上H为蜗壳边墙的最大高度，L为蜗壳前室的宽度。

如边墙的平面形状如图4-6-31(d)所示，则可将整个边墙作为半个等厚的圆柱形壳体考虑，如图4-6-31(e)。圆柱形壳体的高度为H，内半径为R(R=L/2)，厚度为H。圆柱形壳体内壁承受梯形分布的内水压力，上端的水压强度为q_1，下端的水压强度为q_2，

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

通过计算确定壳体的内力。

对图 4－6－31(d)所示边墙用结构力学方法求解时，方法如下，环形墙上作用的内水压力，一部分由壳体水平环的作用承受，一部分由竖向梁的作用承受，因而可将边墙分成多条高为 H 的竖向梁，梁的下端为团接。假设环向作用只存在于墙的中部高为 H/2 的范围内，将环向作用分担的这部分水压力以均布外压力的方式作用在竖向梁的中部，分布的范围为 H/2，压强为 P_k，P_k 待定。此外，在竖向梁上还作用全部内水压力。与此同时，在边墙中部取出半圆环，环高为 H/2，环上承受压强为 P_k 的均匀内水压力。对竖向梁和半圆环分别进行计算，求出在上述荷载作用下，竖向梁跨中的水平位移和半圆环的径向位移与 P_k 的关系，令两者相等即可解得 P_k

$$P_k = \frac{H^4(q_1 q_2)}{64h^2(R^2 + \frac{13}{512}\frac{H^4}{h^2})}$$

P_k 按上式确定后，由竖向梁可得到墙上、下端和中部水平截面上的弯矩和剪力，由水平圆环上可求出边墙中部的环向拉力 P。此外，在边墙的水平截面上还有轴向(竖向)力作用，该内力由顶板作用于边墙顶上的竖向力引起。在顶板计算中该力即为顶板外周边上的支承反力，由顶板计算确定。

将整个蜗壳分解为环形板和墙的内力计算方法考虑了结构在环向的整体作用，与平面框架法比较，其优点是可以求出环向内力，但环形板墙法没有考虑顶板和边墙的整体作用。

进一步的方法是将顶板和边墙的连接处作刚性连接考虑，计算中在顶板的外缘和边墙的顶缘要进行弯矩平衡，这种方法的计算工作量较大。

(3)有限元法

钢筋混凝土蜗壳结构的体形复杂，无论是用平面框架法还是环形板墙法都不能充分反映钢筋混凝土蜗壳结构的真实情况。大型钢筋混凝土蜗壳应该用有限元法分析蜗壳结构的整体应力状态。

图 4－6－32 所示为用等参六面体单元进行三维有限元计算时的单元部分情况。计算包括了整个顶板和边墙，为了减少单元数，对整体应力状态影响不大的部分，如 120°断面和 180°断面之间的部分可不包括在计算范围内。

用有限元法进行计算时，边界约束条件的正确确定很重要。我国某些工程的钢筋混凝土蜗壳结构，在进行有限元计算时，对各部分边界的约束条件确定如下：

①边墙底部为固接。

②顶板与边墙的上游面一般为顺流向链杆约束，位于中墩处的节点附加垂直边杆，顶板与边墙共有区内的节点为固接。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

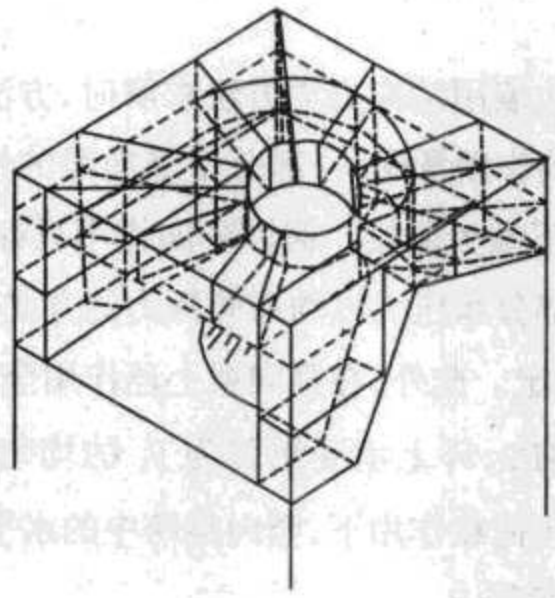


图 4－6－32 钢筋混凝土蜗壳结构计算单元剖分图

③顶板和边墙的下游面与尾水墩连接部分的节点用顺流向链杆约束。

④顶板与座环连接处按固接处理。

有限元计算得到的结果为截面上的应力值，而钢筋混凝土规范中强度计算是根据构件截面内力进行的，因而如何应用有限元计算结果的问题尚待妥善解决。

（三）配筋

钢蜗壳外围结构允许开裂，但应进行裂缝宽度验算。Y 形框架的水平横梁接受弯构件配筋，柱按偏心受压构件配筋。此外，在外围结构中应在环向配置构造筋。一般外围结构需要的受力筋数量不多。

钢筋混凝土蜗壳结构不允许开裂，如抗裂验算不能满足要求，应采取防渗措施，如在结构表面设薄钢板衬。

按 Γ 形框架法计算内力时，顶板按偏心受拉构件配径向筋，边墙按偏心受拉构件配竖向筋。环向配构造筋，顶板环向构造筋数量应为受力筋的 20% 左右，边墙环向构造筋可按直径 16mm、间距 30cm 配置。顶板径向受力筋由计算确定，按顶板内缘需要配筋。辐向布筋到顶板外缘，根据需要加密钢筋。边墙竖向受力筋按最大弯矩配置，钢筋由顶直通到底，不予切断。

按环向板墙法计算内力时，环向筋应按环向内力要求验算。

所有钢筋在内外壁各置一层，其间每隔 1m 设一直径为 12～16mm 的联系筋。

二、尾水管的结构设计原理

弯曲形尾水管由直锥段、弯管段和扩散段三部分组成。结构计算的荷载组合，主要考

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

虑正常运行，尾水管正常检修、施工及校核洪水运行情况，往往由检修情况控制。由于尾水管形状复杂，且处于厂房下部结构的大块混凝土中，精确地进行尾水管结构计算是困难的，工程设计中通常采用简化的方法进行尾水管的结构计算。

(一)直锥段的计算

尾水管直锥段也是蜗壳的一部分，因蜗壳断面是渐变的，故直锥段顶端为平面，底端为螺旋形曲面的变厚度圆锥体。结构计算中，常简化为顶端自由、底部固定的厚壁圆筒。顶端作用着由座环传来的荷载，壁上有内、外水压力。圆筒的厚度与直径取锥体顶端和底端的平均值，高度取直锥段的最大高度。由于简化极为近似，计算结果与光弹试验出入较大，且因锥体的截面尺寸较大，大都按构造配筋，所以，尾水管直锥段可不进行内力计算而按构造配筋。直锥段竖向为受力筋(偏心受压)，环向为构造筋，一般沿其表面(内外侧)在垂直和水平向配置 ϕ16～25mm、间距 20～30cm 的钢筋。

(二)扩散段计算

扩散段的边墩和中墩向上延伸到尾水平台，其顶板可能与尾水挡墙整体连接，并与弯管段结构连成整体，与尾水墩墙构成板系结构。由于按板系结构计算扩散段结构的工作量大，所以，在工程设计中目前仍都采用结构力学法计算内力。

用结构力学法计算扩散段内力时，常在顺流方向上选择 3～4 个结构上有代表性的断面，沿垂直水流方向切取单宽横剖面按平面框架计算。其计算简图如图 4－6－33、图 4－6－34 所示。当底板与边墩和中墩连成整体时，切取的平面框架为一闭合框架，当底板与边墩和中墩分离时，平面框架为门形框架，此时底板应视为独立结构。为解决检修时的抗浮稳定，可将底板用锚筋锚固于基岩上，并布置排水孔，底板按以锚筋为支点的无梁板计算。

对于图 4－6－33 中 2—2 断面，因顶板厚度很大，不应再按平面框架计算。一般当单孔断面顶板高跨比大于$\frac{1}{2}$或双孔断面高跨比大于$\frac{2}{5}$时，应按深梁计算。

按平面框架计算尾水管扩散段内力的方法虽较简单，但没有考虑相邻平面框架间的相互约束作用，因而不够精确。事实上，作用在框架上的全部直接垂直荷载(包括自重、水压力、扬压力)和地基反力，往往不能平衡，二者的差值就是该框架与相邻框架截面间相互作用的竖向剪力。若将此剪力求出，并作为外荷载分配给框架的顶板、边墩、中墩和底板，使框架处于平衡状态。如图 4－6－34 所示。然后再按平面框架法计算内力，结果就较为精确。

(三)弯管段计算

弯管段顶板(图 4－6－33 的 1—1 断面)可按深梁计算，若一期混凝土较薄，也可作为

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

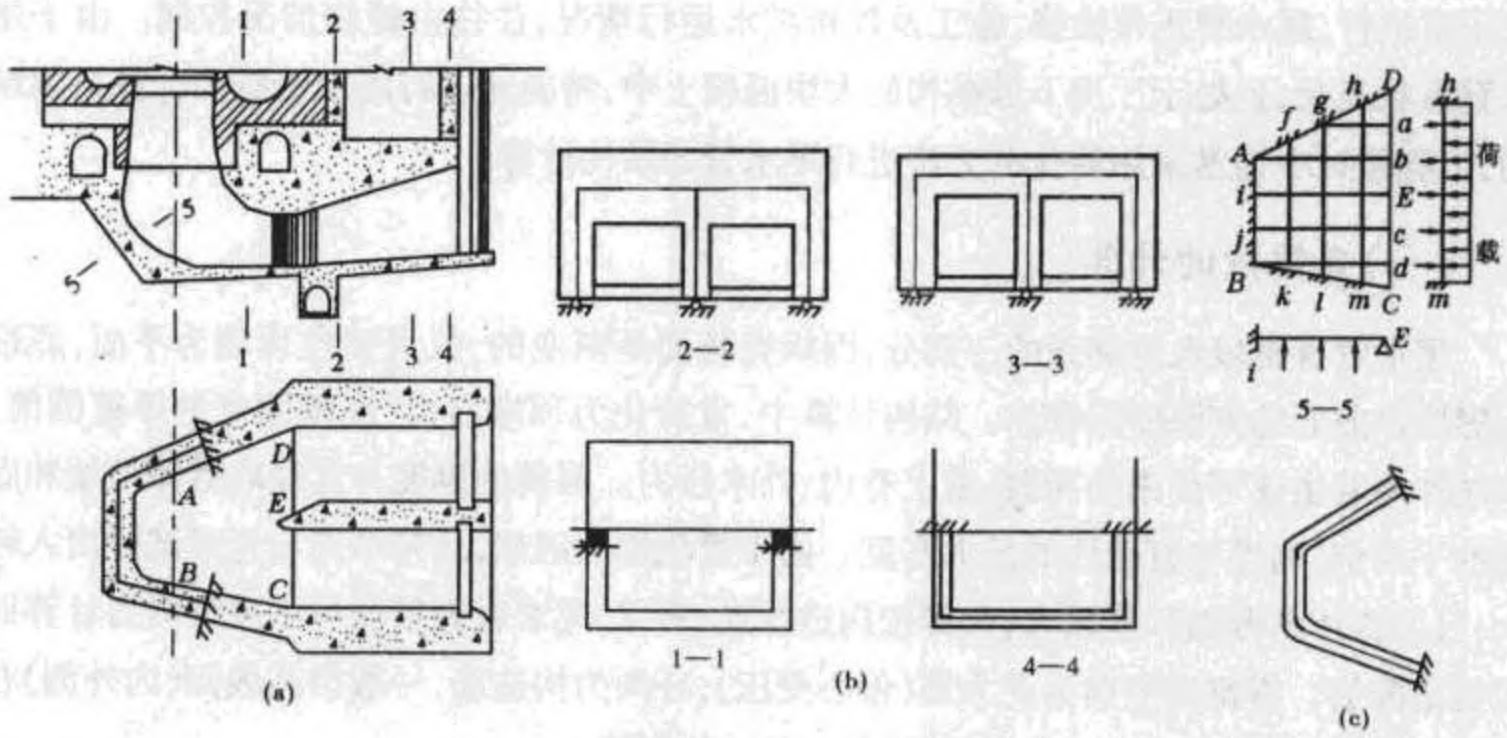


图 4-6-33 尾水管结构计算简图

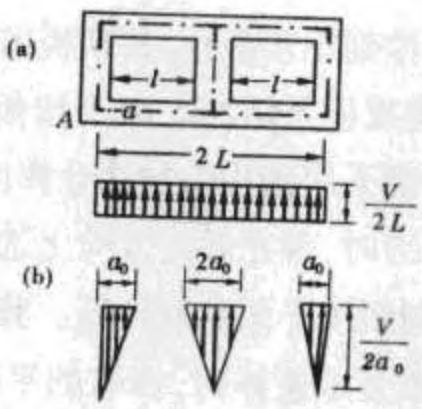


图 4-6-34 简化的地基反力分布图

框架计算。位于钢筋混凝土蜗壳下的弯曲段顶板,若厚度小于跨度的$\frac{1}{2}$,则可按下游边固接于蜗壳边墙,而上游边铰接于直锥段的单向板计算。或按另两边也固接于尾水管边墙的双向板计算。

(四)尾水管配筋简介

尾水管结构允许开裂,但应进行裂缝开展宽度计算。

由于尾水管各部分的尺寸较为厚大,所以,通常按构造配筋,并兼作温度筋和架立筋,设计尾水管时,可先选择最不利的荷载组合,计算少数最大受力断面的内力和配筋,若这些断面为按构造配筋,则其他断面就可不作计算直接按构造配筋。钢筋配置应尽量减少钢筋种类,照顾施工方便,钢筋间距尽可能相等或协调一致。

扩散段一般按顺流向和垂直流向两个方向双向配筋,内外壁各布置一层。弯管段顶

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

板沿内壁布置顺流向钢筋，垂直流向上配置环向钢筋，底板也为双向布筋。锥管段沿表面按构造布置斜直筋和水平环向筋。钢筋直径一般为 16 ~ 25mm，间距为 20 ~ 30cm。各部位钢筋间距应协调一致。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第五篇

水电站电气设备及自动装置安装工程

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第一章　输电线路自动重合闸与BZT接线工艺

第一节　电源线路三相自动重合闸及其运用

一、单侧电源线路三相自动重合闸

(一)对单侧电源线路三相自动重合闸的基本要求

35kV及以下线路一般采用三相一次重合闸(简称SZCH),装于线路电源侧。对SZCH的基本要求如下。

1.具有判别正常跳闸和事故跳闸的逻辑功能

在断路器事故跳闸时,SZCH应起动;正常跳闸时,应闭锁SZCH。为了区别正常跳闸和事故跳闸,一般有两种判别方法。

(1)“不对位”起动方式

所谓“不对位”就是指控制开关在“合后”位置,而断路器在“跳闸”位置,两个位置不相符,表明断路器因保护动作或误动而跳闸。这种起动方式适用于有人值班就地控制的水电站或变电所,不适用于遥控的线路。因为遥控跳闸后,就地操作的控制开关仍在“合后”位置,会造成判断错误。

(2)保护起动方式

利用线路保护动作于断路器跳闸的同时,并使SZCH起动。这种起动方式对误碰跳闸不能起纠正作用。

2.在正常跳闸时,应将SZCH闭锁

断路器在下列情况下跳闸都应将SZCH闭锁:

(1)手动跳闸或遥控跳闸;

(2)按频率自动减负荷自动装置使断路器跳闸;

(3)手动合闸到故障线路的事故跳闸,因这种故障多属检修质量差,检修后忘拆接地线的持续性短路,重合成功率很低;

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(4)母线差动或桥形接线主变差动动作跳闸,因不属线路故障,故也应闭锁 SZCH。

3.起动时间尽可能短些

SZCH 的起动时间在保证保护已复归,故障点绝缘已恢复,断路器操作机构已准备好重合等前提下,应尽量短一些,以缩短中断供电的时间。

4.预先规定动作次数

SZCH 动作次数应按预先规定进行。如果规定一次重合,必须保证只动作一次。

5.动作后自动复归

SZCH 动作后自动复归,可为下一次动作做好准备。

6.与继电保护配合动作

根据电力系统结构及 SZCH 设置情况,采用 SZCH 前加速或后加速保护动作,以加快跳闸一重合闸循环过程,减轻第二次事故跳闸的后果。

7.方便调试和监视

SZCH 在线路运行时应便于退出或进行完好性试验,动作时应有信号。

(二)单侧电源 SZCH 的原理接线

常用的单侧电源 SZCH 原理接线见图(5-1-1)。

1.工作原理

单侧电源 SZCH 装置主要由 DCH 型重合闸继电器、防止跳跃继电器 TBJ、加速继电器 JSJ、信号继电器 XJ、切换片 QP 等元件所组成。

DCH 型重合闸继电器为一只组合式继电器,内中包括一只时间元件 SJ、一只中间元件 ZJ、一只电容 C、一只信号灯 XD、充电电组 4R、放电电阻 6R、时间元件附加电阻 5R、指示灯附加电阻 17R 等,见图 5-1-5(a)虚线框内所示。线路断路器控制开关 KK 采用小型强电控制开关(LWX_1 — W2.2.40/F6),其接点动作图表见图 5-1-1(b)。

SZCH 的工作原理简述如下。

(1)"不对位"起动

利用控制开关接点 KK_{12-9}与断路器接点 DI_3"不对位"判别正常跳闸或事故跳闸。

正常跳闸时,控制开关处于"跳闸后"位置,KK_{12-9}接点断开,虽 DL_3 在断路器跳闸后闭合,SZCH 也不起动。

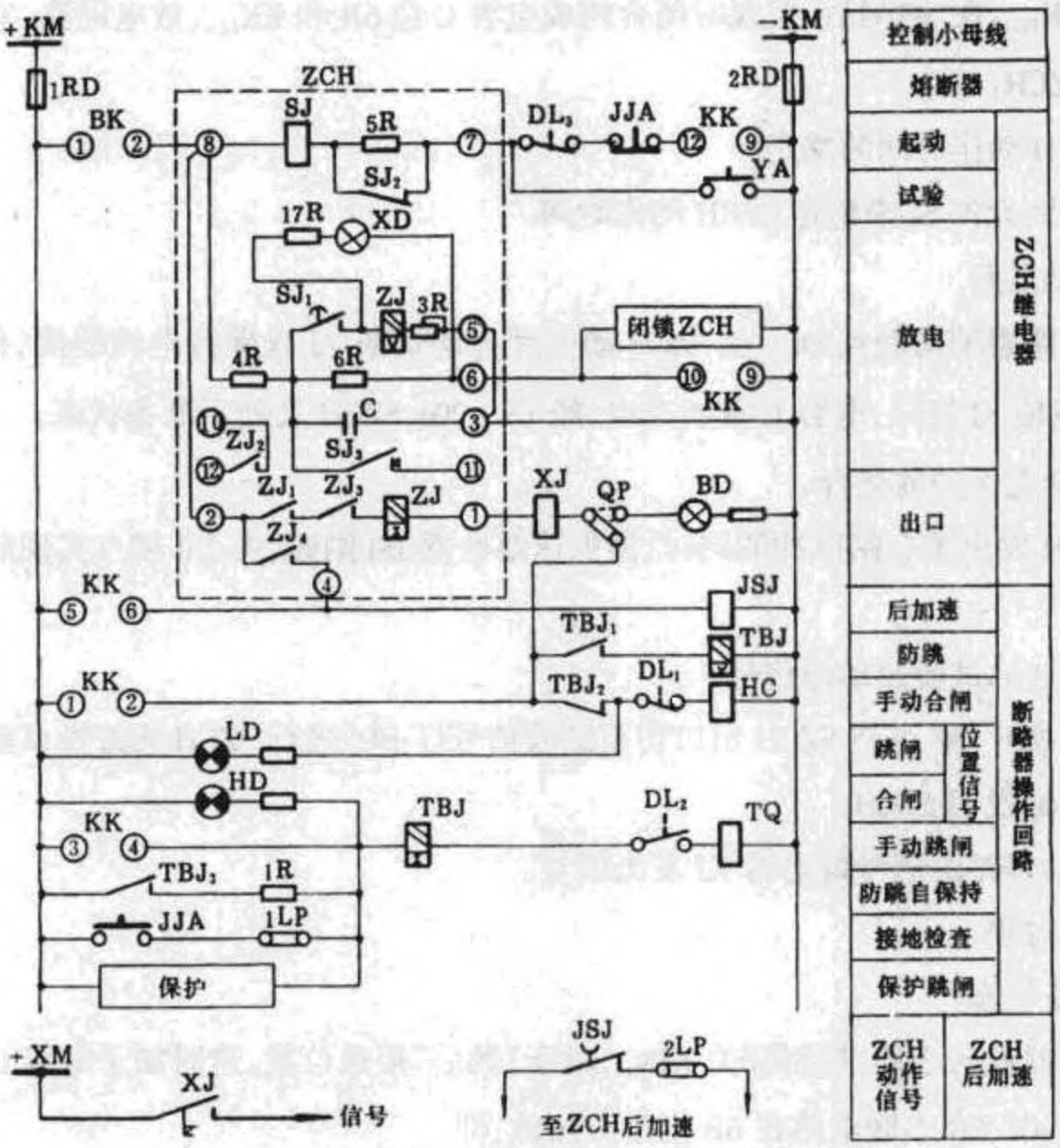
事故跳闸时,控制开关处于"合闸后"位置,KK_{12-9}闭合,故在断路器跳闸后 DL_3 接点接通而使 SZCH 起动。

(2)利用电容 C 充电时间较长实现 SZCH 只动作一次。

适当选择电容 C 和充电电阻 4R 的参数,使充电至 ZJ 电压线圈动作电压约需 15~20S,故在重合不成功或在手动合闸到故障线路时,因电容 C 充电时间不够,故 SZCH 不会

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网



(a)

KK控制开关接点动作图表

把手正视接点背视位置	跳 合	①② ④③		⑤⑥ ⑧⑦		⑨⑩ ⑫⑪	
型式	F6	2		2		40	
位置 \ 接点	—	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	9-12
跳闸后	|	—	—	—	—	×	—
合闸	/	×	—	×	—	—	×
合闸后	|	—	—	—	—	—	×
跳闸	\	—	×	—	×	×	—

(b)

图 5-1-1 单侧电源 SZCH 原理接线

(a)原理接线;(b)控制开关接点动作图表

第二次合闸。

(3)手动跳闸时闭锁 SZCH

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

利用 KK_{12-9}在“跳闸后”位置时闭合构成电容 C 经 6R 和 KK_{12-9}放电回路，实现手动跳闸时闭锁 SZCH。

(4)SZCH 动作时间的整定

利用时间元件 Sl 来整定 SZCH 动作时间。

(5)自动复归

利用断路器辅助触点 DL_1 在 SZCH 动作后自动切断 ZJ 自保持电流线圈，使 SZCH 复归；DL_1 接点使 SJ 复归；电容 C 重新充电，经 15～20s，SZCH 又处于准备状态。

(6)与继电保护的配合

在 SZCH 发出重合闸脉冲的同时，使加速继电器 JSJ 励磁，由 JSJ 接点实现前加速或后加速保护。

(7)SZCH 的试验及动作信号

利用切换片 QP 可将 SZCH 出口切至试验信号灯 BD，进行 SZCH 完好性试验；利用 BK 开关可灵活地投切 SZCH。

SZCH 动作时由信号继电器 XJ 发出信号。

2.动作过程

(1)准备状态

在断路器投入之前，控制开关 KK_{10-9}处于“跳后”接通位置，这时加于电容 C 上的电压近似于电阻 4R、6R 串联电路在 6R 上的分压值，即

$$U_c \approx \frac{R_{6R}}{R_{6R} + R_{4R}} \cdot Uz$$

式中 Uz——直流操作电源电压。

因 $R_{6R} < R_{4R}$（R_{4R}约几兆欧，而 R_{6R}只有几百欧），故 $Uc \approx 0$。

在断路器合闸后，控制开关接点 KK_{10-9}。处于“合后”断开位置，电容 C 即开始充电，经 15～20s 充好电，SZCH 处于准备状态，信号灯 XD 亮。

(2)SZCH 动作过程

断路器因线路事故跳闸，其辅助接点 DL_3 闭合。因控制开关处于“合后”位置，KK_{12-9}接通。符合“不对位原则，故 SZCH 起动。首先时间断电器 SJ 励磁。SJ_2 瞬时断开接点用于自动接入电阻 SR，降低 SJ 线圈电流，保证 SJ 线圈的热稳定；SJ_1 延时闸合接点用于接通电容 C 对 ZJ 电压线圈的放电回路，故 ZJ 动作，发出重合闸脉冲。重合成功之后，由断路器辅助接点 DL_1 和 DL_3 分别使 ZJ、SJ 复归；电容 C 重新充电，再次处于准备状态，完成一个重合闸循环。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

ZJ 采用带有电流自保持的中间继电器，是因为电容 C 放电过程很快，一般小于 0.01s，如无自保持回路，则可能在电容电压衰减后撤消重合闸命令，重合过程半途而废。有了电流自保持回路，则 ZJ 一旦动作，就能保证命令执行。在重合闸出口回路使用 ZJ_1、ZJ_3 多接点串联，是为增加断弧能力，防止接点粘连。

(3)SZCH 重合不成功动作过程

当重合到持续性故障线路时，继电保护再次动作使断路器跳闸，如果 SZCH 与保护配合采用 ZCH 后加速保护，则第二次跳闸是瞬时的。断路器再次跳闸后，SZCH 起动回路再次接通，SJ 又再次起动，其延时接点又接通 C 对用电压线圈放电回路，但这时 C 未充好电，故 SZCH 不动作。

要指出一点，在 SJ_1 闭合时，直流操作电源电压会经过 4R、SJ_1、ZJ 电压线圈形成通路，但由于 4R 阻值很大(约几兆欧)，而 ZJ 电压线圈电阻只有几千欧，ZJ 电压线圈承受分压值很小，故 ZJ 不会动作。

3.参数整定

(1)重合闸动作时限

重合闸动作时限，原则上越短越好，但必须满足以下要求：

①大于故障点反游离时间，即

$$t_{dZ} + t_{hZ} > t_{YL}$$

或

$$t_{dZ} = t_{YL} - t_{hZ} + \Delta t$$

式中 t_{dZ}——重合闸动作时限；

t_{YL}——故障点去游离时间；

t_{hZ}——断路器合闸时间；

Δt——时间裕度，一般取 0.3～0.4S。

②大于断路器准备好再次合闸的时间，即

$$t_{dZ} \geqslant t_{zb\cdot c}$$

或

$$t_{dz} = t_{zb\cdot c}$$

式中 $t_{zb\cdot c}$——断路器准备好重合所需的时间，包括触头周围绝缘油绝缘强度的恢复和操作机构复原所需时间。

③大于本线路电源侧最大动作时限的继电保护返回的时间，即

$$t_{dZ} + t_{hZ} > t_f$$

或

$$t_{dZ} = t_f - t_{hZ} + \Delta t$$

式中 t_f——最大动作时限的线路保护的返回时间；

t_{hZ}——见式

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

④大于环网或平行线路对侧可靠地切除故障的时间，即

$$t_{M\cdot zx} + t_{tz\cdot M} + t_{dz} + t_{hz\cdot M} > t_{N\cdot zd} + t_{tz\cdot N} + t_{yL}$$

或

$$t_{dz} = t_{N\cdot zd} + t_{tz\cdot N} + t_{yL} - (t_{M\cdot zx} + t_{tz\cdot M} + t_{hz\cdot M}) + \Delta t$$

式中 $t_{N\cdot zd}$——线路对侧（N侧）保护最大时限，可取第Ⅱ段保护时限0.5s；

$t_{M\cdot zx}$——线路本侧（M侧）保护最小时限，可取第Ⅰ段保护时限；

$t_{tz\cdot M}$、$t_{tz\cdot N}$——M、N侧断路器跳闸时间；

$t_{hz\cdot M}$——M侧断路器合闸时间；

t_{yL}——故障点反游离时间；

Δt——时间裕度。

【实例】设线路两侧均采用多油断路器，$t_{tz}=0.1s$，$t_{hz}=0.8s$，$t_{yL}=0.2s$，$\Delta t=0.4s$。重合闸动作时间为

$$t_{dz} = 0.5 + 0.1 + 0.2 - 0 - 0.1 - 0.8 + 0.4 = 0.3s$$

为可靠地切除故障，提高重合闸成功率，单侧电源SZCH的动作时限一般取0.8～1s。

(2)重合闸复归时间

重合闸复归时间是指电容C充电到继电器ZJ动作电压所需的时间。其必须满足以下要求：

①重合失败，由后备保护再次跳闸，不会发生第二次合闸，即

$$t_{dz\cdot j\cdot zd} + t_{tz} + t_{dz} + t_{hz} < t_f$$

式中 $t_{dz\cdot j\cdot zd}$——后备保护最大动作时限；

t_{dz}——重合闸动作时间；

t_{tz}——断路器跳闸时间；

t_{hz}——断路器合闸时间；

t_f——SZCH复归时间。

②重合成功之后不久，线路又发生新的故障，将进行新的一轮跳闸一重合闸循环。从第一次重合至第二次重合应有一定的时间间隔，保证断路器遮断能力确已恢复。一般取$t_f=15\sim20s$即可满足。

【实例】设直流电流电压$U_z=110kV$，ZJ动作电压$U_{dz\cdot j}=65V$，充电电阻$4R=1.1M\Omega$，电容$C=20\mu f$，则

$$t_f = RCln\frac{U_z}{U_z - U_{dz\cdot j}} = 1100000 \times 20 \times 10^{-6} ln\frac{110}{110-65} = 22ln2.45 = 20s$$

如果要调整SZCH返回时间，一般不改变C和4R，而是调整ZJ的动作电压$U_{dz\cdot j}$，调整继电器反作用弹簧紧力。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(3)后加速继电器 JSJ 的复归时间

后加速继电器 JSJ 的复归时间是指继电器失去励磁后接点延时返回的时间,应大于保护动作时间和断路器跳闸时间之和,即

$$t_f > t_{dz \cdot j} + t_{tz}$$

式中 t_f——JSJ 复归时间;

$t_{dz \cdot j}$——保护动作时间;

t_{tz}——断路器跳闸时间。

【实例】设 $t_{dz \cdot j} = 0.1s$, $t_{tz} = 0.1s$,则 $t_f > 0.1 + 0.1 = 0.2s$,一般取 0.3~0.4s。

(三)单侧电源线路三相二次重合闸

前面已谈到多次重合闸可以提高线路供电的可靠性,故对于单回路供电的重要用户,如采用小车式成套开关柜,便于检修断路器时,也可考虑采用三相二次重合闸。

1.装置的构成

由阿城继电器厂 DS-24H 型重合闸继电器等元件构成的三相二次重合闸接线见图 5-1-2。图中 ZCH 为重合闸继电器,SWJ 为双位置继电器,ISZJ、ZSZJ 为记录 ZCH 动作次数的数字继电器,HJ 为手动合闸继电器,TBJ 为防跳继电器,YA 为试验按钮。

DS-24H 型重合闸继电器是 DS-20 系列时间继电器的派生产品,有两对延时滑动接点、两对延时终止接点和两对瞬时切换接点,其用途是:①滑动接点 ZCH_1 发第一次重合脉冲,起动时间整定范围 0~3.5s;②滑动接点 ZCH_2 用于发第二次重合脉冲,按断路器恢复遮断能力所需时间整定,整定范围 8~12s;③动断终止接点 ZCH_3 在第二次重合成功后使装置复归,整定时间 19~20s;④动合终止接点 ZCH_4 用于重合失败后使装置退出运行,整定时间也为 19~20s;⑤瞬时切换接点 ZCH_5 用于 ZCH 前或后加速;⑥瞬时切换接点 ZCH_6 用于提高时间元件的热稳定并自保持。

电磁式双位置继电器 SWJ 有如下工作特点:当合闸电流线圈通电时,SWJ_1 动合接点闭合,并由继电器弹片限制机构自保持,即使合闸电流已消失,SWJ_1 仍处于闭合位置,只有在跳闸电流线圈通电,或复归电压线圈通电时,SWJ_1 才断开,也由弹片机构自保持,故可用 SWJ 反应手动"合闸后"位置,并可实现 ZCH 闭锁。

2.装置的工作原理

(1)准备状态

合闸按钮 HA 起动合闸继电器 HJ 使断路器合上,线路处于供电状态。合闸时,位置继电器 SWJ 动作,SWJ_1 处于"合闸后"闭合位置,ZCH 投入工作,处于准备状态。

(2)二次重合动作过程

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

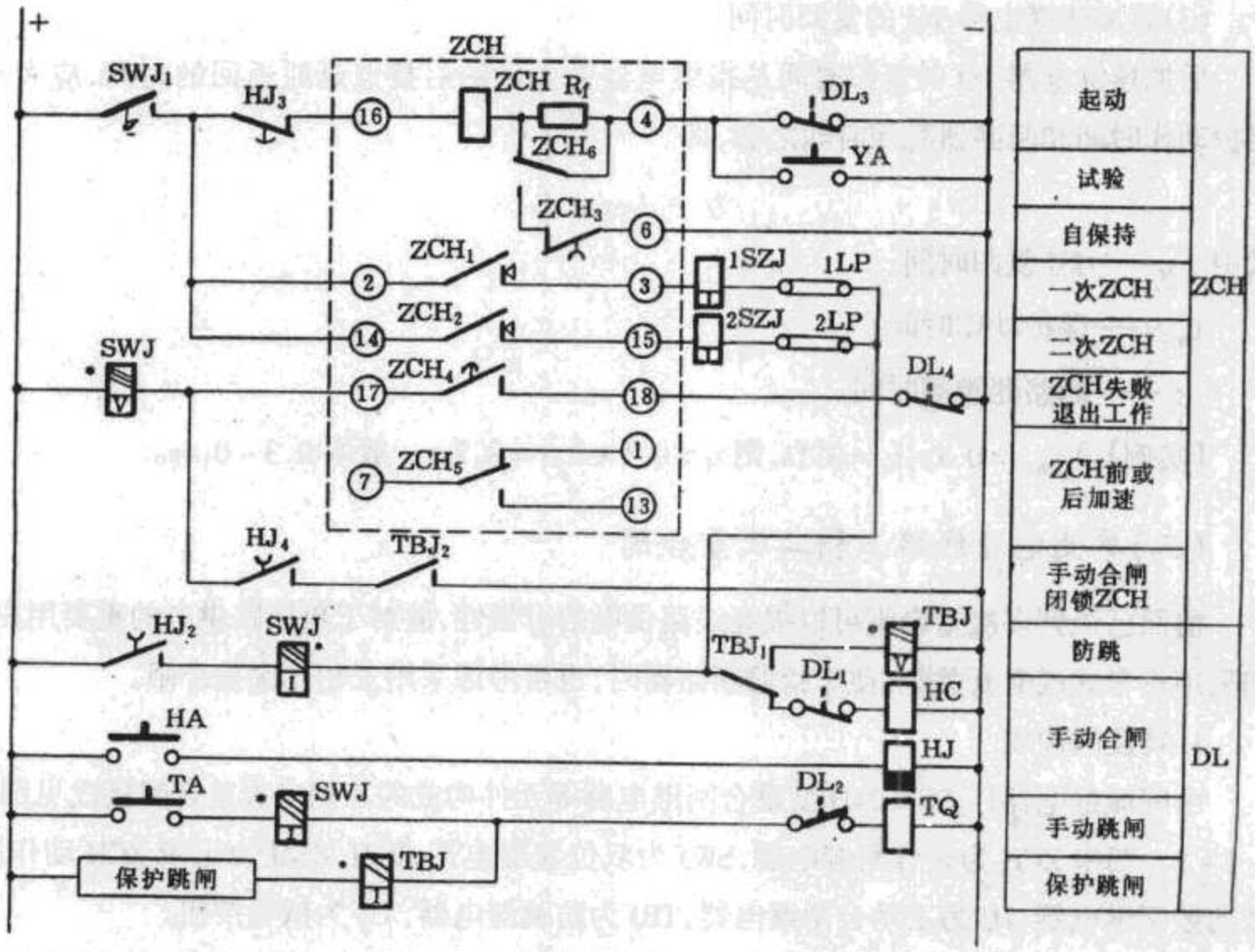


图 5-1-2 线路三相二次合闸装置原理接线

线路故障跳闸，断路器辅助接点 DL_3 闭合，与位置继电器接点 SWJ_1 构成“不对位”起动条件，ZCH 时间元件起动。ZCH_6 接入 R_f，并经 ZCH_3 自保持 19～20s，保证有足够时间由滑动接点 ZCH_1 和 ZCH_2 相继发出两次重合脉冲。

如果故障是暂时性的，则 ZCH_1 发出第一次重合脉冲可能成功，DL_1 在合闸后断开，合闸回路被切断，虽仍然有第二次重合脉冲发出，但不起作用。如暂时性故障在第一次重合时尚未消失，则保护使断路器再次跳闸，经 8～12s 由 ZCH_2 发出第二次重合脉冲。这时如故障已消失，则重合成功，ZCH 继电器由 ZCH_3 经 19～20s 复归。

如故障为持续性的，测保护第三次动作于跳闸，这时因 ZCH 继电器仍处于自保持状态，ZCH_1 和 ZCH_2 均已断开，故不会发第三次重合脉冲。在 ZCH_4 经 19～20s 闭合后，SWJ 电压线圈通电，SWJ_1 接点转为断开，ZCH 装置退出工作。

(3)ZCH 闭锁

手动正常跳闸时，位置继电器 SWJ 另一电流线圈通电，SWJ_1 接点断开，ZCH 退出工作，实现 ZCH 闭锁。

手动合闸到存在故障的线路上时，HJ_4 和 TBJ_2 两接点相继闭合，SWJ 电压线圈通电，

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

SWJ_1 接点断开，也一样闭锁 ZCH。

(4)防跳回路

为了防止 ZCH_1、ZCH_2 接点粘连造成断路器“跳跃”，设有防跳继电器 TBJ、其工作原理与图相同，惟 TBJ 电流自保持线圈串接于保护跳闸回路。

(5)ZCH 完好性试验回路

利用起动回路中的试验按钮 YA 进行 ZCH 完好性试验，试验时将 ILP、ZLP 断开。顺便指出，如只将 ZLP 断开，装置改变为三相一次重合闸。

由 DS－24H 继电器构成的三相一次或二次重合闸，不用电容 C，从而可避免 C 年久失效引起装置不能可靠动作问题。

二、双侧电源线路三相自动重合闸

(一)双侧电源线路 SZCH 的类型及应用

1.非同期重合闸

非同期重合闸是指双侧电源线路(如电力系统联络线，水电站与电力系统联接线路等)在事故跳闸后，只要两个解列系统的频率差、申压差在允许范围内，非同期合闸所产生的冲击电流不超过规定值，即可不检查同期条件，按“不对位”起动条件，将线路断路器重合。

非合期合闸冲击电流周期分量允许值见表 5－1－1。

表 5－1－1　　非同期合闸冲击电流周期量允许值

电　　流	$I_{cj*}\cdot X''_{d*}$	备　注
对于气轮发电机	≤0.65	
对于有阻尼绕组的水轮发电机	≤0.6	
对于无阻尼绕组的水轮发电机	≤0.6	
对于同步调相机	≤0.84	
对于电力变压器	≤1	X''_{d*} 应改 X_{B*}

注　X''_{d*}——发电机次暂态电抗；
　　X_{B*}——电力变压器阻抗。

允许冲击电流是从机组允许机械强度作为判断依据的。

2.快速重合闸

如果线路全线继电保护为速动保护，且继路器使用快速断路器，能在 0.6～0.7s 内完成跳闸一重合闸循环时，因两侧电势的相角可能尚未拉开到危及电力系统稳定的程度，也可采用不检查同期条件的快速重合闸。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

惟一般 110kV 以下线路保护不是全线快速保护，断路器一般也不是快速型，故不能采用快速重合闸。

3.检查无电压重合闸和检查同期重合闸

在故障线路跳闸后，其一侧断路器可在检查线路无电压条件下先重合；另一侧断路器则检查频率差在允许范围时重合。

4.自同期重合闸

在水电站以单回线路与电力系统联接，且机组采用自同期并列方式时，则在线路故障跳闸后，电力系统侧先检查无电压重合，然后水电站侧实行自同期重合，即在未给上励磁的发电机转速达 80%时将断路器重合，联动给上励磁，将发电机拉入同步。

(二)检查无电压和检查同期重合闸

1.工作原理

检查无电压和检查同期 SZCH 原理示意如图 5-1-3 所示。

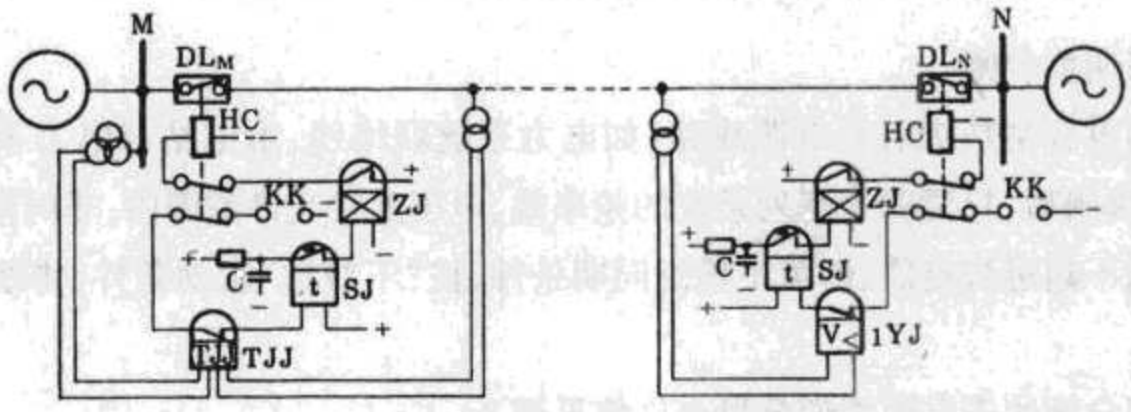


图 5-1-3 检查无电压和检查同期 SZCH 原理示意图

线路 M 侧装设检查同期 SZCH，N 侧装设检查无电压 SZCH。在线路故障使两侧断路器跳闸后，N 侧利用低电压继电器 1YJ 检查线路无电压，ZCH 继电器起动，使 N 侧断路器先行重合。如重合成功，则 M 侧利用频差继电器 TJJ 检查两系统频差是否符合要求。如满足同期条件，则 M 侧断路器继而重合，恢复系统并列运行。

如线路故障为持续性，则 N 侧重合不成功，保护加速动作，DL_N 再次跳闸，不再重合。

2.两侧 SZCH 的配合

检查无电压和检查同期重合闸的配合工作有以下几个问题。

(1)顺序的配合

在无电压侧未重合以前，TJJ 两个电压线圈仅有一个线圈接入电压，其常闭接点打开，不会发生同步侧先重合，无压侧无法重合的问题。

(2)同期侧断路器不会误重合

在无压侧断路器重合到持续性故障时，ZCH 后加速使断路器辅助接点 DL_N 再次跳

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

闸。在这重合过程中，M侧的TJJ可能检查到频率差符合同期条件而发生TJJ常闭接点返回，但因N侧从重合到再次跳闸时间很短，而TJJ接点返回的时间小于ZCH起动时间，故M侧断路器不会误重合。

(3)断路器误碰跳闸的补救

断路器误碰引起的误跳闸如发生于M侧，则可通过检查同期ZCH，自动恢复并列；如发生于N侧，则不能倚靠检查无电压ZCH恢复并列。

(4)重合闸方式的变换

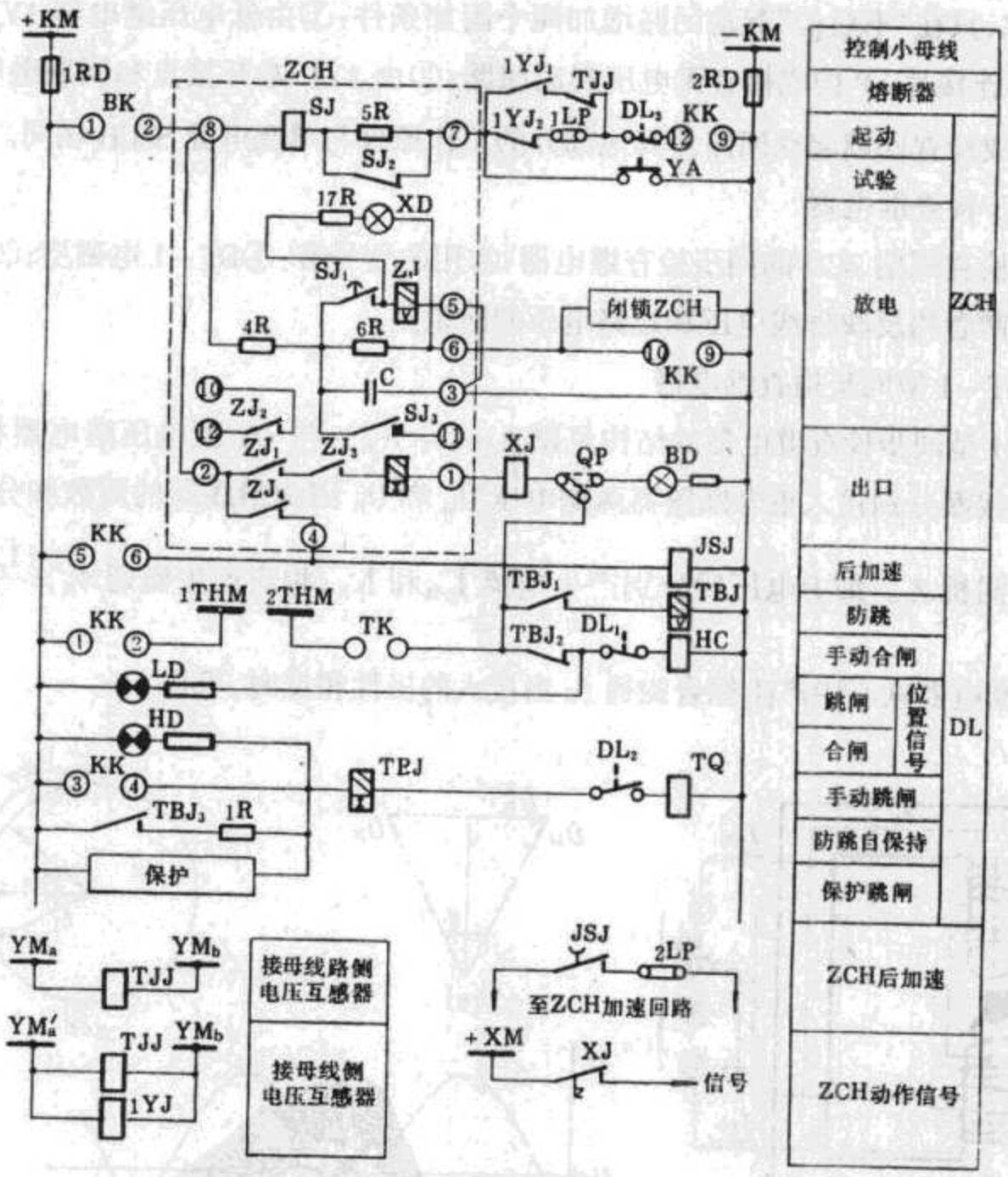


图5-1-4 检查无电压和检查同期SZCH原理接线

从上述两种重合闸的工作配合情况可知，检查无电压ZCH一侧的断路器负担较重。为使两断路器检修机会均等，两侧的重合闸方式应适当轮换。为此，一般在两侧均装设检查无电压和检查同期两种重合闸方式，通过连接片1LP选择。1LP投入为检查无电压ZCH；LP断开为检查同期ZCH，参阅图5-1-4。虽然在1LP投入时，ZCH起动回路存在

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

检查无电压和检查同期两个回路并联，但显然，当线路无电压时只有检查无电压 ZCH 能起作用；在误碰跳闸时，则因线路有电压，检查无电压 ZCH 不起作用，也可由检查同期 ZCH 使断路器恢复投入。要特别注意两侧的 1LP 不能同时投入，因为两侧均投入检查无电压 ZCH 时，如果两侧 ZCH 起动时间整定相同，就可能两侧 SZCH 同时动作，造成非同期并列。

3.检查无电压和检查同期 SZCH 的原理接线

图 5－1－4 为检查无电压和检查同期 SZCH 的原理接线，与图 5－1－1 单侧电源 SZCH 相比，只在“不对位”起动回路增加两个附加条件：①由低电压继电器 1YJ 的常闭接点 $1YJ_2$ 和连接片 LP 构成检查无电压起动回路；②由 $1YJ_1$ 常开接点和同期继电器 TJJ 常闭接点构成检查同期起动回路。其他部分的工作原理与单侧电源 SZCH 相同。

4.同步检查继电器

用于检查同期 ZCH 的同步检查继电器，常用的型号有：①DT－1 电磁型；②BT－1B 晶体管型。两者均反映母线电压和线路电压的向量差。

(1)DT－1 型同步检查继电器

DT－1 型同步检查继电器的结构见图 5－1－5(a)，与 DY 型电压继电器相似。继电器有两组线圈分别接入重合断路器两侧电压 $\dot{U}_M$ 和 $\dot{U}_N$ 因两组线圈的匝数和分布相同，故有相等的阻抗 $\dot{Z}_j$。加上电压后分别产生电流 $\dot{I}_{j\cdot M}$ 和 $\dot{I}_{j\cdot N}$，相应产生磁通 $\phi_M = \frac{\dot{I}_{j\cdot M}W}{R_\mu}$ 和 $\phi_N = \frac{\dot{I}_{j\cdot N}W}{R_\mu}$，在断电器铁心中产生综合磁通 ϕ_S 当接入的极性相反时，可得

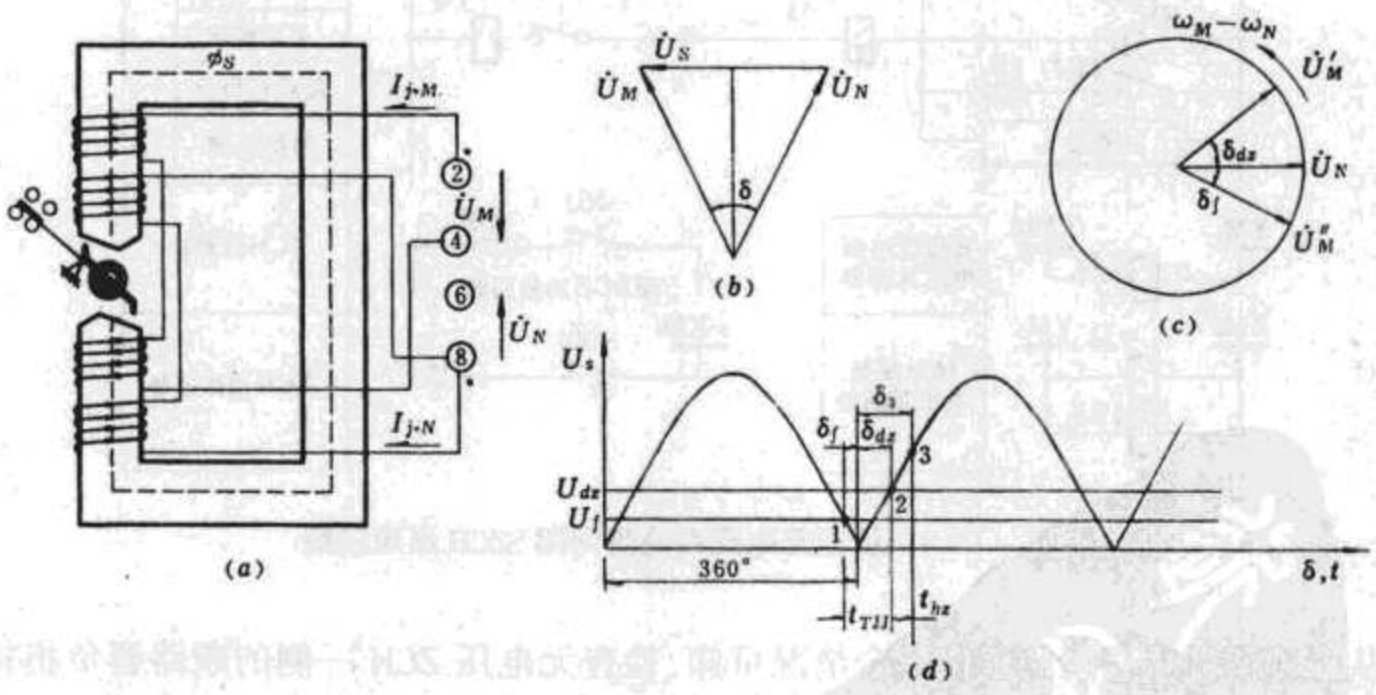


图 5－1－5 DT－1 型同步检查继电器

(a)结构；(b)电压向量；(c)旋转向量；(d)Us 与 δ 关系

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$\phi s = \phi M - \phi N = \frac{W}{R_\mu}(\dot{I}_{j\cdot M} - \dot{I}_{j\cdot N}) = \frac{W}{R_\mu \dot{Z}_j}(\dot{U}_M - \dot{U}_N)$$

式中 W——继电器每一组线圈匝数；

R_μ——继电器铁芯磁组；

$\dot{Z}_j$——继电器每一组线圈阻抗。

为了简化分析，上式中忽略了两组线圈间互感。从式可见综合磁通 ϕs 与所加电压差成正比。ϕs 为一脉动磁通，与脉动电压 Us 的概念完全相同，可用脉动电压 Us 进行分析。

$\dot{U}_M$ 与 $\dot{U}_N$ 具有不同的角频率，两个电压向量之间的相角 δ 随时间 t 而变。若 $\dot{U}_N$ 固定不动，则 $\dot{U}_M$ 以两旋转向量角频率之差($\omega_M - \omega_N$)转动，如图 5-1-7 所示。可得脉动电压有效值

$$Us = 2U\left|\sin\frac{\delta}{2}\right|$$

式中 U——电压有效值；

δ——两电压向量之间的相位差，$\delta = (\omega_M - \omega_N)t$。

从式可见，当 δ = 0°时，Us = 0；δ = 180°时，Us = 2U(为最大值)；δ = 360°时，Us = 0，Us 变化一个周期。周期为

$$Ts = \frac{1}{|f_M - f_N|}$$

从式可见，f_M 与 f_N 越相近，Ts 就越大；f_M 与 f_N 相差较大时，Ts 愈小，同步检查继电器就是反映 Ts 大小而工作的，参阅图 5-1-5(d)。当 Us 小于继电器 TJJ 的返回电压 U 时，其常闭接点返回，见图中点 1；当 Us 大于继电器 TJJ 的动作电压 U_{dz} 时，其常闭接点断开，见图中点 2。从点 1 至 2 间为 TJJ 常闭接点处于闭合状态的时间，以 t_{TJJ} 表示。过了 2 点，继电器 TJJ 常闭接点又断开，每一周期继电器接点闭合一次，频率差较小时，闭合时间较长；频率差较大时，闭合时间较短。要使 SZCH 能可靠地发出重合脉冲，必须使 t_{TJJ} 大于 ZCH 继电器的起动时间 t_{dz}，即

$$t_{TJJ} > t_{dz}$$

继电器的动作电压 U_{dz} 和返回电压 U_f 可按下式转换为动作角 δ_{dz} 和返回角 δ_f

$$\delta_{dz} = 2\sin^{-1}\left(\frac{U_{dz}}{2U}\right)$$

$$\delta_f = 2\sin^{-1}\left(\frac{U_f}{2U}\right)$$

动作角 δ_{dz} 和返回角 δ_f 有如下关系

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$\delta_f = k_f\delta_{dz}$$

式中 k_f——返回系数，一般取0.8～0.85。

继电器动作时间为

$$t_{TJJ} = \frac{\delta_{dz} + \delta_f}{\omega_M - \omega_N} = \frac{(1 + k_f)\delta_{dz}}{2\pi(f_M - f_N)}$$

DT－1型同步检查继电器的动作角可在20°～40°范围内整定。

(2)BT－1B型同步检查继电器

BT－1B型同步检查继电器原理接线见图5－1－6。

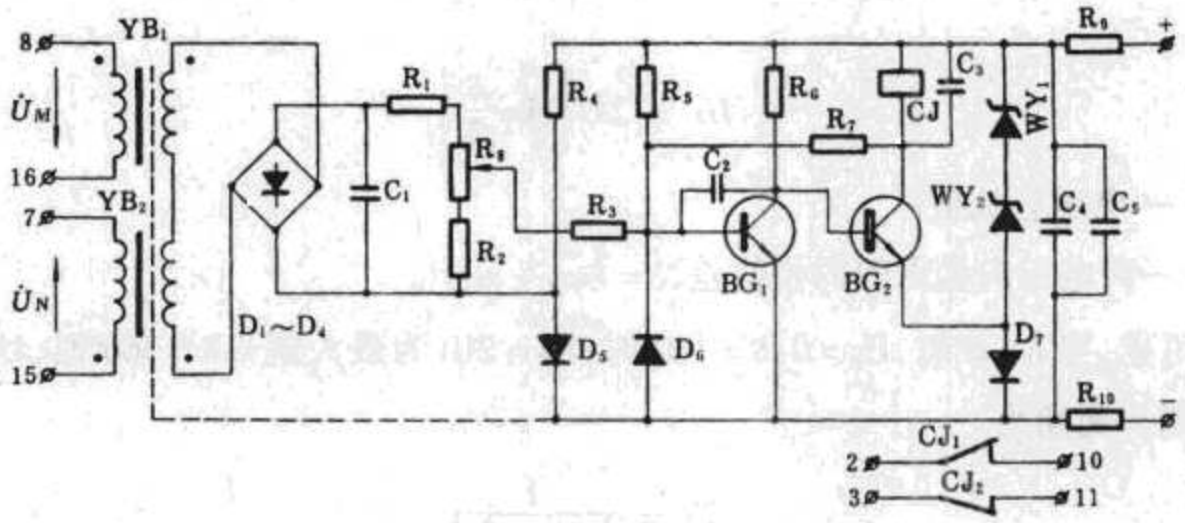


图5－1－6 BT－1B型同步检查电器原理接线

继电器由电压形成回路、触发器和干簧继电器等元件构成。电压 $\dot{U}_M$ 和 $\dot{U}_N$ 分别加至变压器 YB_1、YB_2 的一次侧，其二次电压反极性连接，故综合输出反映两电压的向量差，即脉动电压 Us 经整流滤波转变为平滑的直流信号电压，经 R_1、R_2、R_3 分压，取出部分电压 U_{sr} 加至下一级继电触发器，该直流信号电压反映 Ts 的大小。

继电触发器为具有继电特性和高灵敏度的零指示器，由 R_4 和 D_5 构成比较电路，U_{D5} 为门槛电压。当输入信号电压 $kU_{sr} \geqslant U_{D5}$ 时(相当于动作角 δ_{dz})，触发器翻转，干簧继电器 CJ 动作，其常闭接点断开；当 $kU_{sr} < U_{D5}$ 时(相当于返回角 δ_f)，继电器返回，其常闭接点闭合。从常闭接点返回至动作的时间即为同步检查继电器的动作时间 t_{TJJ}。调整 R_8 可改变继电器的动作角 δ_{dz}。

5.参数整定

(1)无电压侧(N侧)元件参数整定方法

①低电压继电器1YJ，选用DY－36/160型，一般按0.5倍额定电压整定，即

$$U_{dz \cdot f} = 0.5\frac{U_e}{n_y} = 50V$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

②ZCH 动作时间 t_{dz} 接线路两侧断路器不同时跳闸的条件整定，N 侧 ZCH 动作时间为

$$t_{dz} = t_{M\cdot zd} + t_{tz\cdot M} + t_{YL} - t_{N\cdot zx} - t_{tz\cdot N} - t_{hz\cdot N} + \Delta t$$

式中各符号意义参见式中说明。

(2)同步侧(M 侧)元件参数整定方法

①同步检查继电器 TJJ 的动作角按以下两条件整定：①$t_{TJJ} \geqslant t_{dz}$；②在临界点(图 5-1-5)(d)点 2)发出重合脉冲时，因断路器要延到点 3 才合上，实际合闸相角为 δ_3，要求这时发生的非同期合闸冲击电流不超过允许值。

因

$$t_{TJJ} = \frac{(1 + k_f)\delta_{dz}}{2\pi(f_M - f_N)}; t_{TJJ} \geqslant t_{dz}$$

故得 TJJ 动作角为

$$\delta_{dz} \geqslant \frac{2\pi(f_M - f_N)t_{dz}}{1 + k_f}$$

冲击电流周期分量有效值为

$$I_{c\cdot j} = \frac{2 \mid \dot{E}''_d \mid \sin\frac{\delta_3}{2}}{\dot{Z}''_\Sigma} \leqslant I_{gj\cdot yu}$$

式中 $\dot{E}''_d$——同步点两侧次暂态电势($|\dot{E}''_d\cdot M| = |\dot{E}_d\cdot N| = |\dot{E}''_d|$)；

$\dot{Z}''_\Sigma$——系统综合次暂态阻抗；

$I_{cj\cdot yu}$——允许冲击电流周期分量有效值。

移项可得

$$\delta_3 = \leqslant 2\sin^{-1}\left[\frac{I_{gj\cdot yu}\cdot \dot{Z}''_\Sigma}{2 \mid \dot{E}''_d \mid}\right]$$

将 $\delta_3 = \delta_{dz} + (\omega_M - \omega_N)t_{hz\cdot M}$ 代入上式得

$$\delta_{dz} + (\omega_M - \omega_N)t_{hz\cdot M} \leqslant 2\sin^{-1}\left[\frac{I_{gj\cdot yu}\cdot \dot{Z}''_\Sigma}{2 \mid \dot{E}''_d \mid}\right]$$

因 $\omega_M - \omega_N = \frac{(1+k_f)\delta_{dz}}{t_{dz}}$，故代入上式得

$$\delta_{dz} \leqslant \frac{2\sin^{-1}\left[\frac{I_{gj\cdot yu}\cdot \dot{Z}''_\Sigma}{2 \mid \dot{E}_d \mid}\right]}{1 + (1 + k_f)\frac{t_{hz\cdot W}}{t_{dz}}}$$

两式为同步检查继电器 TJJ 应满足的整定公式。

【实例】假设 $k_f = 0.85$，ZCH 动作时间 $t_{dz} = 1s$，断路器合闸时间 $t_{hz} = 0.8s$，频差 $|f_M - f_N| =$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

0.15Hz，系统综合次暂态阻抗 $Z''_{\Sigma}=2\chi''_{d}$，允许冲击电流周期分量有效值 $I_{cj\cdot yu}=0.6\frac{E''_{d}}{X''_{d}}$，由式得

$$\delta_{dz}=\frac{2\pi\times0.15\times1}{1+0.85}=29.19^{\circ}$$

又由式

$$\delta_{dz}\leqslant\frac{2\sin^{-1}\left[0.6\frac{E''_{d}}{X''_{d}}\cdot2\chi''_{d}/2E''_{d}\right]}{1+(1+0.85)\frac{0.8}{1}}=\frac{2\sin^{-1}0.6}{2.48}=30^{\circ}$$

从两个整定条件均可得见 $\delta_{dz}\approx30^{\circ}$，故可整定动作角 30°。

②ZCH 动作时间 t_{dz}，与无电压侧动作时间的整定原则相同，本侧保护动作时限取最小值，对侧保护动作时限取最大值，即

$$t_{dz\cdot M}=t_{tz\cdot zd}+t_{tz\cdot N}+t_{YL}-t_{M\cdot zx}-t_{tz\cdot M}-t_{hz\cdot M}+\Delta t$$

式中各符号意义参见式中说明。

三、自同期重合闸在水电站的应用

(一)水电站自同期重合闸的意义

水电站以单回线路与电力系统联接，当该线路故障跳闸时，由于机组甩负荷，将导致水电站母线频率迅速上升，甚至使机组停机。

在线路故障消除后，机组重新起动、并网，恢复发电，需要时间较长。即便在不停机情况下再次并网，操作也较缓慢，解决不了电力系统稳定运行的需要。若采用重合闸恢复并网，时间快得多。但一般的检查同期 ZCH，较难达到目的。

在事故情况下，如经验算水电站机组允许用自同期方式并列，则可采用自同期重合闸，迅速恢复并网，则对电力系统事故后电压的恢复，系统的稳定运行有着显著效果。

(二)水电站采用自同期重合闸的条件

当水电站具备以下条件时，可考虑装设自同期重合闸：

1.经过验算，水轮发电机组采用自同期并列方式产生的冲击电流在允许范围内，对系统电压降低的影响不太大，根据规程规定允许在事故情况下以自同期方式并列。

2.机组水力机械自动化较完善，可用一个自同期重合闸脉冲完成开机、并网、带上故障跳闸前负荷的全过程。

3.水电站以单回路向电力系统送电。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

4.电站近区用电较小,并容许短时停电及电压降低。

(三)自同期重合闸在水电站的应用

自同期重合闸在水电站的应用,可用图5-1-7说明之。

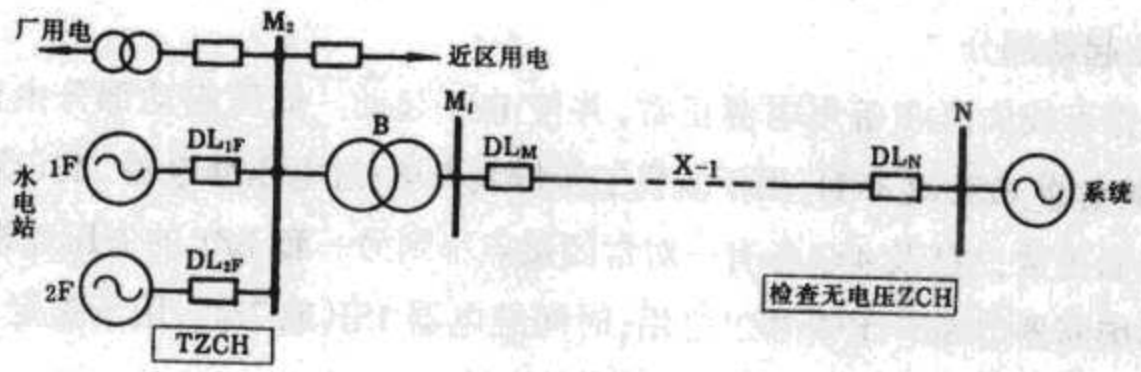


图5-1-7　自同期重合闸在水电站的应用

当线路X-1故障,两侧断路器跳闸后,电力系统侧(N侧)检查无电压重合闸先将DL重合。如重合成功,则在水电站侧以自同期重合闸恢复并列。

实现自同期重合闸的方法,根据电站具体情况的不同,可有以下两种接线。

1.水电站无近区负荷的情况

当水电站无近区负荷时,则X-1线路事故跳闸时,电站侧可不跳线路断路器,而直接跳发电机断路器。这样,可用发电机断路器进行自同期重合闸,接线比较简单。

2.水电站有近区负荷的情况

当水电站发电机电压母线接有近区负荷,X-1线路故障时,跳线路断路器DL_M,发电机继续运行供给近区用电。在这种情况下,自同期重合闸接线比较复杂,必须在N侧重合成功之后,监视X-1线路有电压,先使发电机断路器跳闸,将机组停下来;监视发电机电压母线的电压已低于0.1额定电压,合上线路断路器DL_M,系统电压送至发电机电压母线;然后才以发电机断路器以自同期方式开机和并网。

我国广东流溪河水电站,最初采用第一种方法实现自同期重合闸,后来为了不使近区供电受影响,改用第二种方法。两种自同期重合闸方式都经实践证明是可行的,惟因自同期并列方式本身存在一定的电流冲击,虽在规程允许范围内,但电站仍不放心,因此后来不再使用。由于自同期重合闸装置在我国未广泛应用,故具体接线从略。

第二节　BZT接线工艺

一、"暗备用"的BZT典型接线

水电站厂用电系统的"暗备用"的BZT原理接线见图5-1-8。每台厂用变压器各装

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

一套 BZT,实现互为备用。

1.BZT 的构成

每套 BZT 装置按其工作性质划分,基本上可分为低压起动和自动合闸两个组成部分。

(1)低压起动部分

监视工作母线失压和备用电源正常,并使 BZT 起动。低压起动部分由以下元件组成:低电压继电器 1YJ(或 3YJ),用于监视工作母线失压;过电压继电器 2YJ(或 4YJ),用于监视备用电源正常,2YJ 及 4YJ 各有一对常闭接点串到另一套 BZT 的失压监视回路,兼作电压互感器熔断器熔断时闭锁 BZT 之用;时间继电器 1SJ(或 2SJ),用于整定 BZT 动作延时;信号继电器 1XJ(或 2XJ),用于发 BZT 动作信号。

(2)自动合闸部分

在工作电源切断后,将备用电源断路器投入。自动合闸部分由以下元件组成:中间继电器 BSJ 具有 0.5~0.8s 延时断开、瞬时闭合的接点,用于保证 BZT 只动作一次;自动空气开关辅助接点 1ZKK、2ZKK,用于保证工作电源先切,备用电源后投;信号继电器 XJ,用于发合闸信号;切换开关 BK,用于手动撤出 BZT 装置。

2.BZT 的动作过程

(1)准备状态

闭锁开关 BK 投入;1DL、2DL、1ZKK、2ZKK 在合闸后位置;3ZKK 在断开位置;Ⅰ、Ⅱ段母线电压正常,1YJ~4YJ 常闭接点断开,2YJ、4YJ 常开接点闭合;BZT 未起动,1SJ、2SJ 线圈不励磁,其延时接点断开;BSJ 线圈励磁,其接点闭合,但因正电源被 $1ZKK_{4-4}$ 和 $2ZKK_{4-4}$ 切断,故不发合闸脉冲;监视 1ZKK、2ZKK 投入位置的指示灯 BD 亮。

(2)动作过程

以工段母线 BZT 为例,当母线失压时,1YJ 和 2YJ 常闭接点闭合,如此时备用电源电压正常,则 4YJ 常开接点闭合,满足 BZT 起动条件,时间继电器 SJ 动作,经过整定延时,使 1ZKK 跳闸,1XJ 发 BZT 动作信号。

在 1ZKK 跳闸后,$1ZKK_{3-3}$ 辅助触点断开,BSJ 失磁,其接点经 0.5~0.8s 延时断开,这时出现 $1ZKK_{4-4}$ 和 BSJ 接点同时处于闭合状态的短暂时间,发出一个短合闸脉冲,经 XJ 线圈作用于 3ZKK 的合闸接触器 HC,使 3ZKK 合闸,I 段母线即转由 B_2 供电,由 XJ 发 3ZKK 投入信号。

(3)BZT 投入不成功

如果工作母线失压是由于母线发生持续性故障所造成,则 BZT 使 3ZKK 合闸后,故障电流将使变压器 B_2 的继电保护起动,按选择性要求将 3ZKK 跳闸。由于在发一个合闸脉

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

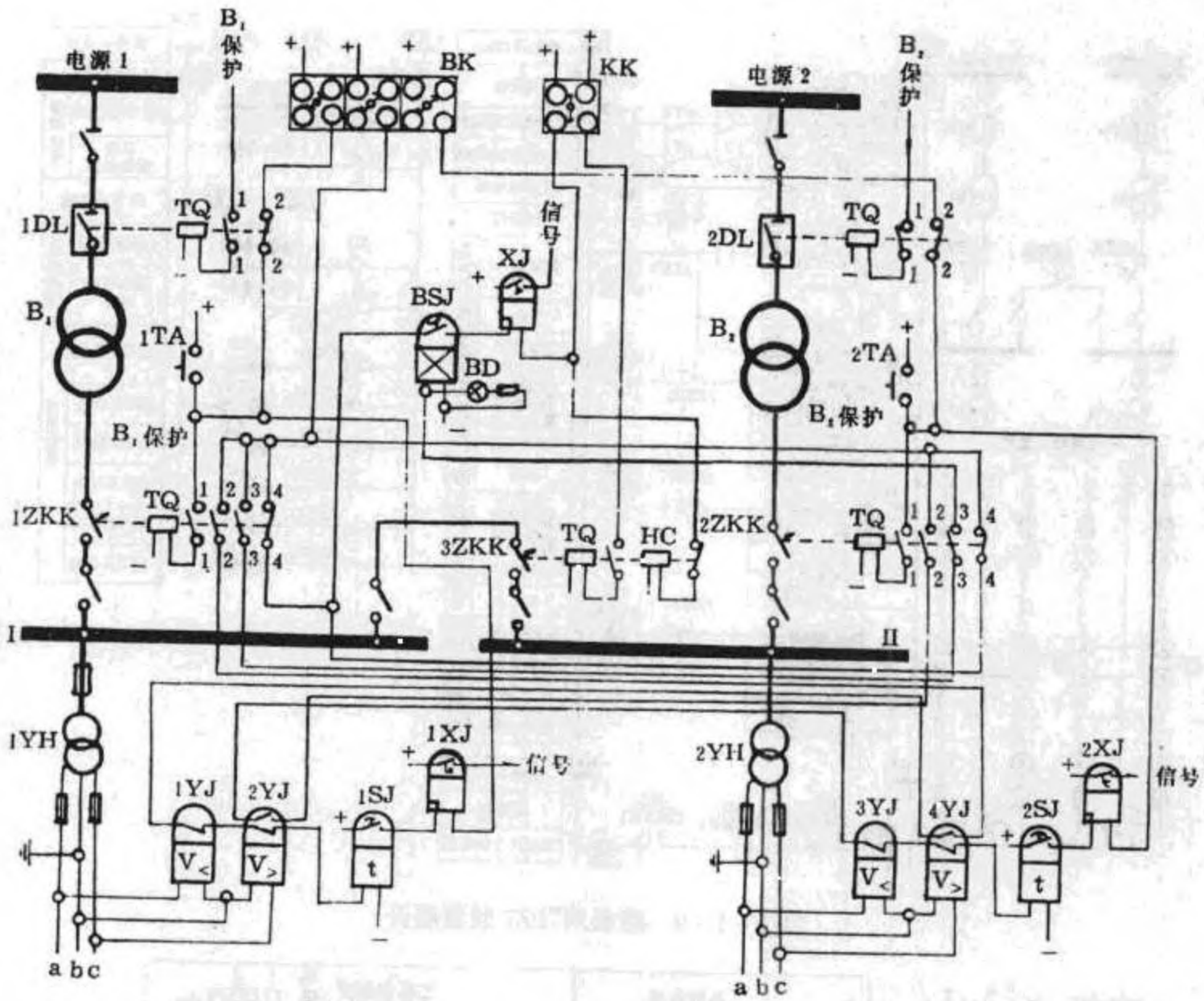


图 5-1-18 "暗备用"的 BZT 原理接线

冲后 BS 接点已返回，故 BZT 只动作一次，不影响Ⅱ段母线正常供电。

图 5-1-9 为"暗备用"BZT 展开图，接线原理与图 5-1-8 相同。由图 5-1-9 可以更清晰地看出 BZT 的动作过程及与继电保护的配合情况。

二、"明备用"的 BZT 典型接线

水电站和变电所厂用电的"明备用"的 BzT 原理接线见图 5-1-10。

对"明备用"BZT 的基本要求与"暗备用"BZT 全同，原理接线也极相似，惟"明备用"BZT 有以下特点。

1.失压监视使用的低电压继电器不同

在"暗备用"BZT 中，可用一只低电压继电器，并从另一套 BZT 的备用电源正常监视用过电压继电器，借用一个常闭接点，构成失压监视。而"明备用"BZT 的失压监视则必须装设两只低电压继电器。

2.合闸回路使用的闭锁继电器不同

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

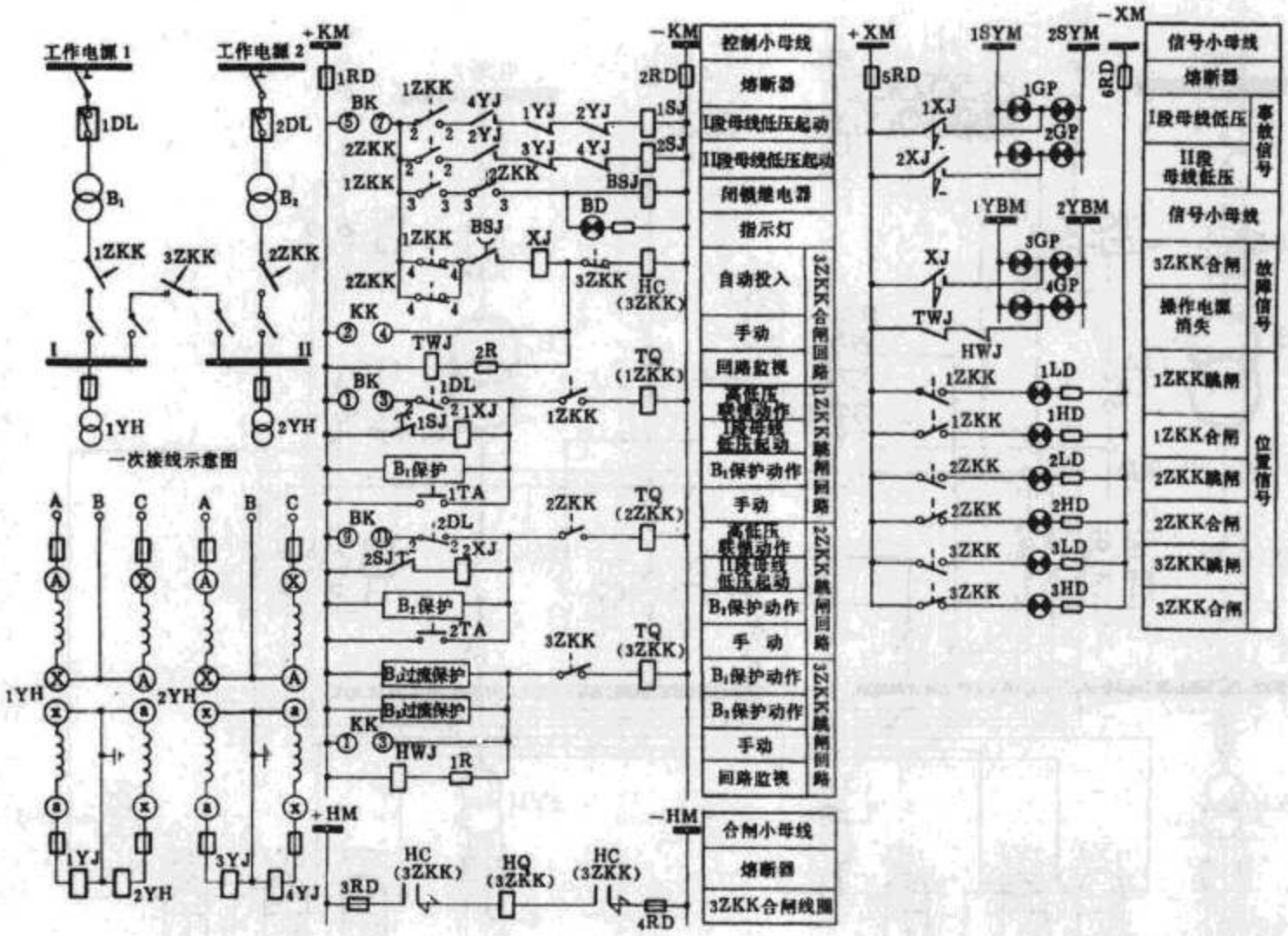
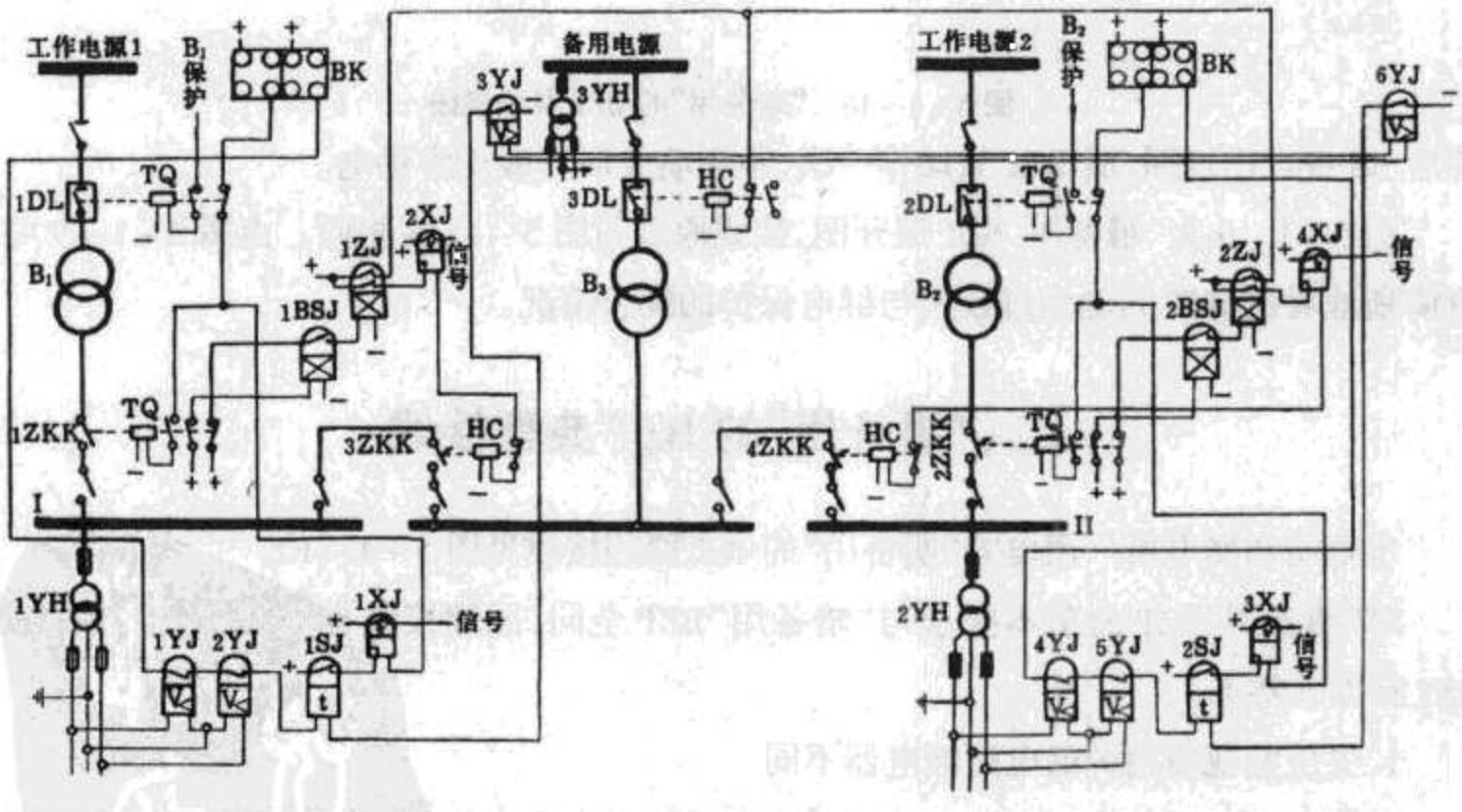


图 5-1-9 暗备用"BZT 装置展开



5-1-10 "明备用"的 BZT 原理接线

在"暗备用"BZT 中，两段母线的 BZT 可共用一个自动合闸回路，两套 BZT 只需一只 BSJ 闭锁继电器。而"明备用"BZT，由于合闸对象不一致，故每套均要有单独的 BSJ 继电

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

器和中间继电器。

3.继电保护配合不同

在“暗备用”BZT中，如备用电源合闸到持续性故障，首先应使分段开关跳闸，防止越级跳闸影响非故障母线的供电。而“明备用”BZT则在合到持续性故障时，可直接使备用电源断路器跳闸。

三、简易的BZT原理接线

功能比较完善的BZT，需要装设具有电动合闸操作机构的自动空气开关，使用的二次设备也较多，造价仍偏贵。为了节省投资，在一些小电站或35kV变电所中，常采用简易的BZT，其原理接线见图5-1-11。

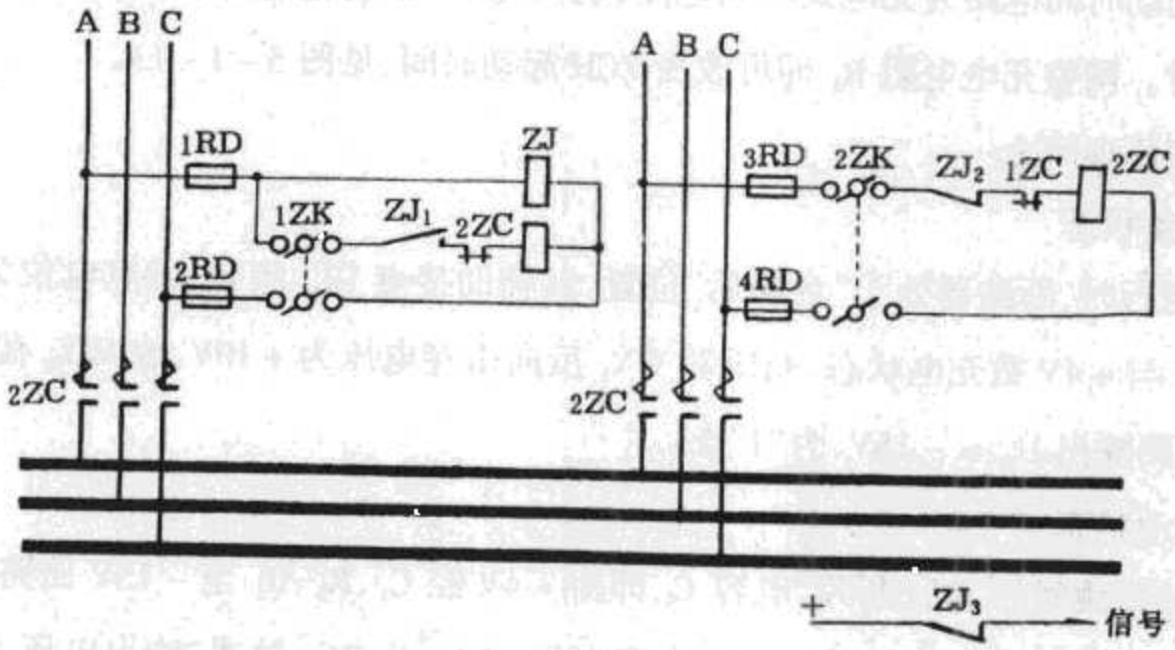


图5-1-11 简易的BZT原理接线

图中1ZC、2ZC为交流接触器；ZJ为交流型中间继电器，用于监视工作电源电压是否正常。工作电源正常时，继电器ZJ处于励磁状态，其接点ZJ_1闭合，接触器1ZC合上，母线由工作电源供电。这时因ZJ_2和1ZC处于断开位置，备用电源不接入。工作电源消失时，继电器ZJ失压复归，ZJ_1接点返回断开，接触器1ZC线圈失磁跳闸，1ZC触头断开，切断工作电源供电回路，然后由1ZC的常闭辅助接点与ZJ_2接点一起使接触器2ZC线圈励磁，2ZC投入，母线转由备用电源供电。在ZJ复归时，由其接点发出备用电源自动投入动作信号。

当工作电源恢复正常时，ZJ又再次动作，母线自动恢复由工作电源供电。

简易的BZT接线简单，除用于备用电源自动投入外，也可用于事故照明自动切换。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第三节 晶体管三相一次自动重合闸

下面以 JSGC 型晶体管两段式电流保护和重合闸成套装置为例，介绍晶体管三相一次自动重合闸。JSGC 型装置的原理接线见图 5－1－12，工作原理与用 DCH－1 型重合闸继电器构成的 SZCH 相同，由 ZCH 起动时间电路，一次合闸脉冲、ZCH 后加速等电路所组成。

一、ZCH 起动时间电路

1.电路接线

ZCH 起动时间电路为充电式时间电路，利用电容 C_1 充电至稳压管 WY_1 反向击穿电压取得延时。调整充电电阻 R_1 即可改变 ZCH 起动时间，见图 5－1－13。

2.工作原理简介

(1)准备状态

正常运行时，断路器处于“合闸后”位置，其辅助接点 DL_3 闭合，①点电位为 0V，电容 C_1 处于 0V 与 +4V 微充电状态，稳压管 WY_1 反向击穿电压为 +10V，故 WY_1 截止，BG_1 截止，时间电路输出 $U_{sc} \approx -15V$，为“1”态。

(2)起动状态

线路故障跳闸后，DL_3 断开，电容 C_1 即由 +4V 经 C_1、R_2、R_1 至 －15V 回路进行充电。经整定时限，C_1 充至稳压管 WY_1 反向击穿电压，WY_1 及 BG_1 导通，输出电压 $U_{sc} \approx 0V$，为“0”态。C_1 充至 U_{WY_1} 所需时间为

$$t_{dz} = (R_1 + R_2)C_1 \ln \frac{19}{19-(10+4)}$$

式中 R_1、R_2——充电电阻(其中 R_1 可调)；

C_1——电容。

利用 R_1 调整充电时闸，调整范围 0.5～2s。

要试验 ZCH 装置是否正常，可按试验按钮 YA，使 ZCH 起动时间电路起动。

二、一次合闸脉冲电路

1.电路接线

一次合闸脉冲电路见图 5－1－14，为一只由截止管 BG_1 控制的放电式前记忆电路，

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

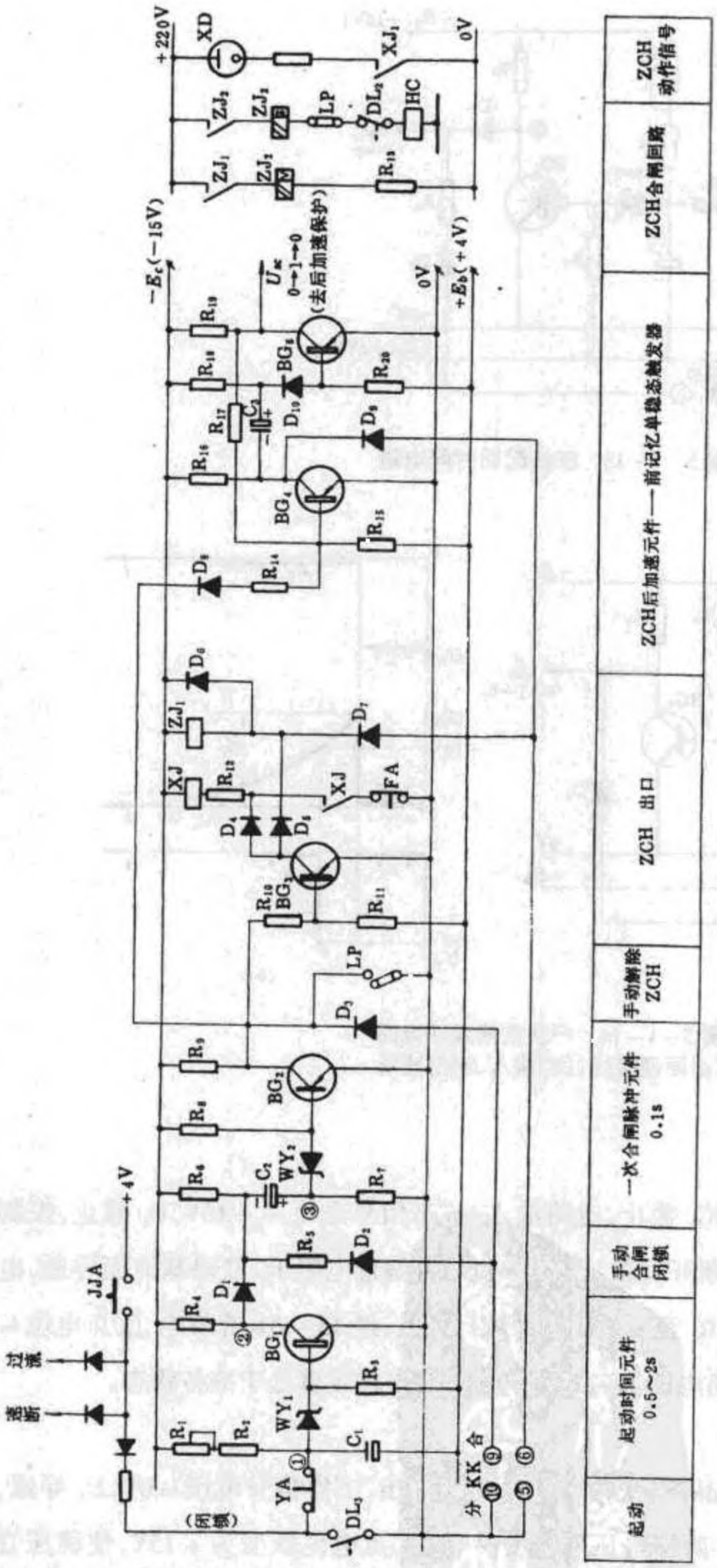


图 5-1-12 晶体管 SZCH 原理接线

利用电容 C_2 充好电需时 15～20s 保证 ZCH 只动作一次，并利用 C_2 放电以取得 0.1s 的一

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

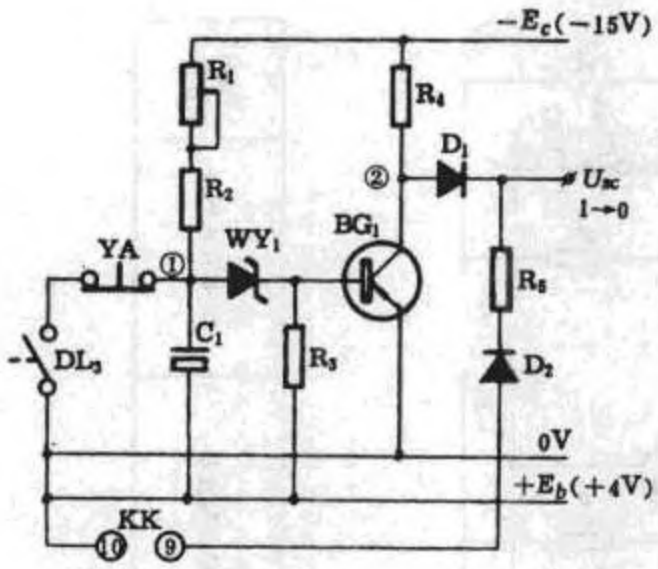


图 5－1－13 ZCH 起动时间电路

次合间短脉冲。

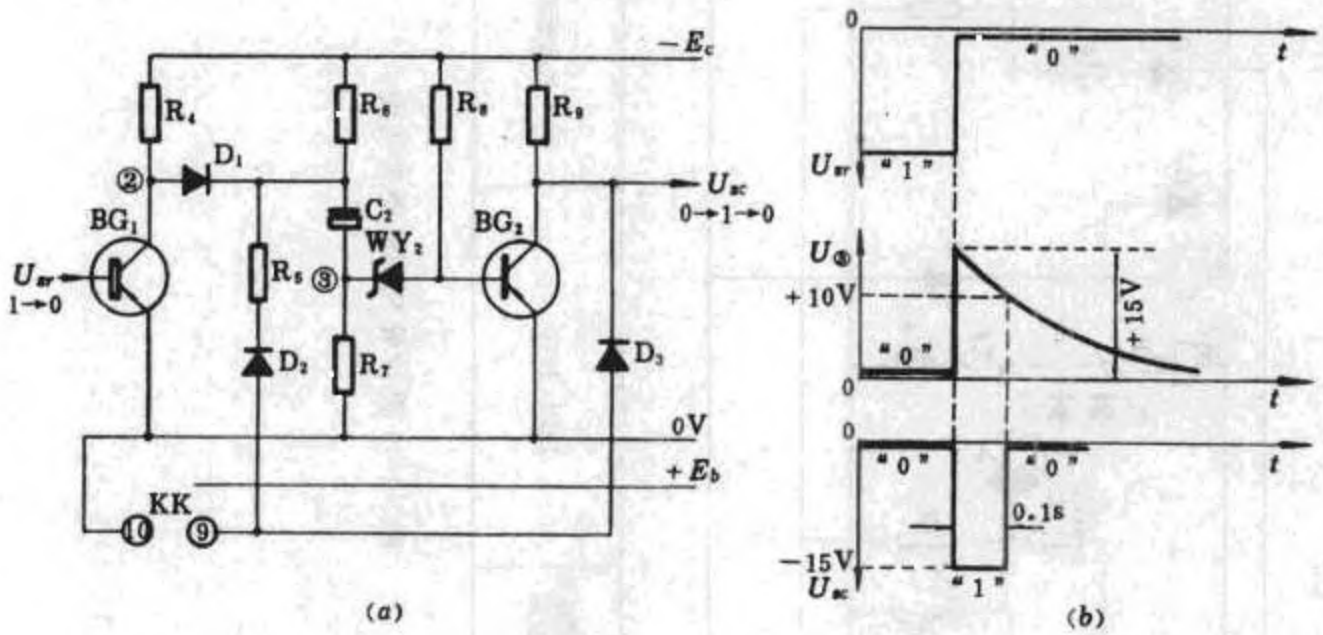


图 5－1－14 一次合闸脉冲电路
(a)原理接线；(b)输入、输出波形

2.工作原理简介

(1)准备状态

ZCH 未起动以前，晶体管 BG_1 截止，电路输入“1”态信号电压≈－15V，D_1 截止，控制开关接点 KK_{10-9}处于“合闸后”断开位置，晶体管 BG_1 由偏置电阻 R_8 取得基流而导通，电容 C_2 由 0V 经 BG_{2e-b}、WY_2、C_2、R_6 至－15V 回路进行充电，经 15～20s 充好电，②点电位≈－15V，③点电位≈0V，电路输出电压 U_{sc}≈0V，为“0”态，ZCH 装置处于准备状态。

(2)动作状态

线路故障跳闸，ZCH 起动，晶体管 BG_1 导通，电路输出“0”态信号电压≈0V，D_1 导通，②点电位变为 0V，但因电容 C_2 两端电压不能突变，故③点电位跃变为＋15V，使稳压管 WY_2 反向击穿，＋15V 电位加至晶体管 BG_2 基极，BG_2 即转为截止，电路输出电压由“0”态

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

变为“1”态。与此同时，C_2 通过 R_7、BG_{1e-c}、D_1 回路放电，③点电位沿指数曲线下降(见图 5-1-14(b)波形)。当降低到 WY_2 截止电压(约 10V)时，BG_2 又变为导通，输出电压又变为“0”态。可见在 ZCH 起动后，电路将输出一个 0-1-0 短脉冲，宽度由放电时间常数 $\tau = R_7C_2$ 决定，一般取 0.1s。

一次合闸短脉冲推动下一级由 BG_3 构成的反相器翻转，BG_3 由截止变为导通，使出口元件一微型中间继电器或干簧继电器 ZJ_1 和 XJ一动作，实现重合闸并发信号。信号由本身接点自保持，用 FA 按钮复归，参阅图 5-1-12。

(3)ZCH 只动作一次

重合不成功，断路器辅助接点 DL_3 再次断开，ZCH 再次起动。但因电容 C_2 充电时间短，未能充至稳压管 WY_2 反向击穿电压就因晶体管 BG_1 导通而放电，BG_2 保持在导通状态，故一次合闸脉冲电路无输出，保证 ZCH 只动作一次。

(4)手动合闸至故障线路闭锁 ZCH

正常手动合闸是由控制开关 KK_{5-6} 接点将 0V 经 D_7 送至出口元件 ZJ_1。因 ZJ_1 接点容量太小，故在 ZJ_1 动作后，用 ZJ_1 接点去起动接点容量较大的重复中间断电器 ZJ_2，由 ZJ_2 接点接通断路器合闸接触器 HC 回路，使断路器合闸。如果合闸到故障线路，则通过 KK_{5-6} 及 D_9 回路，将 0V 电压送至 ZCH 后加速电路，利用后加速保护迅速将断路器跳闸。

(5)正常手动跳闸闭锁 ZCH

正常手动跳闸时，控制开关 KK_{10-9} 闭合，将 0V 经 D_3 送至一次合闸脉冲电路输出端，使其钳位 0V，晶体管 BG_3 截止，不会发一次合闸脉冲；同时使电容 C_2 经 R_7、KK_{10-9}、D_2、R_5 回路放电，实现闭锁。

三、重合闸后加速电路

1.电路接线

重合闸后加速电路由一只有记忆作用的单稳态触发器构成，见图 5-1-15。它的作用是将 0.1s 短脉冲展宽为 1s 长脉冲，通过“与”门加到第Ⅱ段保护出口回路，使第Ⅱ段保护变为瞬动保护。

2.前记忆单稳态触发器工作原理

前记忆单稳态触发器的工作原理简述如下(参见图 5-1-15)。

(1)准备状态

在 ZCH 未动作前，一次合闸脉冲电路输出“0”态信号，即 ZCH 后加速电路输入电压 $UU_{sr} \approx 0V$，这时，$+E_b$ 经 R_{15}、R_{14} 至 0V，在晶体管 BG_4 基极分压，电位为正，BG_4 截止，④点

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

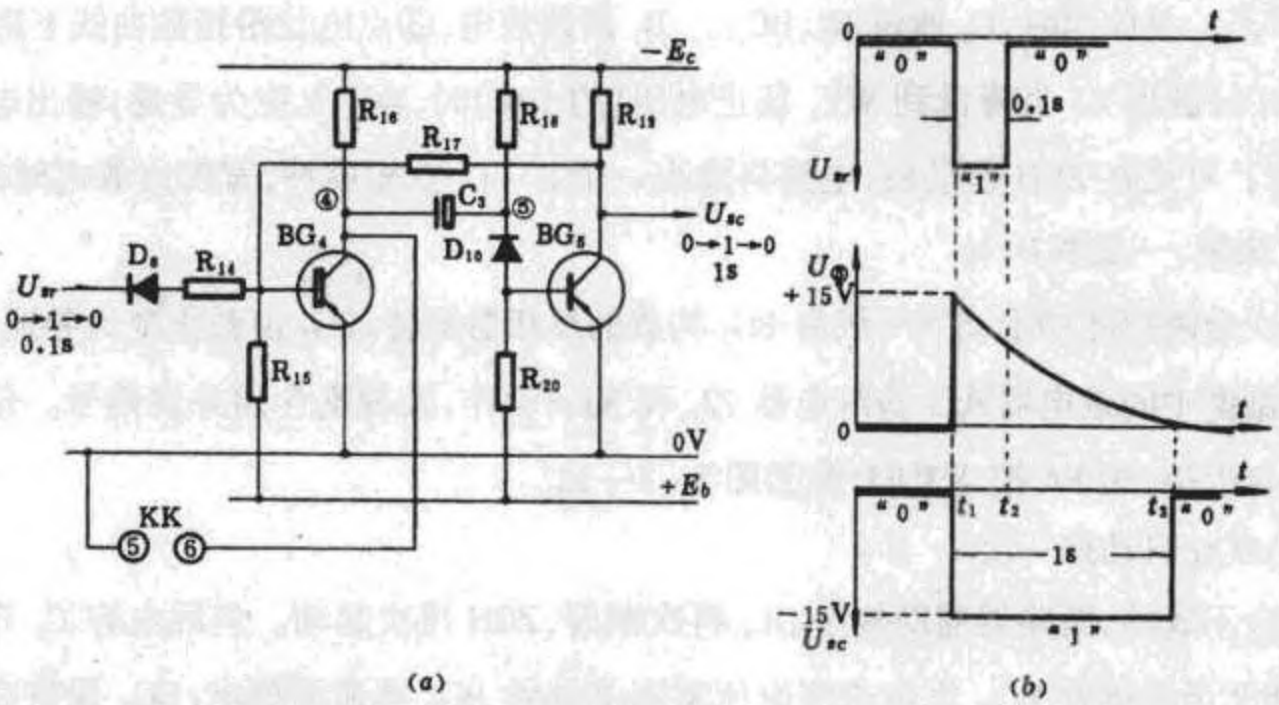


图 5-1-15 ZCH 后加速电路一前记忆单稳触发器

(a)原理接线;(b)输入、输出波形

电位近于 -15V。原来 BG_5 由 D_{10}、R_{18} 取得基流,BG_5 导通,电容 C_3 由 0V 经 BG_{5e-b}、D_{10}、C_3、R_{16} 至 -15V 回路充电;处于准备状态。

(2)脉冲展宽工作过程

当 t_1 时刻(参阅图 5-1-15),电路输入"1"态(-15V),晶体管 BG_4 导通,④点电位为 0V,因电容 C_3 端电压不能突变,故⑤点电位跃变为 +15V,使 BG_5 截止,输出电压由"0"态变为"1"态,同时 C_3 经 R_{18}、BG_{4e-c} 和电源回路放电,⑤点电位沿指数曲线下降。

到 t_2 时刻,虽然一次合闸脉冲已消失,但因反馈电阻 R_{10},的作用,使 BG_4 仍保持导通,④点电位仍为 0V,这时⑤点电位虽已下降,但尚未降到 0V,故 BG_5 仍保持截止,输出电压仍为"1"态。R_{17},起自保持作用或称记忆作用。

到 t_3 时刻,C_3 放电终止,并过渡到反充电状态,⑤点电位为负,BG_5 又转为导通,输出电压 0V,记忆解除,BG_4 截止,单稳触发器返回。

从 t_1 到 t_3 为脉冲展宽的宽度,其大小由 $R_{18}C_3$ 时间常数决定,一般取 1_{1s}。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第二章 同步发电机自动并列与励磁调节

第一节 全/半自动准同期装置

一、恒定导前时间的自动准同期装置

利用恒定导前时间发出同期合闸脉冲原理构成的自动准同期装置，型号主要有 ZZQ－1、ZZQ－3A、ZZQ－4、ZZQ－5 和 ZZT－2A。一般是通过检测整步电压的周期长短和电压值来鉴别频率差、电压差是否在允许范围内，并用恒定导前时间发出合闸脉冲。ZZQ－1、ZZQ－3A 和 ZZQ－4 设有自动调频部分，可实现发电机频率对系统频率的自动追踪。ZZQ－5 和 ZZT－2A 除自动调频外，还设有自动调压部分，可在并列过程中对发电机电压进行自动调节。ZZT－2A 在合闸部分采用了双回路系统，互相闭锁，提高了合闸部分的可靠性，还设有自启动及双回路系统故障信号，便于远方操作监视，功能更加完善。中小型水电站目前使用较多的是 ZZQ－3A(ZZQ－4 与 ZZQ－3A 原理相同)和 ZZQ－5，本书仅介绍 ZZQ－3A 装置。

(一)ZZQ－3A 自动准同期装置原理

ZZQ－3A 型装置主要由合闸、调频、电压差闭锁和电源等四个部分所组成，原理方框图见图 5－2－1。

1. 自动调频部分

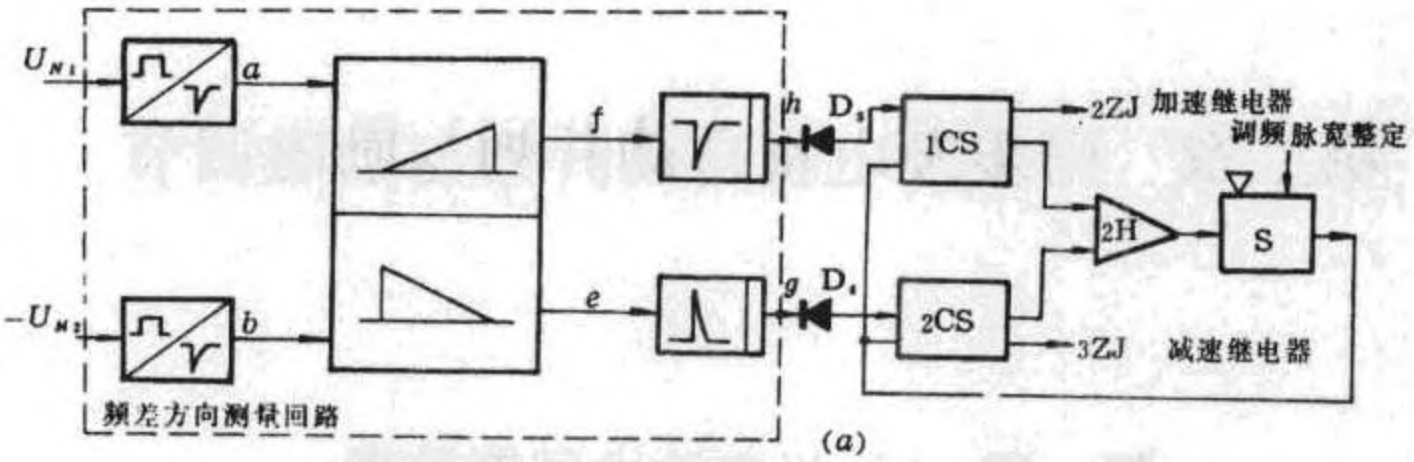
由频率差方向测量回路鉴别频率差方向。当发电机频率低于系统频率时，h 点输出一系列负脉冲，启动双稳态触发器 1CS，发出加速脉冲，通过调速器使机组升速；当发电机频率高于系统频率时，g 点输出一系列负脉冲，启动双稳态触发器 2CS，发出减速脉冲，使机组减速。还设有调频脉宽整定环节，用于调节脉冲宽度，改变调节速度。

2. 自动合闸部分

通过线性整步电压发生器将脉动电压变成三角波整步电压，波形见图 5－2－2。在 $\delta=180°$时，三角波整步电压值最小；在 $\delta=180°$时，整步电压值最大。整步电压分两路输

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网



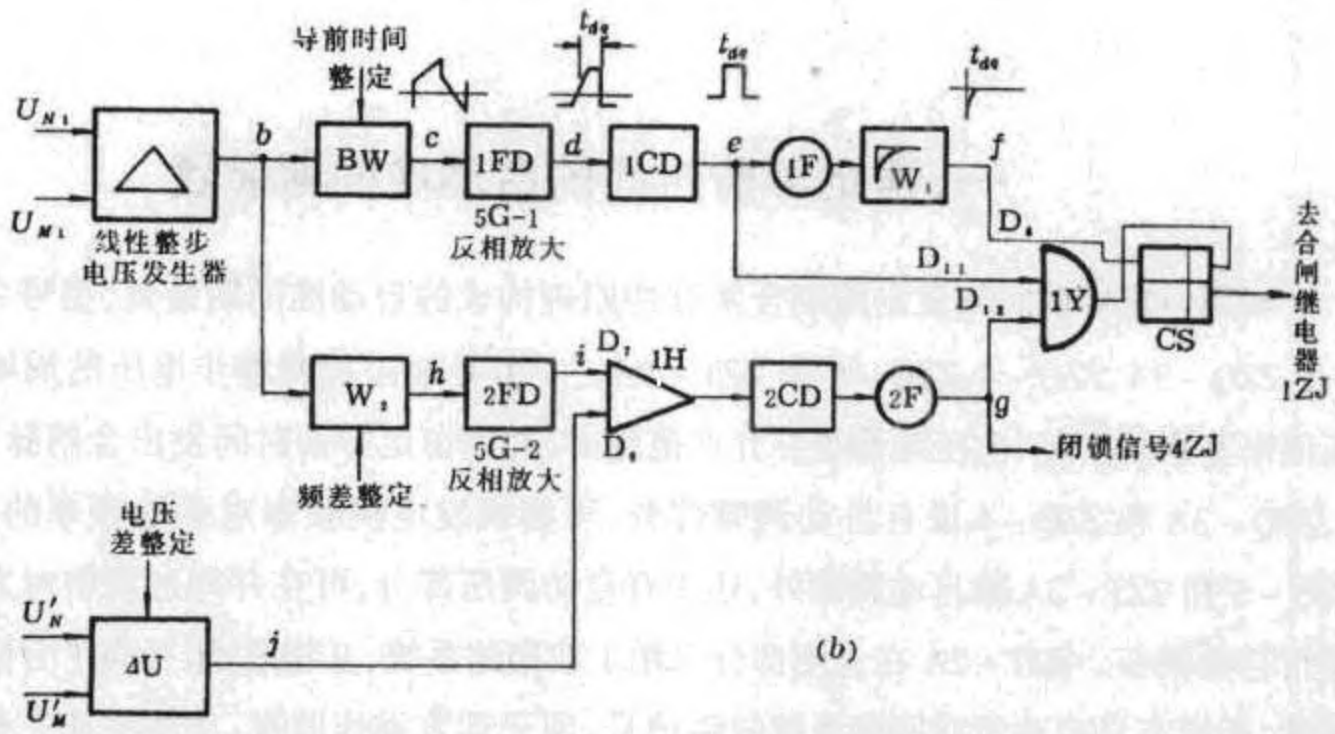


图 5-2-1 ZZQ-3A 装置原理方框图
(a)调频部分;(b)合闸和电压差闭锁

出:①一路经比例微分环节(BW)、放大器 1FD、触发器 1CD,在 e 点发出一个与导前时间有关成长脉冲;再经反相器 1F,微分环节 W_1,在 f 点发出一个窄负脉冲,使双稳态触发器 CS 翻转,发出合闸脉冲;②另一路经微分环节 W_2、反相放大器 2FD,在 i 点输出一个与允许频差有关的闭锁信号,再经或门 1H,双稳态触发器 2CD、反相器 2F,输出一个闭锁信号,与 e 点发出的长脉冲,经与门 1Y,一起作用于双稳态触发器 CS 闭锁。

3.电压差闭锁部分

通过电压差绝对值测量回路($|\Delta\dot{U}|$)测得的电压差,与允许电压差整定值相比较,如不满足,则在 j 点输出一个闭锁信号,与上述频率差闭锁信号共同经或门 1H、双稳态触公器 2CD、反相器 2F,使合闸脉冲被闭锁。

(二)ZZQ-3A 自动准同期装置原理接线

1.自动合闸部分

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

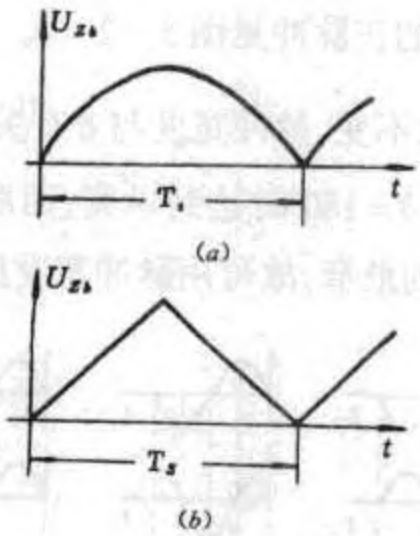


图 5-2-2 整步电压波形
(a)脉动电压;(b)三角波整步电压

(1)线性整步电压发生器

①电路组成

线性整步电压发生器由相敏环节、积分回路和选频滤过器等所组成,见图 5-2-3。

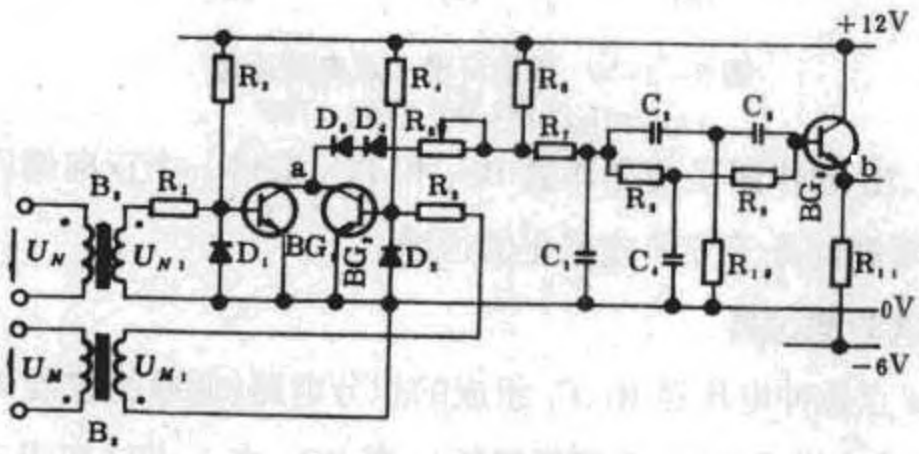


图 5-2-3 线性整步电压发生器接线图

反映待并发电机电压的 U_{M1} 和运行系统电压的 U_{N1} 分别经限流电阻 R_1、R_2 加到晶体管 BG_1 和 BG_2 的基极,BG_1 和 BG_2 组成相敏环节,当 BG_1、BG_2 同时截止时,a 点输出高电位。

②相敏环节的作用

在分析相敏环节的工作原理时,为简化起见,假定 U_{M1} 和 U_{N1} 频率保持不变。由于 U_{M1} 和 U_{N1} 存在一定的差异,故其相角差 δ 随时间 t 而变化。根据图 5-2-3 所示极性,当 U_{M1} 与 U_{N1} 的相位差 $\delta=0$ 时,晶体管 BG_1 基极加上 U_{M1} 正半波,BG_1 导通;BG_2 基极加上 U_{N1} 负半波,BG_2 截止。仅在 U_{M1} 进入负半波而 U_{M1} 又还未转入正半波的极窄范围内出现 BG_1、BG_2 同时截止。a 点出现一个极窄的正脉冲,其宽度与频差大小有关。当 $\delta=90°$ 时,a 点电位为正,脉冲幅值不变,宽度则增大至 $\frac{T}{4}$;当 $\delta=180°$ 时,a 点电压波形宽度达到最大,为

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$\frac{T}{2}$。上述三种典型情况 a 点出现的正脉冲见图 5－2－4。可见相敏环节的作用是将 U_{M1}、U_{N1} 两个电压信号变换成一个幅值不变，脉冲宽度与 δ 有关的直流脉冲电压。δ 在 0～180° 时，脉冲宽度随 δ 增大而增宽，在 δ＝180°时达到最宽；而后，在 180°～360°之间时，脉冲宽度又随 δ 增大而减小，δ＝360°达到最窄，故可用脉冲宽度反映脉动电压的变化情况。

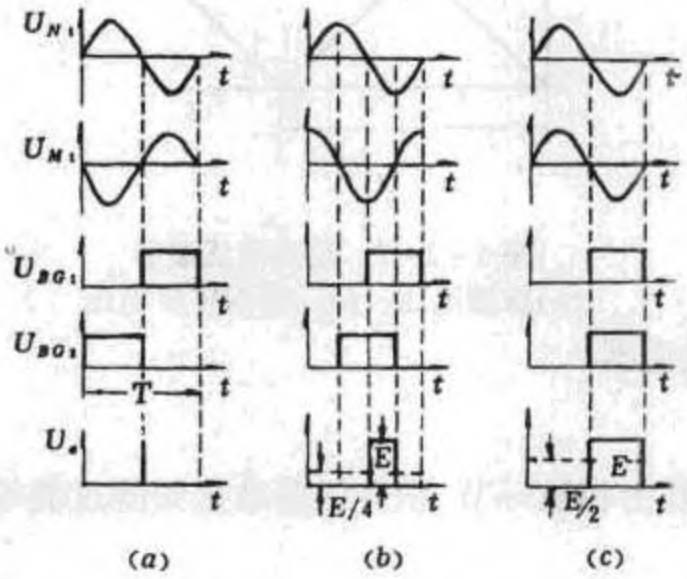


图 5－2－4 相敏环节 δ 点电压波形

(a)δ＝0；(b)δ＝90°；(c)δ＝180°

相敏回路中 R_3、R_4 的作用是使晶体管 BG_1 和 BG_2 取得一个正向偏压，以保证 BG_1 和 BG_2 在 U_{M1} 和 U_{N1} 过零瞬间处于导通或截止的边缘。

③积分回路和选频滤过器

图 5－2－3 中 a 点脉冲电压经 R_7、C_1 组成的积分电路(低通滤波器)和由 C_2、C_3、R_{10} 及 C_4、R_8、R_9 组成的双 T 选频滤过器，又经射极输出器 BG_3，在 b 点转变为三角波整步电压。各点的电压波形见图 5－2－5。

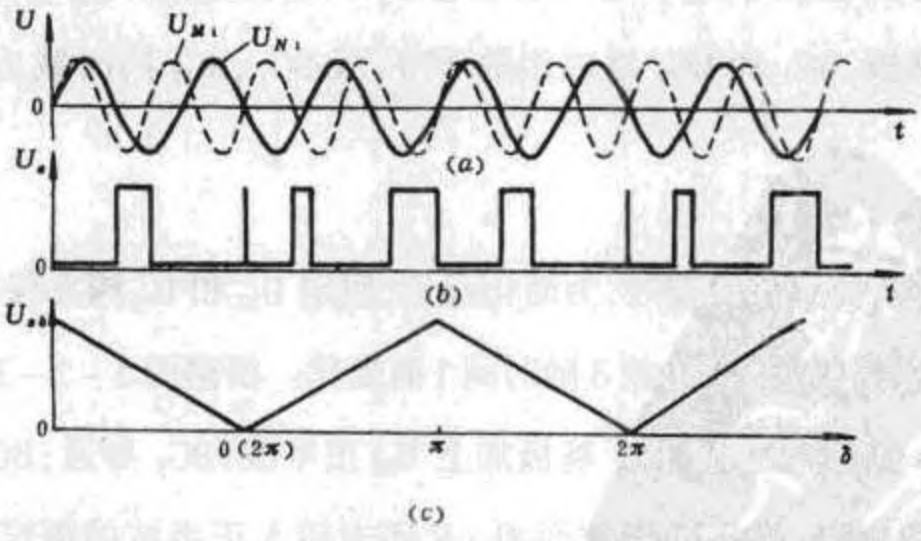


图 5－2－5 整步电压波形

选频滤过器的作用是减少低通滤过器的时间常数，使输出的三角波整步电压具有良好的线性，以保证导前时间恒定。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

④其它

D_3、D_4 为温度补偿二极管。

R_5 用于调整积分电路的输入电压。

⑤整步电压波斜率

三角波整步电压在 $\delta=0$ 和 360°时为最小值(接近 0V)；$\delta=180°$时有最大值 $U_{\Delta\cdot zd}$；从 0 ~ 360°，变化一个周期 T_s。

三角波上升部分的斜率为

$$K=\frac{U_{\Delta\cdot zd}}{T_s/2}=2\mid f_M-f_N\mid U_{\Delta\cdot zd}$$

其直线表达式为

$$U_{zd}=K\mid\omega_s\mid t\quad(0<\mid\omega_s\mid t<\pi)$$

三角波下降部分的斜率为 - K，其直线表达式为

$$U_{zd}=-K(\mid\omega_s\mid t-2\pi)\quad(0<\mid\omega_s\mid t<2\pi)$$

从式可见，频差愈大，斜率也愈大，三角波电压周期愈短；频差愈小，斜率也愈小，三角波电压周期愈长。

(2)获得恒定导前时间的方法

①比例微分运算放大器

三角波整步电压通过比例微分电路获得恒定导前时间。ZZQ - 3A 的比例微分运算放大器见图 5 - 2 - 6(a)。图中电阻 R 与 R_{14} 构成比例器，电容 C_5 与 R_{14} 构成微分器，C_5 与 R 并联，

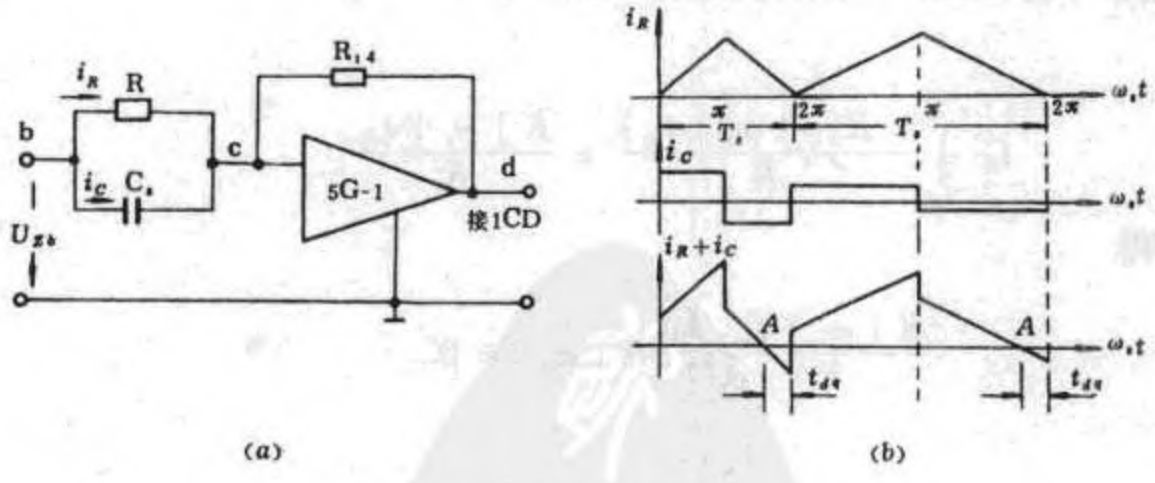


图 5 - 2 - 6　比例微分运算放大器
(a)原理接线；(b)波形

故加至运算放大器 5G - 1 输入信号可近似地等于比例信号和微分信号的合成，比例微分电路波形见图 5 - 2 - 6(b)。

②恒定导前时间

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

运算放大器为反相输入，从图 5－2－6(b)可见 $i_R + i_C$ 在 A 点以前均为正，故运算放大器输出为负。输出信号接至后一级由 BG_4、BG_5 构成的施密特触发器 1CD，作为电平检测器，其翻转条件按运算放大器输出电压 U_d 由负变正过零的瞬间。因运算放大器 C 点电位近于零(即所谓虚地点)，故 1CD 的翻转条件可写成

$$(i_R + i_C)R_{14} = 0$$

或

$$i_R + i_C = 0$$

三角波整步电压 U_{zd} 上升部分有：

$$\left.\begin{aligned} i_R &= \frac{U_{zb}}{R} = \frac{K\,|\,\omega_s\,|\,t}{R} \\ i_C &= C\frac{dU_{zb}}{dt} = CK\,|\,\omega_s\,| \end{aligned}\right\} \quad (0 < |\,\omega_s\,|\,t < \pi)$$

这时，i_R 和 i_C 值均为正值。三角波整步电压下降部分有：

$$\left.\begin{aligned} i_R &= \frac{U_{zb}}{R} = \frac{-K(|\,\omega_s\,|\,t - 2\pi)}{R} \\ i_C &= C\frac{dU_{zb}}{dt} = -CK\,|\,\omega_s\,| \end{aligned}\right\} \quad (0 < |\,\omega_s\,|\,t < 2\pi)$$

这时因 $|\omega_s|t < 2\pi$，故 i_R 仍为正值，而 i_c 则为负值，故可得 $i_R + i_C = 0$ 的 1CD 翻转点 A。A 点至同步点(整步电压过零处)之间的时间即为导前时间 t_{dq}。

③恒定导前时间的调整

三角波同步电压下降如以同步点作为坐标原点，则

$$i_R = \frac{-K(-|\,\omega_s\,|\,t_{dq})}{R} = \frac{K\,|\,\omega_s\,|\,t_{dq}}{R}$$

以 i_R、i_C 代入式可得

$$\frac{K\,|\,\omega_s\,|\,t_{dq}}{R} - CK\,|\,\omega_s\,| = 0$$

简化后得

$$t_{dq} = RC$$

从式可见导前时间 t_{dq} 与 ω_s 无关，只随 RC 而变。调整 R 或 C 值，可改变导前时间，RC 不变，导前时间也不变。在 ZZQ－3A 及 ZZQ－4 中，R 为分级可调电阻，R_1 为细调电阻，按合闸时间需要调整，导前时间整定电路见图 5－2－7。

(3)频差闭锁电路

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

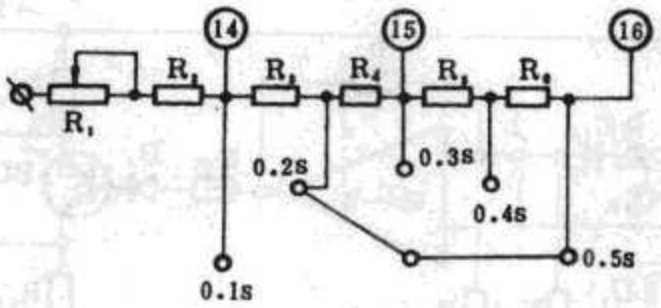


图5-2-7 ZZQ-3A导前时间整定电路

频差闭锁电路见图5-2-8,由b点输入三角波整步电压U_{xd},经C_{10}、R_{32}组成的微分电路在h点得到矩形波电压,其幅值为

$$U_1 = C_{10}\frac{dU_{xb}}{dt}R_{32} = C_{10}R_{32}K2\pi f_s = K'f_s$$

可见矩形波电压的幅值与f_s成正比,频率差f_s愈大,幅值愈高。故可用它与另一给定电压U_2(代表允许频率差)相比较,来鉴别f_s是否在允许范围内。

比较方法是将U_1和U_2在h点相迭加得合成电压U_h,参阅图5-2-9(b),再经运算放大器5G-2反向放大,输出电压为U_i。当频率差小于允许值时,U_i为负值,D_7和BG_7,处于截止状态,无频差闭锁信号输出;当频率差超过允许值时,U_i出现正、负两值,在三角波下降沿。π~2π范围内为正值,则D_7和BG_7导通,触发器2CD翻转,反相器2F输出低电平去闭锁合闸双稳触发器CS,同时去起动继电器4ZJ,发出频差闭锁动作信号(参阅图5-2-1、图5-2-11),由3DX指示灯显示。如频率差不符合要求时,只在π~2π区域内灯亮,故闪烁频繁,灯光较暗。

(4)电压差闭锁电路

电压差闭锁电路见图5-2-10。待并发电机电压U_M和系统电压U_N分别经中间变压器B_2、B_3变换成弱电电压,再各自经D_{14}~D_{17},和D_{18}~D_{21}整流并滤波,转变为直流电压U'_M和U'_N,通过R_{59}、R_{60}构成的均压式绝对值比较电路(直流电压按同极性对接),其电压差再经D_{22}~D_{21}整流桥输出,其输出电流在R_{61}的压降U_G与整定电压U_{DZ}(代表电压差允许值)相比较,当$U_G < U_{DZ}$时,表示电压差小于允许值,允许合闸,这时G点电位为负,D_8和BG_7处于截止状态,无闭锁信号输出;当$U_C > U_{DZ}$时,表示电压差超过允许值,G点电位为正,D_8和BG_7,导通,触发器2CD翻转,起动继电器4ZJ,发出闭锁动作信号,并经反相器2F输出低电平去闭锁合闸双稳态触发器CS。因电压差不符合要求时,在0~2π区域内指示灯3XD亮,故灯较明亮,从而可与频差闭锁动作信号相区别。

R_{56}为电压差允许值调整电阻。

5.合闸部分原理接线

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

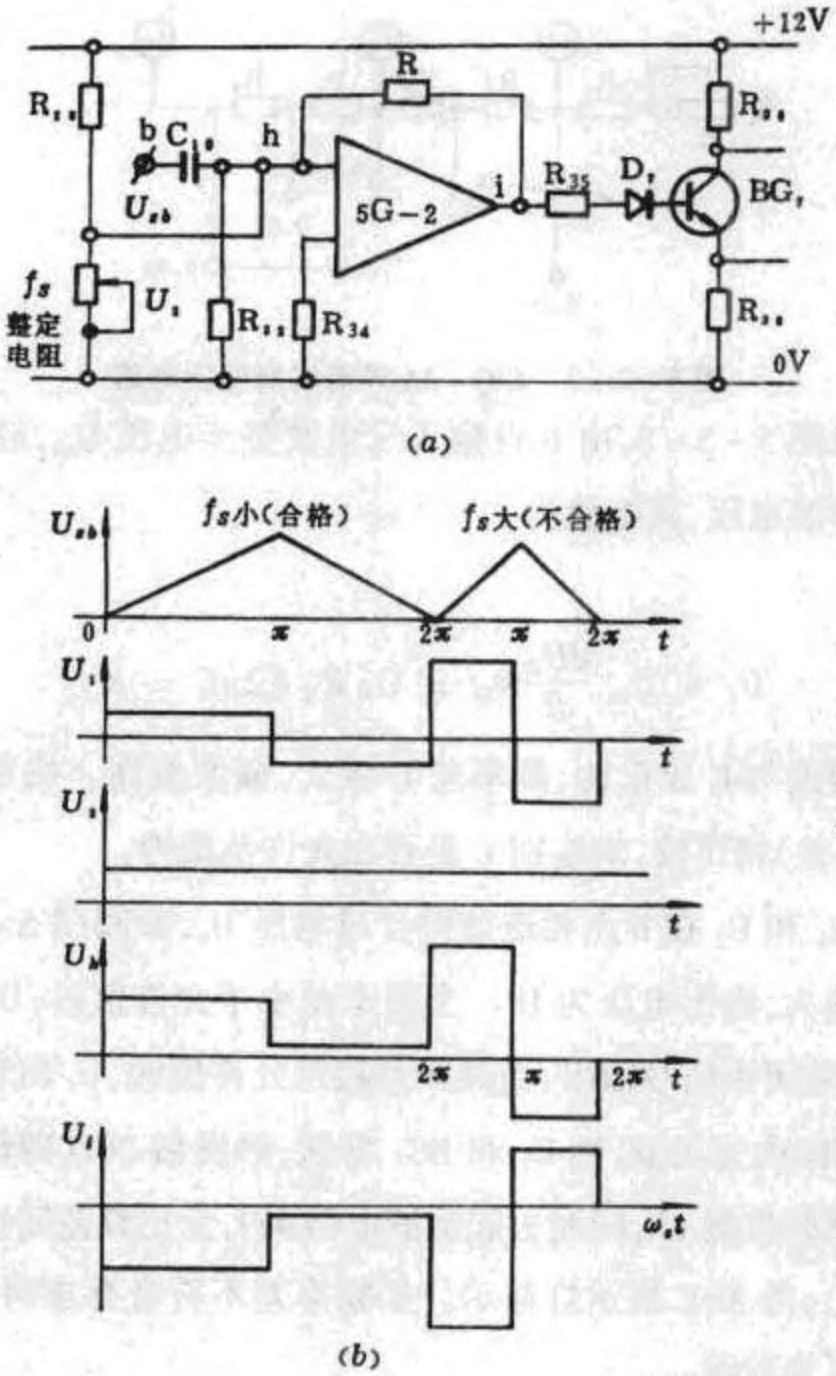


图 5-2-9 频率闭锁电路
(a)原理接线;(b)各点电压波形

①合闸电路

合闸部分原理接线见图 5-2-11。

前面已谈到恒定导前时间的获得是通过 d 点电压 U_d 由负变正过零的瞬间。当 U_d 为正时,其后一级电平检测器 1CD 翻转,在 e 点输出恒定导前时间的正矩形长脉冲。若此时频率差和电压差均满足允许值,则由 D_7、D_8 组成的或门 1H 都不通,由 BG_7、BG_8 组成的触发器 2CD 不翻转,BG_9 处于截止状态。这时,e 和 j 两点均输出正电压,由 D_{11}、D_{12}组成的与门 1Y 截止,为允许合闸准备条件。由 f 点来的负脉冲使 BG_{10}、BG_{11}组成的双稳态触发器翻转,BG_{12}由导通变截止,BG_{13}由截止变导通,驱动合闸继电器 1ZJ 动作,发出合闸脉冲,1ZJ 另一接点使合闸信号灯 4DX 亮;若在 e 点输出正长脉冲时,频差或电压差超过允许

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

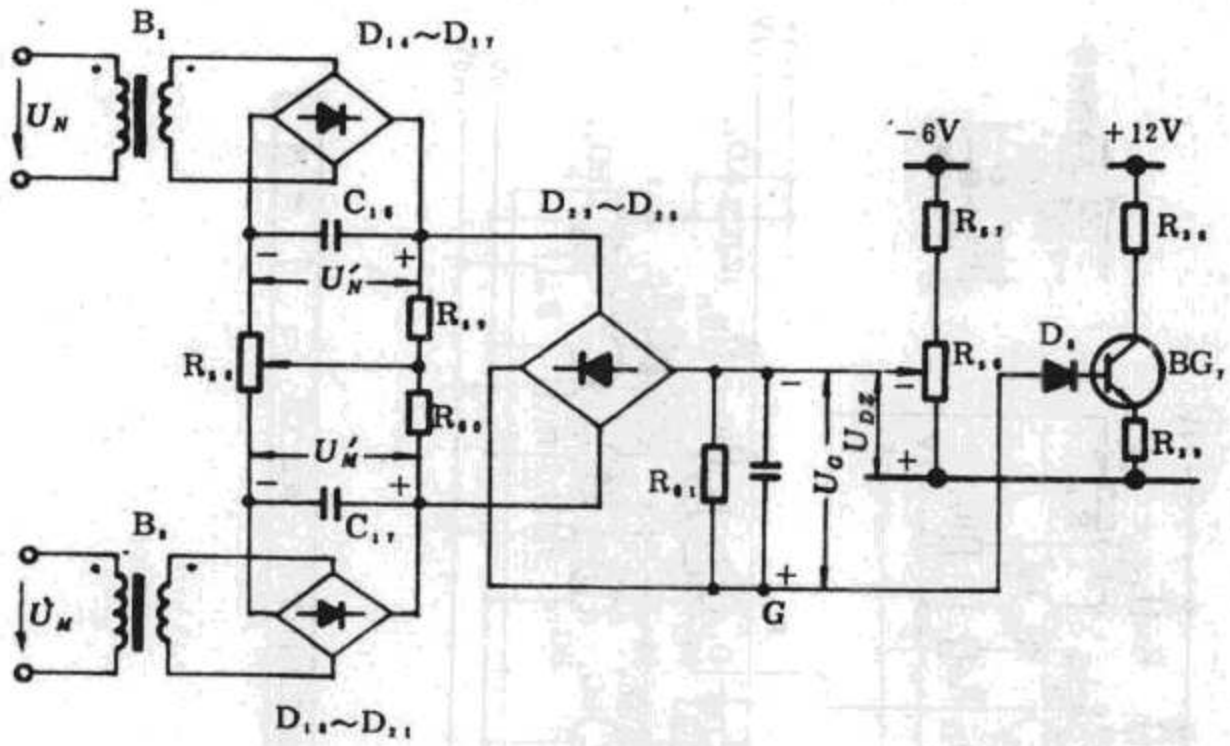


图 5-2-10 电压差闭锁电路

值，则 D_7 或 D_8 导通，2CD 翻转，BG_9 导通，j 点电位近于 0V，闭锁继电器 4ZJ 动作，发出闭锁信号，同时双稳 CS 的 BG_{10} 集电极处于 0V，不能翻转，从而实现对合闸脉冲进行闭锁。

②元件作用

自动合闸电路图中一些元件的作用如下。

A. 电容 C_6、C_{11} 用于使运算放大器输出电压减少交流成份，因两电容数值很小，对低频（一般小于 0.5Hz）整步电压呈现很大阻抗，不起作用，相当于开路，而对于整步电压中的交流成份（主要是 50Hz）相当于一个积分电容。

B. "电容门"。在晶体管 BG_7 基极接入 R_{36}、C_{13}。等组成的"电容门"，其作用是在刚接通电源瞬间，利用电容 C_{13} 经 R_{36}、BG_7，基极的充电电流，使 BG_7 导通时间维持 1s 以上，以防止电源接通瞬时的过渡过程造成检测器 1CD 误翻转，在 C_{13} 充完电后，BG_7 基极电流为零，不妨碍正常工作。

C. 钳位。在 BG_{13} 和 BG_8 两集电极之间接入 D_9 钳位电路，目的是在 BG_{13} 导通后通过 D_9 给 BG_8 集电极钳至低电位，避免在发出合闸脉冲时由于频差或电压差处于临界状态，出现不稳定的闭锁，造成合闸继电器接点抖动。

D. 自动中断合闸脉冲。在晶体管 BG_{10} 和 BG_5 集电极之间接入 D_{11}，作用是使合闸继电器直接受 BG_5 的控制，只有在所整定的导前时间相对应的导前角度范围内，合闸继电器才能动作。过了这一导前角度范围，因导前时间电压信号消失，合闸继电器就由 BG_5 自动复归，准备下一次动作。

经验证明，在并列过程中当 ω_s 很小时，常出现整步表指针停留在某一位置，甚至倒退的现象，这是由于 ω_s 过小出现的反向加速度，致使发电机电压与电力系统电压之间的角

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

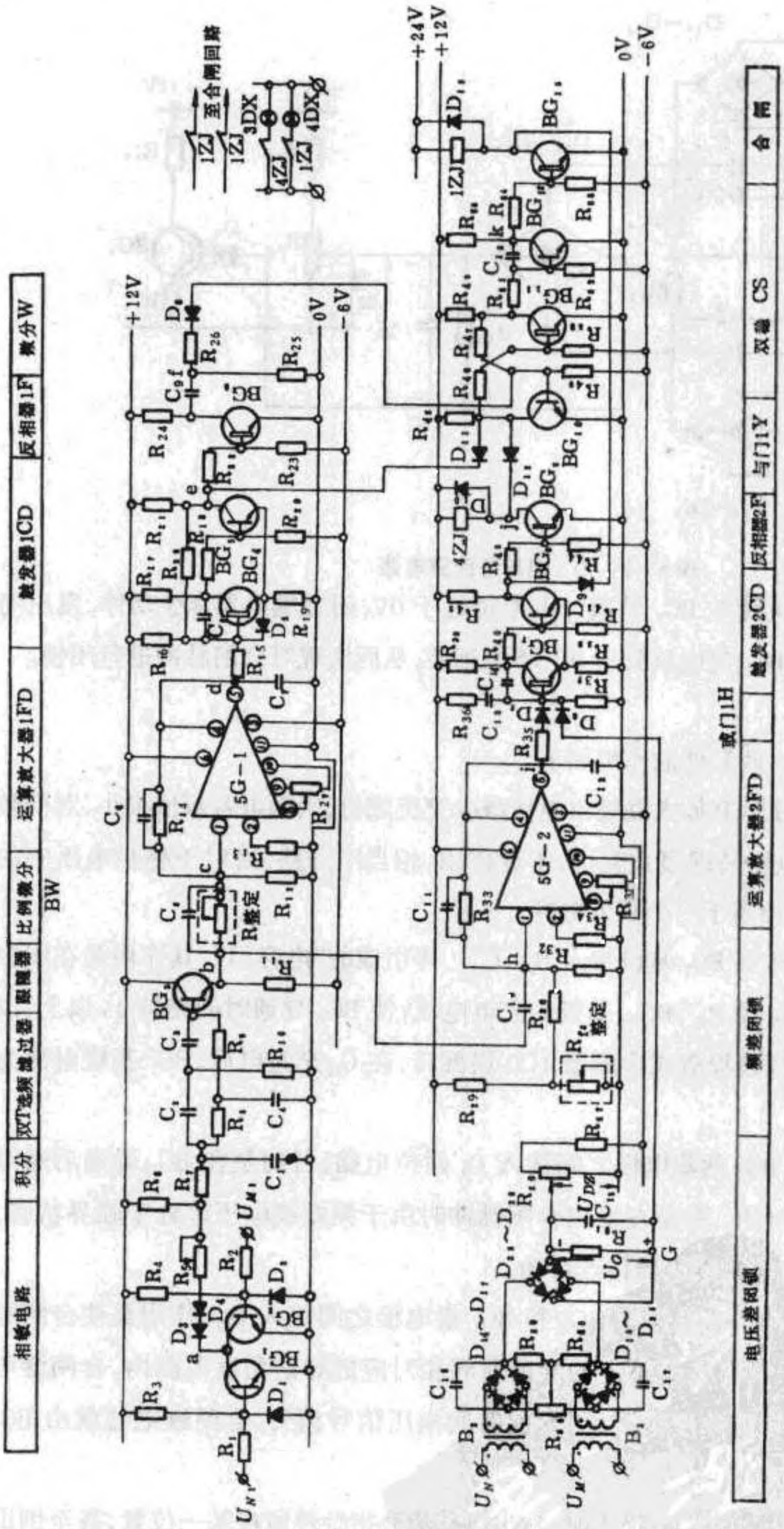


图5-2-12 ZZQ-3A 自动合闸部分原理接线

度不是变小，而是随 ω_s 越小而变得越大。当出现这种情况时，通过 D_{11} 可使合闸脉冲自劲

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

冲断。

图 5－2－13 画出 ω_s 出现反向加速度时各点的波形，虚线部分表示无反向加速度时的情况。图中假设正常时 $\dot{U}_M$ 相对 $\dot{U}_N$ 顺时针转动。当由于 ω_s 出现反向加速度，致使 $\dot{U}_M$ 相对于 $\dot{U}_N$ 逆时针旋转，这时 b 点电压在 A 点之后不是越来越小，而是越来越大。由于 $\frac{du_b}{dt}$ 迅速改变符号，使 c、d、e 等点的波形发生相应变化，合闸继电器就能自动中断合闸脉冲。至于中断合闸脉冲后断路器主触头能否立即返回，则要视合闸操作回路的具体接线和断路器固有合闸时间长短而定。要附带指出，在并列成功后，e 点电位将始终处于高电位，合闸继电器只有在装置退出后才返回。

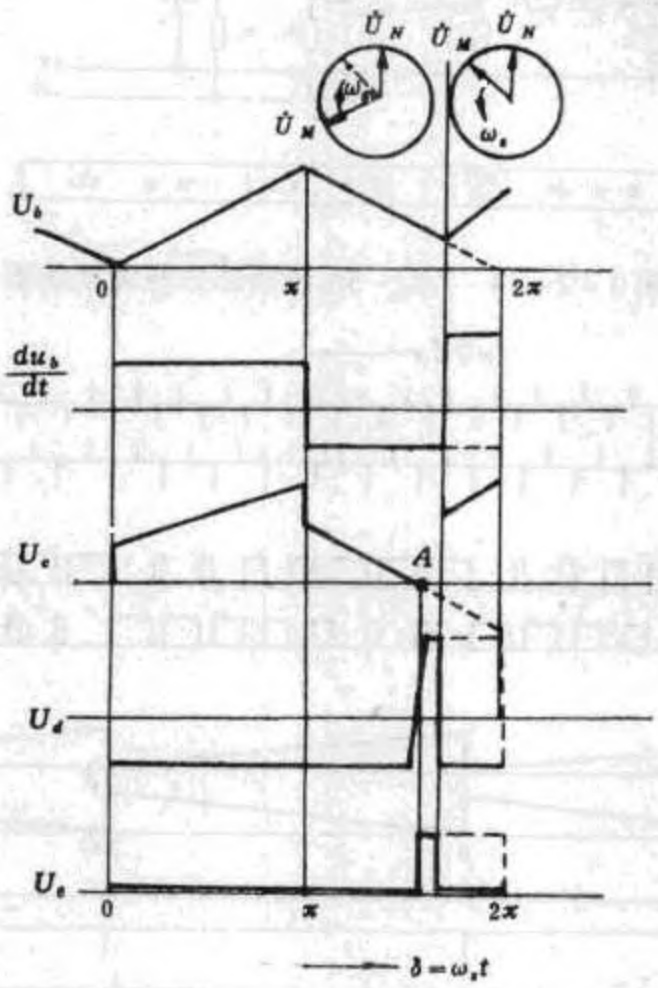


图 5－2－13　出现反向加速度时各点波形

2. 自动调频部分

自动调频部分由频差方向测量环节和调频执行环节所组成。

(1)频差方向测量环节

ZZQ－3A 调频部分原理接线图见图 5－2－14，各点电压波形见图 5－2－15。

频差方向测量环节用于确定发电机增速或减速。频差方向测量电路由微分电路 1W、2W，双稳触发器 1CS、2CS，积分电路 1Z、2Z 及微分电路 3W、4W 等所构成。发电机电压和

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

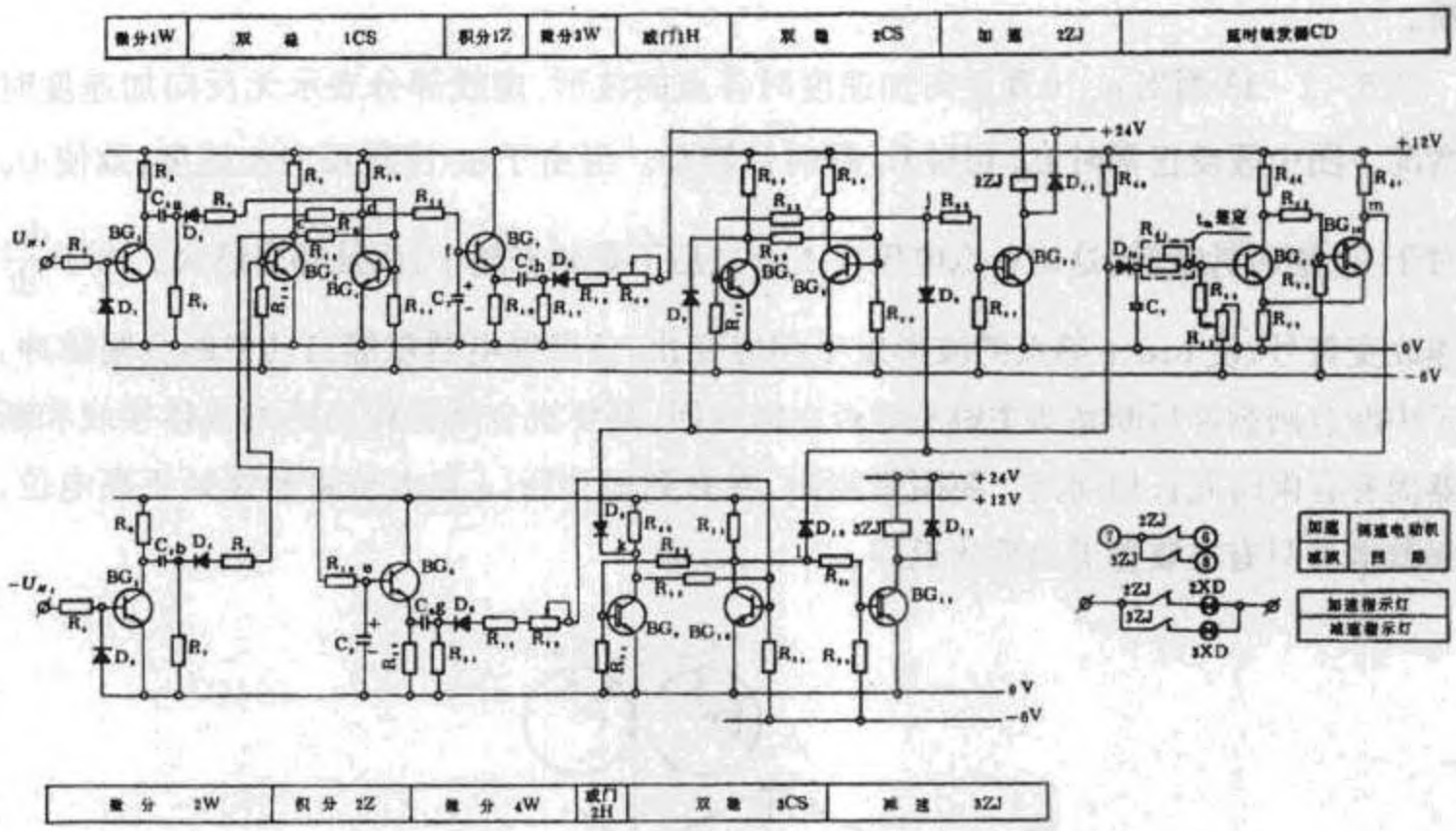


图 5-2-14 ZZQ-3A 调频部分原理接线图

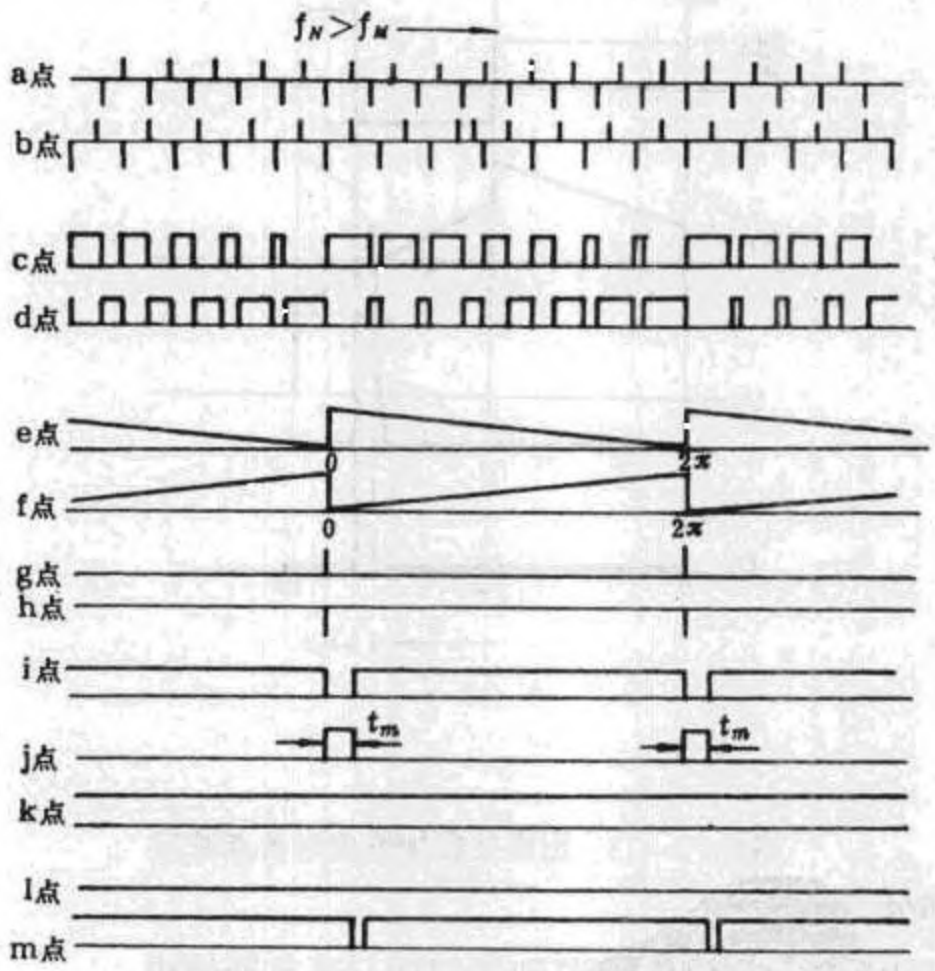


图 5-2-15 调频部分各电压波形

系统电压分别由晶体管 BG_1 和 BG_2。两组整形电路变换成方波信号，然后通过微分电路 1W(由 C_1、R_3 组成)与 2W(由 C_2、R_7 组成)取得正负尖脉冲，由 a、b 点输出，用二极管 D_2、D_4 取其负脉冲，去控制由 BG_3、BG_4 组成的双稳触发器 1CS，使其不断翻转，1CS 的输出波

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

形见图 5－2－15c 点和 d 点。

在 $f_N > f_M$ 时，c 点波形由宽变窄，d 点波形由窄变宽，两点电压分别经积分电路 1Z（由 R_{19}、C_5 构成）、2Z（由 R_{15}、C_3 构成）变换成一个由小到大，另一个由大到小的锯齿波，见图 5－2－16 和 f 两锯齿波分别经 BG_5 和 BG_6 两射极跟随器和微分电路 3W（由 C_4、R_{17} 构成）、4W（由 C_6、R_{21} 构成），在 g、h 两点分别得正负两种脉冲。$f_N > f_M$ 时，h 点输出负脉冲，g 点输出正脉冲；反之，$f_N < f_M$ 时，则 c 和 d、e 和 f。各点电压波形互换。故可利用 g、h 两点输出脉冲的符号来判别机组转速快或慢。

(2)调频执行环节

①加速或减速

调频执行环节由双稳触发器 2CS、3CS、继电器 2ZJ、3ZJ、延时触发器 CD 等所组成。由晶体管 BG_7、BG_8 组成的 2CS 用于推动加速继电器 2ZJ；由晶体管 BG_9、BG_{10} 组成的 3CS 用于推动减继电器 3ZJ。

当 $f_N > f_M$ 时，h 点输出一系列负脉冲，其间隔为 T_s。该负脉吁通过 D_5 使 BG_8 由导通变为截止，其后级反相器 BG_{11} 即由截止变为导通，使加速继电器 2ZJ 动作，作用于机组加速。g 点输出一系列正脉冲，因 D_6 反向截止，不发生作用。

当 $f_N < f_M$ 时，则 g 点输出一系列负脉冲，通过 D_6 使 BG_{10}。由导通变截止，BG_{12} 由截止变导通，使减速继电器 3ZJ 动作，作用于机组减速。h 点输出的正脉冲无效。

②调速速度的调节

由 BG_{13}、BG_{14} 和 C_7、R_{10} 等组成的延时触发器用于改变调速脉冲的宽度，从而改变调速速度。其工作原理是：当起始状态 BG_7、BG_8 均处于截止时，电容 C_7 经 D_{13} 和 R_{40} 充电到某一电压值，这时施密特触发器 CD 的 BG_{13} 导通，BG_{14} 截止，m 点为高电位，D_9 和 D_{10} 均反向截止；当 h 或 g 点出现负脉冲时，相应的双稳态触发器 2CS 或 3CS 翻转，通过 D_7 或 D_8 使延时触发器输入端钳位于低电位，电容 C_7 不能继续充电，而通过 R_{41} 和 BG_{13} 的 be 极放电，继续维持 BG_{13} 导通；待 C_7 放电不足维持 BG_{13} 基流时，BG_{13} 即变为截止，施密特触发器返回，m 点电位变为低电位。C_7 放电时间的长短，决定 m 点正脉冲宽度。当 m 点为低电位时，j 或 e 点即被 D_9 或 D_{10} 钳位为低电位，使晶体管 BG_{11} 或 BG_{12} 截止，继电器 2ZJ 或 3ZJ 便随之复归。调速脉冲的宽度可通过 R_{41} 进行调节，见图 5－2－17。

(三)工作电源和外部接线

(1)工作电源

ZZQ－3A 的交流回路和电源接线见图 5－2－17。

装置的工作电源电压有 +24V、+12V、0V 和 －6V 四种。+24V 用于继电器操作，其

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

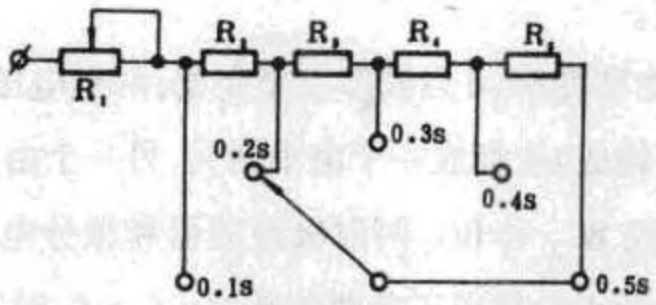


图 5-2-16 调速脉冲宽度调节回路

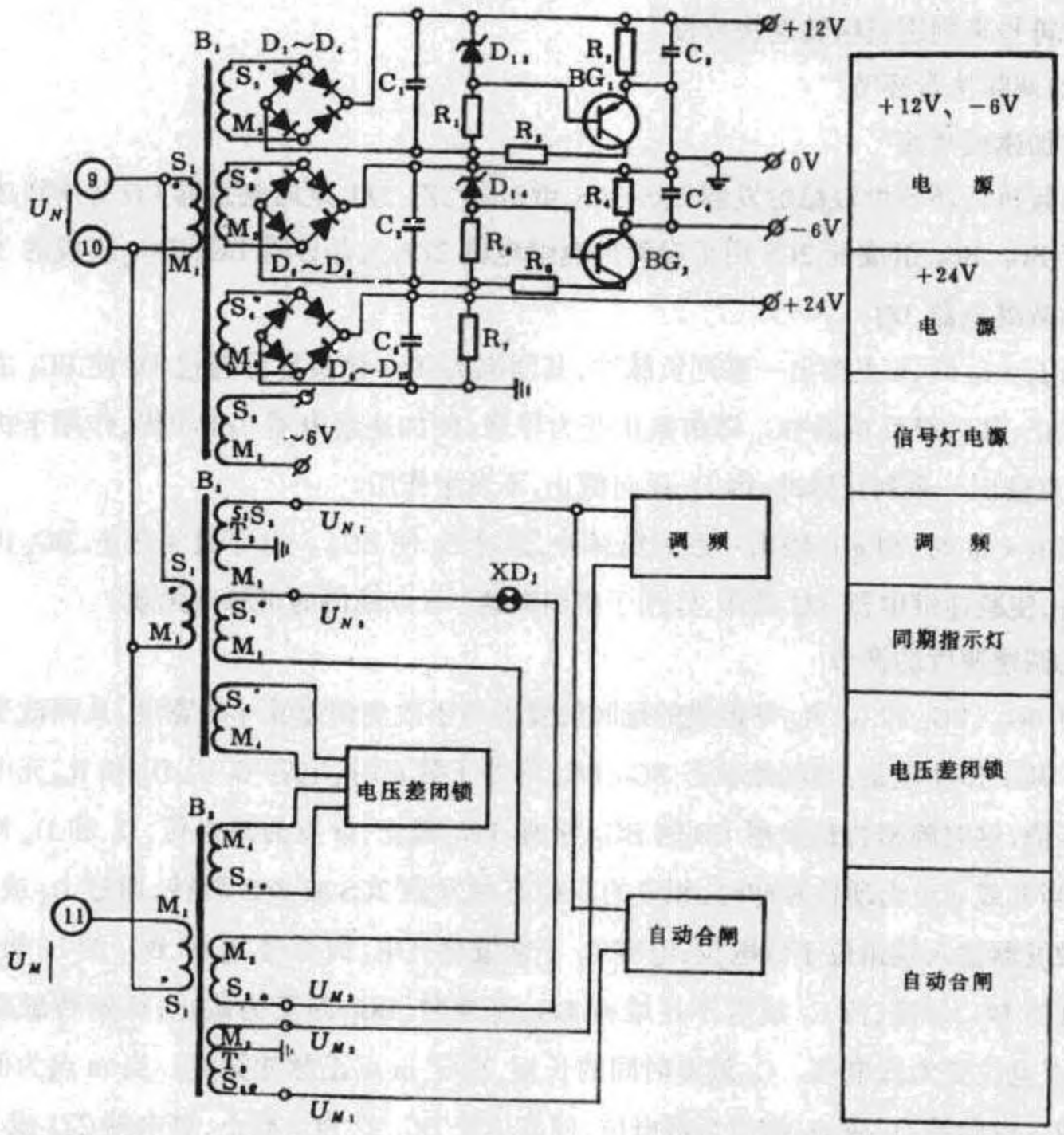


图 5-2-17 ZZQ-3A 的交流回路和电源接线

他三种电压用于自动合闸和自动调频部分。四种电压由共同的一台电源变压器 B_1 的四个次级绕组取得。

B_1 初级绕组由运行系统的电压互感器供电。为了监视电源正常，B_1 设有一个 -6V 的次级绕组接信号灯。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

测量变压器 B_2 和 B_3 分别接运行系统和待并系统的电压互感器，各设有三个副绕组提供自动合闸和自动调频部分的测量信号。XD_1 为装于装置面板上的同步指示灯。

(2)外部接线

全厂装设一台公用的 ZZQ－3A 装置，为集中自动准同期方式，其外部接线示例见图 5－2－18。交流电压回路为 b 相接地，故同期电压小母线取 TQM_a、TQM'_a、YM_b。

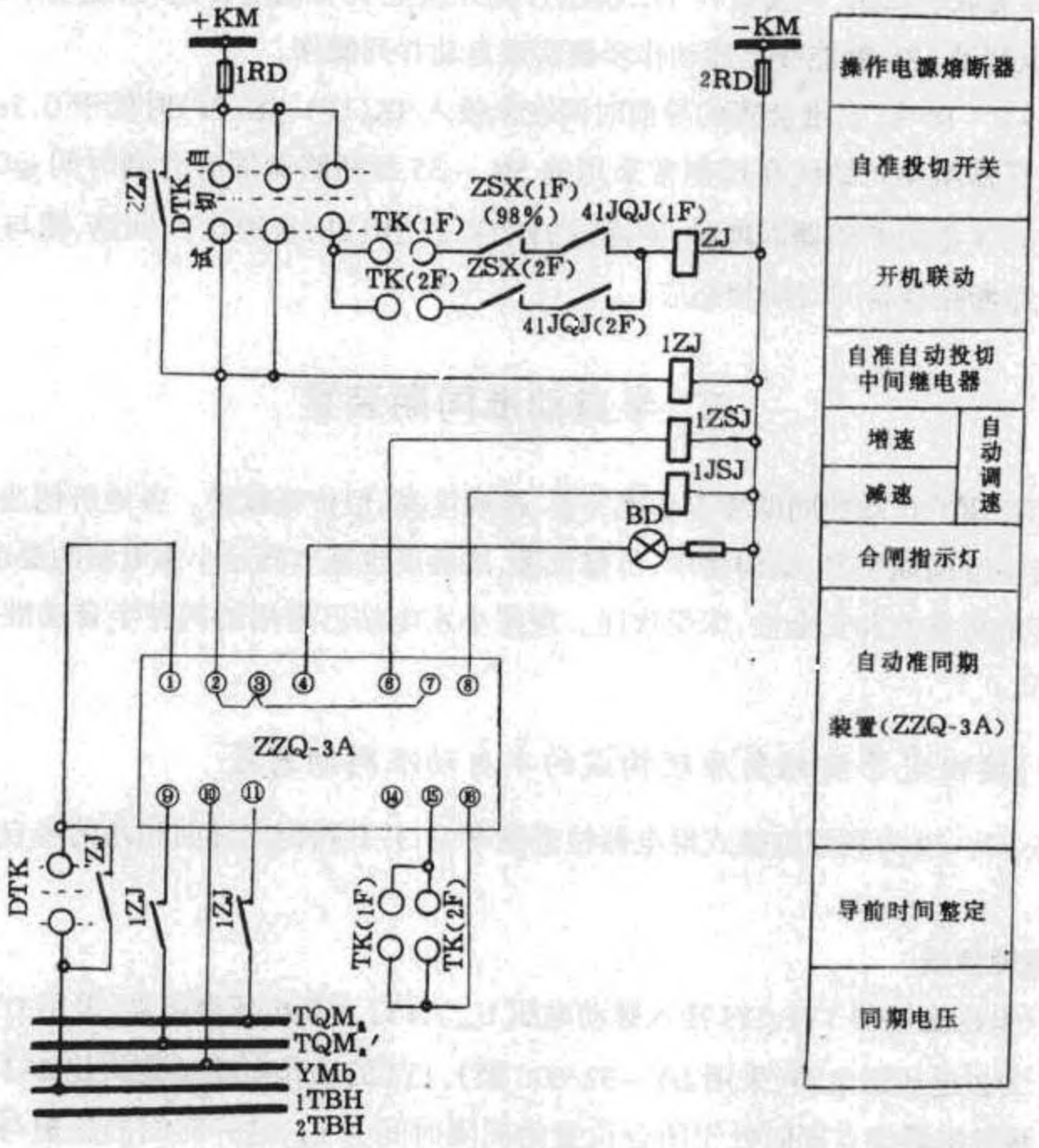


图 5－2－18　ZZQ－3A 外部二次接线

同期操作前，应将发电机电压和频率调至接近额定值；然后合上待并发电机的同期开关 TK，将发电电压和系统电压加至同期小母线 TQM_a、TQM'_a 和 YM_b 上；投入手动准同期装置，用手动进行电压、频率“粗调”；再投入自动准同期投入开关 DTK 至“试验”位置，中间继电器 1ZJ 起动，其接点接通自动准同期装置的交流电压回路，自动准同期装置投入工作。根据频率差方向，自动跟踪，由外接增速继电器 1ZSJ 或减速继电器 1JSJ 发出增速或减速脉冲。当机组与系统频率差缩小到允许范围时，装置接给定的导前时间发出合闸脉

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

冲,信号灯 BD 亮。这时,可参看同期表指针是否处于红标位置,验明自动准同期装置工作是否正常。

经过试验之后即可将 DTK 扳至"自动"位置,DTK 另一接点接至 1TBM 回路,装置发出合闸脉冲正式投入断路器。

经过实践证明自动准同期装置工作可靠,则可过渡到机组开机一并列联动。DTK"切开"位置即为联动回路,只要投入 TK,机组开机升速至 98%额定转速时,起动中间继电器 ZJ,ZJ 接点起动 1ZJ,就能按上述动作步骤实现自动并列操作。

图 5-2-18 中,自准装置的导前时间在未投入 TK(1F)、TK(2F)时处于 0.5s 位置,与发电机变压器组津元结线高压侧常采用的 SN_3-35 型断路器固有合闸时间≤0.5s 相适应。在进行发电机断路器同期时,则通过 TK(1F)或 TK(2F)接通 0.3s 回路,使与发电机用 SN_{10}-10 型断路器合闸时间相适应。

二、半自动准同期装置

前面介绍的自动准同期装置功能完善,准确度高,但价格较贵。各地所创造的多种简易的半自动准同期装置,结构简单,价格低廉,准确度也基本满足小水电站的要求,提高了并列操作的可靠性和安全性,深受欢迎。现将小水电站已采用的两种半自动准同期装置介绍如下。

(一)按恒定导前相角原理构成的半自动准同期装置

图 5-2-19 为利用电磁式继电器检查频率差,并获得恒定导前相角的半自动准同期装置。

1.原理接线

两只电压继电器 1YJ、2YJ 接入脉动电压 U_{sm}。1YJ 为低电压继电器(采用 DY-36/160 型),2YJ 为过电压继电器(采用 DY-32/60C 型),1YJ 的动作电压整定得比 2YJ 的返回电压为高,两继电器接点同时处于闭合位置的间隔时间为 t_{mn},这一时间的长短与脉动电压周期 T_s 的长短有关。T_s 愈长,表示频差愈小,t_{mn} 也愈长;反之,T_s 愈短,t_{mn} 也愈小。故可用 t_{mn} 与时间继电器 SJ 整定的时间相比较来判别频率差是否满足要求。

在频率差符合准同期条件,即 $t_{mn} > t_{SJ}$ 时,电压继电器 2YI 在 $U_{sm} = U_{2YJ}$ 时返回,发出合闸脉冲。$U_{sm} = U_{2YJ}$ 位置为恒定导前相角 δ_{dq},参阅图 5-2-19(b),当脉动电压较高时,1YJ 处于返回状态,其常闭接点断开;2YJ 及 2ZJ 处于励磁状态,其常开接点 2YJ、$2ZJ_1$ 闭合。当脉动电压从最大值下降到 U_{1YJ} 时,IYJ 已在 U_{1YJ} 时动作,其常闭接点闭合,起动时间继电器 SJ,其延时接点经 t_{SJ} 时间闭合;在脉动电压下降到 U_{2YJ} 时,2YJ 及 2ZJ 均返回,其常开接

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

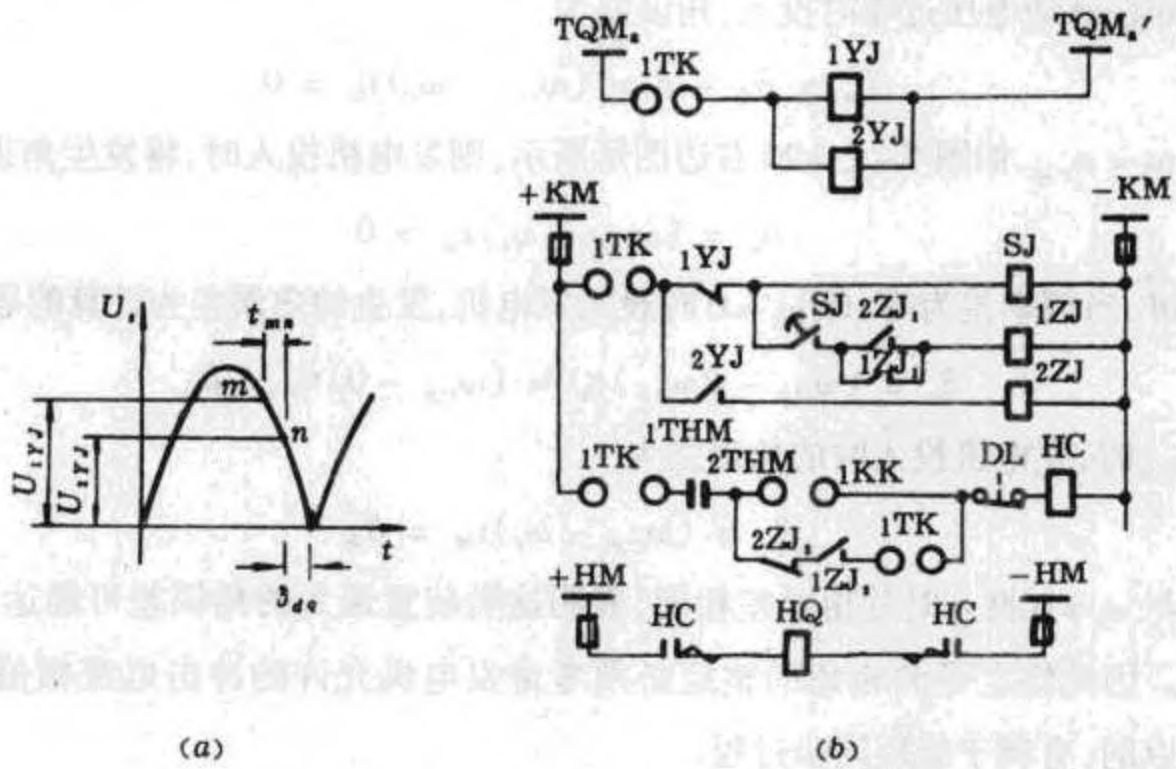


图 5-2-19　恒定导前相角的半自准同期装置
(a)波形;(b)接线

点 2YJ、2ZJ;断开;如果 $t_{mn} > t_{SJ}$,就会出现 SJ 延时接点已闭合,而 2ZJI 尚未断开的短暂间隔,发出一个短脉冲去起动 1ZJ。1ZJ 动作,其接点 $1ZJ_1$ 自保持,另一接点 $1ZJ_2$ 与 $2ZJ_2$ 共同送出合闸脉冲;如果 $t_{mn} < t_{SJ}$,则在 SJ 延时接点闭合前,2YJ、2ZJ;均已返回断开,1ZJ 无法起动,实现闭锁。

图 5-2-19(b)中设有合闸小母线 1THM、2THM,是为防止非同期合闸,串接非同期闭锁接点之用。

这类自动准同期装置存在一个较大的缺点是:会带着角误差将发电机投入,参阅图 5-2-20。

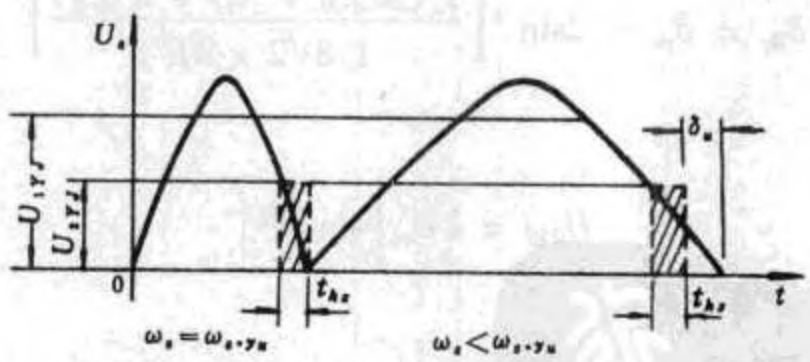


图 5-2-20　恒定导前相角合闸可能产生的误差

2.角误差分析

并列时,如机组实际滑差角速度 W_s 等于计算角速度 $\omega_{s\cdot js}$,则在经合闸时间 t_{hz} 后,转子实际的相对位移角为

$$\delta = \omega_s t_{hz} = \omega_{s\cdot js} t_{hz} = \delta_{dq}$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

发电机刚好在脉动电压过零时投入，角误差为

$$\delta_u = \delta_{dp} - \delta = (\omega_{s\cdot js} - \omega_s)t_{hz} = 0$$

如并列时 $\omega_s < \omega_{s\cdot js}$，如图 5-2-20 右边图形所示，则发电机投入时，将发生角误差

$$\delta_u = (\omega_{s\cdot js} - \omega_s)t_{hz} > 0$$

从理论上讲，当频率差为零，即 $\omega_s = 0$ 时投入发电机，发生的角误差为计算的导前相角，即

$$\delta_u = (\omega_{s\cdot js} - 2\omega_{s\cdot js})t_{hz} = (\omega_{s\cdot js} - 0)t_{hz} = \delta_{dq}$$

当 $\omega_s = 2\omega_{s\cdot js}$ 时，发电机投入时的角误差为

$$\delta_u = (\omega_{s\cdot js} - \omega_s)t_{hz} = \delta_{dq}$$

其绝对值与 $\omega_s = 0$ 投入时的角误差相同，表明这类装置最大的角误差可能达到计算的恒定导前角。因此恒定导前相角的整定必须考虑发电机允许的冲击电流幅值，采用 $\omega_s = 2\omega_{s\cdot js}$ 是可以的，有利于缩短同步过程。

3.参数整定

装置各起动元件的动作值和返回值整定方法如下：

(1)1YJ 的动作电压

低电压继电器动作电压按比继电 2YJ 返回早一个时间 t_{mn} 整定。动作时导前角为

$$\delta_{1YJ} = \delta_{dq} + 2\omega_{s\cdot js}t_{mn} = \omega_{s\cdot js}(t_{hz} + 2t_{mn})$$

1YJ 的动作电压为

$$U_{1YJ} = 2U_m\left|\sin\frac{\omega_{s\cdot js}(t_{hz} + 2t_{mn})}{2}\right|$$

(2)2YJ 的返回电压

过电压继电器返回电压按最大允许冲击电流整定。允许导前相角为

$$\delta_{dq} = \delta_{yu} = 2\sin^{-1}\left[\frac{I_e(X''_{d\cdot M} + X_{LJ} + X''_{d\cdot N})}{1.8\sqrt{2}\times 2E''_d}\right]$$

2YJ 的返回电压为

$$U_{2YJ} = 2U_m\left|\sin\frac{\delta_{dq}}{2}\right|$$

(3)SJ 的延时时间

时间继电器的整定时间与断路器合闸固有时间有关，通常取 $t_{SJ} = 0.3 \sim 0.5$s。

(二)晶体管半自动准同期装置

1.电路接线

由晶体管电子电路构成的 Z-2 型半自动准同期装置见图 5-2-21。

变压器 B_1、B_2 分别接待并发电机电压和运行系统电压。当待并发电机和系统的频

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

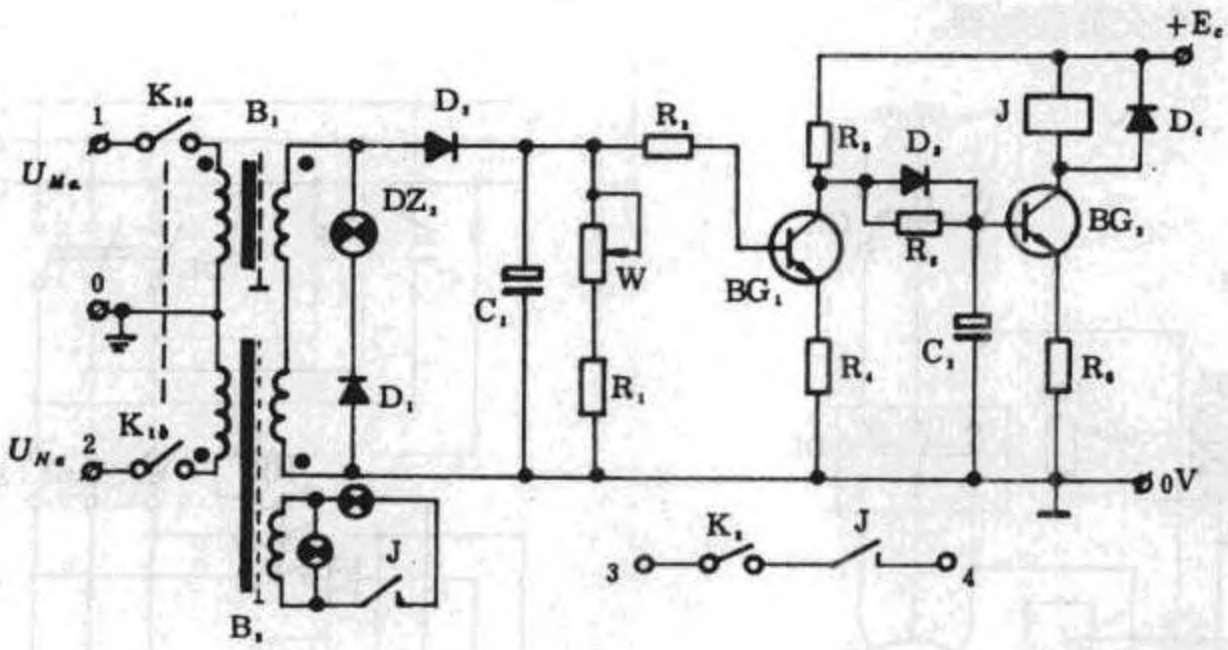


图 5-2-21　Z-2 型晶体管准同期装置

率、电压和相位相同时，则 B_1、B_2 两个次级电压向量差为零；当三个准同期条件之一项或两项不相等时，则次级电压向量差不为零。这一电压差反映脉动电压 U_s。

电压差的负半周经 D_1 加到指示灯 DZ_2，作为同期指示。

电压差的正半周经 D_1、R_2 加到晶体管 BG_1 的基极，进行差值比较。若同期条件不满足，则 BG_1 导通，BG_2 截止，继电器 J 不动作；若同期条件满足，则 BG_1 截止，BG_2 导通，继电器 J 动作，发出合闸脉冲。

2.同期条件

同期条件满足与否是通过电压差正半周直流电压与晶体管 BG_1 的基极起始电压进行比较作出判断的。电压差小于 BG_1 基极起始电压时，BG_1 即转为截止。BG_1 截止后，电源 $+E_c$ 经 R_3、D_3 对电容 C_2 充电，经 20ms，C_2 充电电压达到 BG_2 基极起始电压，BG_2 导通，J 动作。

延时 20ms 的作用是利用这一时刻，使发电机和系统的电压差再次进行比较，若比前周期大，则 C_2 在未充到 BG_2 基极起始电压前，BG_1 又导通，C_2 经 R_5 放电，BG_2 就不能导通。

这类准同期装置的工作误差为：

周波差≤0.2～0.8Hz；

电压差≤4%～15%；

相位差≤5°～11°。

3.外部接线

这种装置低压发电机组用得较多，运行情况反映良好。二次接线实例见图 5-2-22、图 5-2-23。前者用于电动合闸空气开关的机组；后者用于手动合闸的空气开关，并

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

需要增加一个交流接触器。

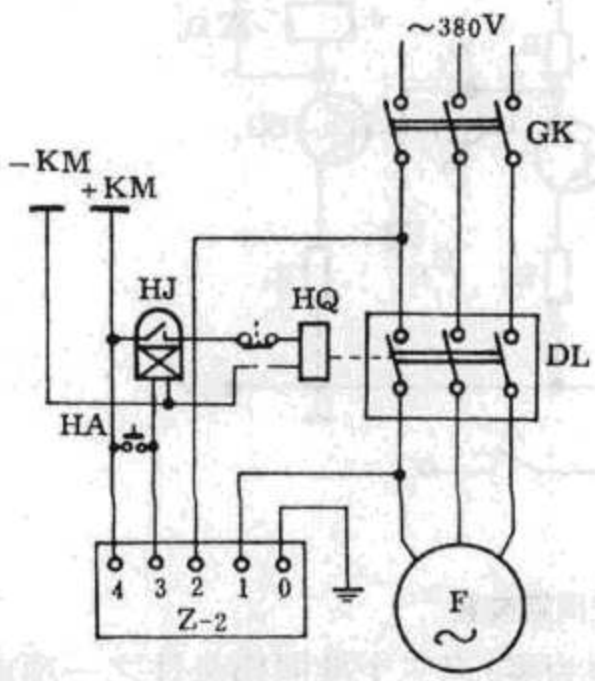


图 5-2-22 电动空气开关自动并网接线

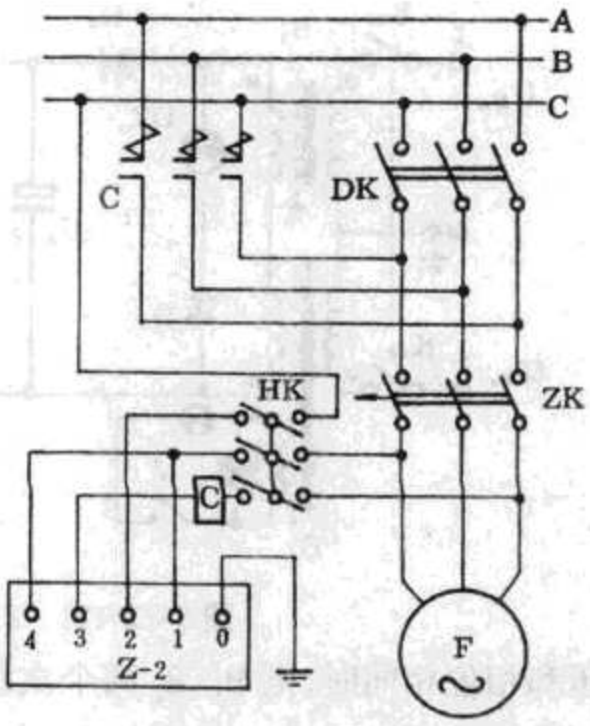


图 5-2-23 手动空气开关自动并网接线

第二节 励磁调节方式

一、小型水轮发电机的励磁方式

小型水轮发电机的励磁系统，按供电方式可分它励、自励两大类。它励是指发电机的励磁电源由与发电机无电的直接联系的电源供给，如直流励磁机、交流励磁机等，它励励磁电源不受发电机运行状态的影响，可靠性较高。自励是指励磁电源取自发电机本身，如移相电抗分流相复励、可控硅自并励和自复励、谐波励磁等，自励系统采用静止部件构成，取消了旋转电机，运行维护较简单，但受发电机运行状态的影响较大。

小型水轮发电机常用的励磁系统简述如下。

(一)直流励磁机励磁系统

直流励磁机励磁系统见图 5-2-24。

发电机的励磁电流由直流励磁机 L 供给，励磁机的励磁电流则由励磁机自并励电流 i_{ZL} 和自动电压调节器输出电流 i_{ZTL} 供给，总的励磁电流为

$$i_L = i_{ZL} + i_{ZTL}$$

调节励磁机励磁电流就可改变发电机的转子绕组励磁电流，实现发电机电压调整的目的。励磁机励磁电流的调节方法是：①手动调整磁场变阻器 R_c 以改变 i_{ZL} 值；②根据端电压偏

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

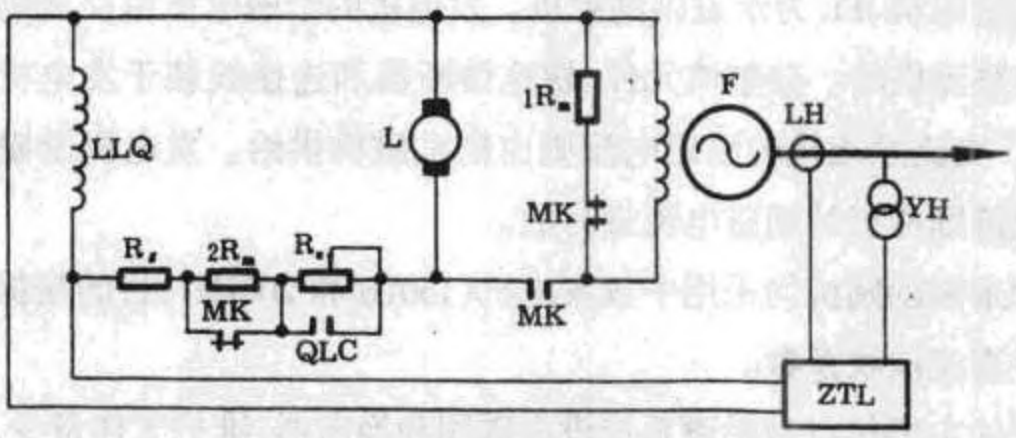


图 5-2-24 直流励磁机励磁系统
ZTL—自动调节励磁装置

差信号自动调节 i_{ZTL} 以保持端电压为给定值。

直流励磁机励磁方式的主要优点是：

1.励磁电源为独立电源，可靠性较高。

2.技术比较成熟，调节方便，价格低廉。

其主要缺点是：

1.碳刷和换向器容易磨损，甚至产生环火维护麻烦。

2.调节速度较慢。

3.一般只能起动不大于30%发电机额定容量的异步电动机。

4.换向器容量有一定限制。

5.同轴直流励磁机影响整个机组长度，增加厂房投资。

直流励磁机励磁已沿用几十年，技术成熟，运行稳定，调节方便，仍继续被采用，但由于存在换向器磨损、环火等问题，已逐渐被调节性能更为完善的励磁方式所取代。

(二)交流励磁机—旋转整流器励磁系统

交流励磁机—旋转整流器励磁系统(又称无刷励磁)见图 5-2-25。

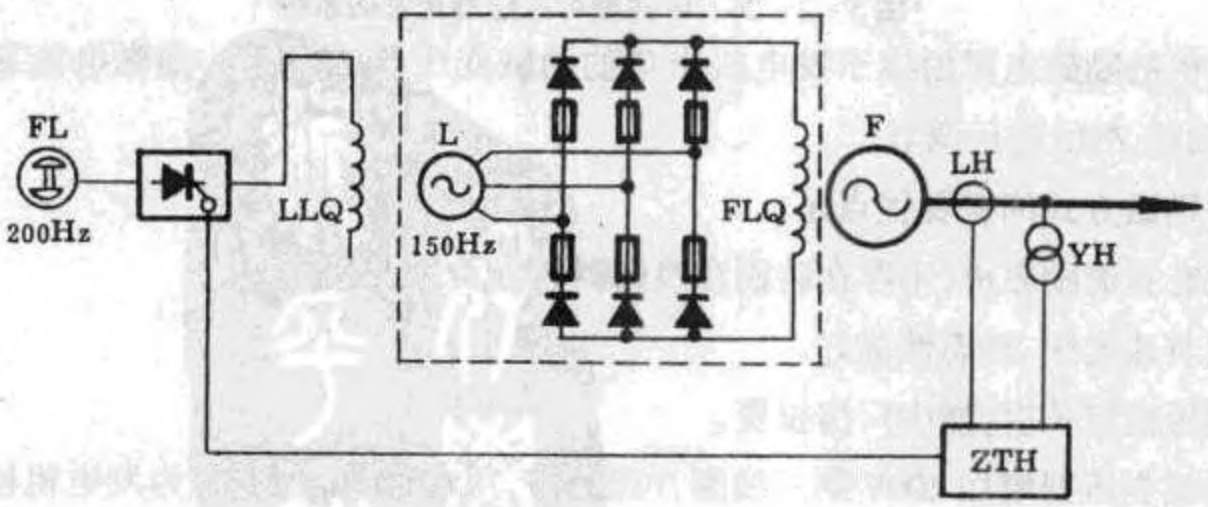


图 5-2-25 交流励磁机—旋转整流器励磁系统

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

图中 L 为交流励磁机，FL 为永磁副励磁机。发电机的励磁电流由交流励磁机电枢输出功率经三相全波整流供给。硅整流元件、快速熔断器和连接线装于发电机转子空心轴中，随轴一起旋转。交流励磁机的励磁电流则由副励磁机供给。发电机励磁调节是通过电压调节器改变交流励磁机的励磁电流进行的。

交流励磁机和永磁副励机均采用中频发电机(150Hz 和 200Hz)，目的是提高励磁调节的反应速度和减少直流波纹系数。

这种励磁方式的主要优点是励磁系统没有碳刷和换向器，维护工作量少，根除了环火问题。缺点是：

1.发电机事故跳闸时，只能靠硅二极管续流灭磁，灭磁速度较慢。

2.发电机励磁电流和电压不能直接测量。

3.旋转的硅元件和快速熔断器承受较大的离心力，结构有特殊要求，监视熔断器是否完好，增加一定的困难。

无刷励磁还处在试用阶段，使用不够广泛。

(三)自并励可控硅静止励磁系统

自并励可控硅静止励磁系统见图 5－2－26。

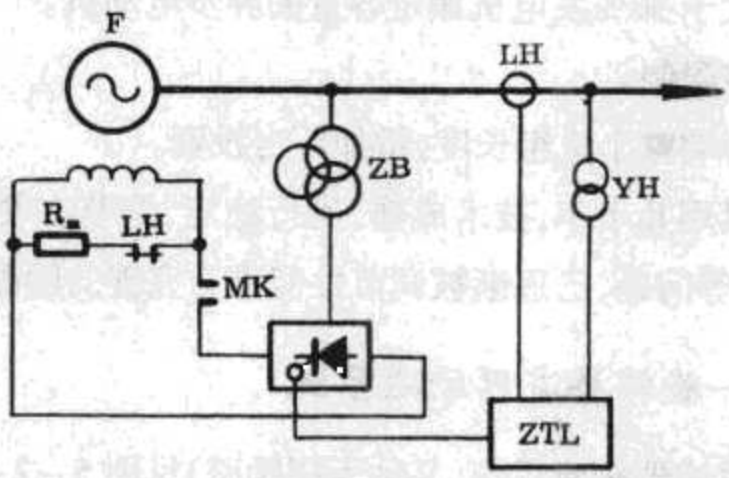


图 5－2－26 自并励可控硅静止励磁系统

发电机的励磁电源由接于发电机出口的励磁变压器 ZB 供给，励磁电流靠自动电压调节器(简称 ZTL)进行调节。

这种励磁方式的主要优点是：

1.没有直流励磁机，不存在碳刷和换向器磨损及环火等问题。

2.调节速度快，动态性能好。

3.缩短机组长度，减少厂房投资。

4.励磁变压器增加 400V 第三线圈，可改为厂用电它励，还可作为发电机检修用短路干燥电源。

5.如采用三相全控整流电路，可以实现“逆变”灭磁，为简化励磁系统创造条件。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

缺点是:强行励磁能力与机端电压有关,机端三相短路时残压很低,丧失强行励磁能力,影响继电保护动作灵敏度,且影响发电机在电力系统短路被切除后运行的稳定性。

这种励磁系统曾在800kw水轮发电机上进行过试验,证明在50%额定电压下发生三相短路,发电机差动保护能可靠动作,并以较快速度恢复机端电压。因为在短路发生瞬间,定子和转子绕组储存磁能释放,励磁电流并不随机端电压同时下降,暂态电流仍可使快速保护可靠地动作。必要时尚可用图5-2-21的"记忆"电路解决有时电流起动记忆电路限保护的动作可靠性问题。图中利用时间继电器1SJ的瞬时切换接点与电流继电器1LJ~3LJ接点并联,构成电流起动记忆电路,只要暂态电流能使电流继电器动作,即可由$1SJ_1$瞬时切换接点自保持,使保护可靠地动作于跳闸。

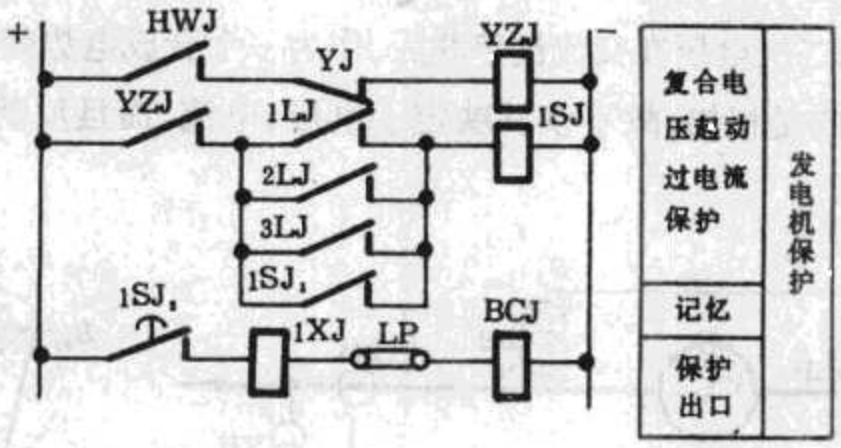
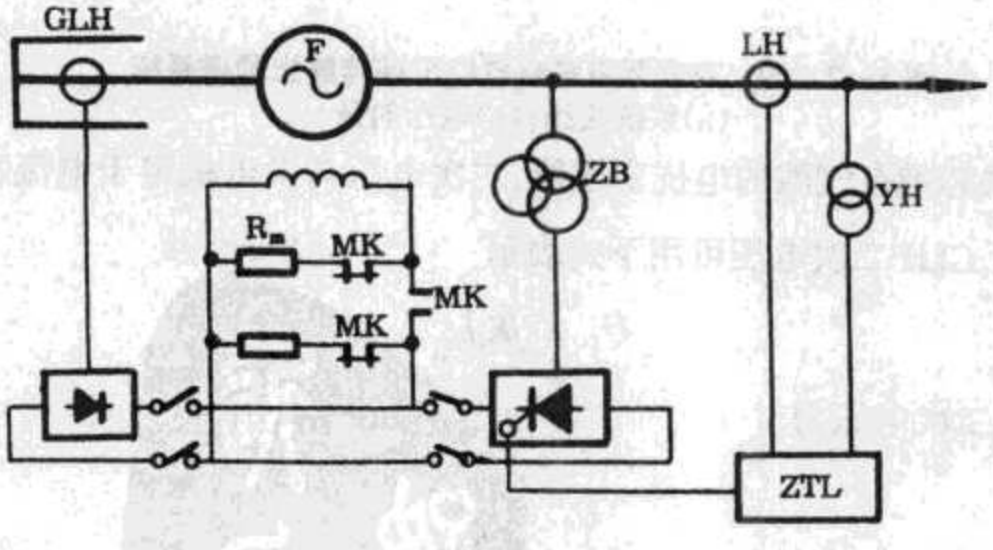


图5-2-27　电流起动记忆电路

(四)直流侧并联的自复励可控硅静止励磁系统

目前广泛应用的直流侧并联自复励可控硅静止励磁系统见图5-2-28。



5-2-28　直流侧并联自复励可控硅静止励磁系统

励磁电源有:①电压源,由并接于机端的励磁变压器ZB供给;②电流源,由串接于中性点或机端的功率变流器GLH供给,均取自发电机本身,故称自复励。

复励电流与发电机定子电流大小有关。发电机空载时复励无输出,由电压源提供建立空载电势所需励磁;在发电机带上负荷后,则由复励提供定子电流电枢去磁效应所需的

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

励磁。因发电机调整特性不是线性，仅靠复励不能使端电压恒定，还必须由电压调节器ZTL加以校正。

这种励磁系统除前述自并励系统的优点外，尚有以下特点：

1.在发电机外部短路时，复励能提供较大的强励电流，并有很高的强励电压上升速度。

2.两个励磁电流在直流侧并联供给，一个励磁电源故障时尚可由另一个励磁电源承担部分励磁，从而避免失励的可能性。

(五)交流侧串联自复励可控硅静止励磁系统

交流侧串联自复励可控硅静止励磁系统见图5-2-29。励磁变压器ZB的二次电压和功率变流器GLH的二次电压在交流侧串联后，作为一个合成电势经一组可控桥整流供给励磁。因两个电压向量相加，故不仅反映定子电压、电流，而且反映cosφ变化，具有相复励特性。

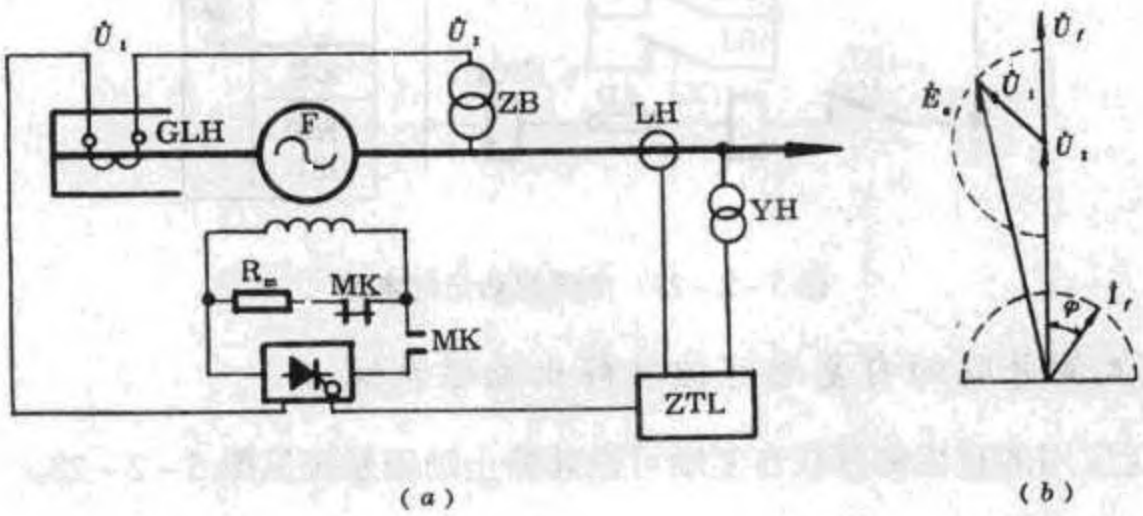


图5-2-29 交流侧串联自复励可控硅静止励磁系统
(a)系统接线；(b)电压向量

GLH为采用铁芯带有气隙的电抗变压器，二次电压与发电机定于电流$|\dot{I}_f|$成正比，相位则比$\dot{I}_f$超前90°，GLH二次电压可用下式表示

$$\dot{U}_1 = jK_I\dot{I}_{fx_\mu}$$

励磁变压器ZB的二次电压为

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_f}{K_v}$$

上两式中 K_V、K_I——分别为励磁变压器和功率变流器变比；

$\dot{U}U_f$、$\dot{I}_f$——发电机端电压和定子电流；

χ_μ——功率变流器GLH激磁电抗。

两个电压合成电势为

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$\dot{E}_a = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_f}{K_V} + jK_I\dot{I}_{fx_\mu}$$

其电压、电流向量见图 5-2-29(b)。

这种励磁系统的优点是：

1.两个励磁电源只需一组可控桥整流电路，结构比较简单，且可采用三相全控桥实现“逆变”灭磁。

2.具有相复励特性，在 cosφ 变化时起补偿作用。

缺点是 GLH 激磁电抗较大，致使整个装置效率下降。

(六)三次谐波自励恒压励磁系统

三次谐波励磁系统见图 5-2-30。

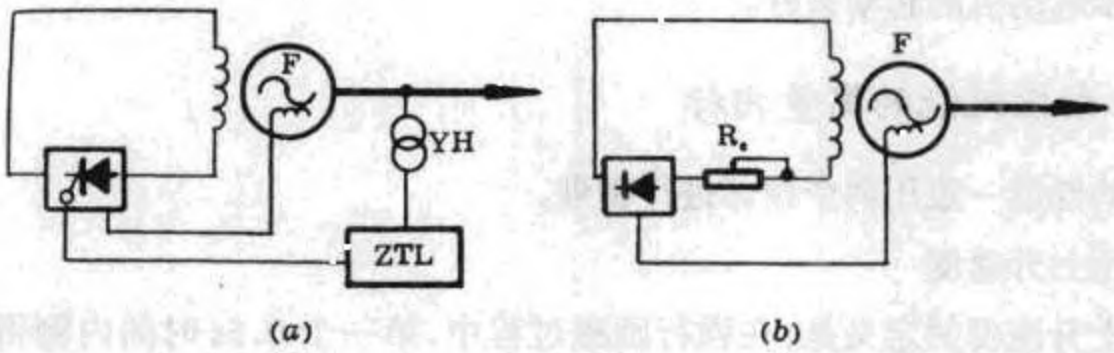


图 5-2-30 谐波励磁系统
(a)自励恒压；(b)手动调节

小型凸极同步发电机由于电枢和磁极间的气隙磁密分布不是正弦波形，故在走子绕组上感应出一系列谐波电势，其中以三次谐波能量最大。此外，发电机带上负载后，电枢反应也会产生奇次谐波电势。只要在定子槽中附加一组节距为$\frac{\tau_1}{3}$(τ_1 为基波节距)的三次谐波绕组，就可将发电机的三次谐波能量引出，通过整流桥供给发电机励磁。

三次谐波励磁系统的优点是：

1.三次谐波电势的大小与发电机负载及 cosφ 有关，具有自励恒压特性，调节速度较快，端电压波动范围一般不大于 10%。

2.在系统短路时，三次谐波电势剧增，具有强励作用。

3.有较大的起动异步电动机的能力。

三次谐波绕组与发电机主绕组没有电的联系，电压低，制造容易，价格低廉。

缺点是：由于发电机调压特性较平，并列运行会出现抢无功功率和振荡现象。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

二、继电强行励磁和强行减磁

(一)强行励磁的作用

在电力系统电压剧烈降低时,由自动装置迅速将发电机励磁电流增至最大值,称强行励磁。

强行励磁的主要作用是:

1.提高电力系统的暂态稳定性。

2.加快故障切除后的电压恢复过程。

3.提高继电保护的动作灵敏度。

4.改善异步电动机的起动条件。

(二)强行励磁性能的衡量指标

强行励磁的性能一般用两个指标进行衡量。

1.励磁电压上升速度

励磁电压上升速度的定义是:在强行励磁过程中,第一个0.5s时间内测得的励磁电压上升平均速度,用额定励磁电压的倍数表示,见图5-2-31励磁电压变化曲线。

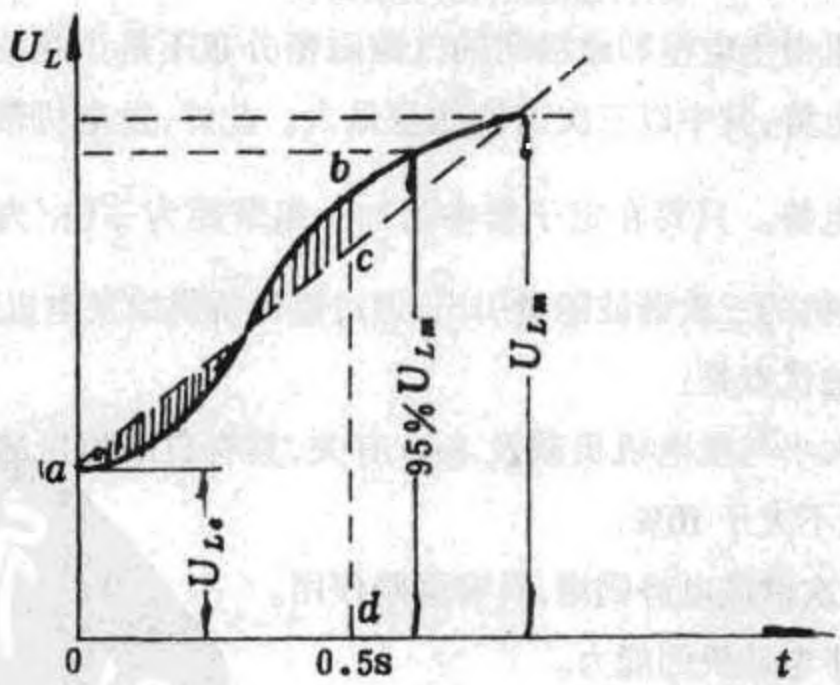


图5-2-31 盛磁电压变化曲线

U_{Le}—额定励磁电压;U_{Lm}—强励顶值电压

在强行励磁时,因发电机磁路饱和,励磁电压变化为曲线ab,其电压上升速度可用直线ac段表示,直线以下包含面积acdo与曲线ab以下包含面积abdo相等。电压上升速度为

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$v = \frac{cd - ao}{ao \times od} 1/s$$

式中 cd——0.5s 测得的励磁电压；

ao——额定励磁电压；

od——测定时间，0.5s。

从提高电力系统暂态稳定性看，强励电压上升速度越快越好。用于直流励磁机系统的继电强励装置，强励电压上升速度一般取 0.8～1.21/s

2.强励顶值电压倍数

强励顶值电压倍数是指强励时达到的最高励磁电压与额定励磁电压之比，可用下式表示

$$K_Q = \frac{U_{Lm}}{U_{Le}}$$

式中 K_Q——强励顶值电压倍数；

U_{Lm}、U_{Le}——强励顶值电压和额定励磁电压。

强励顶值电压倍数越大，暂态同步电势 E'_d 越高，对电力系统暂态稳定性越有利。但要提高强励顶值电压，必须提高转子绕组的绝缘水平，增加励磁电源容量，影响机组和配套设备造价。故强励电压倍数也不能要求过高，应根据电力系统的需要和发电机结构等因素合理选择，一般取 1.8～2 倍。

此外，强励允许时间也是一个应予注意的指标。强励的允许时间决定于转子绕组允许的过负荷能力，表面风冷的发电机强励允许时间可长达 1min。

(三)继电强行励磁装置

1.继电强行励孩装置原理接线

图 5－2－32 为继龟强行励磁装置原理接线图。由低电压继电器 1YJ、2YJ，中间继电器 1YZJ、2YZJ，信号继电器 XJ 和直流接触器 QLC 等元件所组成。

当发电机端电压降至 80～85%额定电压时，1YJ、2YJ 同时动作，分别起动 1YZJ、2YZJ；由 1YZJ、2YZJ 常开接点闭合去使 QLC 励磁；QLC 触头闭合将磁场变阻器 R_o 短接，励磁机励磁电流立刻增至最大值，实现强行励磁。

当发电机端电压恢复至低电压继电压返回值时，1YJ、2YJ 常闭接点返回而断开，强行励磁装置复归。

强行励磁动作时，由信号继电器 XJ 发出强励动作信号。

在接线中采用两只低电压继电器分别接于机端不同的电压互感器二次侧，可防止电压互感器熔断器熔断造成强行励磁误动作；用发电机断路器常开辅筋接点闭锁 QLC 操作

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

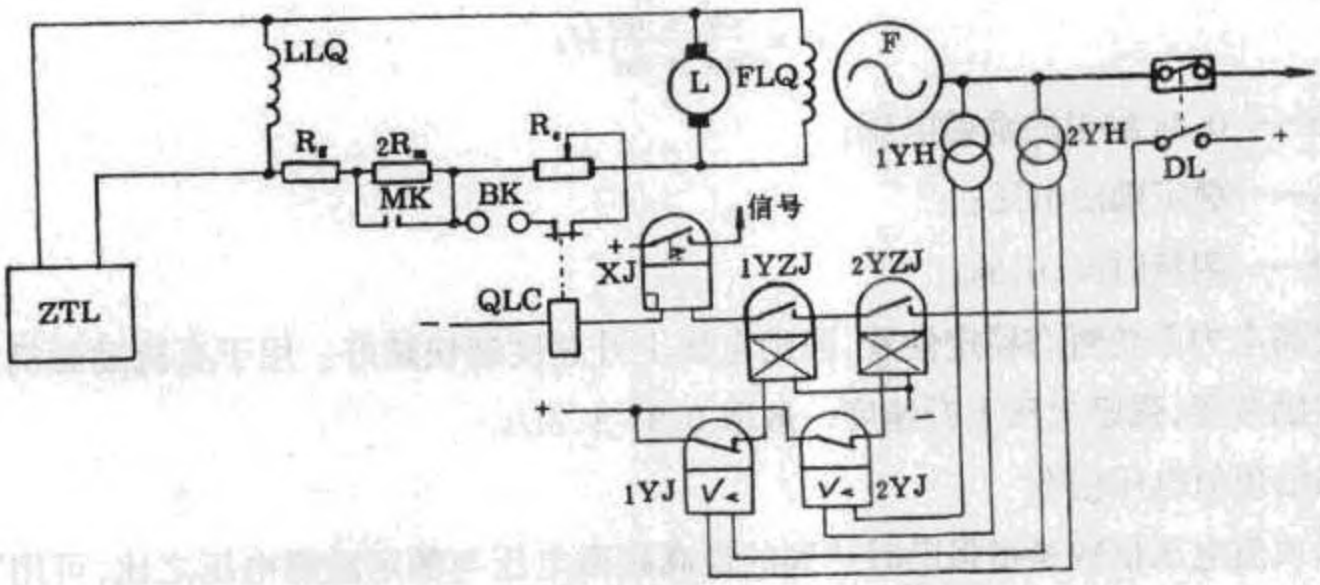


图 5-2-32 继电强行励磁装置原理接线

回路,可使强励装置在断路器跳闸后退出;在强励执行回路串接一只切换开关 BK,可随时视需要将强励装置投切。

低电压继电器 1YJ、2YJ 的动作电压按下式整定

$$U_{dz} = \frac{U_e}{K_k K_f}$$

式中 U_e——发电机额定电压;

K_k——可靠系数,取 1.05;

K_f——返回系数,取 1.06~1.1。

通常取 $U_{dz} \approx (0.8 \sim 0.85)U_e$。

2.继电强行励磁装置接线应注意的问题

(1)保证最大动作机率

并联运行发电机的继电强励装置,其低电压元件应接于不同的相别上,确保在发生任何类型的相间短路时均有一定数量的发电机进行强励。

例如某台发电机的继电强励装置的两只低电压继电器接入电压 U_{ab},只能反映 AB 两相短路,对于 AC 或 BC 两相短路,该装置就不能动作。

图 5-2-33 为发电机电压母线发生各种形式的两相短路时的电压向量图。1YJ、2YJ 接于 U_{ab},正常运行时继电器端子上感受电压为

$$U_j = |\dot{U}_{ab}| = U_e$$

当发生 AB 两相短路时,$U_j = |\dot{U}_{ab}| = 0$,有很高的灵敏度。

当发生 BC 或 CA 两相短路时,$U_j = 1.5|\dot{U}_z| = \frac{1.5U_e}{\sqrt{3}} = 0.866U_e$ 这时强行励磁灵敏度为

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

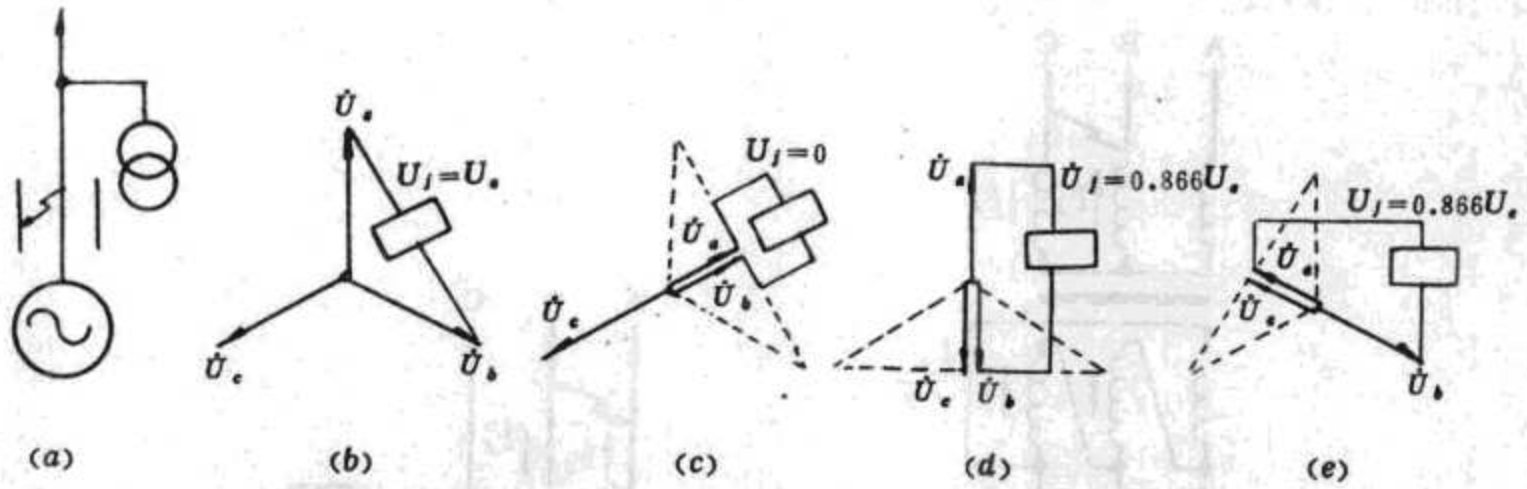


图 5-2-33 发电机出口两相短路时低电压继电器感受电压
(a)一次接线;(b)正常;(c)AC 短路;(d)BC 短路;(e)CA 短路

$$K_{cm}=\frac{U_{dz}}{U_j}=\frac{(0.8\sim0.85)U_e}{0.866U_e}=(0.92\sim0.98)<1.2$$

不能满足要求。因此,应按排另外的机组的强行励磁装置反映 BC 或 CA 两相短路。假如一个水电站有三台机组,则一号机的强行励磁装置接 U_{ab},2、3 号机分别接 U_{bc}、U_{ca},这样,任何两相短路都有一台机投入强行励磁。

(2)与复励调节器相配合

强行励磁装置的低电压元件接入的电压相别,还应考虑自动电压调节器对某些故障丧失强行励磁作用,必须依靠继电强行励磁的情况。

例如某台发电机装设复励电压调节器,其电流互感器采用两相电流差 $\dot{I}_A-\dot{I}_C$ 接线,当发生变压器高压侧 BC 两相短路时,参阅 5-2-34 下反映到低压侧出口线电流为

$$\dot{I}_a=\frac{\dot{I}'_d}{\sqrt{3}}$$

$$\dot{I}_b=\frac{2\dot{I}'_d}{\sqrt{3}}$$

$$\dot{I}_c=\frac{\dot{I}'_d}{\sqrt{3}}$$

复励采用 $\dot{I}_a-\dot{I}_c$ 两相电流差接线,故其输出电流为零。

又如复励电流互感器采用两相电流和与第三相电流差 $\dot{I}_a+\dot{I}_b-\dot{I}_c$ 接线方式时,参阅图 5-2-34(b),则当发电机出口发生 AB 两相短路时,复励输出电流也为零。可见上述两种接线方式的复励调节器对一些故障丧失强行励磁能力,故在确定继电强行励磁装置的接线时,应弥补这一缺陷,将其接入 $\dot{U}_{ab}$ 电压上。

(3)采用正序滤过器

为了提高强行励磁装置的灵敏度,必要时可将低电压元件经正序滤过器接至电压互感器上。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

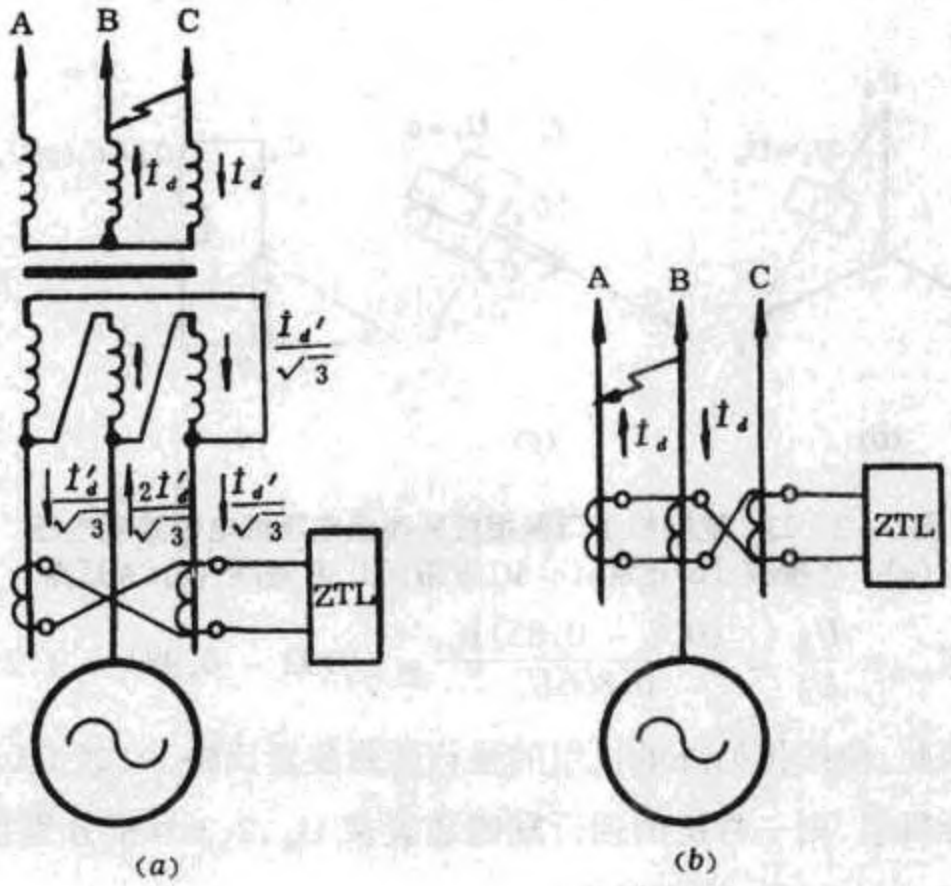
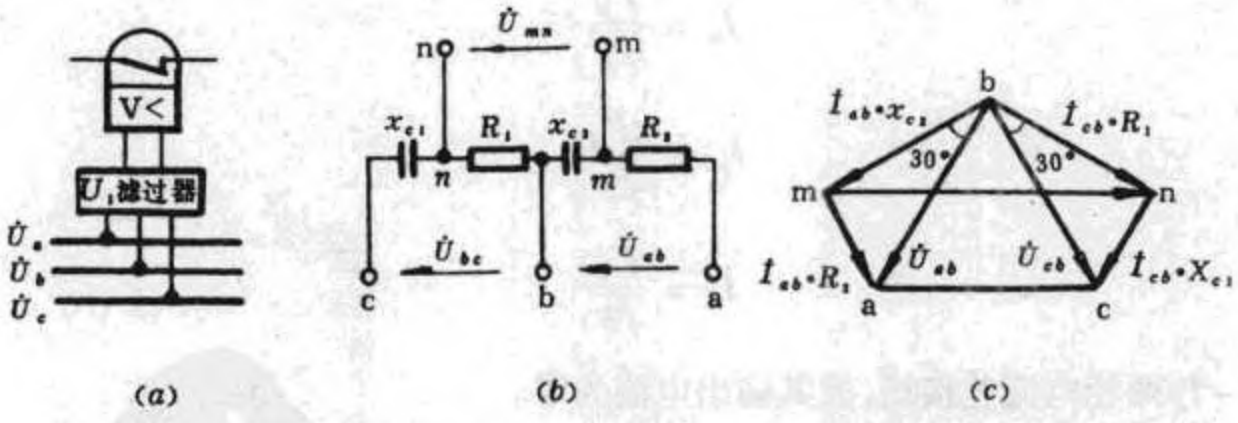


图 5-2-34 复输出为零的接线和故障形式举例
(a)$\dot{I}_a-\dot{I}_c$;(b)$\dot{I}_a+\dot{I}_b-\dot{I}_c$

阻容式正序电压滤过器如图 5-2-35 所示。各臂电阻、电容元件参数按以下条件选择:

$$R_1 : \chi_{c1} = \chi_{c2} : R_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} : \frac{1}{2}$$



(a) (b) (c)

图 5-2-35 正序滤过器
(a)接线;(b)内部结构;(c)电压向量

当正序滤过器输出端开路,在输入端加上正常三相额定电压时,其输出电压为

$$U_{mn} = \sqrt{3}\,U_{bm}$$

因 $U_{bm}=\frac{\sqrt{3}}{2}U_e$,故 $U_{mn}=1.5U_e$。

当发电机电压母线发生两相短路时,母线残压正序分量只为$\frac{1}{2}$额定电压,这时,m、n

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

点空载输出电压为

$$U_{mn}^{(2)} = \frac{1.5}{2}U_e = 0.75U_e$$

假设低电压元件仍按(0.8~0.85)U_e整定,其灵敏度为

$$K_{em} = \frac{(0.8 \sim 0.85)1.5U_e}{0.75U_e} = 1.6 \sim 1.7$$

显然比未经正序电压滤过器的灵敏得多,同时还可反映各种不对称短路,不受电流互感器接线方式的影响,故在强行励磁装置中得到较多的应用。

(4)确保低电压继电器动作

反映系统全电压的低电压继电器,在接入不同的电压互感器时还应注意相位,确保两只继电器反应同一故障。

例如图5-2-36所示小水电站常用的电压互感器接线方式。电压互感器1YH由两台双线圈单相电压互感器接成V/V接线,一般用于测量和保护;电压互感器2YH由三台双线圈电压互感器接成△/Y-1接线组别,一般用于自动调节励磁。通常将强行励磁装置的两只低电压继电器分别接至1YH和2YH的二次侧。从图中可见,1YJ应接于;1YH的U_{ab},2YJ则应接于2YH的U_{b0},才能保证在发生AB两相短路时两只继电器感受的电压均为零。

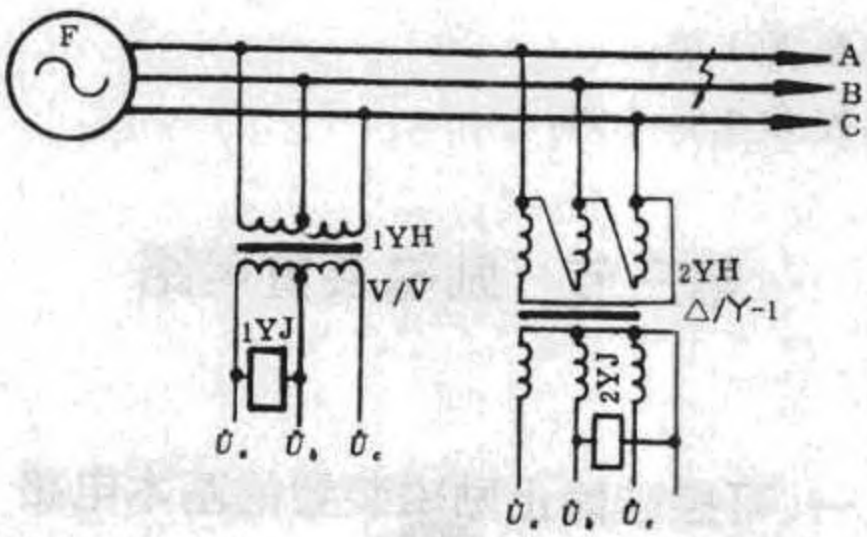


图5-2-36 低电压继电器接入方式相位配合

(四)继电强行减磁装置

1.强行减磁的作用

强行减磁的作用是:

(1)发电机甩负荷时,机组过速,伴生发电机过电压,可能危及发电机绝缘,强减装置能迅速将电压降至空载电压。

(2)发电机内部故障跳闸时,为了消除发电机感应电势继续供给故障点电流,必须在

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

断路器跳闸的同时，联动跳灭磁开关，迅速灭磁。而在灭磁开关跳闸时，直流励磁机甩负荷，又可能在换向器上产生过电压，故用强减装置迅速降低励磁机励磁电流。

2.强行减磁的取得方式

强行减磁的取得方式有以下几种：

(1)利用自动电压调节器电压负反馈闭环调节，在端电压升高时迅速降低励磁。

(2)利用继电器、直流接触器等元件构成继电强行减磁装置。

(3)利用灭磁开关的辅助接点，在跳灭磁开关时自动接入强减电阻，原理与继电强减装置相似。

3.继电强行减磁装置的原理接线

继电强行减磁装置原理接线与继电强行励磁装置相似，只是低电压元件改用过电压继电器。在发电机过电压达1.15倍额定电压时，过电压继电器动作，其接点闭合起动强行减磁接触器QJC。QJC常闭触头断开，励磁机励磁回路即自动接入强减电阻，使励磁机励磁电流迅速降低。

强行减磁电阻一般按励磁机励磁绕组热态电阻的10倍选择。

强行减磁装置过电压元件动作电压按下式整定

$$U_{dz} = \frac{K_k}{K_f}U_e$$

式中 K_k——可靠系数，取1.05；

K_f——返回系数，取0.9~0.94。

第三节 励磁装置电路

一、可控硅静止励磁装置的基本电路

(一)可控硅静止励磁装置的组成

目前我国中、小型水轮发电机使用的可控硅静止励磁装置，型号很多，各有特点，但其组成一般均可分为基本工作单元和辅助单元两大部分。

1.基本工作单元

基本工作单元包括测量比较、综合放大、移相触发、功率输出等单元。

(1)测量比较单元

测量变压器和电流调差环节组成测量比较单元。它测量发电机端电压、定子电流和

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

cosψ,并与给定值比较,输出一个直流电压偏差信号。

(2)综合放大单元

因测量比较单元输出的信号微弱,故应加以放大才能满足励磁装置调节精度和动态品质的要求。此外,还有其他信号(如电流限制、低励限制等)需要与测量比较信号加以综合,再一起作用于移相触发电路。

(3)移相触发单元

将综合放大单元来的信号转换为移相触发脉冲,改变可控硅导通角。

(4)功率输出单元

由励磁电源和可控桥式整流电路组成,由移相触发脉冲控制,以实现励磁调节。

2.辅助工作单元

辅助工作单元是指发电机和励磁装置为安全运行而设置的各种保护,和便于运行操作的附加装置,如起励、手动自动切换、低励、过励等单元。

(1)起励单元

发电机转子剩磁一般比较小,不满足自励建压的需要,故要设置起励单元供给发电机初始励磁。

(2)手动、自动切换单元

在发电机进行试验、线路递升加压和继电保护试验时,必须将自动调节励磁装置转为手动调节,手动调节并可作自动调节的备用。

(3)低励单元(又称最小励磁限制)

当电力系统无功容量剩余,发电机转换为进相运行时,为了防止励磁电流过分降低,导致机组失去稳定,或危及发电机安全,故设置低励单元。

(4)过励单元(又称电流限制)

当电力系统电压剧烈降低,强励动作时,为了保护发电机和励磁装置的安全,设置过励单元,限制转子电流在安全范围内。

(二)可控硅静止励磁装置的组成

TKL型自励可控硅励磁装置是目前使用较为广泛的可控硅励磁装置之一,适用于1000~10000kW水轮发电机自动调节励磁,它能满足单机运行、并网和调相等运行方式的要求。产品基本型号有TKL-11自并励和TKL-21自复励两种。前者结构比较简单,适用于小型机组;后者由复励和电压调节器两部分组成,适用于负载突变大、强励要求高的大中型机组。本书以TKL型可控硅励磁装置为例,阐述可控硅静止励磁装置的基本电路。TKL-11型自并励装置原理方框见图5-2-37,其原理接线见图5-2-38插页;TKL-2互型自复励装置原理方框见图5-2-39,其原理接线见图5-2-40。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

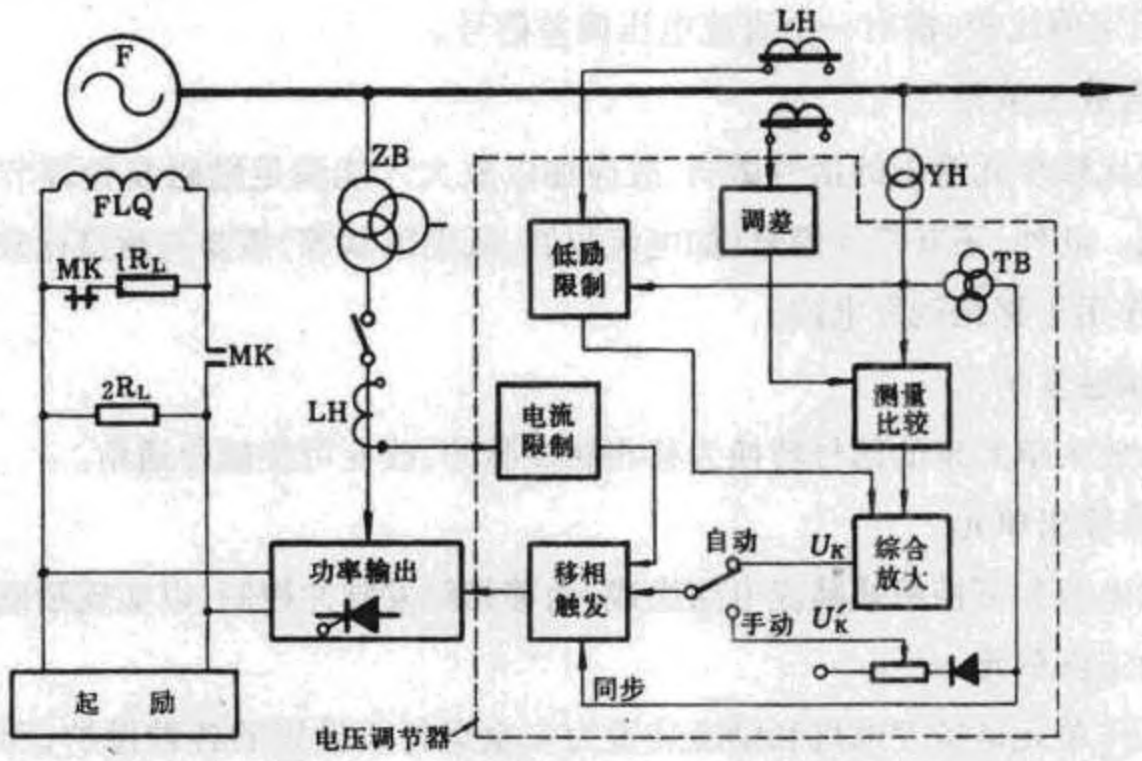


图 5-2-37 TKL-11 自并励可控硅静止励磁装置原理方框图

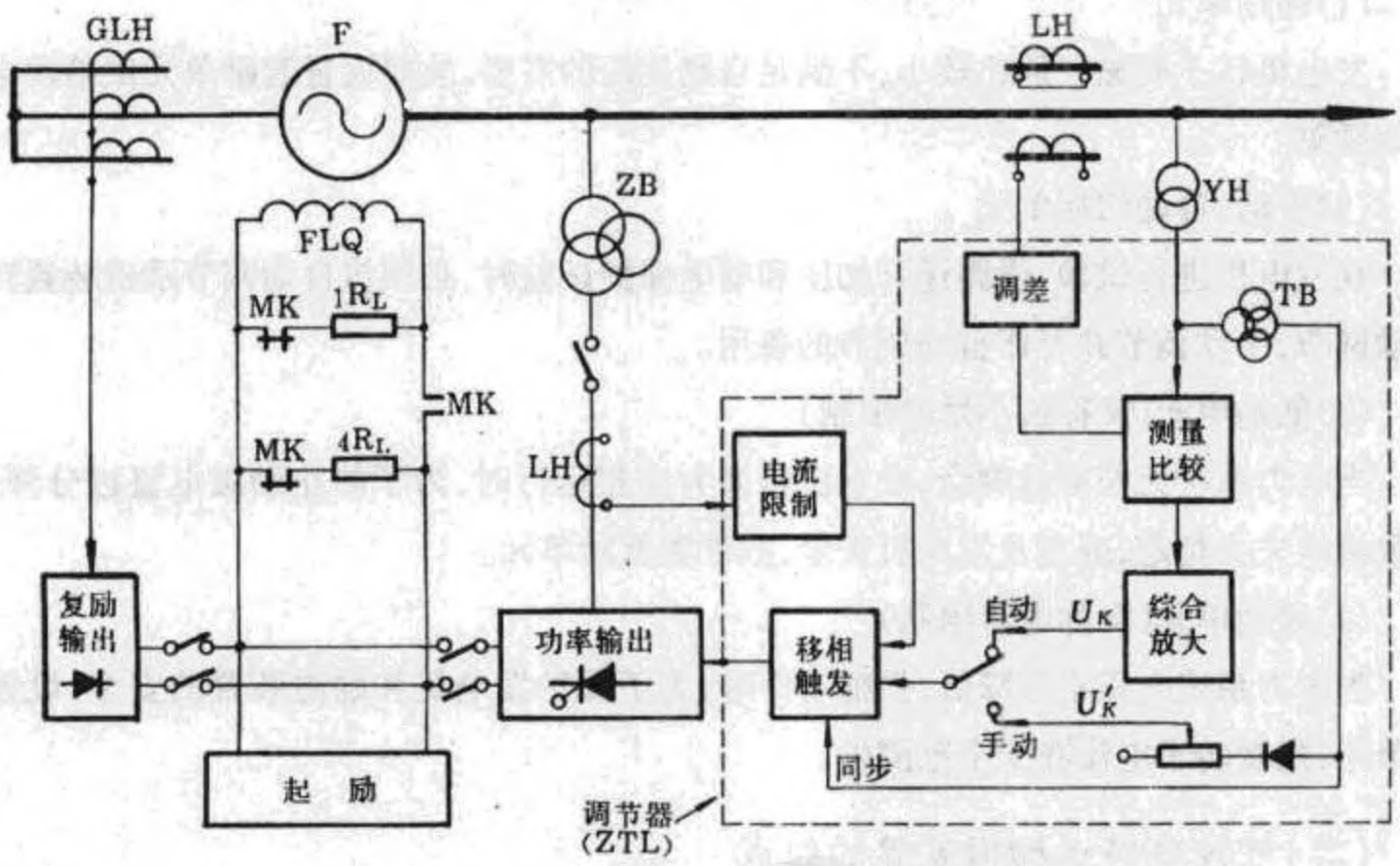


图 5-2-39 TKL-21 自复励可控硅静止励磁装置原理方框图

(三)可控硅静止励磁装置功率输出电路

功率输出电路主要包括励磁电源,可控桥式整流电路和保护等附加回路。

1.励磁电源

(1)自并励的励磁电源

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

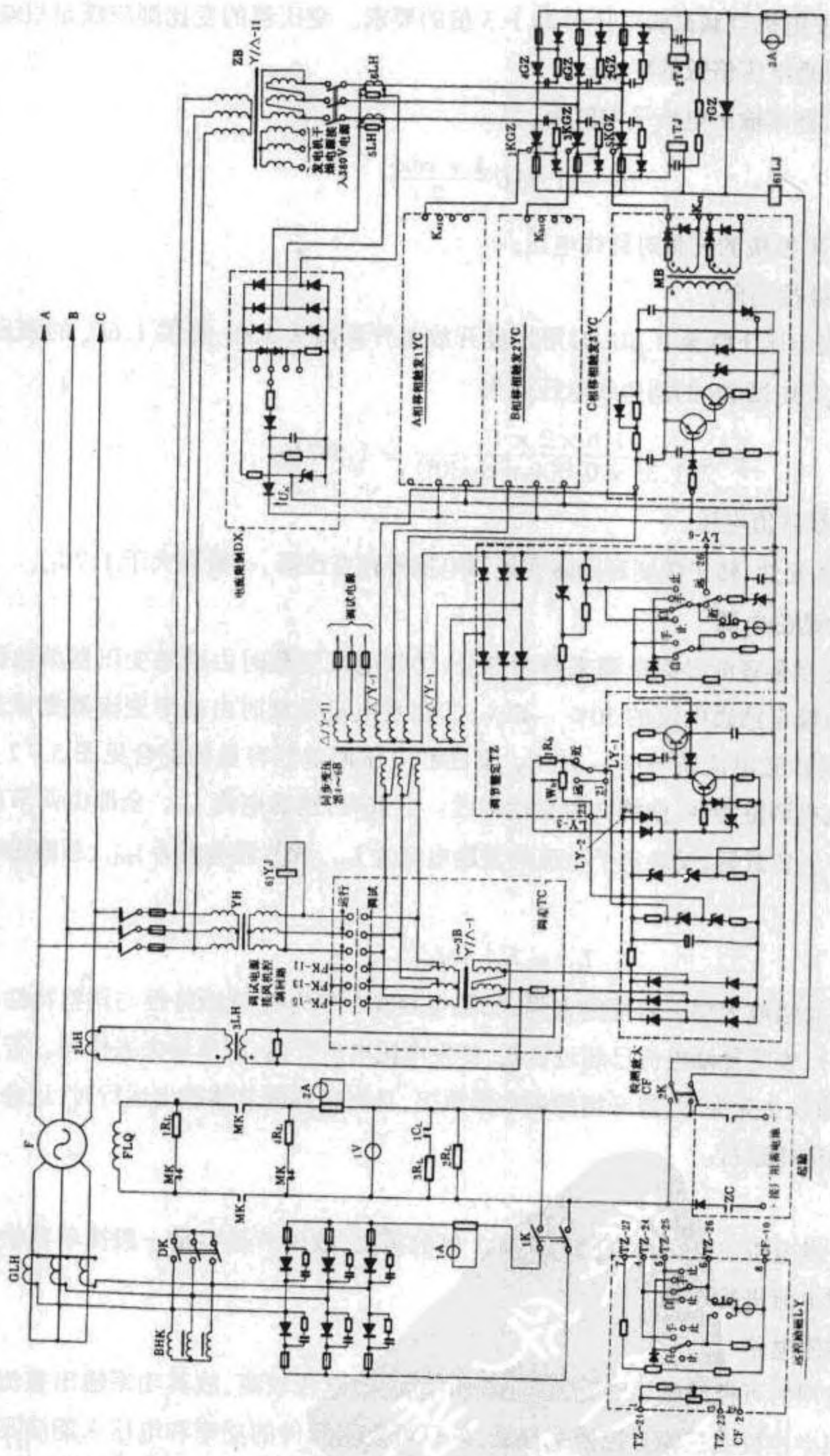


图5-2-40 TKL-21 自复励可控硅静止励磁装置原理接线图

TKL－11 自并励装置的励磁电源由接于发电机出口的励磁变压器 ZB 供给。励磁变

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

压器容量选择应满足发电机额定负载下对励磁电压和励磁功率的要求，同时应满足强励短时的需要，以及发电机空载试验电压升高 1.3 倍的要求。变压器的变比则应满足机端电压下降条件下强励电压倍数的要求。

三相半控桥式整流输出电压平均值为

$$U_L = 1.35U\frac{1+\cos\alpha}{2}$$

式中 U——加于半控桥的三相对称线电压；

α——可控硅控制角。

假设在发电机电压下降至 $0.8U_e$ 时可控硅开放角开到最大 150°，提供 $1.6U_e$ 的强励顶值电压，则励磁变压器 ZB 的副边线电压应为

$$U' = \frac{1.6\times 2\times U_e}{1.35\times 0.8(1+\cos 30^\circ)} = 1.587U_{Le}$$

式中 U_{Le}——强励顶值电压。

考虑到可控硅元件、转子碳刷和励磁变压器电抗等存在压降，一般取大于 $1.7U_{Le}$

(2)自复励的励磁电源

TKI－21 自复励装置的励磁电源来自两部分：①发电机空载时由励磁变压器单独供给励磁电流，约占额定励磁电流的 30%～40%；②在发电机负载时由功率变流器提供复励分量，约占额定励磁电流的 60%～70%。复励和电压调节器容量的配合见图 5－2－41，曲线 1 为发电机调整特性，曲线 2 为复励特性。空载时，励磁电流 I_{L0}。全部由调节器提供，$I_{L0} = I_{ZTL}$；带上负载后，反映定子电流的复励电流为 I_{FL1}，调节器电流为 I_{ZTL1}，总励磁电流为

$$I_{L1} = I_{FL1} + I_{ZTL1}$$

要注意复励不能太强或太弱。若复励太强，如图中曲线 2 变为 2，复励特性与调整特性相交，出现阴影部分，表明复励电流已超过需要，使发电机电压升高，调节器失去作用。若复励复励太弱，则曲线 2 变为 2″，势必增加调节器负担，且当碰到调节器撤出运行时，还会发生发电机较大的进相运行。

因调节器要满足发电机空载试验电压升高 1.3 倍的需要，故调节器容量一般按单独供给发电机额定励磁电流进行选择。

2.可控硅整流电路

水轮发电机用的可控硅励磁装置，因使用功率较大，电压较高，故其功率输出整流电路大都采用三相半控桥或三相全控桥式接线，单只可控硅元件的功率和电压未能满足需要时，还采用多只元件串、并联使用。三相桥式整流电路具有电压脉动系数小，功率因数

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

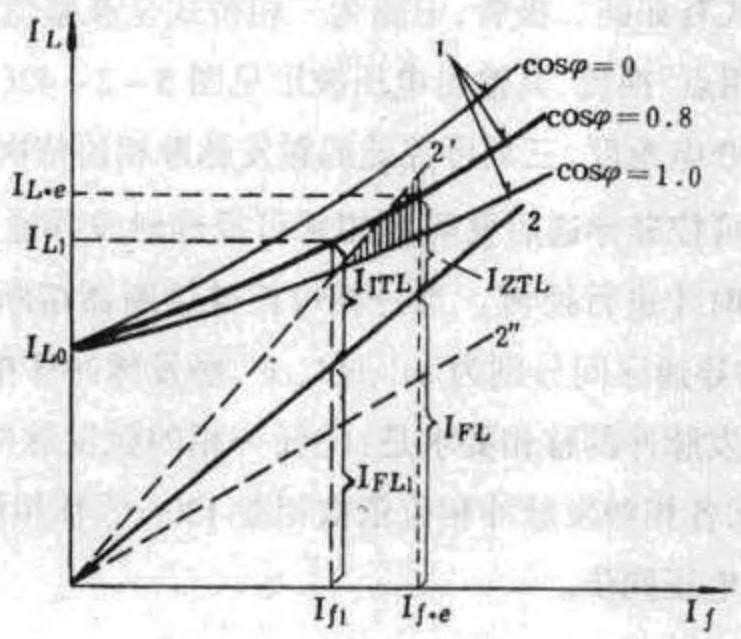


图 5-2-41 复励容量选择图

1—调整特性;2—复励特性

较高,变压器效率较大,整流元件耐压要求较低等优点,故得到广泛应用。

(1)三相半控桥式整流电路

三相半控桥式整流电路接线及波形见图 5-2-42。可控硅元件 1KGZ、3KGZ、5KGZ 的阴极连在一起,构成共阴极组;三只硅二极管 2GZ、4GZ、6GZ 的阳级连在一起,构成共阳极组,此外尚有一只续流管 7GZ。三只可控硅元件一般采用共阴极组的原因是:阴极接散热器可简化接线,并使控制极使用的脉冲变压器绝缘降低要求。

可控硅的导通条件是:除了要求元件阳极电位高于阴极外,还必须在控制极加入正触发脉冲。可控硅的截止条件是:通过电流小于维持电流,或在阳极加反向电压。

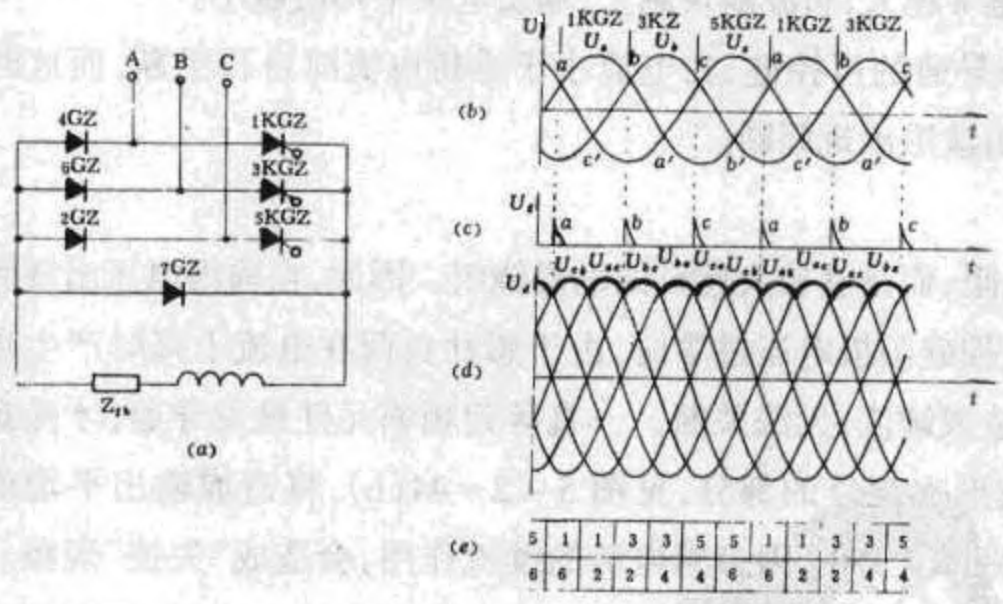


图 5-2-43 三相半控桥式整流电路接线及波形

(a)接线;(b)阳极电压波形;(c)脉冲顺序;(d)整流电压波形;(e)元件导通号

①对触发脉冲的移相要求

为了分析方便,暂假定负载为纯电阻。

若可控硅在刚进入正向电压瞬间加上触发脉冲,则控制角 α 为零,具有最大导通角 β

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

($\beta = 180 - \alpha$),其工作方式有如硅二极管,电路为三相桥式全波整流电路,六个桥臂分别在a、b、c、a′、b′、c′"自然换相点"换流,其输出电压波形见图5-2-42(b)。自然换相点a、b、c分别滞后$\dot{U}_a$、$\dot{U}_b$、$\dot{U}_c$各30°电角度,三只可控硅的触发脉冲相位依次相差120°电角度。

当控制角为α时测可控硅导通后要等到相邻可控硅触发导通,给原来处于导通状态的可控硅加上反向电压时才进行换流。当一相可控硅熔断器熔断时,则要延迟到a′、b′、c′点换流,故各可控硅的导通区间分别为aa′、bb′、cc′,触发脉冲移相范围为0~180°。

可见三相半控桥触发脉冲的移相要求是:①任一相的触发脉冲应在滞后本相相电压30°~210°的区间发出;②各相触发脉冲相位依次相差120°;③移相触发电路的工作电源必须与加至可控硅的正向电压同步。

②输出电压波形

图5-2-43为三相半控桥α=0°、30°、60°、90°、120°、150°的输出电压波形。

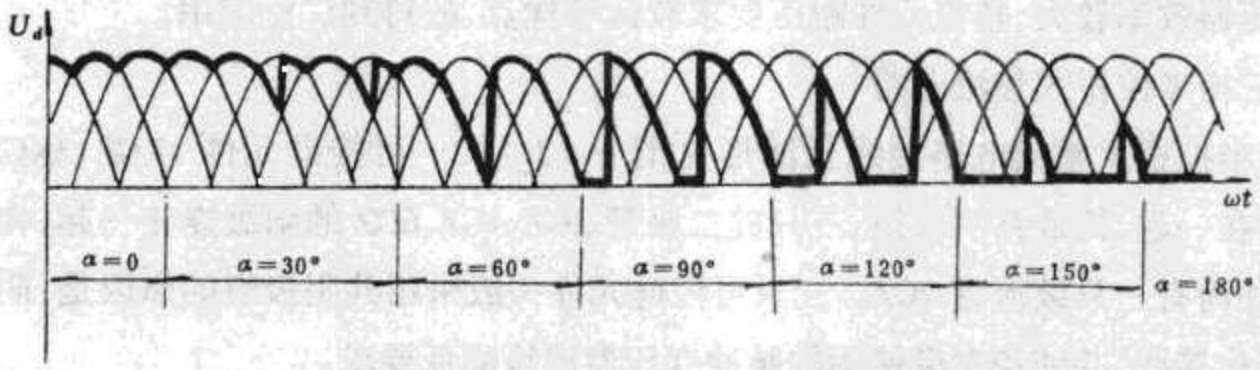


图5-2-43 移相角α在不同角度时的整流波形

当0°<α<60°,因原来导通的可控硅受相邻元件导通而来的反向电压所关断,线电压未过零,故波形是连续的。惟a越大,斩波缺块越大,输出电压平均值越小。

当60°<α<180°,因原来导通的可控硅,在电流小于维持电流时自行关断,而这时相邻元件尚未触发导通,故输出波形出现间断。

③续流管7GZ的作用

实际电路负载不是纯电阻,而是有较大感抗的励磁绕组。因此,在输出电压出现间断时,将出现两种情况:①在可控硅阳极电压过零时,由于感性负荷在电流下降时产生自感电势,使原来导通的可控硅造成续流,无法关断。一直等到相邻元件触发导通,才受到反向电压而关断换流。输出波形出现负的部分,见图5-2-44(b),将造成输出平均值减少;②若控制角α从较小值突增至180°,因自感电势的续流作用,会造成"失控"现象。这时续流方向如图5-2-44(a)所示。失控波形见图5-2-44(c)。在A_1点时,虽可控硅元件1阳极电压过零,但续流继续导通;在A_1至A_2点,续流使元件1、4导通;至A_2点时,A相电压又高于B相电压,使元件1、6导通;至A_3点,则元件1、2导通;至A_4点,又是元件1、4导通。如此循环下去,可控硅元件1一直无法关断,输出电压相当于一相整流,其值为三相全波桥式整流输出平均值的一半。为了克服上述现象,必须加装续流管7GZ,自感

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

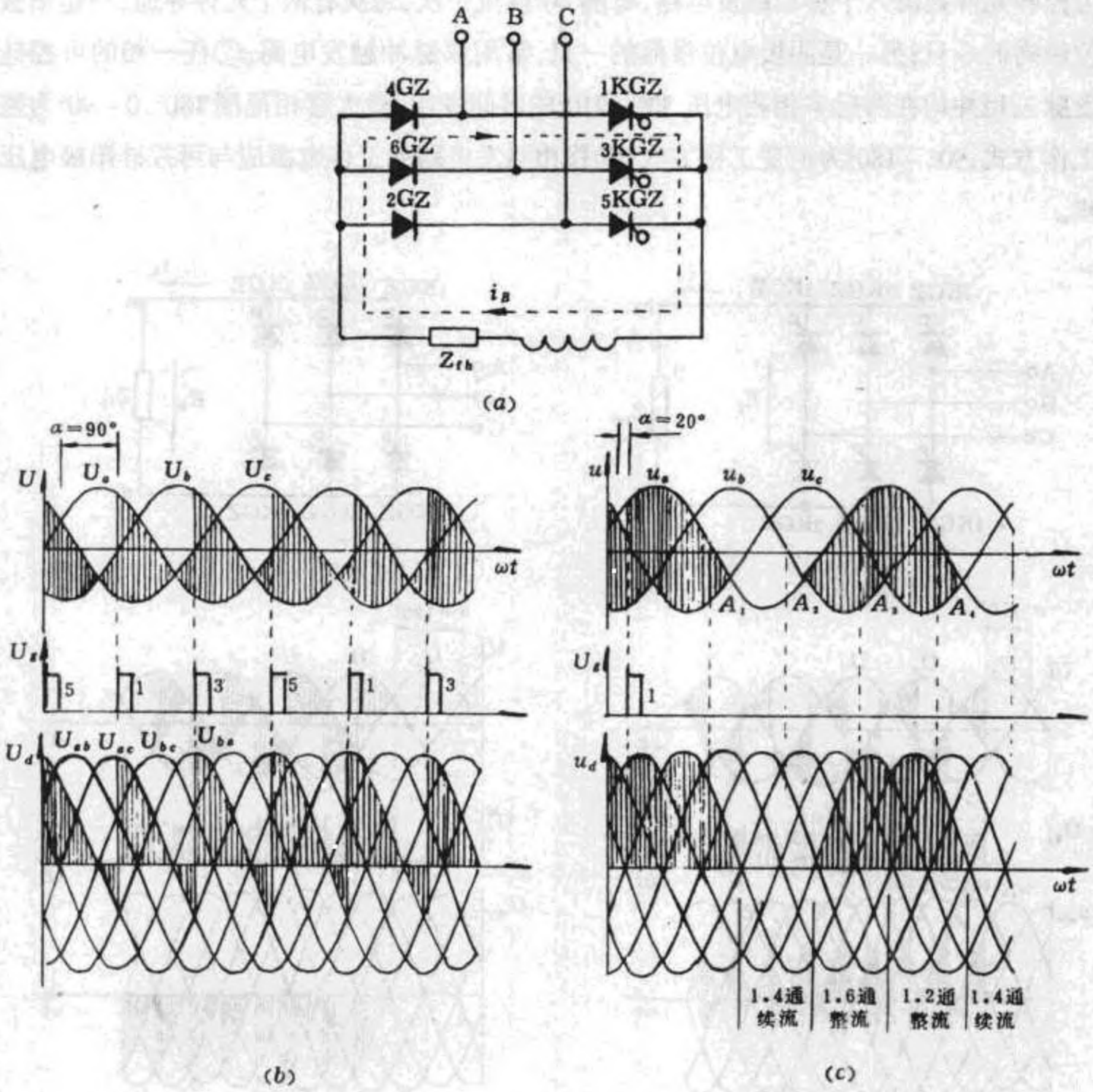


图 5-2-44　三相半控桥未装续流管时的运行情况

(a)续流方向;(b)α=90°时波形出现负的部分;(c)α=0 突增至 180°造成"失控"

电势将从两个支路通过:①续流管;②元件 1、4 支路。由于续流管正向压降很小,使元件 1、4 支路流过的电流小于维持电流,故元件 1 就能在阳极电压过零时自行关断,有如纯电阻负载一样。

续流管只在电压波形出现间断的区间($60° < \alpha < 180°$)起作用,在 $0° < \alpha < 60°$区间,电压波形是连续的,续流管不起作用。

(2)三相全控桥式整流电路

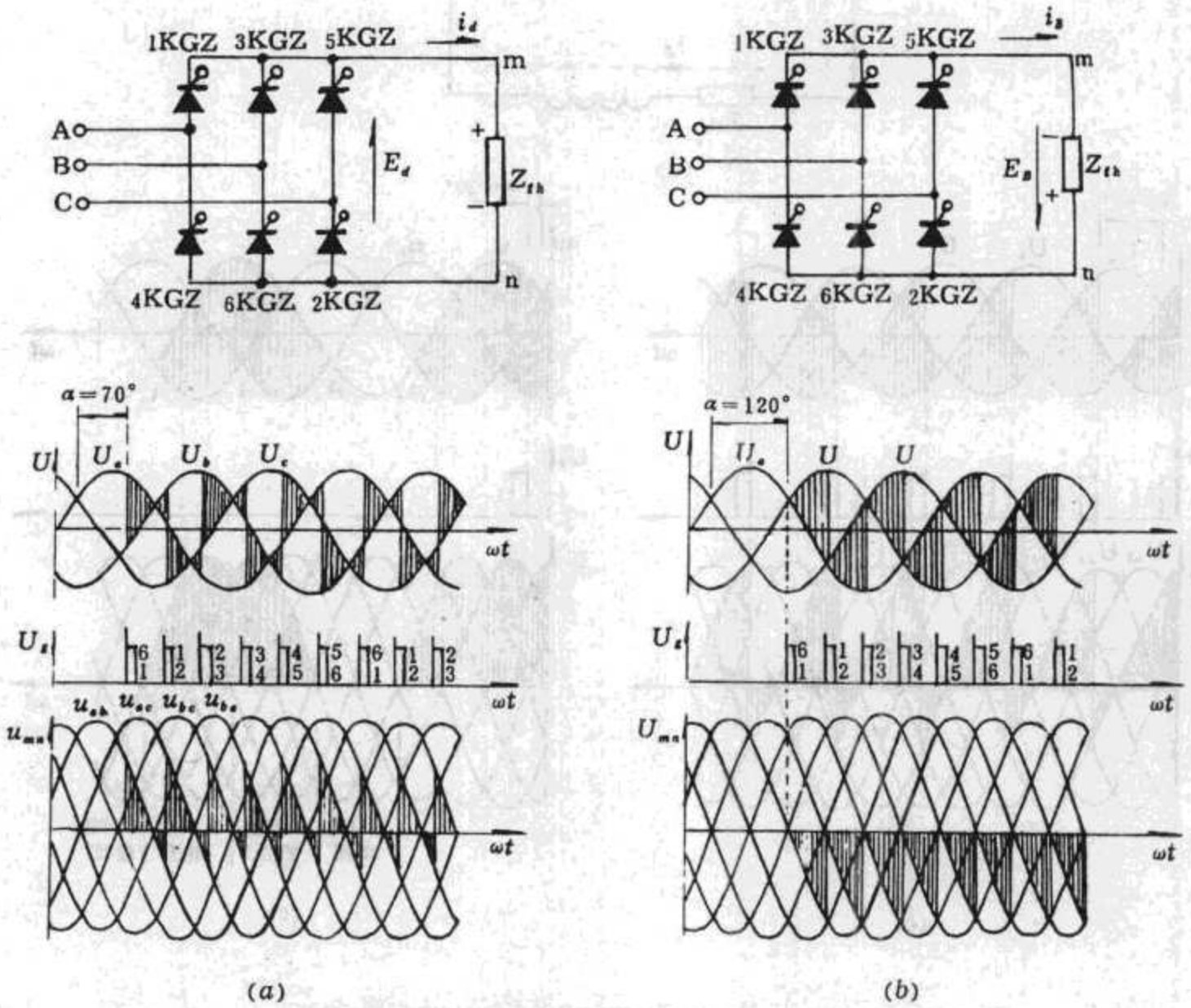
①对触发脉冲的移相要求

三相全控桥式整流电路接线及波形见图 5-2-45。对触发脉冲的移相要求是:①六

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

个可控硅元件共需六个移相触发电路，每隔60°换流一次，每次有两个元件导通，一是阳极电位最高的一只；另一是阴极电位最低的一只，常用双脉冲触发电路；②任一相的可控硅触发脉三相冲均在滞后本相相电压30°～210°的区间发出，最大移相范围180°，0～90°为整流工作方式，90°～180°为逆变工作方式；③移相触发电路的工作电源应与可控硅阳极电压同步。



(a)　　(b)

图5－2－45　三相全控桥式整流电路接线及波形

(a)整流状态(α＝70°)；(b)逆变状态(α＝120°)

②输出电压波形

三相全控桥式整流当a＝0时，也属二极管工作方式，输出波形与三相桥式全波整流相同。

α＝30°时，由于可控硅元件2、4、6也与1、3、5一样延迟30°导通，故输出电压波形比半控桥缺了一小块。

α＝60°时，输出电压波形连续，也比半控桥缺了一块。

当60°＜α＜90°时，由于自感电势的续流作用，使导通可控硅延迟关断，在输出波形中

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

出现负的部分，但因正比负大，故平均值仍为正值，为整流工作状态。$\alpha = 90°$时，正负两部分相等，为整流与逆变的临界点。

当$90° < \alpha < 180°$时，波形中负的部分比正的部分大，平均值为负值，进入逆变工作状态。所谓"逆变"，意思是感性负载向电源倒送功率。α越大，逆变输出越大。

③"逆变"灭磁

采用三相全控桥的可控硅励磁装置，在发电机正常停机或事故停机时，使移相角α突增至140°左右，就可进入"逆变"灭磁。

逆变灭磁的特点是：①从整流状态过渡到逆变状态，励磁电流方向不变，但励磁电压的方向反转；②逆变必须有足够高的电源电压才有效，由于整流桥交流侧电压随停机过程衰减，故逆变灭磁是一种衰减的逆变过程，电压衰减后，灭磁效果变差，使灭磁时间拖长；③灭磁速度与逆变角β'大小有关。所谓"逆变角"是指移相角$\alpha = 180°$作为逆变角$\beta' = 0$的起点向左推算，即$\beta' = 180° - \alpha$。理论上$\beta' = 0$时灭磁速度最快，协须保证可控硅能可靠换流。根据经验和理论分析，β'一般取30°左右为宜，即$\alpha = 150°$左右。

(四)可控硅静止励磁装置移相触发电路

1.对移相触发电路的要求

对移相触发电路有以下要求：

(1)移相触发电路的交流工作电源应与加于可控硅的正向阳极电压同步。

(2)移相范围应满足电压调节范围的要求。

(3)触发脉冲应有一定的陡度、宽度和幅值，以保证可靠触发。

(4)具有抗干扰误触发能力。

(5)在同步电源电压波动较大时，仍能可靠地工作。

(6)避免在可控硅承受反向电压时加上触发脉冲，造成反向漏电流过大。

2.最佳的触发脉冲波形

(1)导通过程变化曲线

可控硅元件的导通过程并不是瞬时完成的，而是经历阳极电压下降，工作电流上升的过程，历时约几十微秒。导通过程可用图5-2-46(a)阳极电压U和工作电流I的变化曲线表示。从脉冲到来至电压下降到原电压90%的时间称为延迟时间，用t_1表示；从原电压90%降至10%的时间称为上升时间，以t_2表示，导通时间为$t_1 + t_2$。

在导通过程的t_2时间内，U、I值均较大，因而出现一个浪涌功率损耗P。在多只可控硅串、并联使用的整流电路，元件延迟时间不一致会产生过载和瞬时过电压。减少浪涌损耗和延迟时间的有效措施是提高触发脉冲的前沿陡度和幅值。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

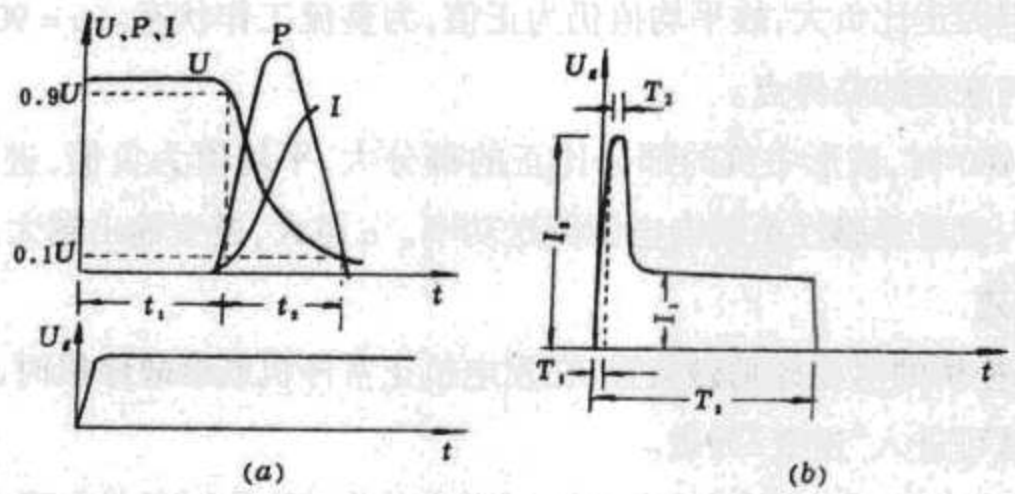


图 5-2-46 可控硅的导通过程图

(a)阳极电压、电流变化曲线;(b)最佳触发脉冲波形

(2)最佳触发脉冲波形

最佳的触发脉冲波形如图 5-2-46(b)所示。T_1 为前沿上升时间,T_2 为脉冲宽度,T_3 为脉冲尖顶部分宽度,I_1 为平顶部分幅值,I_2 为最大幅值。为了减少可控硅的延迟时间,T_1 最好小于 $1_{\mu s}$,一般不得大于 $10_{\mu s}$;I_2 要大于触发电流的 2~3 倍;I_1 要大于元件的触发电流;脉冲的宽度 T_2 应大于导通时间。如果脉冲宽度不够,有可能因电流尚未上升到维持电流以上,就因脉冲消失而回复关断。脉冲平顶部分的宽度 T_3 要大于电流上升到掣住电流的时间,掣住电流是指脉冲消失后,仍能保持导通的阳极电流,约为维持电流的 3~10 倍。

(3)触发脉冲参数

TKL 型可控硅励磁装置的触发脉冲参数如下:

脉冲高度,副边接 10Ω 时,不小于 8V;

脉冲前沿,不大于 10μs;

同步电压下降至 $0.4U_e$ 时,脉冲高度不下降。

3.移相触发电路的组成

移相触发电路一般由同步电路、移相、脉冲形成和脉冲放大等环节所组成。

(1)同步电路

①三相半控桥式整流电路的同步电路

TKL 型自励装置的同步电路见图 5-2-47。同步电源取自发电机端,故易实现同步要求。同步电源与可控硅阳极电压的相位关系分析如下。

励磁变压器 ZB 为 Y/△-11 接线组别,其二次侧电压超前一次侧电压 30°。同步变压器 TB 为△/Y-1 接线组别,其二次侧电压滞后一次侧申压 30°,即加至可控硅移相触发电路的同步电压滞后可控硅阳极电压 60°,相位分析见图 5-2-47。从前述三相半控桥式电路对触发脉冲的移相要求可知,当同步电压滞后可控硅阳极电压 30°是最理想的,控制

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

角 $\alpha=0$ 正对准可控桥阳极线电压的零点，在自然换相点换流，有最大的移相范围 0～180°，这种同步关系称“零点对齐”。显然 TKL 型励磁装置的同步电路未能做到这一点，只有 0～150°的移相范围。

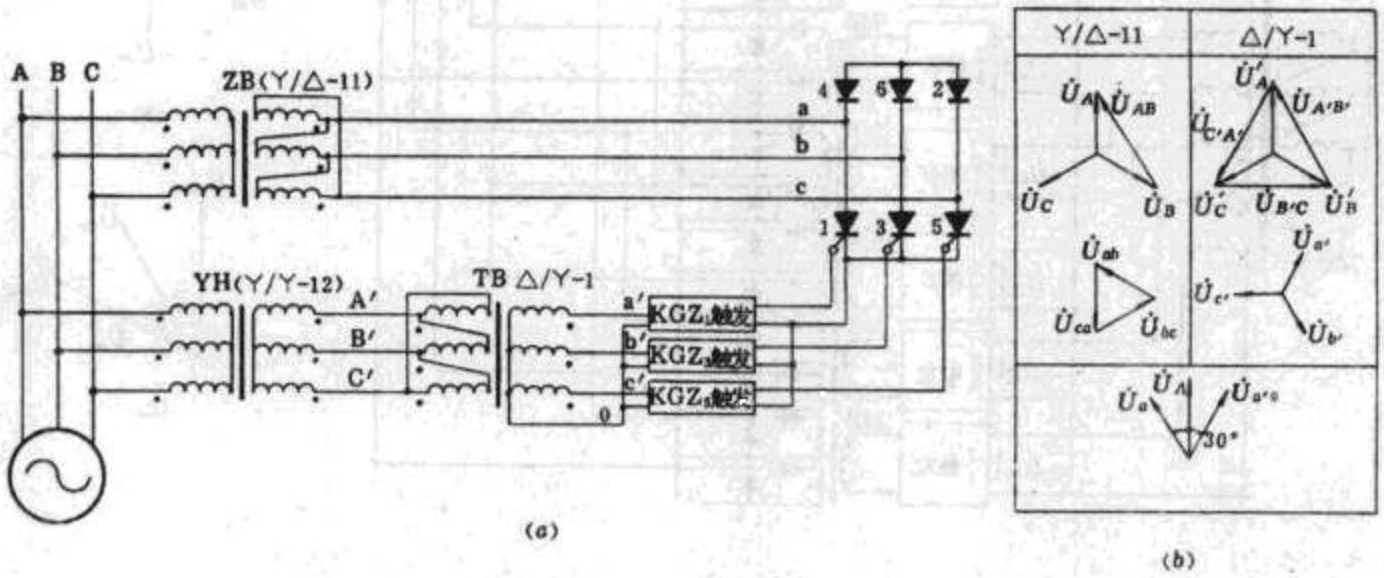


图 5－2－47　TKL 型自励装置同步电路
(a)接线图；(b)相位分析

②三相全控桥式整流电路的同步电路

三相全控桥式整流电路的双脉冲同步电路，可以按相电压组合或接线电压组合。图 5－2－47 为按相电压组合的双脉冲同步电路，六只可控硅触发器的同步电压分别为 $\dot{U}_{a0}$、$-\dot{U}_{c0}$、$\dot{U}_{b0}$、$-\dot{U}_{a0}$、$\dot{U}_{c0}$、$-\dot{U}_{b0}$，每个触发器的脉冲变压器有两个副绕组，每次发出两个窄脉冲，每周期共发 12 个窄脉冲。将 12 个脉冲按可控硅 1、2、3、4、5、6 顺序，在触发本元件的同时也给上一只元件发触发脉冲的原则组合，即可使三相全控桥可靠地工作。

其相位关系分析如下：

同步变压器采用面△/Y－1，一次绕组分别接 $\dot{U}_{AC}$、$\dot{U}_{BA}$、$\dot{U}_{CB}$，二次相电压取 $\dot{U}_{a0}$、$\dot{U}_{b0}$、$\dot{U}_{c0}$、$-\dot{U}_{a0}$、$-\dot{U}_{b0}$、$-\dot{U}_{c0}$以 A 相为例，二次电压 $\dot{U}_{a0}$滞后一次电压 $\dot{U}_A$30°，参阅图 5－2－48 一同步电路接线，同步变压器一次电压相位与加至可控硅元件 1 的阳极电压相同，可见同步电压 $\dot{U}_{a0}$滞后可控硅阳极电压 30°，实现“零点对齐”的同步，移相范围为 0～180°。

(2)移相触发电路原理接线

①电路类别

在可控硅励磁装置中用得较多的移相触发电路有：①由弛张振荡器构成的窄脉冲移相触发电路；②锯齿波移相触发电路；③晶体管移相触发电路。现只讲述 TKL 型自励装置使用的晶体管移相触发电路。

晶体管移相触发器主要由两只晶体管 1BG(PNP 管)、2BG(NPN 管)构成的复合开关管和一些二极管、阻容元件所构成，接线见图 5－2－49。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

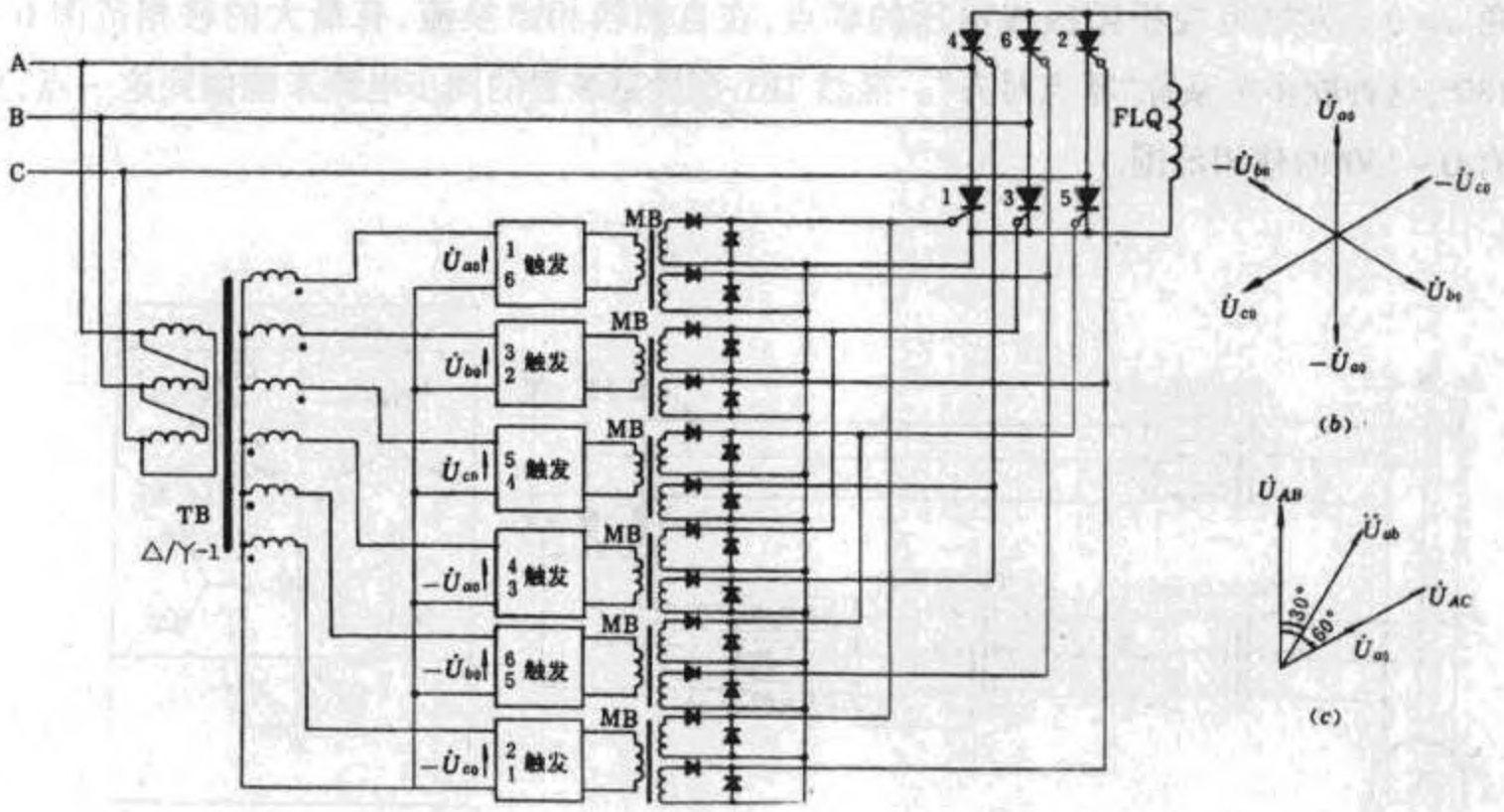


图 5-2-48 三相全控桥同步电路
(a)按相电压组合接线;(b)同步电压向量;(c)相位分析

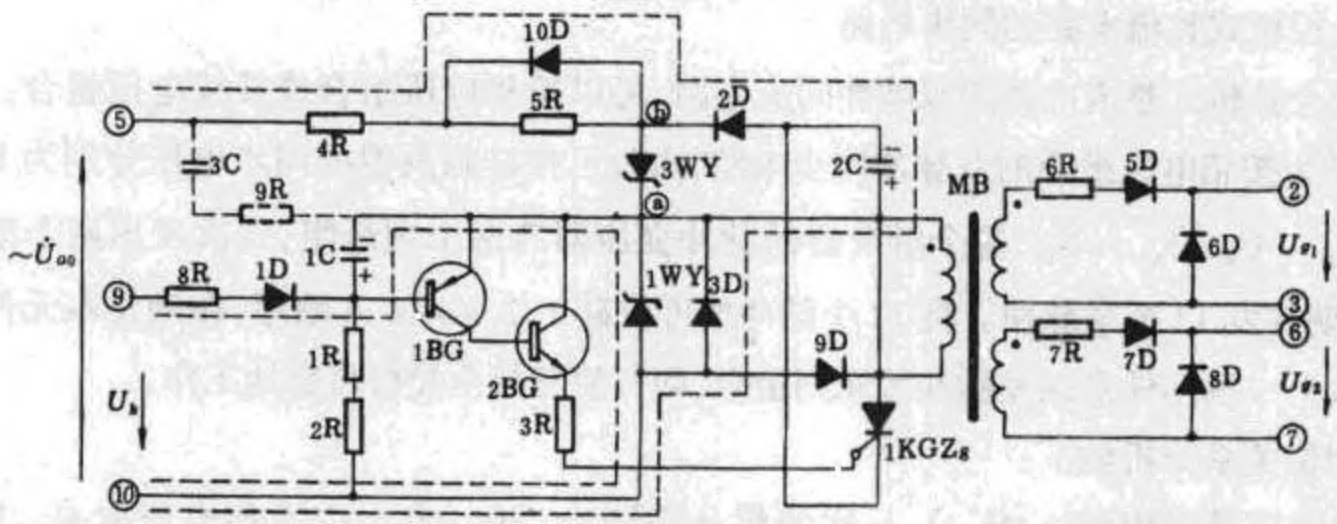


图 5-2-49 晶体管移相触发器原理接线

②晶体管移相触发器工作原理

以 α 相为例,同步电压 $\dot{U}_{a0}$ 由⑤⑩端输入,控制电压 $\dot{U}_k$ 由⑨⑩端输入。U_k 经 8R、1D 和 1WY 回路对电容 1C 充电,1C 充好电的稳态电压极性下正上负,使 1BG 处于截止状态。1C 稳态充电电压为 1BG 的封锁电压。

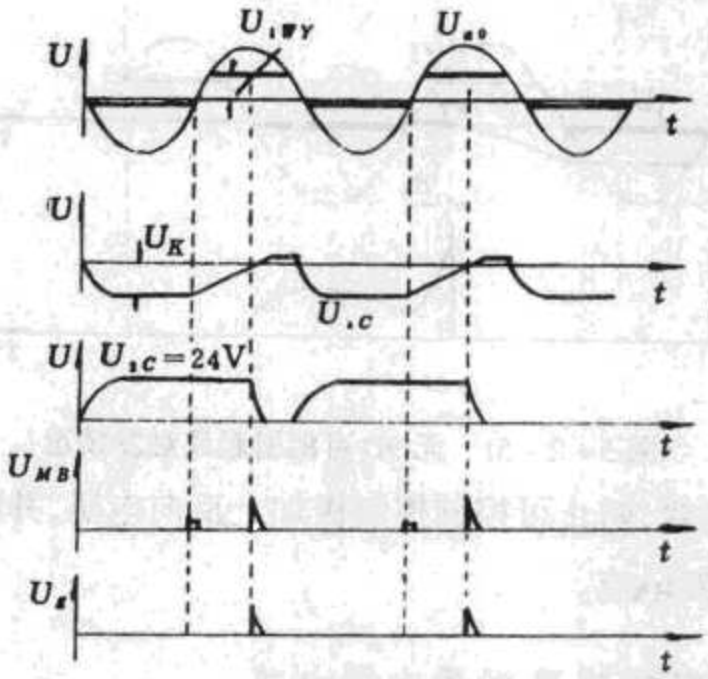
同步电压 $\dot{U}_{a0}$ 为负半周期间,电流由⑩端经 3D、2C、2D、10D、4R 流向⑤端,2C 被充电。2C 充电稳态电压受稳压管 3WY 反向击穿电压值限制,约 24V。

在同步电压 $\dot{U}_{a0}$ 进入正半周时,电流由⑤端经 4R、SR、3WY、1WY 流向⑩端。3WY 所加为正向电压,压降很小,1WY 则反向击穿,@点电位近于 +20V 梯形波电压。这时因 2D 反向截止,故在负半周时被充电的 2C 不受 $\dot{U}_{a0}$ 正半周电压的影响。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

由于@点出现的梯形波电压极性与1C原来由U_k充电的封锁电压极性相反，故1C被反充电。当1C电压极性反转时，1BG就由截止转为导通，2BG随之导通，2C电压即通过$2BG_{c-e}$和3R加至可控硅1KGZ控制极上，使1KGZ导通。2C即通过1KGZ向脉冲变压器MB初级线圈放电，发出一个触发脉冲，脉冲形成过程各点波形见图5－2－50。



5－2－50　移相脉冲形成过程波形

脉冲变压器MB有两个副绕组，可产生两个窄脉冲，用以触发两只串联或并联的可控硅，或触发三相全控桥前后两只可控硅。

脉冲的移相由1C的充电和反充电过程快慢决定。U_k增大时，1C充电形成的封锁电压就高，反充电至极性变更所需时间就长，脉冲就向后移；反之，U_k减小时，脉冲就向前移。移相范围为梯形波范围内，不小于150°。

③其它元件的作用

3D与1WY并联的原因是考虑到1WY正向压降较大且不平衡，故并按正向压降较小的3D，保证三相触发比较平衡。

9D的作用是：在可控硅导通角β很小的特殊情况下，2C通过MB和1KGZ放电可能尚未结束而$\dot{U}_{a0}$负半周就已到来，这时如无9D，则负半周电流将经过3D、MB、1KGZ回路，维持1KGZ导通，引起触发脉冲拖长，触发脉冲可能跨入可控硅正向电压范围内造成误触发，见5－2－51图说明。增设9D后，负半周电压可经9D直接进入1KGZ阳极，从而避免误触发的发生。

3C和9R(图中虚线部分)的作用是使同步电压的正半周向前稍移一个角度，用以扩大移相范围，保证移相范围大于150°。

8R用以限制1C充电电流，减轻前级负担。

1D用以防止电流反冲。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

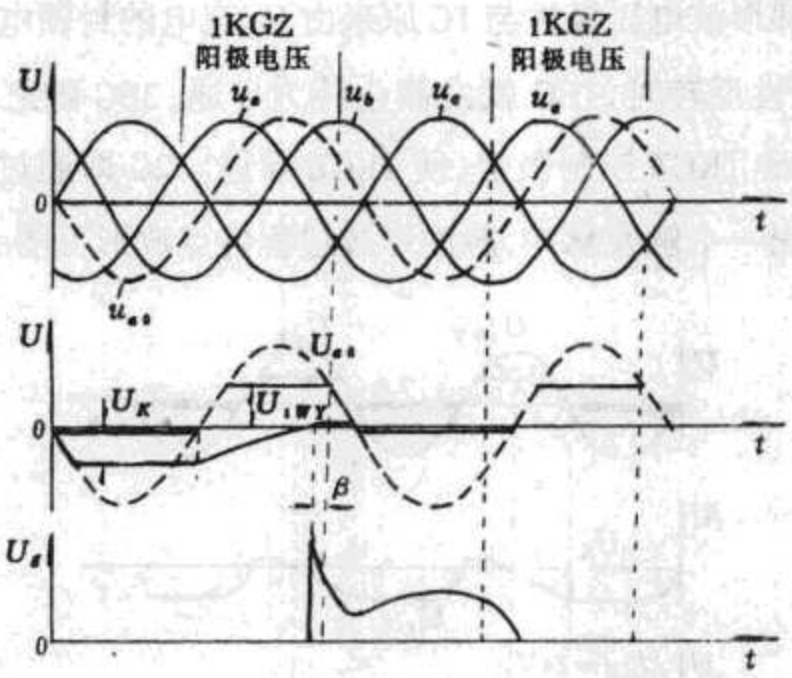


图 5-2-51 无 9D 可能引起误触发情况

5D~8D 为保护二极管，防止可控硅控制极加上反向电压，并限制脉冲幅值。6R、7R 用于调节触发电流。

(五)可控硅静止励磁装置测量比较电路

测量比较电路由测量、调差、电压给定和比较桥等环节组成。常用的测量比较电路见图 5-2-52。

1.测量环节

利用测量变压器 CB 和整流滤波电路，将检测的电压信号变为平滑的直流电压信号。

测量变压器的作用是：①将电压互感器来的二次电压变为励磁装置所需的低电压；②把通常接地的电压互感器二次电压与不允许接地的励磁装置控制回路相隔离。

测量电压信号的整流通常有三相桥式、六相桥式等几种。多相整流可减小整流电压的波纹系数，简化滤波电路，提高反应速度。

2.电压给定和比较环节

发电机端电压应根据电力系统电压改变给定值，并与测得的电压信号相比较，输出一个电压偏差信号，经过放大，转变为移相触发电路的控制电压 U_k。

中小型发电机励磁装置的电压给定和比较电路主要有两种：①对称比较桥；②不对称比较桥。

2.对称比较桥

对称比较桥见图 5-2-53(a)，由型号参数均相同的两只稳压管 1WY、2WY 和两只电阻 2R、3R 组成桥式接线。端电压信号 mU_f 经电位器 $1W_b$ 加至比较桥输入端加。当输入信号 U_{ab} 大于稳压管反向击穿电压 U_{WY} 时，1WY 两端电压即固定不变，$U_{ab}=U_{WY}$，U_{ab} 作为给

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

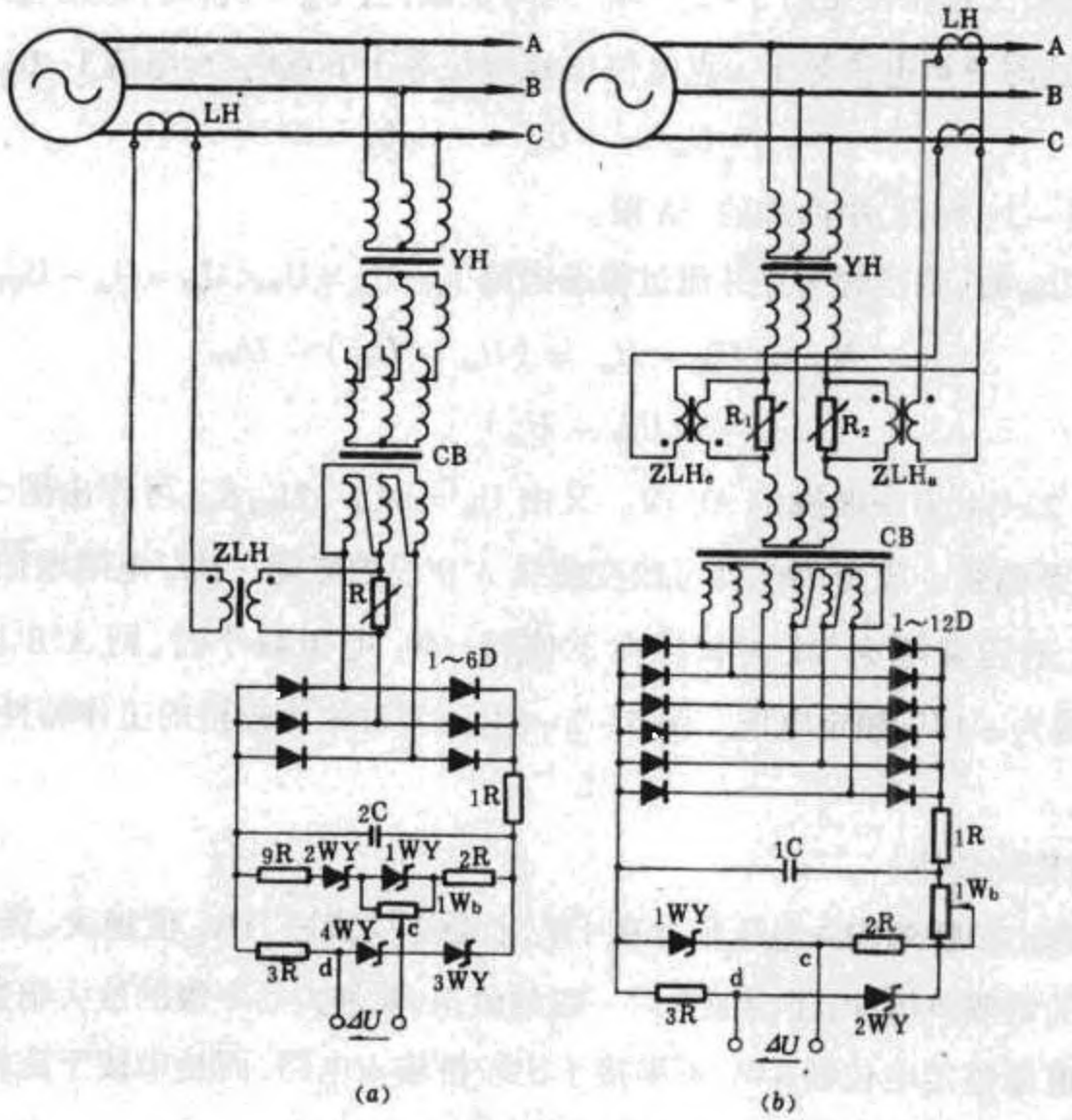


图 5-2-52　测量比较电路

(a)一相调差，不对称比较桥；(b)两相调差，对称比较桥

定电压；3R 电阻两端电压则随输入信号大小而变，U_{cb}作为比较电压。比较桥输出偏差信号为

$$\Delta U = U_{cb} - U_{ab} = U_{cd}$$

要改变给定值可调电位器 $1W_b$。

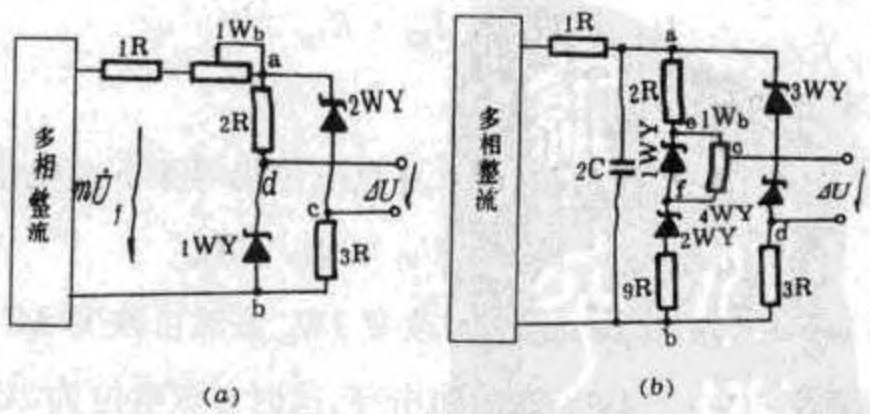


图 5-2-53　比较桥原理接线

(a)对称比较桥；(b)不对称比较桥

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

对称比较桥工作特性见图 5-2-54。忽略负载，当 $U_{ab} < U_{WY}$ 时，稳压管未击穿，电路相当于开路，这时 d 点电位等于 a 点电位，c 点电位等于 b 点电位，电流 I=0，故有

$$U_{cd} = -U_{ab} = -mU_f$$

其关系如图 5-2-54(a)中曲线的 OA 段。

当 $U_{ab} > U_{WY}$ 时，稳压管击穿并流过稳态电流 I_{WY}，$U_{ab} = U_{WY}$，$U_{cd} = U_{ab} - U_{WY}$，故有

$$U_{cd} = U_{cb} - U_{db} = (U_{ab} - U_{WY}) - U_{WY}$$
$$= -(2U_{WY} - U_{ab})$$

可作出图 5-2-54(a)中曲线的 AB 段。又由 $U_{ab} = mU_f - 2I_{WY}R_{1ab}$ 可作出图 5-2-54(b) $U_{ab} = f(U_f)$ 关系曲线。改变 $1W_b$ 即可改变曲线 A′B′段的陡度。$1W_b$ 电阻增加时，$2I_{WY}$ 电流在电阻 R_{1ab} 上的压降增大，故 A′B′段向下偏移；$1W_b$ 电阻减小时，则 A′B′段向上偏移。$1W_b$ 调整范围为 ±15%额定电压。图 5-2-54(c)为对称比较桥的工作特性，P 点为空载额定工作点。

(2)不对称比较桥

上述对称比较桥的输入电压信号在 $1W_b$ 上会造成衰减，$1W_b$ 值越大，衰减越严重，不仅影响装置的调节灵敏性，还会加重后一级的负担，要加大后一级的放大倍数。不对称比较桥的给定电压整定电位器 $1W_b$ 不串接于比较桥输入电路，而是串接于比较桥给定电压的一臂，不影响比较电压，故可避免上述对称比较桥的缺点。

图 5-2-53(b)为不对称比较桥原理接线，其工作特性示于图 5-2-55。为了便于分析，先令 9R 短接。

当 $U_{cb} < U_{WY}$ 时，稳压管未击穿，这时 e、c、f 点电位均与 a 点相同，故有

$$U_{cd} = U_{cb} - U_{db} = U_{ab}$$

U_{cd} 与 U_{ab} 的关系为图 5-2-55(a)直线 OA。

当 $U_{WY} < U_{ab} < 2U_{WY}$ 时，2WY 稳压管先击穿，f 点电位为 $U_{fb} = U_{WY}$，c 点电位则为

$$U_{cb} = U_{WY} + I_{WY} \cdot R_{1w}'$$

式中 R_{1w}'——$1W_b$ 下半部的分压电阻。

这时比较桥另一臂的两只稳压管仍未击穿，d 点电位仍等于 b 点电位，故

$$U_{cd} = U_{cb} - U_{db} = U_{WY} + I_{WY} \cdot R_{1w}'$$

U_{cd} 与 U_{ab} 的关系如图 5-2-55(a)直线 AC 段。改变 $1W_b$ 显然可改变 AC 直线的斜率。

当 $U_{ab} \geqslant 2U_{WY}$ 时，稳压管 1WY～4WY 均反向击穿，这时 e 点电位为 $2U_{WY}$ 不变，c 点电位则按 U_{WY} 加在 $1W_b$ 上的分压决定 d 点电位则为 I_{WY} 在 3R 上的压降，因 I_{WY} 电流是随输入信号而变，故 U_{ab} 为一斜线，这时

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

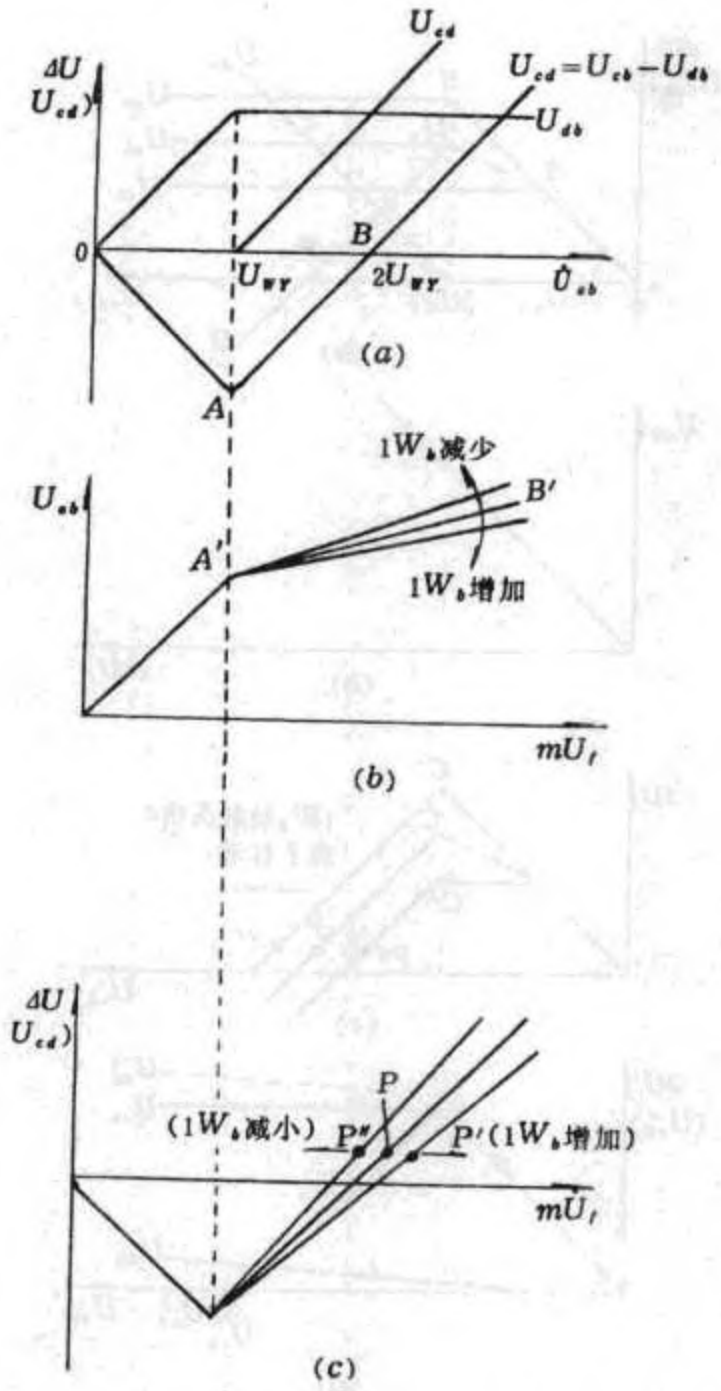


图 5-2-54 对称比较桥工作特性

(a)$\Delta U=f(U_{ab})$;(b)$1W_b$ 对 U_{ab}的影响;(c)$1W_b$ 对 $\Delta U=f(U_{ab})$的影响

$$U_{cd} = U_{cb} - U_{db}$$

可得图 5-2-55(a)直线 CD 段。曲线 OACD 为不对比较桥的工作特性,P 点为空载额定工作点。由于直线 AC 的斜率随 $1W_b$ 而变,故改变 $1W_b$ 时。连带影响直线 CD 段向左或向右移动,P 点也相应左右移,使给定值改变,如图 5-2-55(c)所示。

9R 的作用是提高电压整定的上限。如无 9R,最大整定电压为 c、e 点重合(对应 $1W_b$ 为最大圈数)。在加入 9R 后,e 点电位就在原来 U_{ab}的基础上迭加 9R 的压降,e 点电位变为 U'_{ab},如图 5-2-55(d)虚线所示,对应的 U_{cd}也变为 $U_{c'd}$,向右平移。

3.电流调差环节

可控硅励磁装置常用的电流调差电路有两种接线:①单相电流调差;②两相电流调差。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

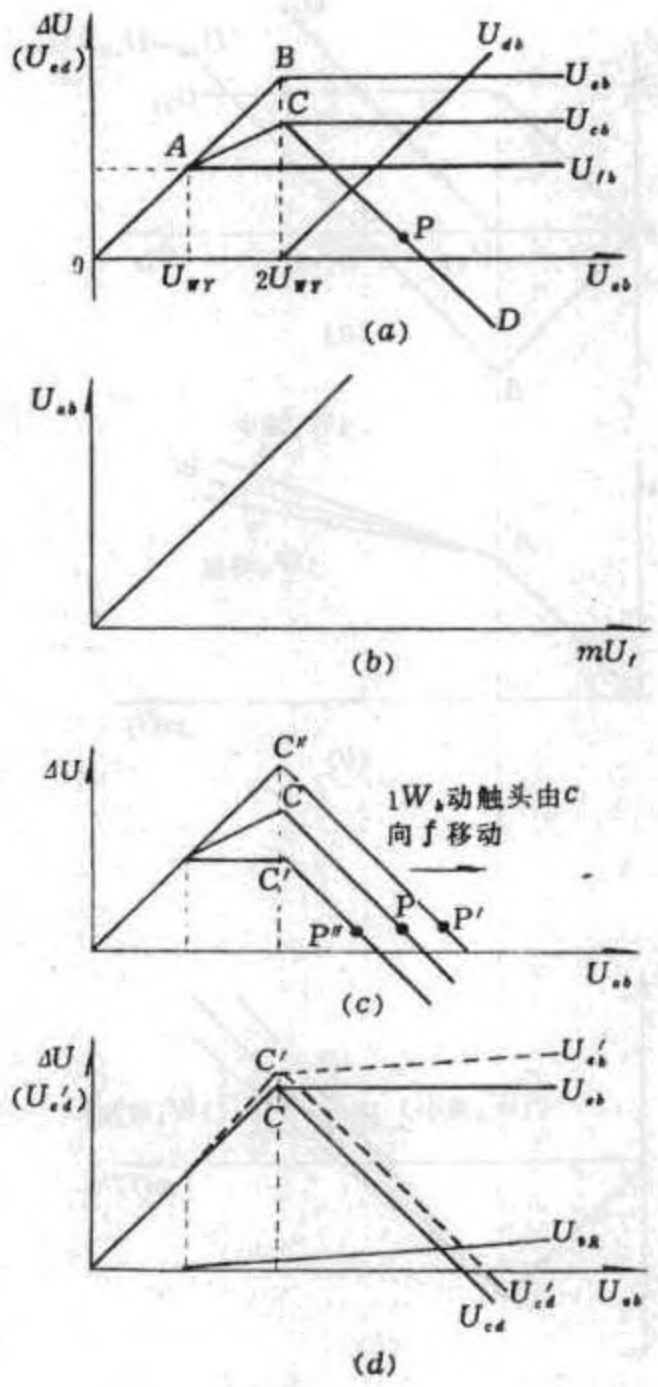


图 5-2-55 不对称比较桥工作性

(a)$\Delta U=f(U_{ab})$;(b)$U_{ab}=f(U_f)$;(c)$1W_b$ 对 $\Delta U=fU_{ab}$ 的影响;(d)9R 对 $\Delta U=f(U_{ab})$ 的影响

(1)单相电流调差电路

单相电流调差电路见图 5-2-56,由电流互感器 LH、中间变流器 ZLH(5/0.5A)、调差电阻 R 等组成。

利用接于发电机引出线 C 相的电流互感器反映定子电流 I_f,经中间变流器对。2LH 转变为弱电流信号。该电流在调差电阻 R 上的压降,迭加到测量变压器二次电压上,从而使输出信号既反映端电压、同时反映定子电流和 cosψ 的变化。

单相电流调差电路电压向量见图 5-2-56(c)、(d)。测量变压器 CB 为 Y/Δ-1 接线组别,其二次线电压 $\dot{U}_{ab}$、$\dot{U}_{bc}$、$\dot{U}_{ca}$ 分别滞后一次线电压 $\dot{U}_{AB}$、$\dot{U}_{BC}$、$\dot{U}_{CA}$ 30°,电压三角形如图 5-2-56 中 Δabc,在迭加 $-\dot{I}_cR$ 后,各相二次相电压为

$$\dot{U}_{a'o} = \dot{U}_{ao}$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$\dot{U}_{b'o} = \dot{U}_{bo} - \dot{I}_c R$$

$$\dot{U}_{c'o} = \dot{U}_{co}$$

当负载为有功时，$-\dot{I}_c R$ 与 $\dot{U}_{co}$ 相位相反，可得电压三角形△ab′c，如图 5－2－26(d)所示。

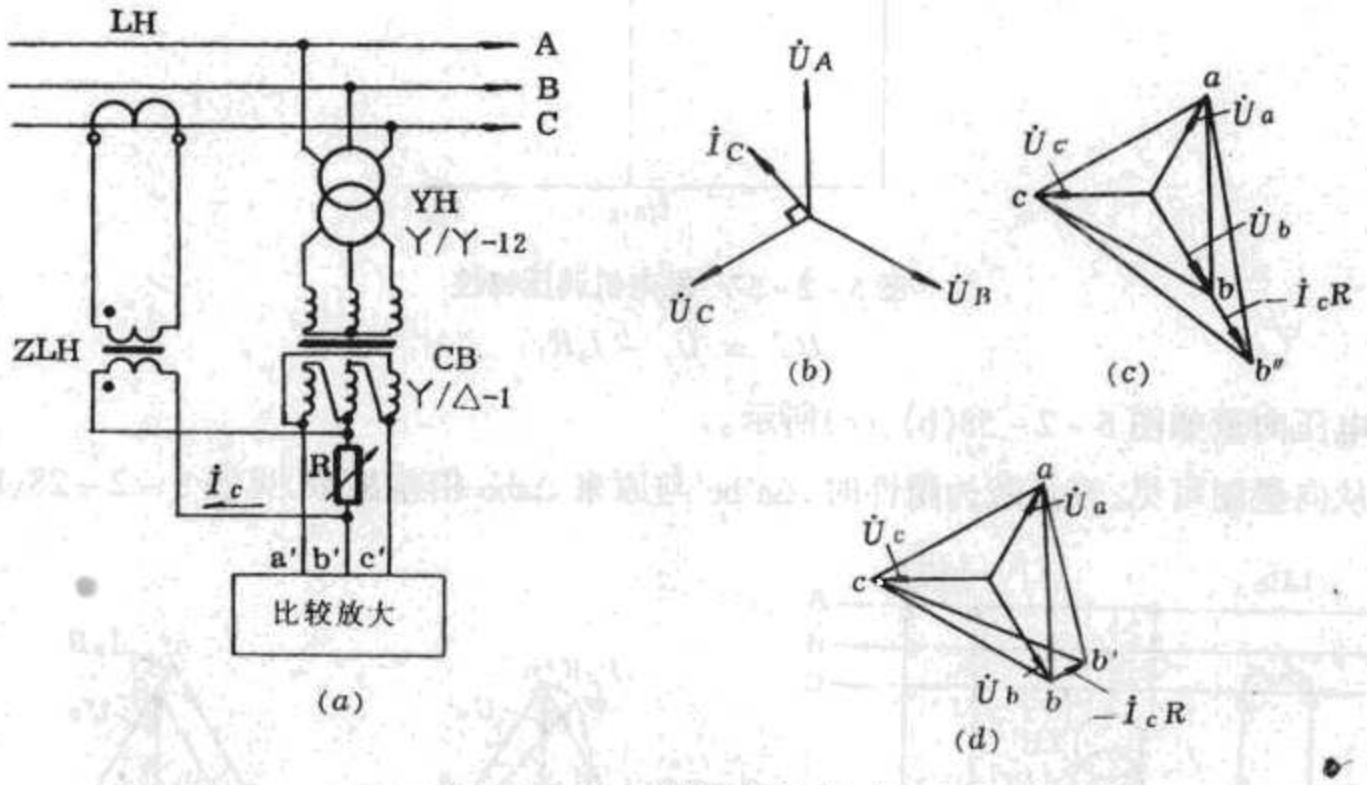


图 5－2－56 单相电流调差电路

(a)原理接线；(b)发电机电压、电流向量；(c)带纯电感性负载时；(d)带纯阻性负载时

Δab′c 与 Δabc 相比，虽一边稍为增长，但另一边却减短了，经三相整流滤波后，得到的直流电压信号并无明显变化，表明该调差电路对有功电流反应不灵敏。

当负载为感性时，$-\dot{I}_c R$ 压降超前 $\dot{U}_{co}$ 90°，可得电压三角形 Δab″c，见图 5－2－56(c)。很明显，Δab″c 比 Δabc 大得多，表明该调差电路对无功电流能灵敏反应。

电流调差电路对发电机调压特性的影响可用图 5－2－57 说明。按图 5－2－56(a)接线，当无功电流增加时，装置感受到的电压 V''_b 有所升高，相当于发电机电压虚假上升，通过励磁装置电压负反馈闭环调节，使发电机电压下降，故有正调差系数，见图发电机调压特性曲线 3；改变 R 值，可得不同的正调差系数；取 R＝0 时，调差回路不用，为自然调差，见图中曲线 2；改变 ZLH 极性，可得负调差系数，见图中曲线 4；如调差系数 $K_{cd}=0$，则为无差调压特性，见图中曲线 1。

(2)两相电流调差电路

两相电流调差电路见图 5－2－58。与上述单相电流调差电路的工作原理相似，只是在 A、C 两相均装电流互感器，并在接线上采取 A 相调差电流 $\dot{I}a$ 在 R_1 上的压降以反极性与 C 相电压信号相减；C 相调差电流 $\dot{I}_C$ 在 R_2 上的压降以正极性与 A 相电压信号相加，即

$$\dot{U}_a' = \dot{U}_a + \dot{I}_c R_2$$

$$\dot{U}_b' = \dot{U}_b$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

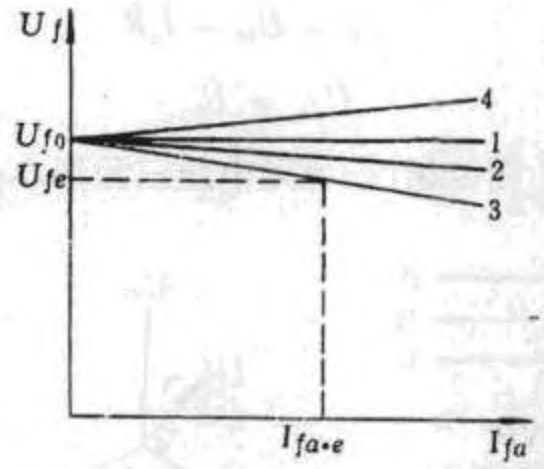


图 5-2-57 发电机调压特性

$$\dot{U}_c' = \dot{U}_c - \dot{I}_a R_1$$

调差电压向量如图 5-2-58(b)、(c)所示。

从向量图可见，当负载为阻性时，Δa′bc′与原来 Δabc 相差甚微，见图 5-2-28(b)；当

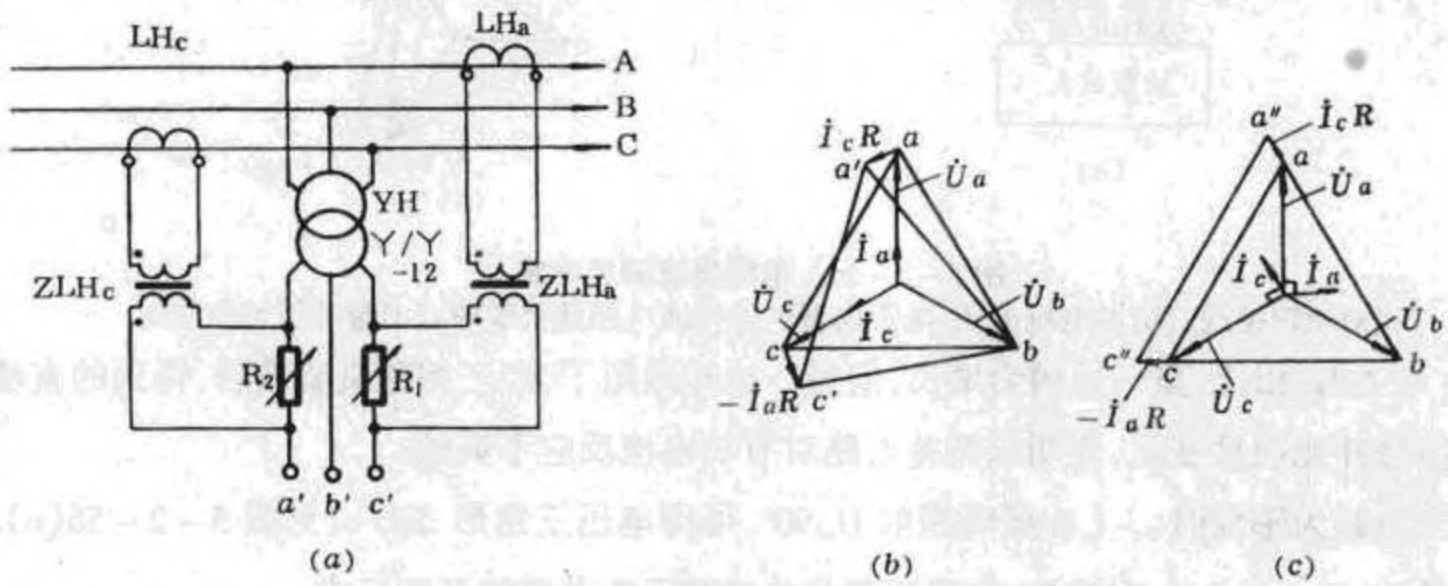


图 5-2-58 两相电流调差电路

(a)接线；(b)带阻性负载时；(c)带感性负载时

负载为感性时，Δa″bc″比原来 Δabc 相差较大，表明这一电路能灵敏反映 cosφ 的变化。

(六)可控硅静止励磁装置综合放大电路

对综合放大电路的基本要求是线性好，有足够的放大系数，稳定性好，有较小的零点漂移和较大的负载能力。

目前广泛使用的放大器有集成运算放大器、晶体管放大器等。TKL 型励磁装置因检测电路采用不对称比较桥，输入信号衰耗较小，故一般采用简单可靠、制作调试方便的晶体管首饰放大器，见图 5-2-59，包括前级放大器和末级射极输出器。

1.前级放大器

(1)组成

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

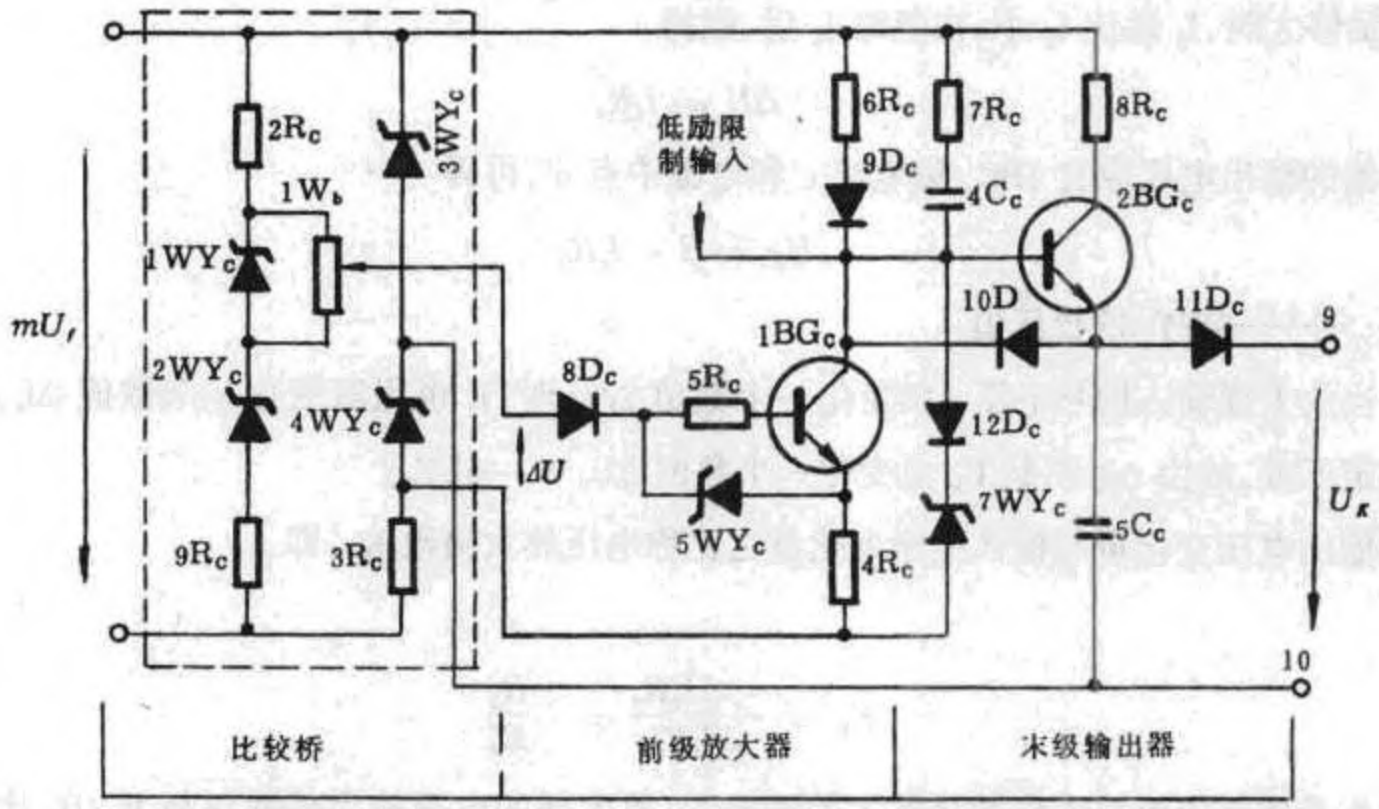


图 5-2-59 综合放大电路原理接线

前级放大器由晶体管 $1BG_c$ 及电阻 $6R_c$、电容 $4C_c$、温度补偿二极管 $9D_c$、发射极电阻 4Rc、基极限流稳压管 $5WY_c$ 及基极限流电阻 SR_c 等元件组成。工作电源取自比较桥稳压管 $3WY_c$、$4WY_c$ 的两端，约 2GV。

(2)输入电压和输出电压

简化的前级放大器原理接线见图 5-2-60。晶体管 $1BG_c$ 的基极电流 I_b 由输入信号电压 ΔU 产生，I_b 随 ΔU 增大。$1BG_c$ 集电极电流 I_c 受 I_b 控制，$I_c = \beta I_b$（β 为晶体管电流放大倍数）。

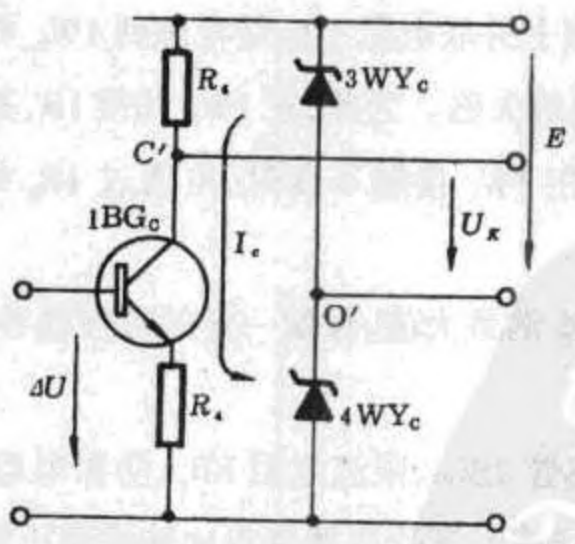


图 5-2-60 前级放大器简化原理图

放大器的输入电压 ΔU 在忽略对电压放大倍数影响不大的次要元件 $9D_c$、$5R_c$、$5WY_c$ 之后，可按下式估算：

$$\Delta U = U_{be} + (I_b + I_c)R_4 \approx (I_b + I_c)R_4$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

当β足够大时，I_b 远比 I_c 小，在忽略 I_b 后，则得

$$\Delta U \approx I_c R_4$$

放大器的输出电压取自 $1BG_c$ 集电极 c′和电源中点 o′，可得

$$U_k = E - I_c R_6$$

式中 E——$3WY_c$ 的稳压值。

当放大器输入信号电压 ΔU 变化一个数值 Δ′U 时，I_c 也跟着变化一个数值 ΔI_c，则 E 则稳定不变，故由 ΔI_c 引起 U_k 也变化一个数值 $\Delta U_K = -\Delta I_c R_6$。

输出电压变化量与输入电压变化量之比称电压放大倍数 K_U，即

$$K_U = \frac{-\Delta I_c R_6}{\Delta I_c R_4} = -\frac{R_6}{R_4}$$

可见在晶体管电流放大倍数足够大的情况下，放大器的电压放大倍数仅与 R_6/R_4 比值有关。如取 $R_6 = 5.1K$，$R_4 = 1K$，则 $K_U = -5.1$。式中“－”号表示输出量的变化与输入量的变化方向相反。

(3)电路中各元件的作用

电阻 R_4 除与放大倍数有关外，并构成电流负反馈，可减少温度变化对输出电压的影响。

$7R_c$ 和 $4C_c$ 串联后与 $6R_c$ 并联(见图 5－2－59)，减少了集电极的交流阻抗，从而降低放大器的交流放大倍数，削弱 U_k 的交流成份。同时电容具有缓慢变化特性，有利于提高闭环运行的稳定性。

在电阻 $1W_b$ 的滑动接点上并联电阻 $1R_b$ 是考虑到 $1W_b$ 可能发生接触不良，如 $I_b = 0$，则 U_k 将达最大，会造成发电机失磁。为此，在 $1W_b$ 并接 1R，其值比 $1W_6$ 大得多，正常工作时并不影响电压整定值，而在 $1W_b$ 接触不良时，可通过 $1R_6$ 维持发电机端电压为某一数值。

$12D_c$、$7WY_c$ 用以限制 U_K 的最大值，保留一定的可控硅导通角。

2.末级射极输出器

末级射极输出器由晶体管 $2BG_c$、限流电阻 $8R_c$、防振电容 $5C_c$、防反偏二极管 $10D_c$ 及输出门二极管 $11D_c$ 等元件组成。工作电源取自比较桥稳压管 $3WY_c$ 两端，约 10V。

射极输出器有较大的输入阻抗，减轻了前级的负担；输出阻抗很小，提高了带负载的能力。

从检测调差电路来的信号 ΔU，经综合放大电路放大及反相后，由综合放大电路输出的控制信号 U_k 随发电机电压 U_f 成正比线性变化。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

二、可控硅静止励磁装置的辅助工作电路

TKL 型可控硅静止励磁装置的辅助工作电路主要有最大励磁电流限制、最小励磁限制、手动自动切换、起励、继电保护等。

(一)最大励磁电流限制

1.最大励磁电流限制的作用

在发电机端电压下降 5%时,可控硅导通角即开放到最大,进行强励。为了避免强励电流过大,损坏发电机励磁绕组和励磁装置整流元件,故设置最大励磁电流限制电路,把强励电流限制在 1.6 倍额定励磁电流之内。

2.最大励磁电流限制原理接线

最大励磁电流限制电路原理接线见图 5-2-61。

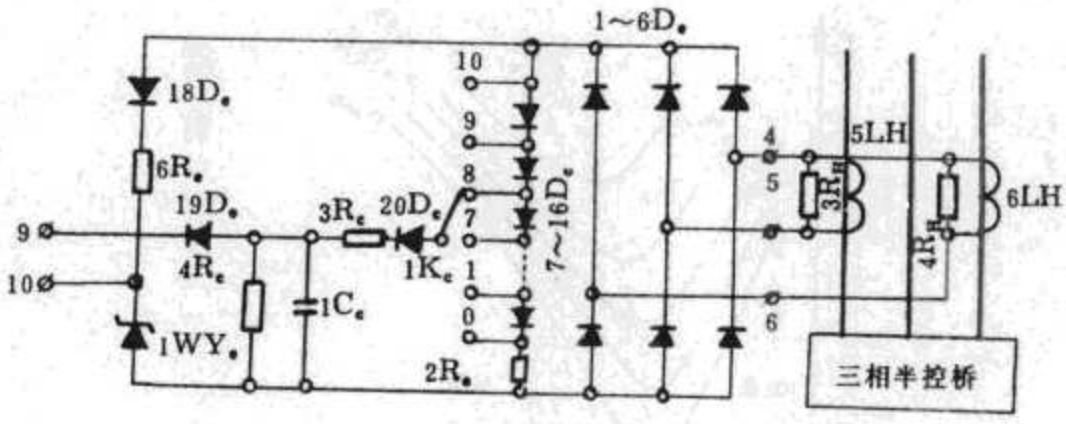


图 5-2-61　最大励磁电流限制原理接线

电流信号由功率输出单元两只电流互感器 5LH、6LH 二次测取得,分别接电阻 $3R_H$ 和 $4R_H$,将电流信号转变为电压信号。5LH 和 6LH 异极性连接成 V 形接线,形成三相,再经整流交换为直流电压信号,最后送入由 $18D_e$、$6R_e$、$1WY_e$、$7\sim16D_e$、ZR_e 等构成的比较桥。

最大励磁电流限制的比较桥与第五节介绍的对称比较桥相似,惟其中一臂的稳压管用 $7\sim16D_e$ 代替。二极管 7~16D。每只正向压降约 0.6V,其值几乎不随电流大小而变,故可视为串联的小稳压管,用波段开关 $1K_e$,分十档选择所需稳定电压。$2R_e$ 上的压降则随电流而变。两个电压加在一起反映电流限制的比较电压。

电流限制的给定电压是由 $18D_e$、$6R_e$ 和 $1WY_e$ 回路分压取得的,以 $1WY_e$ 的反向击穿电压 U_{WY}作为给定电压。比较桥的输出信号为

$$U'k = U_8 - U_{WY}$$

式中　U_8——当 $1K_e$ 开关置于触点 8 位置时的比较电压。

当 $U_8 < U_{WY}$时,U'_k 为负值,这时 $19D_e$ 截止,比较桥无输出;当 $U_8 > U_{WY}$时,U'_k 为正

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

值，比较桥输出一个电流限制偏差信号 U'_k 该信号与综合放大单元的输出信号 U_k。经"或"门接入移相触发单元。当 $U'_k > U_k$ 时，U_k 不起作用，而由 K 控制移相。

$1C_e$ 和 $3R_e$ 构成 R—C 滤波电路，用以改善最大励磁电流限制电路的工作精度。

(二)最小励磁限制

1.最小励磁限制的作用

由于电力系统高压线路空载运行，或无功补偿电容器在电力系统负荷低谷时未及时切除，都可能造成电力系统无功功率过剩，而造成并网运行的发电机进相运行。在自并励励磁系统中，由于电压负反馈作用，将使发电机励磁电流大为降低。从图 5－2－62 同步发电机 V 形曲线可知，发电机欠激有一个稳定极限，进入这一不稳定区，发电机将无法稳定运行，而且有功带得越多的发电机，越容易失步。故必须设置最小励磁限制，保证发电机稳定运行。

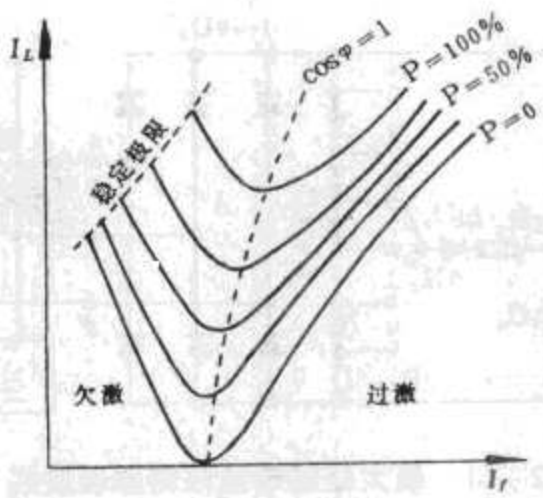


图 5－2－62 同步发电机 V 形曲线

2.最小励磁限制原理接线

最小励磁限制原理接线见图 5－2－63。其工作原理是利用测量进相无功电流与限制给定值比较，输出一个进相无功电流偏差信号，接至测量调差电路的前级放大器的输出端，共同使用末级射极输出器。

最小励磁限制主要由无功电流检测器和晶体管放大器组成。

(1)无功电流检测器

无功电流检测器实质上是一只阻容移相器能灵敏地反映进相无功电流。简化的阻容移相器原理接线和电压向量见图 5－2－64。变压器 B 次级绕组有中间抽头 0，两臂分别接电容 C 和电阻 R。变压器的负载电流 $\dot{I}$ 为容性，超前电压 $U_{cb} < \psi$。R 上的压降 $\dot{U}_R$ 与 $\dot{I}$ 同相，C 上的压降 $\dot{U}_c$ 滞后 $\dot{I}90°$，而 $\dot{U}_R + \dot{U}_c = \dot{U}_{cd}$，故可画出一个以 $|\dot{U}_{cb}|$ 为直径的半圆，见图 5－2－64(b)，od 为圆的半径。改变 R 值可改变 d 点在圆上的位置，如 R＝0，则 d 点与

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

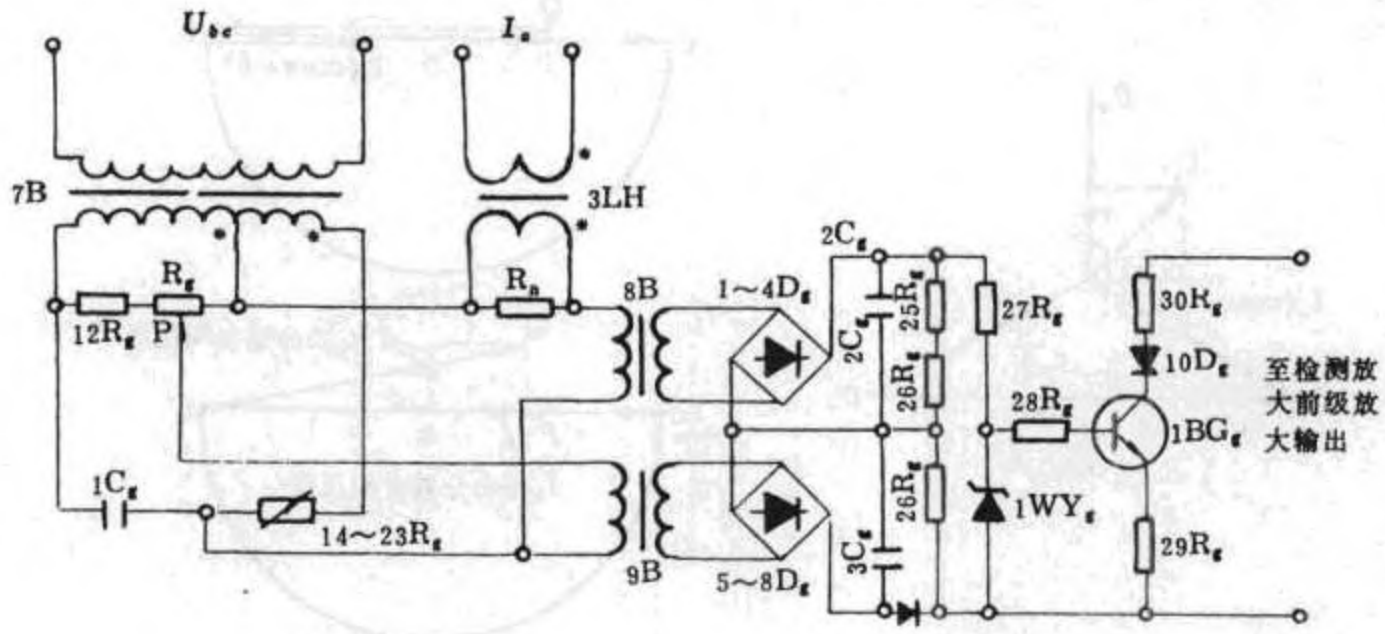


图 5-2-63 最小励磁限制原理接线

b 点重合，这简化电路时变压器二次电流 $\dot{I}$ 为纯容性，超前 $\dot{U}_{cb}$90°。

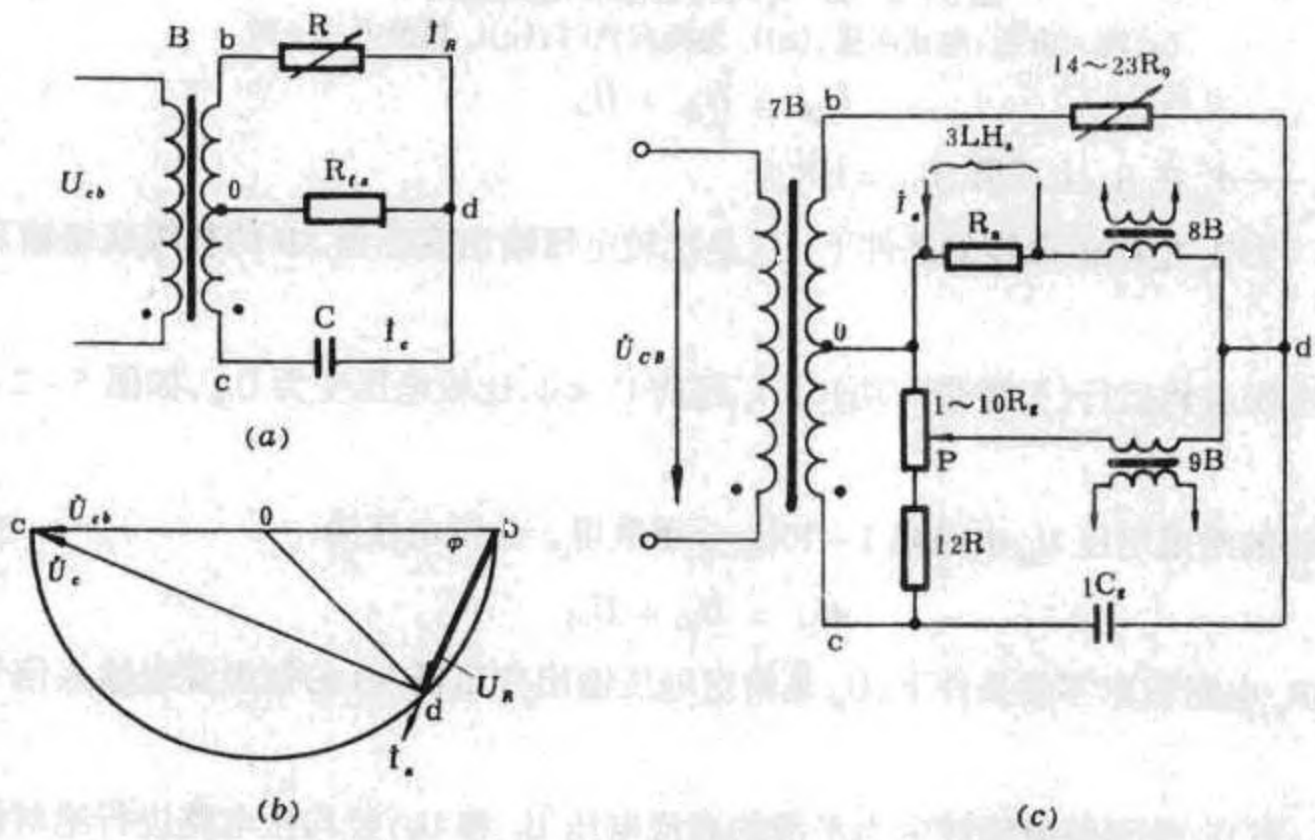


图 5-2-64 无功电流检测器接线和电压向量

(a)简化的阻容移相器；(b)阻容移相器电压向量；(c)无功电流检测器；(d)简化电路

最小励磁限制检测器的简化电路见图 5-2-64(C)，同样可作出以 $|\dot{U}_{cd}|$ 为直径的半圆，od 为圆的半径，d 点随电阻 14～23R。值改变而在圆上移动。信号输入来自：①电压互感器二次电压 $\dot{U}_{cb}$；②A 相电流互感器二次电流 $\dot{I}_a$ 在电阻 R_h 上的压降，其电压向量如图 5-2-65(a)所示。

当发电机进相运行(欠激不带有功)时，$\dot{I}_a$ 超前 $\dot{U}_a$90°，这时 $\dot{I}_a$ 在 R_h 上的压降与 $\dot{U}_{cd}$ 同相，其大小则随进相无功电流的大小而变，可作为进相严重程度的标志。作为比较电压，用 $\dot{U}_{Qb}$ 表示，其向量图见图 5-2-65(b)。如以 b 为起点，则比较电压为

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

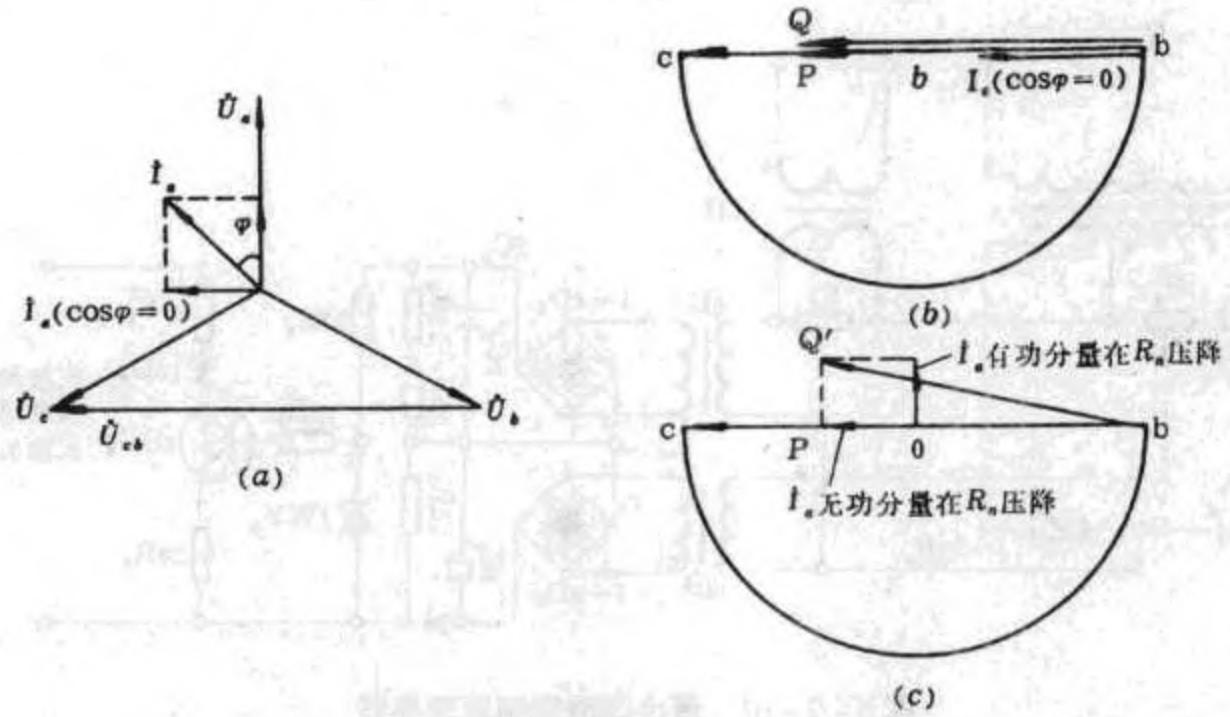


图 5-2-65 $\dot{I}_a$ 对比较电压 $\dot{U}_{ab}$ 的影响

(a)输入电压、电流向量;(b)$\dot{I}_a$ 为纯容性时;(c)$\dot{I}_a$ 超前 $\dot{U}_a<\psi$ 时

$$\dot{U}_{Qb} = \dot{U}_{Qo} + \dot{U}_{ob}$$

式中 $\dot{U}_{Q0}$——$\dot{I}_a$ 在 R_h 上压降,$\dot{U}_{Q0}=\dot{I}_aR_h$。

在 $14\sim23R_g$ 电阻值取零的条件下,$\dot{U}_{Qb}$是比较电压输出变压器 8B 的初级绕组输入信号电压。

当发电机进相运行(欠激带有功)时,$\dot{I}_a$ 超前 $\dot{U}_a<\psi$,比较电压变为 $\dot{U}_{Qb}$,如图 5-2-65(c)所示。

检测器的给定电压 $\dot{U}_{pb}$由电阻 $1\sim10R_g$ 分压取得。给定电压为

$$\dot{U}_{pb} = \dot{U}'_{p0} + \dot{U}_{0b}$$

在 $14\sim23R_g$ 电阻值取零的条件下,$\dot{U}_{pb}$是给定电压输出变压器 9B 的初级绕组输入信号电压。

将 $\dot{U}_{Qb}$和 $\dot{U}_{pb}$分别整流滤波变为平滑的直流电压 U_1 和 U_2,经均压电路进行绝对值比较。如果 $U_1<U_2$,表明进相无功电流小于限制值,检测器输出为负值,不起作用。如果 $U_1>U_2$,则检测器输出一个正值信号去限制无功进相电流的增大。

要改变最小励磁限制值可调电阻 $1\sim10R_g$。

电阻 $14\sim23R_g$ 的作用是考虑发电机在欠激情况下,有功负荷越大越易失步,故加入 $14\sim23R_g$ 使进相无功电流比较值和给定值均随有功负荷变化而改变,故 $14\sim23R_g$ 被称为有功特性整定电阻,其对比较值和给定值的影响如图 5-2-66 所示。当 $14\sim23R_g=0$ 时,d 点与 b 点重合,这时比较电压为 $\dot{U}_{Q'b}$,给定电压为 $\dot{U}_{pb}$,见图 5-2-66(a);当 $14\sim23R_g\neq0$ 时,d 点沿圆弧背离 b 点移动至 d 点,比较电压变为 $\dot{U}_{Q'd}$,比 $\dot{U}_{Q'b}$增大,给定电压变为

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$\dot{U}_{pb}$，比 $\dot{U}_{Q'd}$减小，表明进相无功电流随有功负荷变化而自行改 变给定值。调整 14～23R_g 可适应不同机组特性的需要。

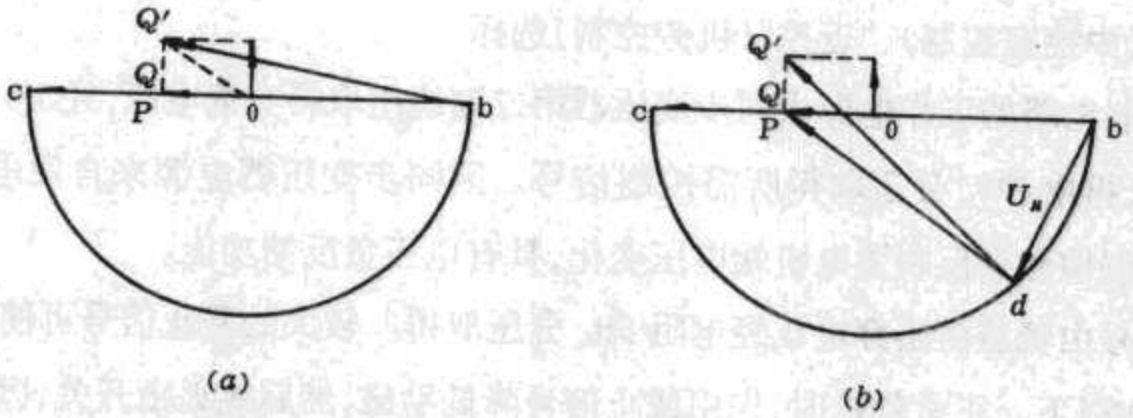


图 5－2－66 有功特性整定电阻的影响
(a)14～23R_g = 0 时；(b)14～23R_g ≠0 时

(2)进相无功电流限制信号放大

无功电流检测器的输出信号经晶体管直流放大器放大后，再经测量调差电路的末级射极输出器输出。工作原理与前述晶体管放大器相同。

图 5－2－63 中各元件的作用如下。

30R_g、10D_g 用以限制晶体管 1BG_g 完全导通时的最小输出电压，以免 1BG_g 完全导通时，造成励磁系统过载。

28R_g 用以限制 1BG_g 的最大基极电流。

1WY_g 为限幅稳压管，并作为 1BG_ge－b 结反向电压保护。27R_g 为 1WY_g 限流电阻。

29R_g 用于减少放大器的电压放大倍数，提高最小励磁限制电路运行的稳定性。

(三)手动、自动切换电路

1.对手动、自动切换电路的要求

可控硅励磁装置一般均设有手动、自动切换电路，在运行中如发生调节不稳定或其他故障，可将“自动”切至“手动”，用手动调节励磁；在发电机零起升压时，也用手动平稳地调节励磁。

对手动、自动切换电路的基本要求是：

(1)在发电机带负荷运行时，手动与自动转换，应达到“无痕迹”切换。

(2)手动调节应能使发电机空载稳定运行，并能在较大范围内调节发电机电压。

(3)手动、自动切换能在机旁和中控室进行。

(4)手动调节环节力求具有端电压负反馈或转子电流负反馈功能，使手动调节信号能自动地跟随发电机电压偏移而变化，有利于稳定运行。

2.手动、自动切换电路接线

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

TKL 型励磁装置的手动、自动切换电路见图 5－2－67。控制方式通过转换开关 $2K_b$ 进行切换，有“自动”(自)、“手动”(手)、“截止”(止)三个位置。可通过另一转换开关 $1K_b$ 进行“远控”(中控室控制)、“近控”(机旁控制)选择。

手动控制电路的工作电源由同步变压器第二副绕组取得交流电压，经 $1\sim6D_b$ 整流变为直流电压，再由 $3W_b$ 分压取得所需控制信号。因同步变压器电源来自发电机端电压，显然手动控制信号会反映发电机端电压变化，具有电压负反馈功能。

截止信号由稳压管击穿电压经电阻 $5R_b$ 分压取得。较大的截止信号可使可控硅导通角减小到 10°以下。正常停机时，先用截止信号降低励磁，然后跳灭磁开关，以减轻灭磁开关触头“电蚀”。只要发电机电压大于 30%额定电压，稳压管 $1WY_b$ 能反向击穿，截止环节就能可靠地工作。

为了实现手动与自动“无痕迹”切换，设置电压校核电路。由校核按钮 $1A_b$、信号电压表 $1V_b$ 和移相触发电路等值电阻 $6R_b$ 等组成。图 5－2－67 中所示为“自动”控制方式，自动控制信号 U_k(或手动控制信号 U''_k)由 $2K_b$ 接入。要转为“手动”控制方式时，可按 $1A_b$，调节 $3W_b$ 使电压表指示与自动控制信号 U_k 相同，即可操作 2Kb 至手动位置。切换时可控硅导通角和发电机端电压都不变，故是“无痕迹”的。

3.其他元件的作用

稳压管 $2WY_b$ 对输入信号起限幅作用，用于抗干扰过电压，因在“远控”时可能产生电缆感心过电压。

限流电阻 $9R_b$ 用于限制控制电流信号。

(四)起励单元

发电机停机后剩磁微弱，不易满足开机时自励建压需要，故一般均附设起励辅助工作电路。常用起励方式有厂用蓄电池起励、交流电源起励和利用发电机残压起励三种。

1.厂用蓄电池起励

厂用蓄电池起励接线见图 5－2－68(a)。起励程序是：先合上刀闸 K，待机组转速达 90%～100%额定转速，投入起励接触器 ZC，蓄电地就给发电机初始励磁。在发电机电压上升至 40%额定电压，即可切出 ZC，发电机即转入自励。

起励蓄电池的容量和电压可按短期内建立 50%～70%U_{eL}选择，一般取 25%U_{eL}和空载额定励磁电流作为参考量。

起励回路中接入二极管 8GZ 用于防止励磁装置向蓄电池反充电，因反充电电流可能很大，对蓄电池及可控硅元件不利。

2.交流电源起励

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

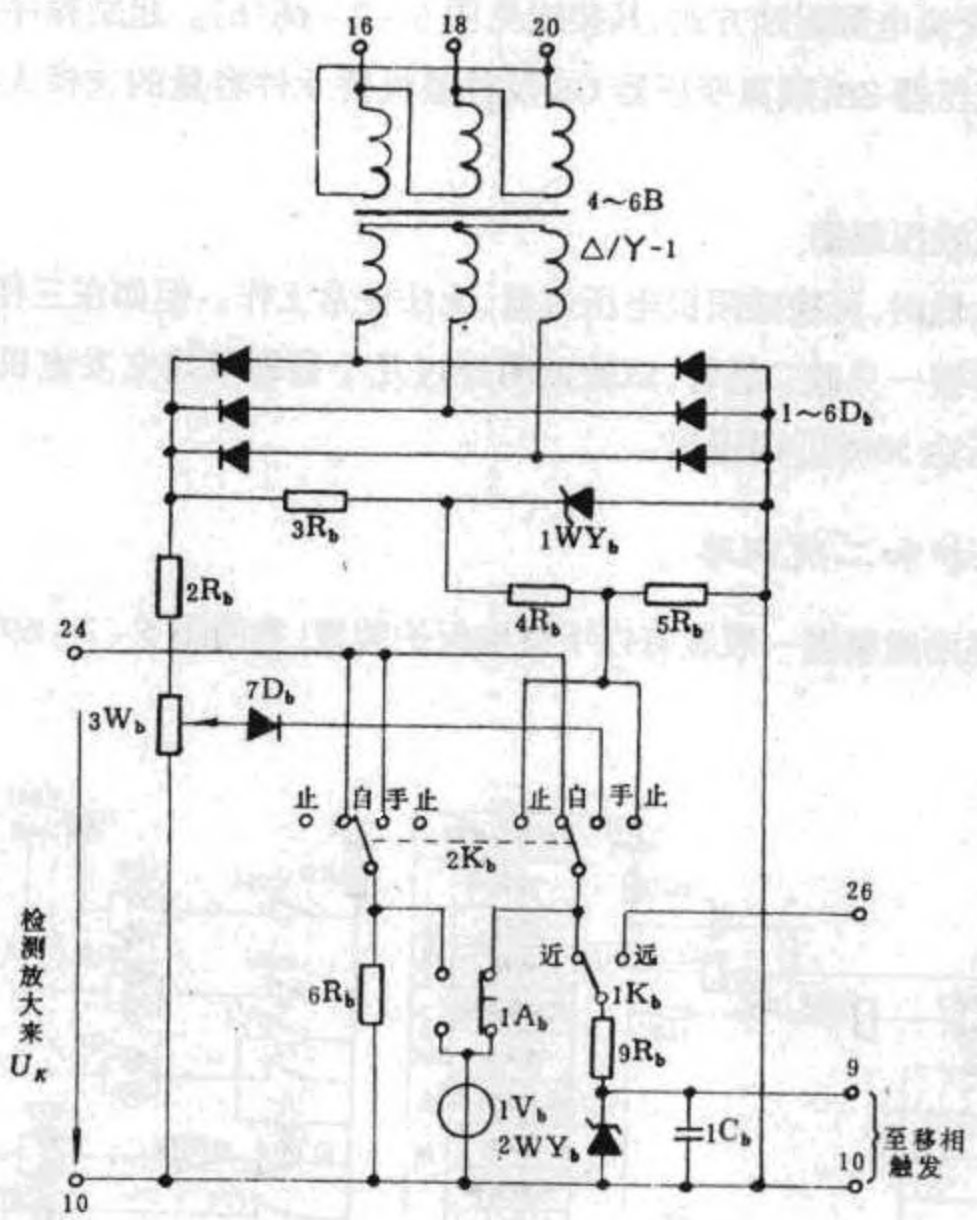


图 5-2-67 手动、自动切换电路

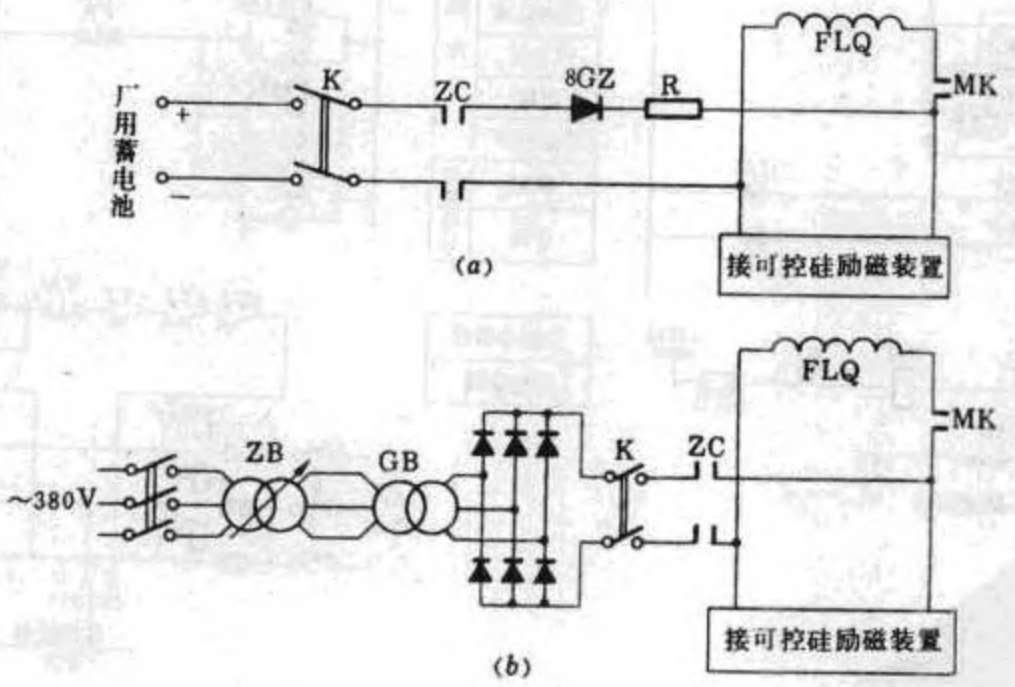


图 5-2-68 发电机起励接线

(a)厂用蓄电池起励;(b)交流电源起励

在发电机容量较大,厂用蓄电池容量不能满足起励需要的情况下,或没有厂用蓄电池

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

的水电站，可采用交流电源起励方式，其接线见图 5－2－68(b)。起励程序与上述蓄电池起励相似。起励变压器 ZB、隔离变压器 GB 及硅整流桥元件容量的选择大约为空载励磁容量的 20%。

3.利用发电机残压起励

发电机残压太低时，可控硅阳极电压过低，无法正常工作。但如在三相半控桥的任一只可控硅元件上并接一只硅二极管，试验证明经过几十秒即可建立发电机额定电压。二极管在发电机电压达 50% U_e 时退出。

(五)继电保护和二次回路

TKL 型可控硅励磁装置一般装有以下继电保护装置(参阅图 5－2－69)。

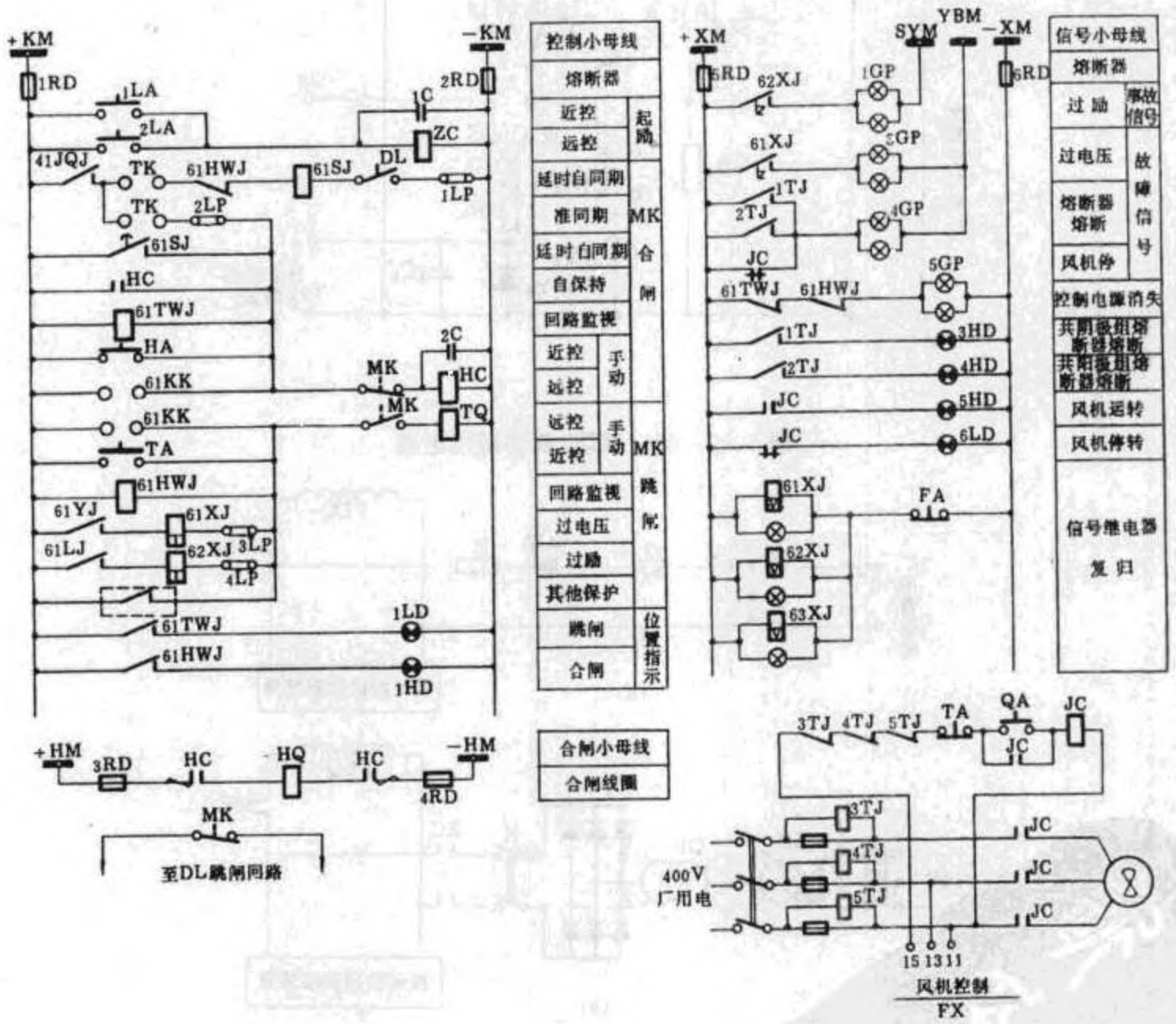


图 5－2－69 继保护和二次接线

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

1.过电压保护

可控硅励磁装置的频率特性较好，在频率45～55Hz范围内变化时，发电机电压变化率不大于15%，而且频率上升时，电压变化率还趋于减小，故不必担心甩负荷发生的过电压。本装置设置过电压保护的目的，主要是防备相位错乱，误操作或可控硅失控引起的过电压。为了保证发电机安全，设置由过电压继电器61YJ构成的过电压保护，按1.2～1.3额定电压整定，作用于跳发电机断路器和灭磁开关并事故停机。

2.过励保护

前面已谈到发电机正常强励时受到电流限制单元的限制，最大励磁电流不超过1.6I_{eL}（I_{eL}为额定励磁电流）。现在讲的过励保护是指三相半控桥由于相位错乱、直流侧短路、强励过程中电流限制单元失效，机组紧急停机频率下降、励磁变压器高压保险一相熔断（造成三相磁通不平衡，引起铁芯发热）等原因造成的严重过励情况。

过励保护由电流继电器61LJ构成，按躲过正常强励电流整定，可取2～2.2I_{eL}，作用于发电机断路器和灭磁开关跳闸并事故停机。

3.风机断相保护

可控硅励磁装置冷却风机三相电源保险一相熔断不易发现，继续运行会造成电动机烧坏，故在三相保险上分别并接一只电流继电器3～5TJ，断相时切断风机三相电源并发出停转信号。

4.失磁保护

失磁保护用于防备励磁消失造成发电机异步运行。由欠流继电器62LJ监视转子励磁电流，整定值可取0.8～0.9倍空载额定励磁电流，保护动作时作用于跳断路器和灭磁开关并事故停机。

5.熔断器完好性监视

功率输出电路可控硅元件和硅二极管均用快速熔断器作为短路保护，参见图5－2－38。为了监视熔断器完好，设有由二极管1～6D和电流继电器1TJ、2TJ构成的熔断器监视回路。当任一臂熔断器熔断时，均可通过有关并联二极管使继电器动作，发出故障信号。

6.过电压吸取装置

用电阻和电容构成的过电压阻容吸收装置，在功率输出电路中用得较多：①在可控硅和二极管上并联阻容吸收装置，用以限制换相过电压；②在三相半控桥交流侧装设三相面接线阻容装置，用以限制励磁变压器投切时发生的过电压；③在三相半控桥直流侧装设阻容装置用以限制回路电感产生的操作过电压。

考虑到发电机进相运行发生失步时，或外部短路时，在发电机转子侧将产生对硅元件

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

威胁较大的感应过电压，其能量较大，直流侧的阻容吸收装置不大起作用，除在选择硅元件耐压水平应加以考虑外，还在直流侧并联一只电阻 $2R_L$ 加以限制。$2R_L$ 阻值较大，约为转子线圈电阻的 100 倍。

在自复励装置的复励回路中，一般还考虑在发电机近端短路时，功率变流器可能由于一次电流迅速增大，而二次侧电流则因转子绕组电感无法迅速上升，造成安匝过剩过电压，危及整流元件。故在功率变流器二次侧装设过电压吸收装置，常用方法有：①三只速饱和电抗器接成 Y 形接线（参阅图 5－2－40），正常运行时，电抗器不饱和，电抗值较大，仅流过很小的电流，在发生过电压时，电抗器进入饱和工作状态，电抗值大大降低，从而吸收过电压能量；②利用三只大功率非线性电阻；③利用对接的硒整流器。有人曾利用阀型避雷器，运行经验表明，因安匝过剩过电压放电功率较大，易发生避雷器炸裂，故不宜使用。

7.开环调试附加二次回路

可控硅励磁装置在投入前，均要进行单个插件的检查试验和整体的开环试验、闭环试验。为便于开环调试，装置设有变换插头、小容量调试电源和轻负载试验电阻。

TKL 型励磁装置在调差插件上设有变换插头，分“运行”“调试”两个位置。当从“运行”位置拔出，插入“调试”位置时，即甩去电压互感器 YH，接入厂用 400V 交流电源（通过风机电源取得）至测量变压器 400V 绕组，调节器就取得测量同步电源。调试结束，将插头插回“运行”位置，又恢复由电压互感器供电。

在同步变压器 4～6B 上设有 Δ/Y－11 接线的 20V 小容量调试电源，用接线柱引出至接线板上，调试时可代替励磁变压器 ZB。

功率输出电路三相半控桥直流侧的 $2R_L$ 电阻，阻值 21.6Ω，除作为感应过电压保护用外，还兼作开环调试小电源试验负载电阻。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第三章 水电站机械自动化装置安装工艺

第一节 水轮发电机组的自动化部件

一、机组的转速、温度和压力信号器

(一)转速信号器

转速信号器 ZSX 或称转速继电器 ZSJ。下面介绍其用途及类型。

1.转速信号器的用途

机组转速是运行工况的一个重要参数。在机组自动控制中,使用转速信号器的地方有:

(1)当线路故障跳闸,机组甩负荷,转速剧烈升高至 140%额定转速,且调速器失灵,将危及机组安全时,由转速信号器的 140%n_e(n_e 为额定转速)接点 ZCX(14%)发出紧急停机并关闭机前主阀命令。

(2)机组甩负荷,转速上升至 115%n_e 时,由转速信号器 ZSX(115%)接点发出事故信号,并使机组停机。

(3)机组采用自同期并列方式时,当机组转速上升至 95%n_e,由转速信号器接点 ZSX(95%)发出自同期合闸脉冲。

(4)在停机过程中,当机组转速下降到 35%n_e 时,由转速信号器接点 ZSX(35%)发出制动命令脉冲。

2.转速信号器类型

目前使用的转速信号器,主要有机械型、电磁型和电子型三类,现介绍前两类。

(1)机械型转速信号器

中小型水轮发电机组使用的一种环形结构的机械型转速信号器如图 5-3-1 所示。根据离心力作用的原理,当机组转速升高时,飞球离心力增大,克服弹簧力而飞出,拨动微动开关发出信号。这种转速信号器结构简单,调整弹簧张力即可改变转速动作值。按机

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

组主轴直径和转速大小有 16 种规格，精度 ±3%。

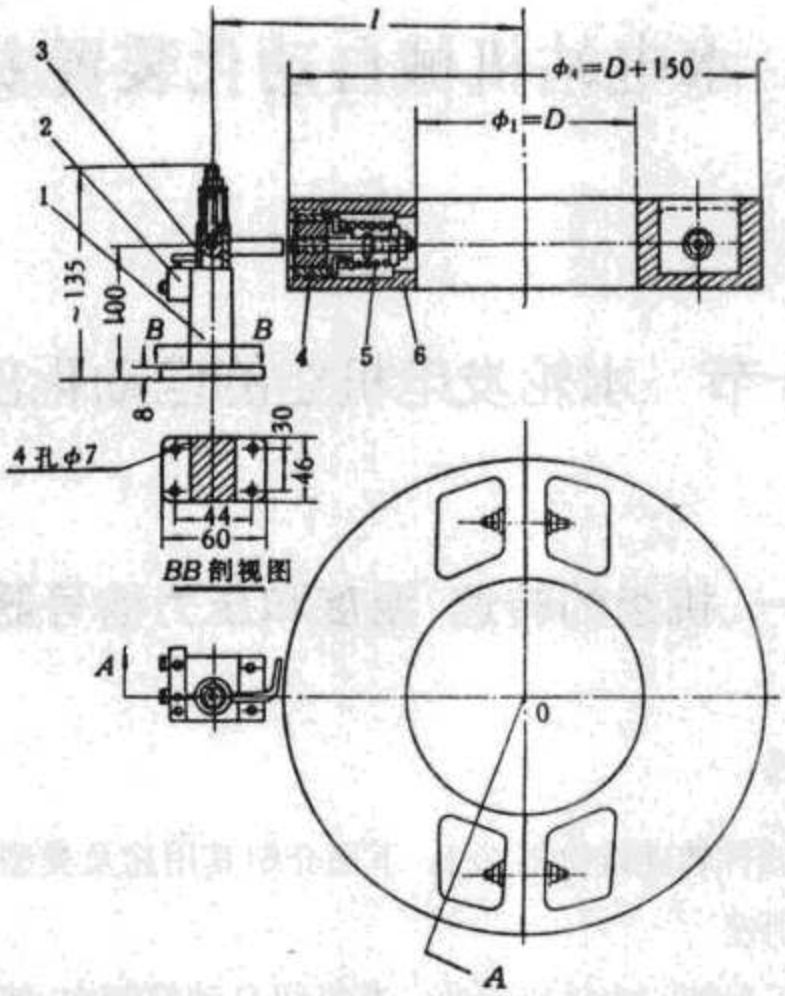


图 5-3-1 机械型转速信号器结构图

1—支架；2—微动开关；3—撞架；4—飞球；5—弹簧；6—夹盘

另一种 ZX-7 机械型转速信号器采用鼠笼型转子及永磁型定子作为测量单元，以月型磁钢及密封型干簧接点作为发信单元，具有七副接点，可在 35～145%n_e 范围内调整，转速适用范围为 30～300r/min。惟这种转速信号器在转速突变时有冲过头现象，接点整定也较困难。

(2)电磁型转速信号器

电磁型转速信号器主要根据永磁发电机电压与转速具有线性关系的原理而设计的，使用若干个电压继电器接于永磁发电机电压回路而构成，常用的有 ZZX-2 型和 ZZX-3A 型两种。

ZZX-2 型转速信号器(阿城继电器厂生产)内部接线如图 5-3-2 所示，采用 DY 型电压继电器及 JZX-10M 型小型密封继电器等元件构成。反映 35%额定转速的继电器 ZJ(为 JZX-10M 型)经桥式整流器接入，整流桥的作用是在低速时，频率仅 5～6Hz，如不将交流电压信号整流，会产生接点震动。惟这种转速信号器仍有如下缺点：①返回系数低，一般在 0.85～0.9 左右，致使甩负荷后转速恢复正常时，ZSX(115%)接点常不能正确返回；②由于磁场干扰，动作值不稳定，ZSX(35%)接点常有提前或滞后动作现象；③ZSX(35%)接点抖动较厉害。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

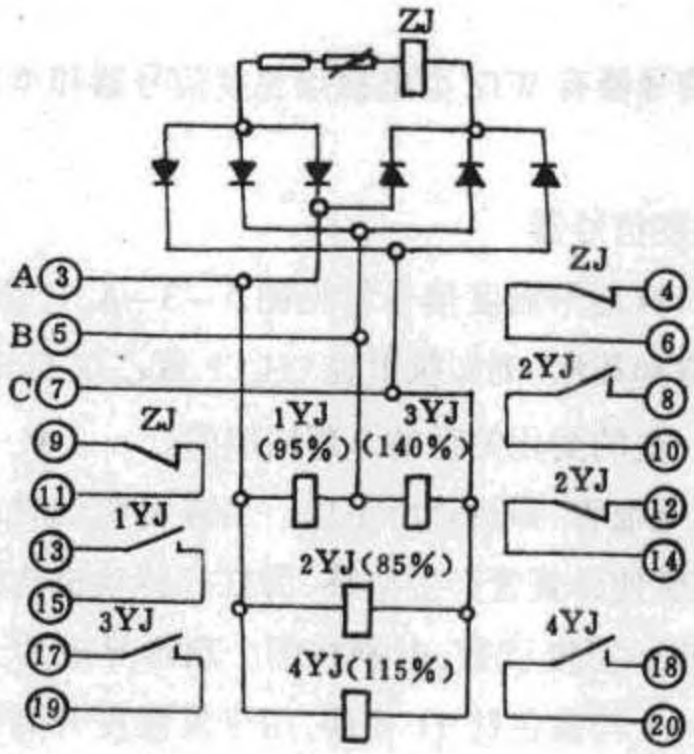


图 5-3-2　ZZX-2 型转速信号器内部接线

许昌继电器厂生产的 ZZX-3A 型转速信号器作了改进，不用 DY 型电压继电器，全部采用 JAG-52 型干簧继电器，由三相全波整流桥供电，整流电压波纹系数较小，继电器返回系数较高，消耗功率小，调整方便。ZZX-3A 型转速信号器内部接线参见图 5-3-3。

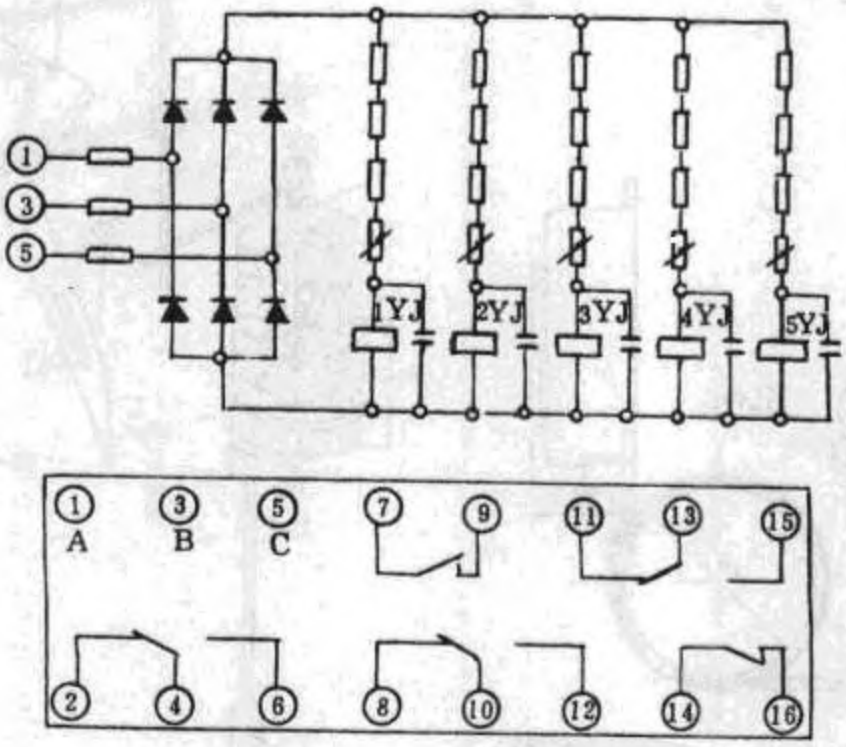


图 5-3-3　ZZX-3A 型转速信号器内部接线

(二)温度信号器 WX

1.温度信号器的用途

温度信号器用于监测水轮机导轴承、上下导轴承、推力轴承的温度及发电机空气冷却器的进出口风温等。当温度升高至允许上限值时，发出故障信号；温度继续上升至危险的过高值时，发出水力机械事故信号，并作用于事故停机。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

2.温度信号器类型

水电站常用的温度信号器有 WTZ 型电接点温度信号器和 WXG 型电接点玻璃水银温度计。

(1)WTZ 型电接点温度信号器

过去常用的 WTZ－012s 扇形温度信号器见图 5－3－4,它是基于灌在一定容积密闭感温包内的气体或液体饱和蒸汽(例如氯甲烷 CH_3Cl、氯乙烷 C_2H_5Cl 或丙酮 C_3H_6O 蒸汽)的温度与压力之间具有一定的变化关系的原理构成的。

测温系统由感温包、毛细管、弹簧管所组成。当温度变化时,感温包内液体的饱和蒸汽压力随之变动,经毛细管使弹簧管产生位移,借杠杆传动机构使轴 9 转动,并带动指针 10 及电刷 15 转动,指针指示温度读数,电刷在两个扇形导电片上滑动,使接点接通发出信号。两个扇形导电片一个与黄色针 11 相连,用于发温度升高警告信号;另一个与红色针相连,用于发温度过高事故信号,并作用于事故停机。扇形导电片的位置可按温度整定值调节。

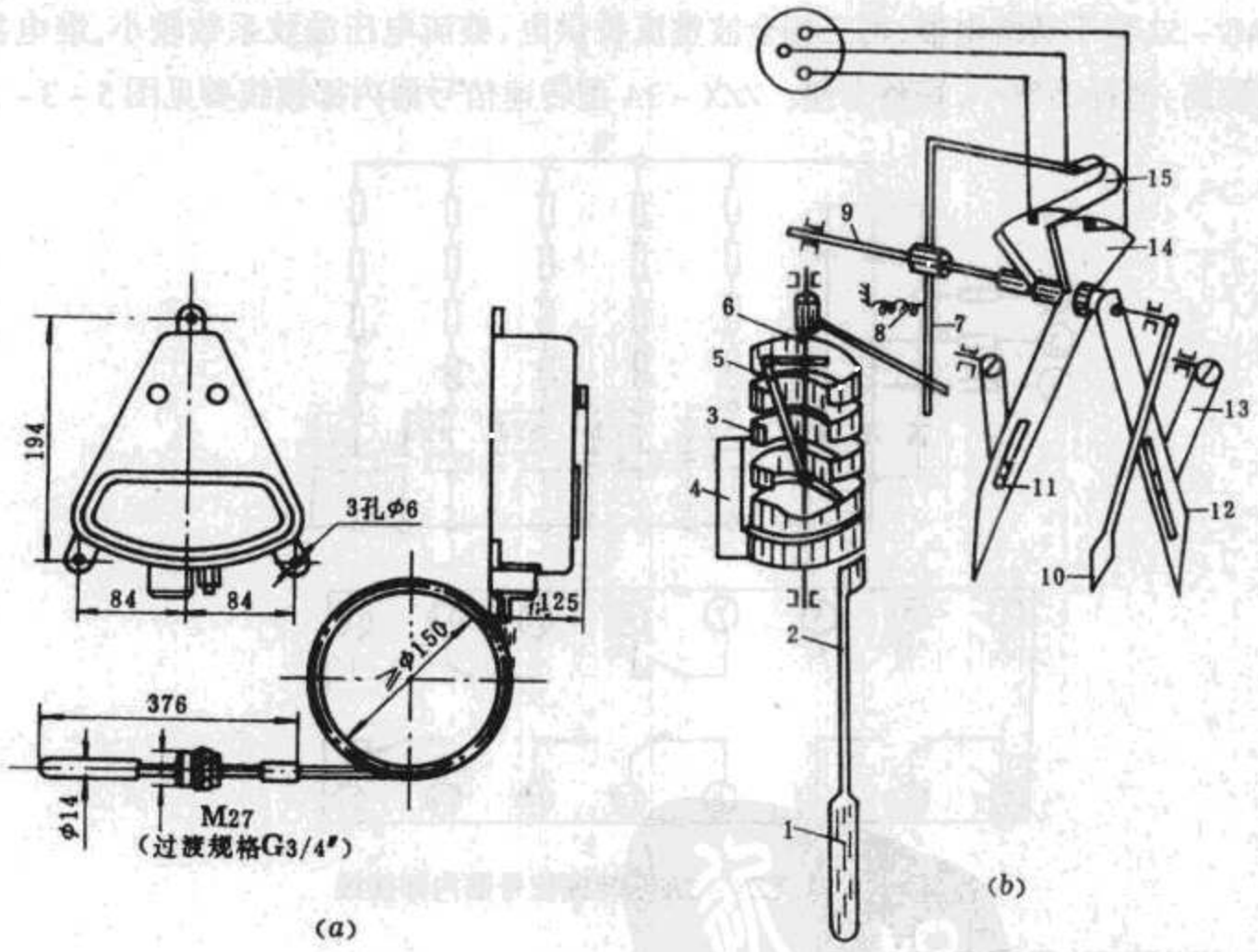


图 5－3－4 WTZ－102S 型扇型温度信号器

1—感温包;2—毛细管;3—弹簧管;4—压板;5—连杆;6—轴;7—杠杆;8—弹簧;9—轴;10—指针;11—黄色针;12—红色针;13—整定元件;14—扇形导电片;15—电刷

WTZ－288 型电接点压力式温度信号计的原理与扇形温度信号器相同,但精度稍高(1.5 级),外型见图 5－3－5。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

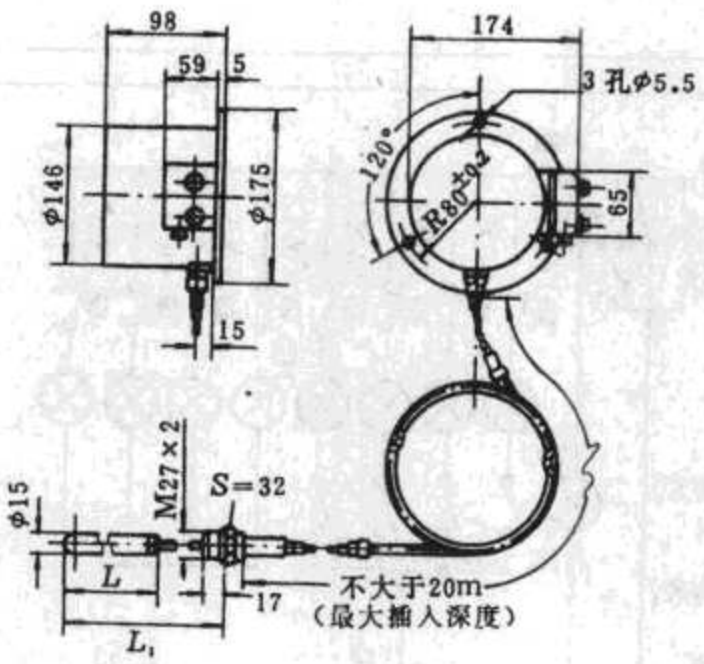


图 5-3-5 WTZ-288 型电接点压力式温度信号器外型图

(2)WXG 型电接点玻璃水银温度计

WXG 型电接点玻璃水银温度计是利用附有电接点的水银温度计构成。一只温度计整定一个动作值,需要四个测温点时可用四只温度计,其原理接线如图 5-3-6 所示。当温度升高至允许上限时,WX_1 接点被水银柱接通,UD 信号灯亮,1J 继电器动作,由 $1J_1$ 接点起动警铃 JL 发出警告信号。当温度上升至危险值时,WX_2 接点被另一水银柱接通,HD 信号灯亮,2J 继电器动作,由 $2J_1$ 接点起动 JI 发警告信号,由 $2J_1$ 接点作用于事故停机。

(三)压力信号器 YLX

1.压力信号器的用途

在水电站中,压力信号器主要用于油、气、水系统的压力监视。例如,在机组制动闸的管路上装设压力信号器,用以监视风闸是否落下;在压油槽和贮气筒上用压力信号器实现保持压力恒定的自动控制。

2.压力信号器类型

水电站常用的压力信号器有 YTK-01 型和电接点压力表两种。

(1)YTK-01 型压力信号器

YTK-01 型压力信号器是一种无刻度仪表,利用弹簧管的变形带动水银开关的接通或断开而发出信号,其结构见图 5-3-7 所示。

将被监视的液、气体经接头 12 引入弹簧管内。弹簧管是用锡磷青铜制成的椭圆截面中间空的金属管,弯成圆形,内外侧截面不相等,故在压力作用下向外伸张,自由端按曲线轨迹移动,通过连杆带动水银开关动作。内装两个可整定不同值的水银开关。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

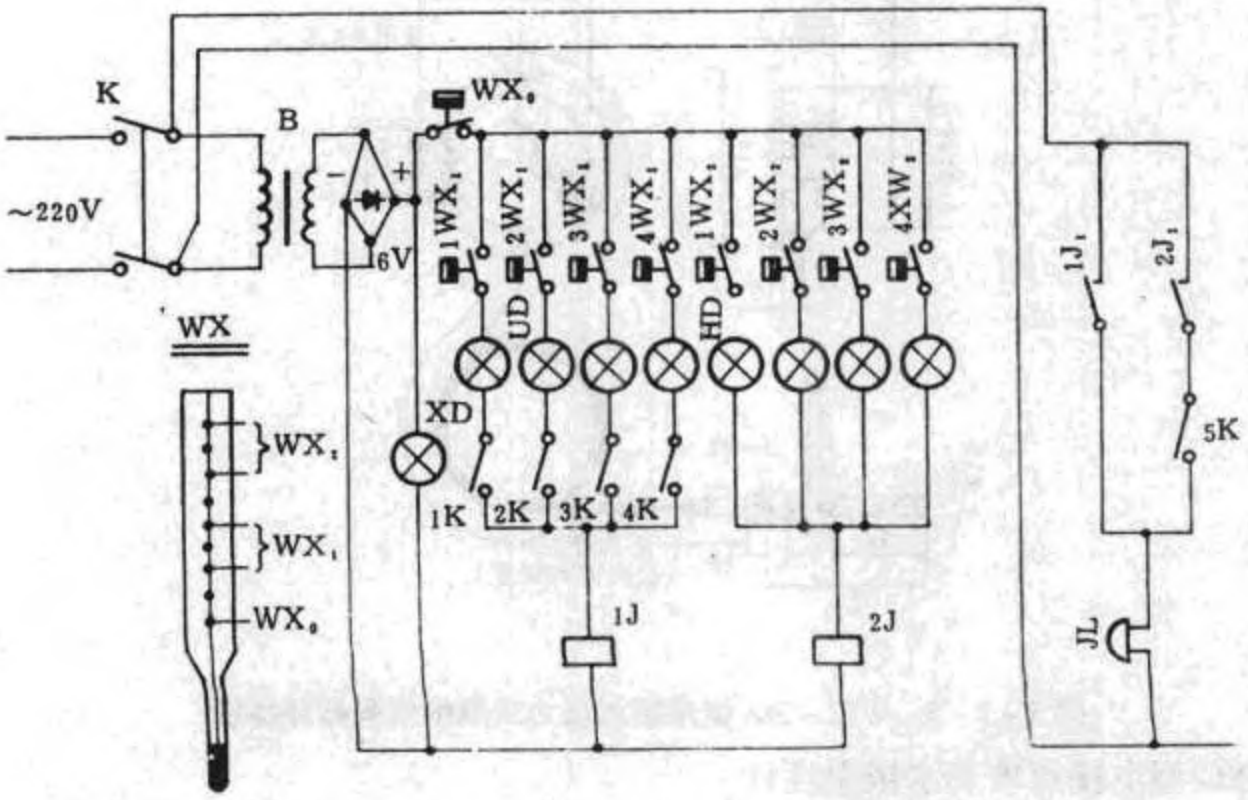


图 5-3-6 WXG 型电接点玻璃水银温度计原理接线

K—开关;B—变压器;WX—水银温度计;JL—警铃;XD、UD、HD—信号灯;1J、2J—继电器

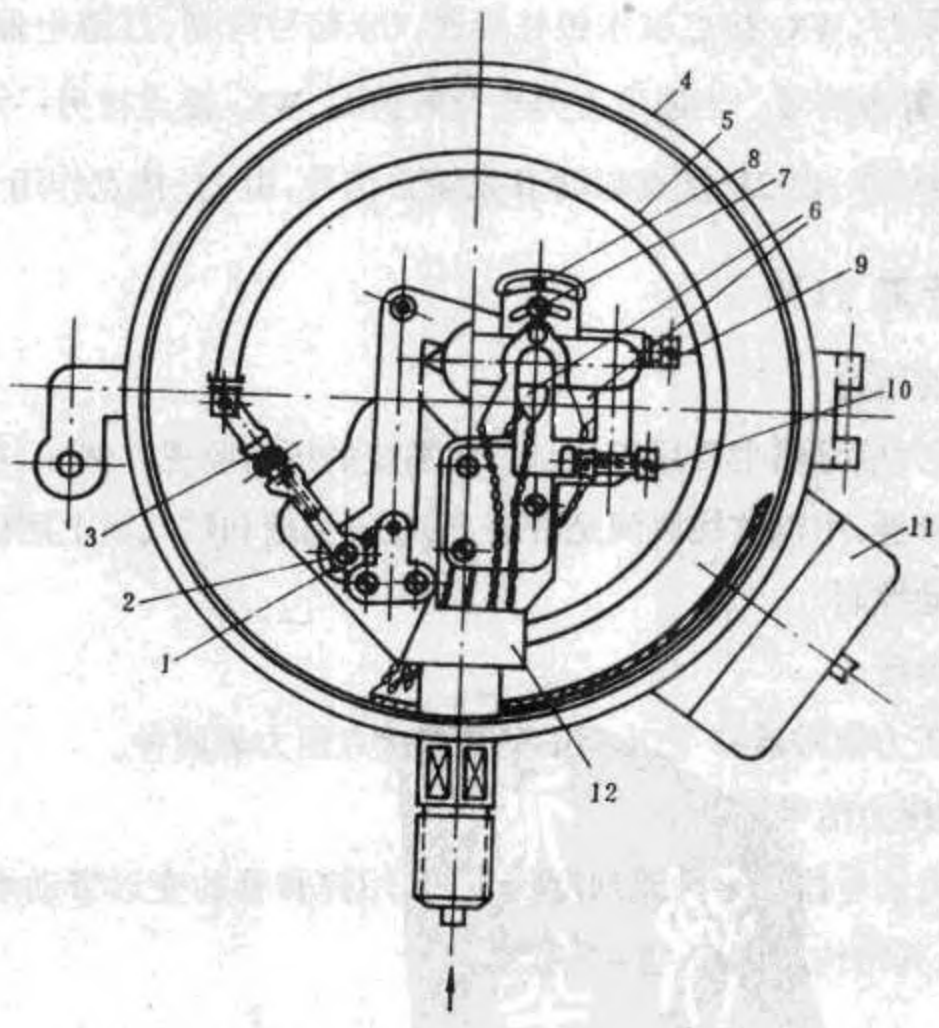


图 5-3-7 YTK-01 型压力信器

1—连杆传动构;2、3—调节螺丝;4—外壳;5—弹簧管;6—水银开关;
7、8—螺丝;9、10—调节螺丝;11—接线盒;12—接头

这种压力信号器的优点是:接点容量大,断弧性能好,接点断开功率达 300W。存在问

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

题是:胀圈易漏油、漏气,补焊后则弹簧力起变化,不能使用;调整较困难,易受振动影响;当水银开关玻璃内壁附有水银蒸汽时易误动。

压力信号器的动作压力在出厂时已调整好。例如 YTK-01-15 型,一般整定 15kg/cm²;YTK-01-40 型,一般整定 25kg/cm²。也可在现场调整。

(2)电接点式压力表

电接点式压力表是一种兼有刻度指示和发信接点的仪表。其动作原理与 YTK-01 型压力信号器基本相同.也由弹簧管、连杆传动机构、电接点等组成。在被测介质压力作用下,使弹簧管末端产生位移,由连杆带动指针和活动触头偏转,发出压力指示,并在达到整定位置时发出信号。电接点由三个导电针(分上限、下限、活动三个)及相应的触点组成,见图 5-3-8。

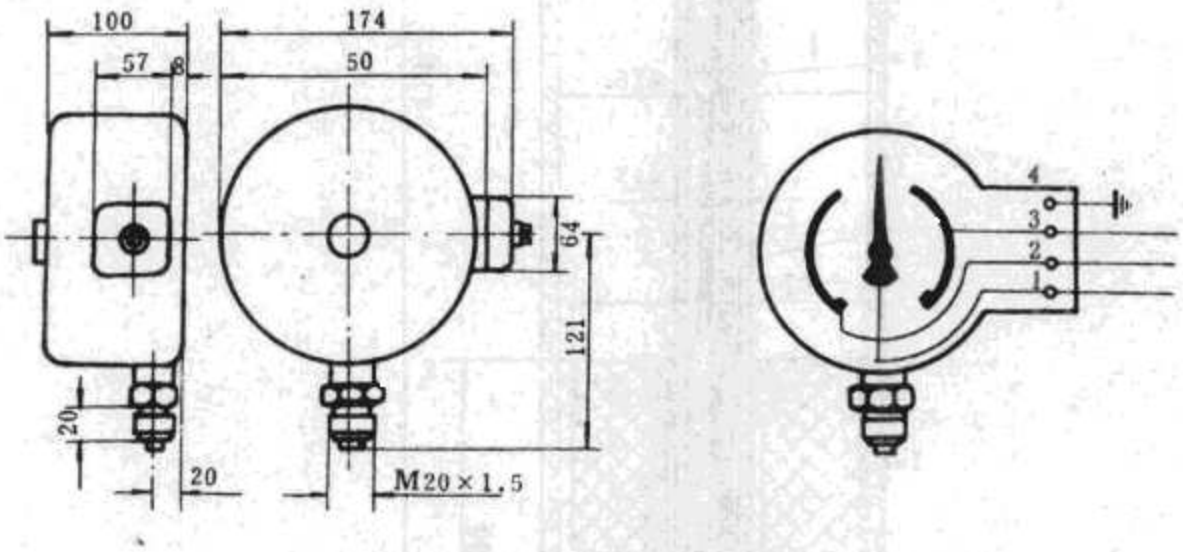


图 5-3-8 电接点式压力表

电接点式压力表的优点是:易于调整,不易受震动影响。缺点是:接点容量小,要通过中间继电器才能起动磁力起动器;在动作值附近时有抖动现象,易产生拉弧而烧坏接点。

二、液位、示流和剪断销信号器

(一)液位信号器

1.液位信号器的用途

在水电站中,液位信号器主要用于机组推力、下导、水导等轴承油槽、油压装置漏油箱的油位监视;水轮机顶盖排水、集水井排水、调相压水等水位的自动控制。

2.液位信号器类型

水电站常用的液位信号器有浮子式和电极式两种。

(1)浮子式液位信号器 FZX

常用的浮子式液位信号器又可分为磁钢浮子型和灯泡浮子型等多种型号。惟都可分

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

为浮于和电气接点开关两个组成部分。

FX－2磁钢浮子式液位信号器结构见图5－3－9。

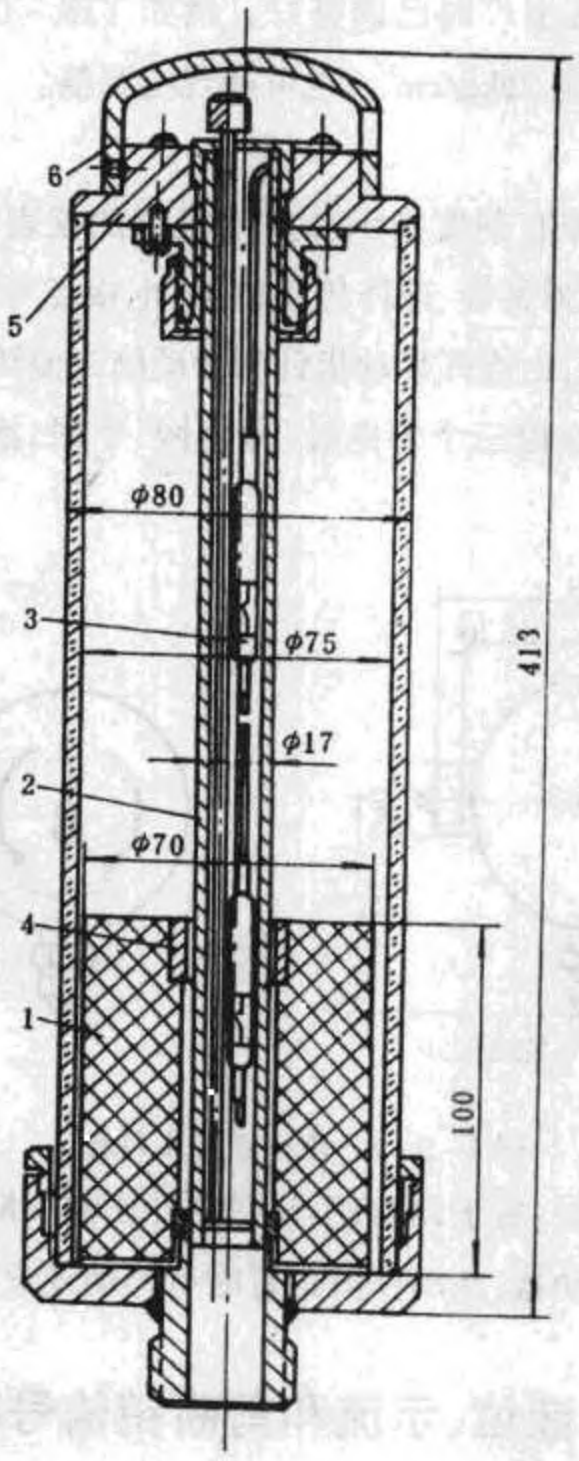


图5－3－9 FX－2浮子式液位信号器

1—浮子;2—导向管;3—湿簧接点;4—磁钢;5—接线座;6—罩

浮子球上带着一块小型永磁铁随液面升降,浮子导向管上装有多个湿簧(或干簧)接点,当永磁铁接近或离开湿簧接点时,该接点即闭合或断开。

图5－3－10为JAS－2型湿簧接点原理图。接点用玻璃密封,内充10个大气压氢气和水银,动、静接点用铂丝或铂锗丝制成,动静接点焊在导磁片上。动导磁片(为坡莫合金簧片,有导磁、导电、弹性性能)上刻有细槽,能起毛细管作用,将下部水银带到接点面形成湿润水银膜,作用有三:①使接点接触面积增加;②由水银膜承受电弧,保护了接点;③水银起缓冲作用,使接点不抖动和噪音。水银在高温下蒸发,冷却后又凝聚于管底,故安装时不能倒置。充10个大气压氢气的作用是使接点间耐压提高,并防止水银氧化。这种接

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

点容量大，接触良好，接点不氧化，不烧伤，不易受机械损伤，寿命长（$10^{9\sim10}$次），灵敏、快速、可靠故常在精密仪器上使用。但要注意垂直安装，应避免承受冲击振动。

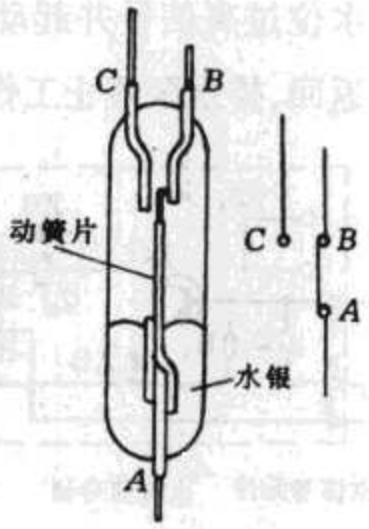


图 5－3－10　湿簧接点原理结构

目前常用的 FX 型液位信号器有 FX－1、FX－2、FX－3 三种型号，区别在接点数目，其他性能相同。另有 ZWX－150、YW－67 等型号，原理相似。YW－67 测量范围可达 0.8～10m。

这类液位信号器用于油槽油位监视情况较好。用于排水自动控制时常因脏物使浮子卡住；液面变化较快时，会发生浮子球迅速越过湿簧接点，无信号输出；导杆过长时会发生浮子球卡住等情况。

(2)电极式水位信号器 DSX

电极式水位信号器由以下两部分组成：①DJ－02 型电极；②ZSX－2(或－3)型水位信号装置见图 5－3－11。一般用于机组调相压水，监视和控制转轮室以下尾水管水位。

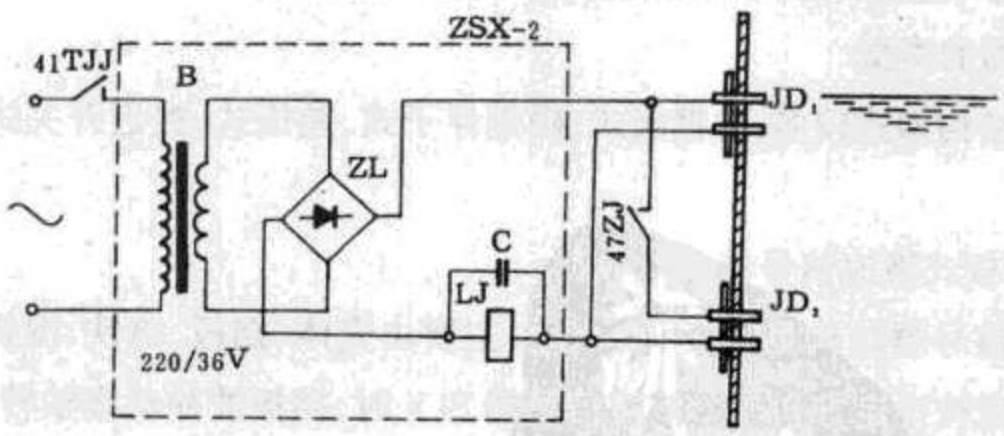


图 5－3－11　DJ－02 与 ZSX 构成的电极式液式信号器

图中电极 JD_1、JD_2 浸没水中时，电流继电器 LJ 动作；经中间继电器发出高水位信号，并打开调相补气电磁阀以驱动液压阀，向转轮室充压缩空气，将水压下；当水位降至 JD_2 以下时，LJ 复归，补气终止。

根据运行经验，这类液位信号器，如采取如下措施，一般可获得较好的效果：①金属电极镀铬防锈或采用碳棒电极；②当用于集水井排水时，在油污、泥沙较多情况下，应经常清

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

洗以保持良好导电性能;③适当提高电极上工作电压,并在电极上加套管。

另一种半导体放大的电极式水位信号器见图 5-3-12,其工作原理为:当水位由 ∇_1 升高到 ∇_2 时,电极 1、3 靠水导通,三极管 BG 的发射极到基极的电流经放大到导通,使继电器 ZJ 动作,ZJ_1 自保持,ZJ_2 发出水位过高信号并起动排水泵。当水位降低至 ∇_1 以下时,BG 没有基流通过,BG 截止,ZJ 返回,排水泵停止工作。

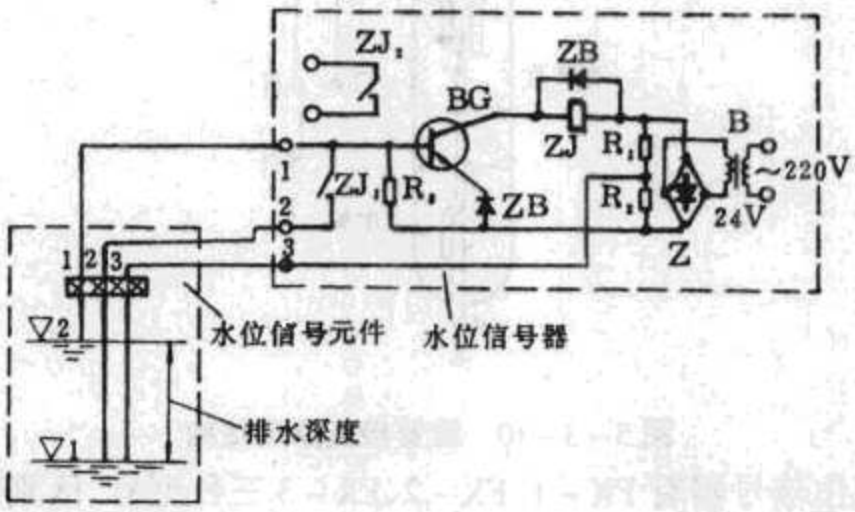


图 5-3-12 半导体水位信号器接线图

ZB—M 极管(ZCP11);ZJ—中间继电器(DZ-51/40);BG—三极管(3AX14);R—碳膜电阻(RT-0.5)

(二)液流信号器 SLX

1.液流信号器的用途

在水电站中,液流信号器主要用于发电机冷却水、水轮机导轴承润滑水(如采用水导时),上下导轴承冷却水等水流情况的监视。当水流中断或很小时,由液流信号器 SLX 发出信号,并自动投入备用水源,或作用于事故停机。

2.液流信号器的类型

液流信号器结构型式较多,有挡板式、磁钢浮子式、差压式、接近开关式等,现介绍前两种。

(1)SLX 型挡板式液流信号器

挡板式液流信号器结构见图 5-3-13。主要由壳体、挡板、磁铁、湿簧接点、指针等部件组成。当水流按指定方向流经液流信号器 SLX 时,挡板被冲动绕轴转动。在流量达到一定值时,挡板上装设的磁铁接近湿责接点,使接点动作,发出水流正常信号;当流量小于某一定值时,挡板在自重和弹簧力作用下,返回中间位置,磁铁离开湿簧接点,于是接点返回。随挡板转动的指针,可指示流量大小。

(2)SX 型磁钢浮子式示流信号器

SX 型示流信号器主要由壳体、湿簧接点、浮筒及磁环等构成,见图 5-3-14 所示。活塞式浮筒按水流流量大小情况而上下移动。当水流流量减少到一定值或全部中断时,

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

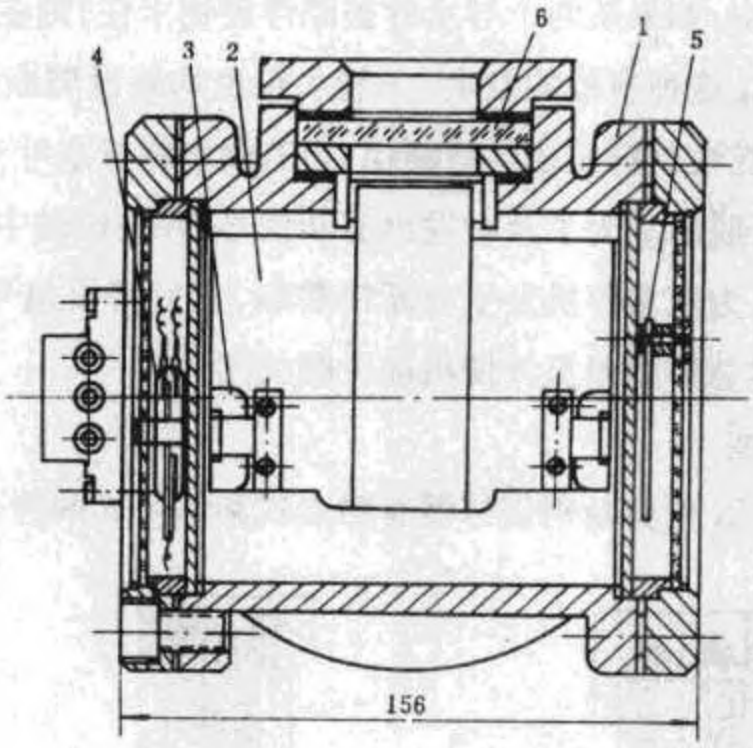


图 5－3－13　SLX 型液流信号器

1—壳体;2—挡板;3—磁铁;4—湿簧接点;5—指针;6—盖

浮筒下降,浮筒上磁环接近湿簧接点时,接点接通,发水流降低或中断信号。

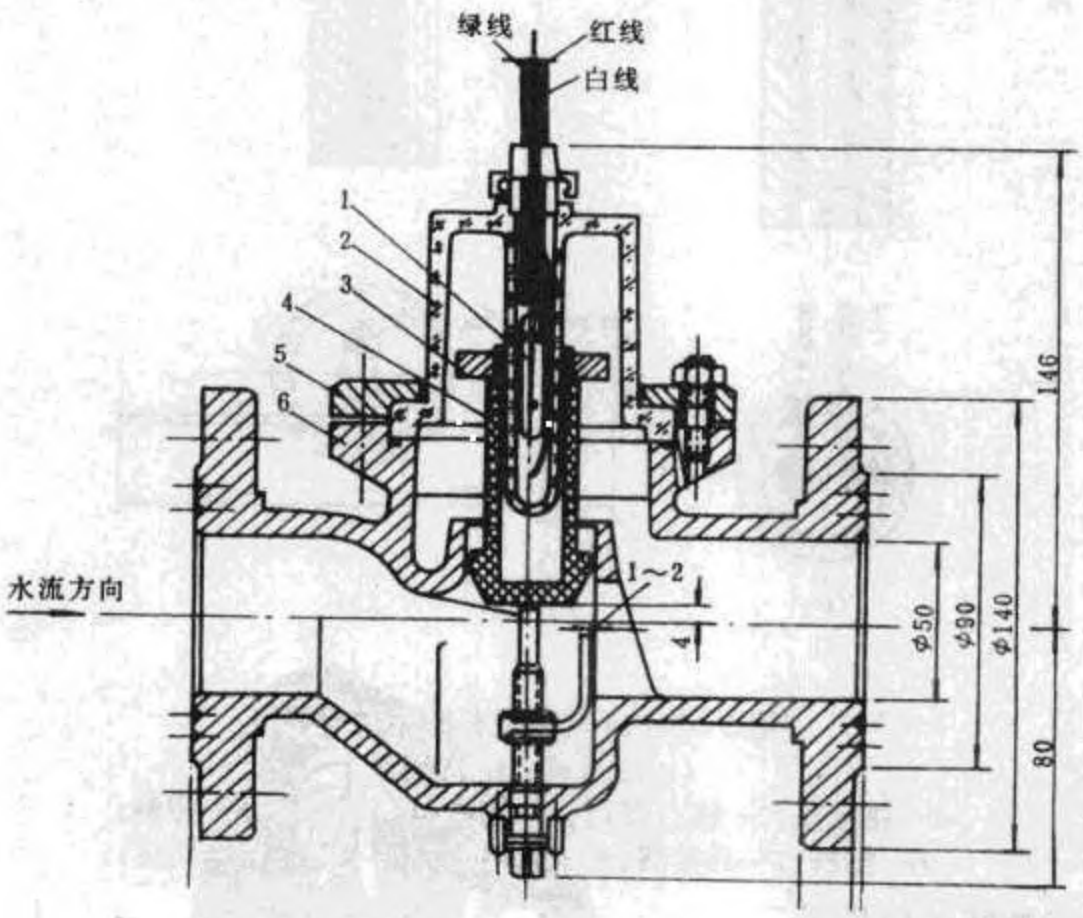


图 5－3－14　SX 型示流信号器

1—湿簧接点;2—透明罩;3—永磁环;4—浮筒;5—压盖;6—壳体

(三)剪断销信号器 JDX

1.剪断销信号器的用途

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

水轮机在运转过程中，如果某两个导水叶被漂浮硬物卡住，则在操作时可能造成导水机构损坏事故。为了防止这种事故的发生，一般水轮机均装设剪断销保护。在导水机构拐臂与连杆连接处采用脆性材料制成的剪断销，当有硬物将导水叶卡住时，剪断销即被剪断，使导水叶拐臂与连杆脱离。为了及时发出剪断信号，并在销轴中心孔内附设剪断销信号器。在水电站运行中，为正常停机发生剪断销剪断，只发警报信号；为事故停机时发生剪断销剪断，则作用于紧急事故停机并使机前主阀关闭。

2.剪断销信号器类型

目前水电站常用的JX型剪断销信号器有触点式和常闭式两种，见图5-3-15。

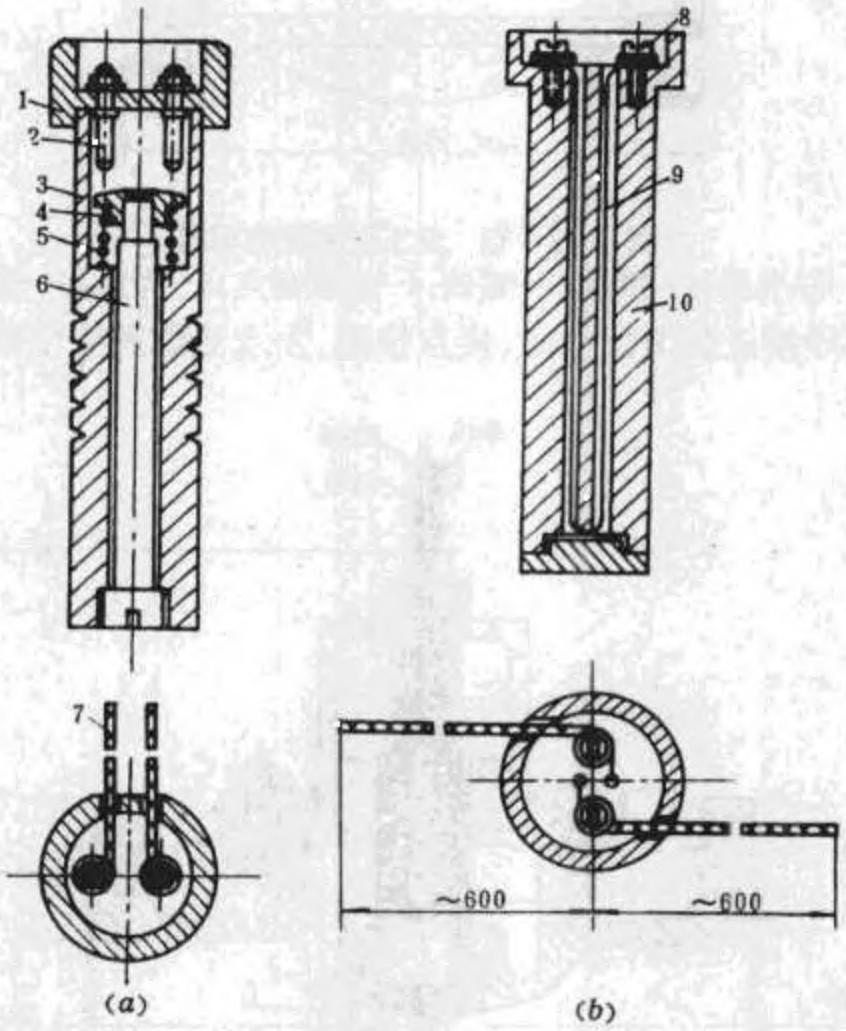


图5-3-15 JX型剪断销信号器

(a)触点式；(b)常闭式

1—接线座；2—接点螺钉；3—销体；4—动能点；5—弹簧；6—螺杆；7—软接线；8—接线螺钉；9—导线；10—销体

(1)触点式剪断销信号器

触点式剪断销信号器见图5-3-15(a)。主要由接点螺钉2(固定触头)、动触头4、弹簧5、螺杆6及销体3组成。正常时两个接点螺钉不通，当导水叶被卡住，导水叶关闭造成剪断销被剪断时，动触头即在弹簧力作用下将两个接点螺钉接通，发出信号。

(2)常闭式剪断销信号器

常闭式剪断信号器见图5-3-15(b)，由有机玻璃销体10穿入销体内的一条导线(φ2

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

熔断丝)9及接线螺钉8组成。使用时,先将装设在剪断销内的闭式信号器分两组串联,然后将1JX、2JX按图5-3-16接线与JXZ-2型剪断销信号装置配合工作。调整R_2,使正常时电桥处于平衡状态,电流继电器无电流流过;当某一个剪断销被剪断时,电桥失去平衡,电流继电器动作,发出剪断销破断信号。

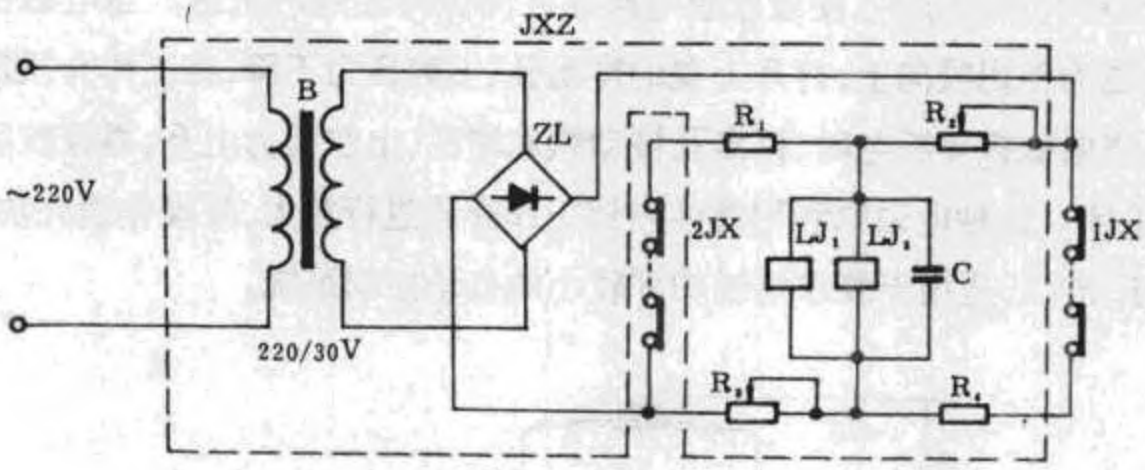


图5-3-16　剪断销信号装置接线图

另一种CJX型常闭式剪断销信号器(参见图5-3-17)采用脆性材料为壳体,内部采用印刷电路,用环氧树脂封浇,有较好的绝缘性能,允许最大工作电流0.5A,工作电源直流220V。可将这种信号器串联后直接与信号继电器连接。

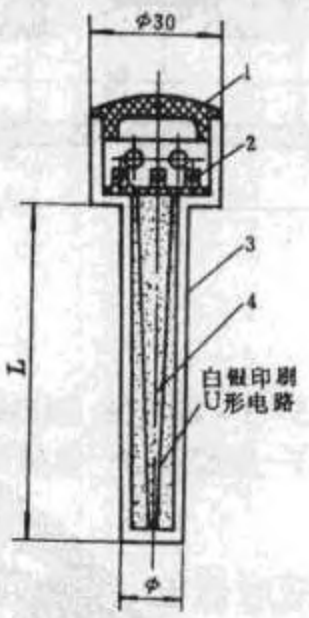


图5-3-17　CJX型剪断销信号器
1—盖;2—出线板;3—壳体;4—环氧树脂填料

三、电磁阀、电磁配压阀和液压阀

为了实现机组的自动控制,必须在油、气、水系统上装设各类远方操作的阀门,主要有电磁阀、电磁配压阀和液压阀等。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(一)电磁阀 DCF

电磁阀一般由电磁铁和阀体两部分构成。现简单介绍几种常用的电磁阀。

1. DF_1 型电磁阀

DF_1 电磁间结构如图 5-3-18 所示。图中位置是处于断电后关闭状态。此时,依靠橡胶膜上腔 A 工作介质的压力,使橡胶膜与阀座之间保持良好的密封。当电磁铁 4 通电时,动铁芯被电磁力作用吸向上,打开上盖的排出孔,上腔压力下降,在工作介质压力作用下使阀门开启;当电磁铁 4 断电时,排出孔被动铁芯堵住,上腔压力上升,靠橡胶膜上下腔压力差使阀门关闭。这种电磁阀利用阀体内部工作介质进行放大,故操作消耗功率小,其额定功率不大于 10VA,适用于要求消耗功率较小的自动控制系统。

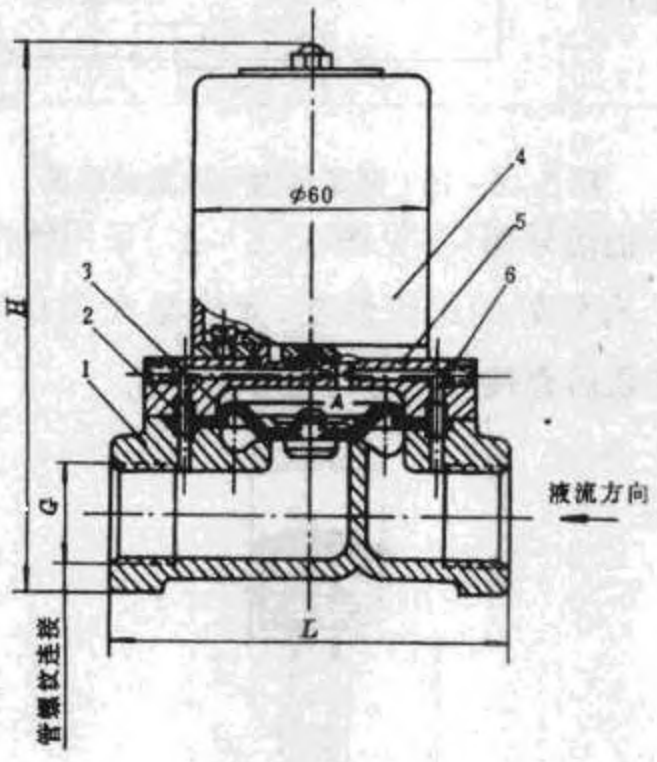


图 5-3-20 DF_1 型电磁阀

1—阀体;2—导管;3—橡胶膜;4—电磁铁;5—上盖;6—导管

2. DF-50 型电磁阀

DF-50 型电磁阀具有双线圈、短时通电、锁扣机构,其操作接线见图 5-3-19。图中 KA 为开启按钮,GA 为关闭按钮,FK 为电磁阀辅助开关。当按下 KA 时,电流通过吸引线圈 DP_K,电磁阀门开启,并由锁扣将其锁在开启位置,由 FK_4 切断开启回路,由 FK_3。闭合做好关闭准备;要关闭电磁阀,只须按下 GA 按钮,电流通过脱扣线圈 DP_G,电磁阀门即行关闭,并由 FK_3 断开关闭回路,由 FK_4 闭合做好开启准备。这种电磁阀的吸引线圈和脱扣线圈均只在短时间通电,完成开启或关闭后,接点 FK_4、FK_3 即将电路自动切断。

3. 电磁空气阀 DKF

电磁空气阀用于控制压缩空气系统管道的通断。目前我国使用的电磁空气阀有 DK

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

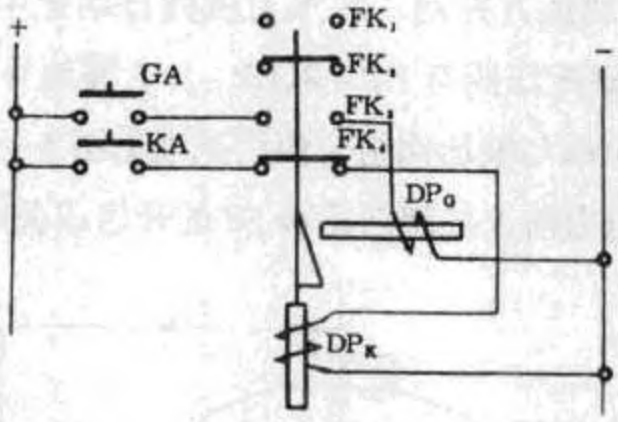


图 5-3-19　DF-50 型电磁阀接线图

-2、DK-10、DK-15、DK-18、DK-20 等多种型号，后四种用得较多，其中前四种配用双线圈电磁铁，短时通电；后一种配用单线圈电磁铁，可以长期通电工作。DK-2 型电磁空气阀原理见图 5-3-20。主阀配有两个电磁操作阀：充气阀和排气阀。当充气阀电磁铁通电时，其衔铁带动充气阀杆向上，使下部进气口打开，由气源来的压缩空气即进入主阀上腔，推动主阀活塞向下移，堵塞 A 道排气口，围带进行充气；当排气阀电磁铁通电时，其衔铁向下，打开排气阀，主阀上腔进行排气，主阀活塞在弹簧作用下向上移，使 A 道与排气口相通，围带进行排气，同时气源 P 被关闭。

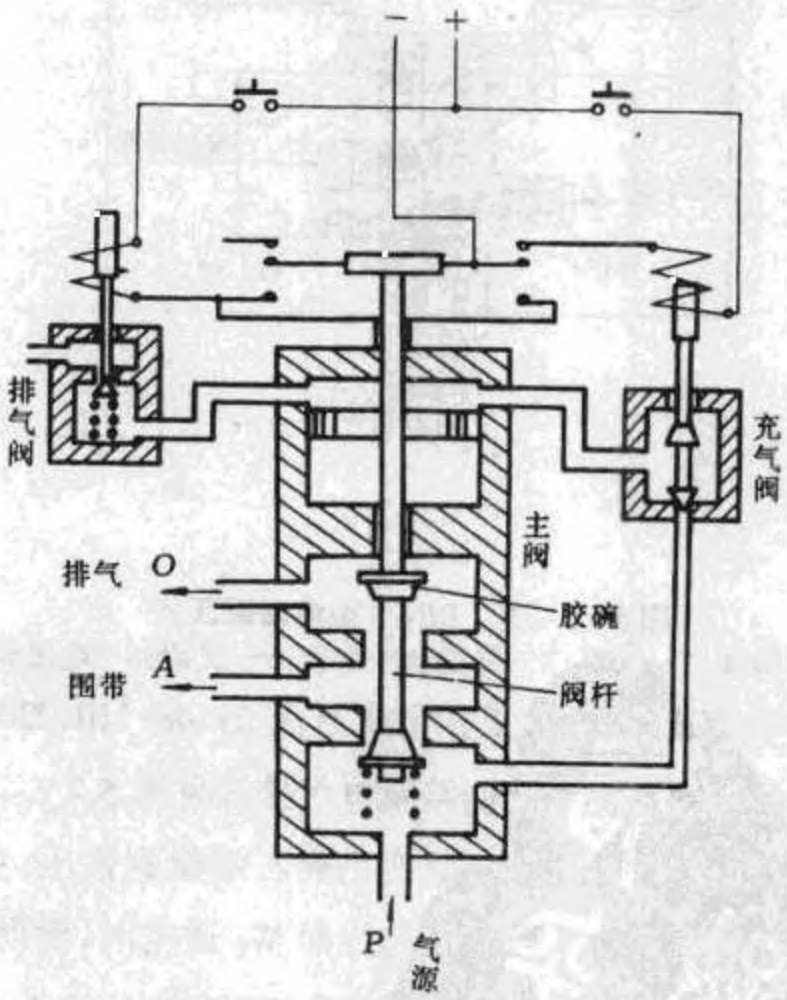


图 5-3-20　DK-2 型电磁空气阀原理图

(二)电磁配压阀 DP

电磁配压阀是一种由电磁铁控制的滑阀，主要用于液压系统的油管路上，借以变换被

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

控液压元件的油流方向，实现远方控制。在水力机械自动化中，电磁配压阀一般与液压阀、油阀组合使用。常用电磁配压阀有 DP－8、DP－8/7 等地号。DP－8 型电磁配压阀结构见图 5－3－21。电磁配压阀与液压阀组合使用原理见图 5－3－22，利用双线圈电磁铁驱动，切换滑阀油路；利用压力油去控制液压阀 SF 的开启或关闭。

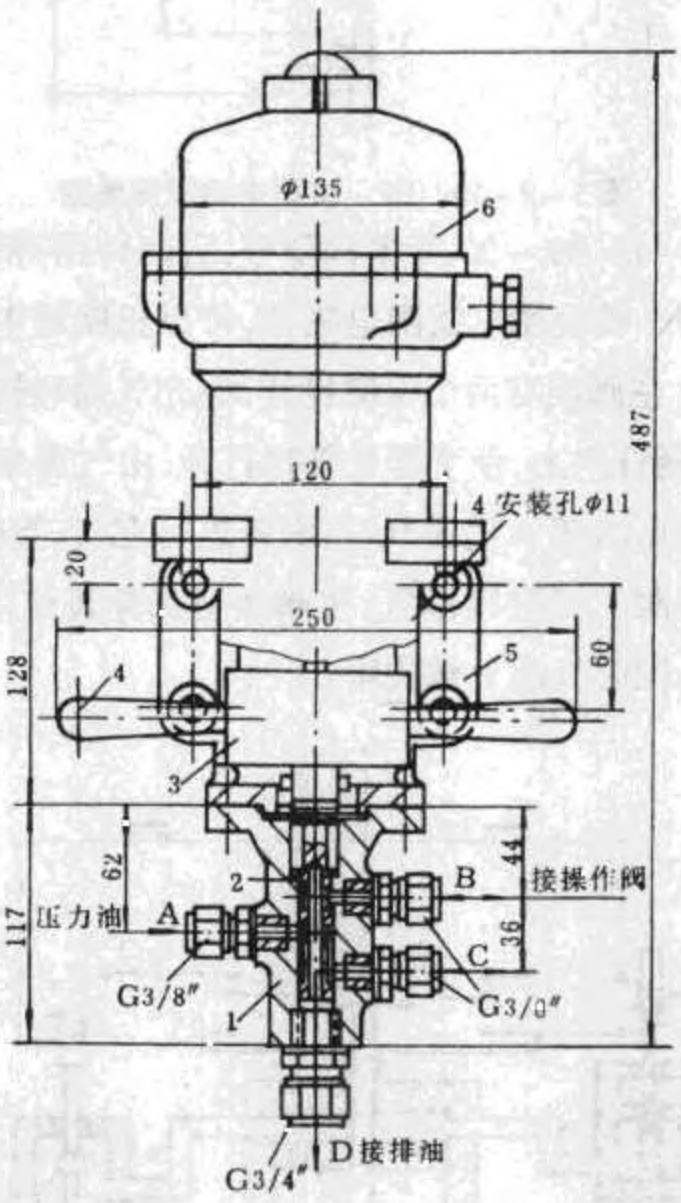


图 5－3－21 DP－8 型电磁配压阀

1—阀体；2—阀塞；3—重块；4—手柄；5—支架；6—电磁铁

DP_2 型是一种小功率电磁配压阀，工作电压直流 24、48、110、220V，消耗功率 20W，阀型二位四通，可用于弱电控制系统。其油路及电气接线见图 5－2－23 工作原理为：油路“O”孔与回油管通，压力油由“P”孔进入，并使主阀右端受到常压；主阀左端受辅助阀控制；辅助闸由左右两个电磁铁驱动。当电磁铁线圈 W_1 通电时，辅助闸向右移，主闸左端与压力油相通，因左端活塞受压面积与右端活塞受压面积之比为 2:1，故当左端接通压力油时，就把主活塞推向右端，使“P”孔与“B”孔通，“A”孔与“O”孔回油通；当电磁铁线圈 W_2 通电时，则辅助阀向左移，进行相反切换。电磁铁线圈都是短时通电的，由 FK 自动切断操作回路。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

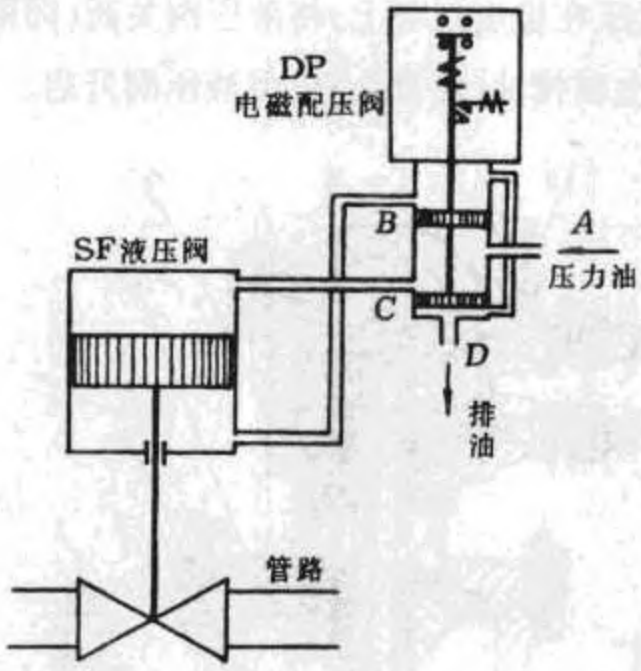


图 5－3－22　电磁配压阀与液压阀组合使用示意图

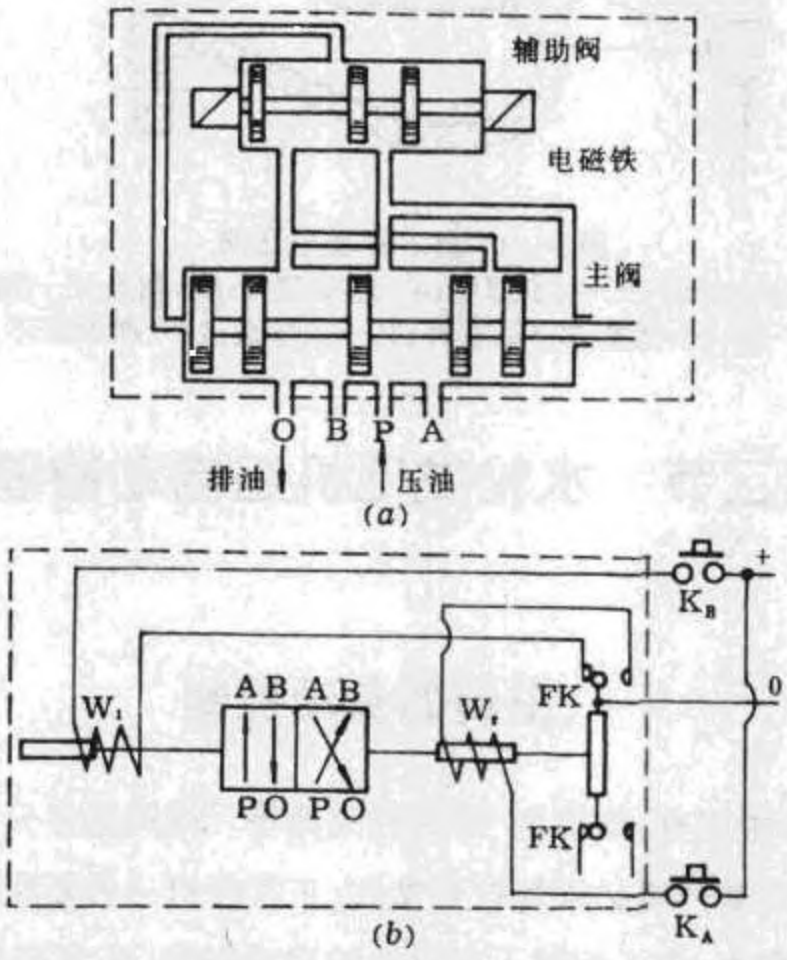


图 5－3－23　DP_2 电磁配压阀

(a)油路;(b)电气接线

(三)液压阀 SF

液压阀是使用油压操作的截止阀,受电磁配压阀的控制,适用于压力小于 $10kg/cm^2$ 的水、气系统管路上。

SF 型液压阀结构见图 5－3－24。阀盘 5 与活塞杆 9 相连;活塞缸 6 左侧上、下两油管与 DP 型电磁配压阀的两油管相连。当压力油进入活塞缸上腔时,下腔排油,活塞下

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

移。通过活塞杆使阀盘5紧压在橡皮封环上，将液压阀关阀(即图示位置)。反之，当活塞缸下腔与压力油相通时，则上腔排油，活塞上移，将液压阀开启。

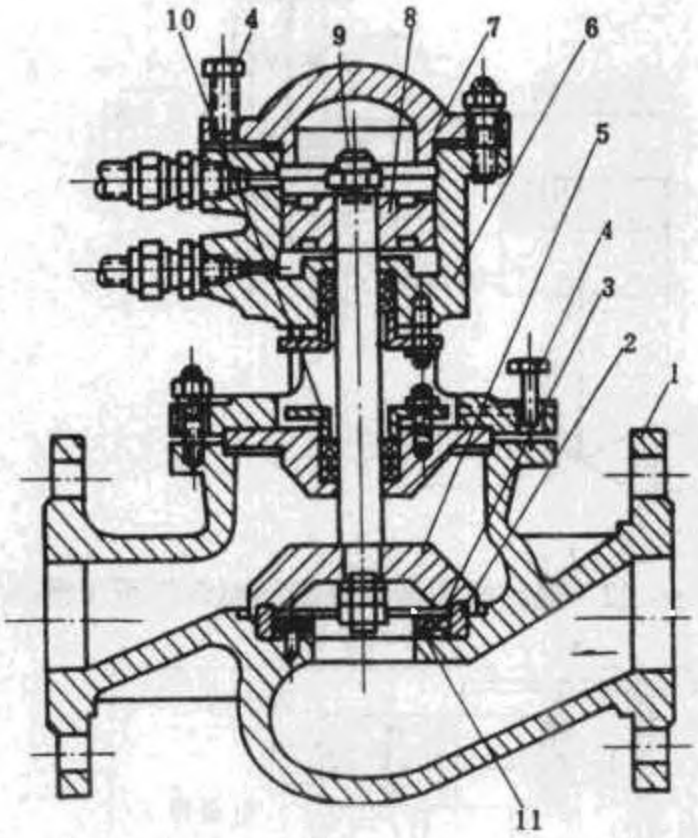


图5-3-24 SF型液压阀

1—壳体；2—封环；3—固定螺丝；4—起动螺丝；5—阀盘；6—活塞缸；7—盖；8—活塞；9—活塞杆；10—压垫盖；11—锥形压环

第二节 水轮发电机组自动控制

一、主阀的自动控制

水电站广泛采用的主阀有：蝴蝶阀、球阀和闸阀等。球阀通常只用于冲击式水轮机。

根据开停机程序，正常开机必须先打开主阀；正常停机一般要在关闭导水叶后也关闭主阀(如果导水叶关闭紧密，为了缩短下次机组的启动时间，正常停机也可不关主阀)；当机组过速保护动作或事故停机过程中导水叶剪断销剪断时，则要紧急停机开关闭主阀。由此可知，主阀的操作与机组操作关系极为密切。故主阀的自动控制必须纳入机组自动控制的过程之内，作为程序控制的一个环节。

在检修或试验时，主阀也可能单独操作，故主阀的控制必须考虑随主机联动和手动两种可能性。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(一)液压蝴蝶阀的自动控制

蝴蝶阀是用得最普遍的一种主阀,装在机组蜗壳前,作为事故和检修之用。

中小型水电站使用的蝴蝶阀有液压和电动传动两种。液压传动蝴蝶阀的机械系统见图 5-3-25,,主要元件有电磁配压阀 51DP、52DP、电磁空气阀 51DKF、液压阀 YP、四通滑阀 HF、油阀 YF、压力信号器 51YLX、52YLX 和压力表、信号灯、按钮等,集中装于蝴蝶阀控制柜内,用管道与蝴蝶阀的接力器、旁通间和锁锭相连接。

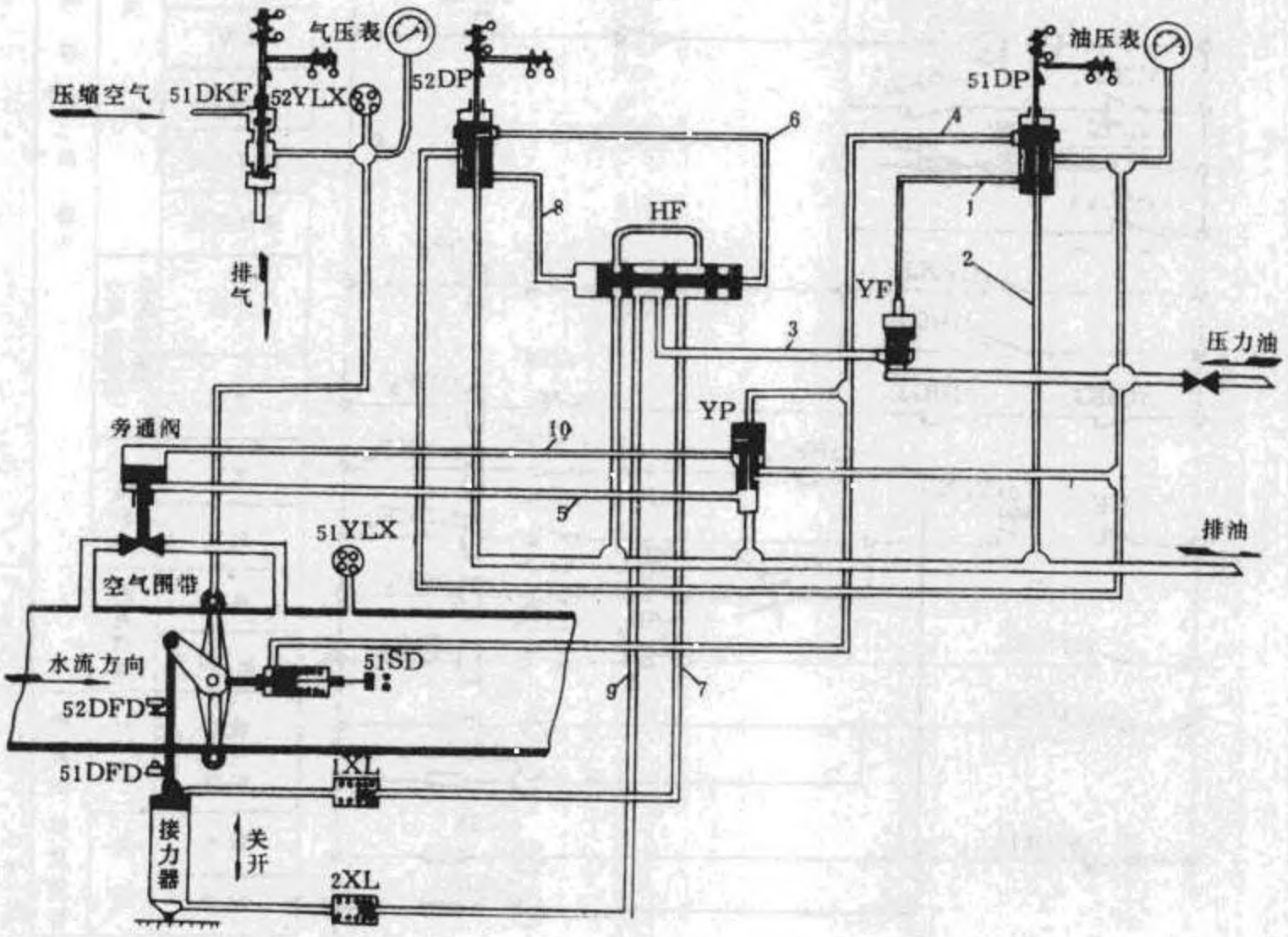
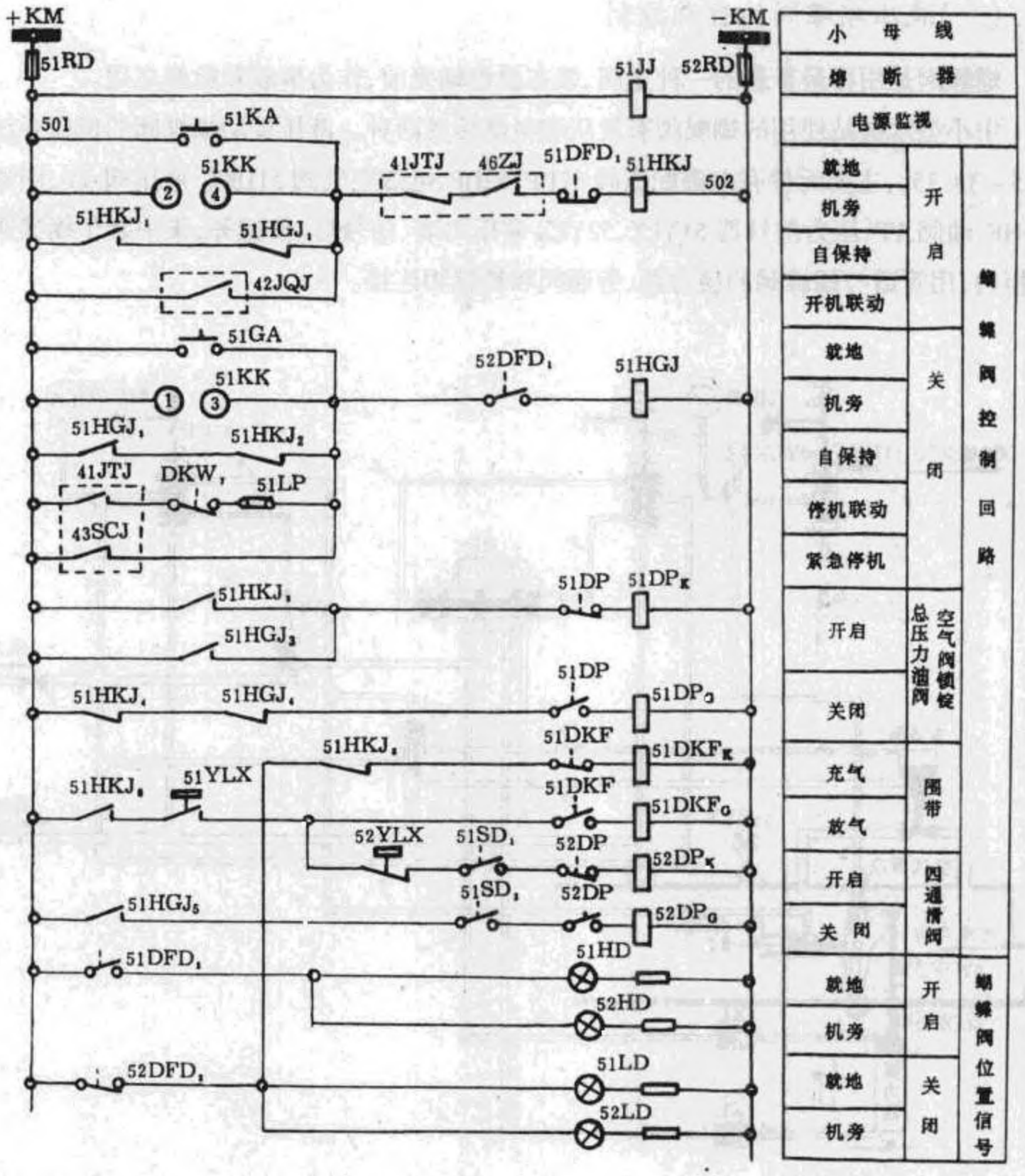


图 5-3-25　蝴蝶阀液压机械系统

蝴蝶阀自动控制电气接线见图 5-3-26。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网



旁通阀51PFD接点动作图表

位置 / 接点	全关		全开	回路号
51PFD₁	▬			
51PFD₂			▬	

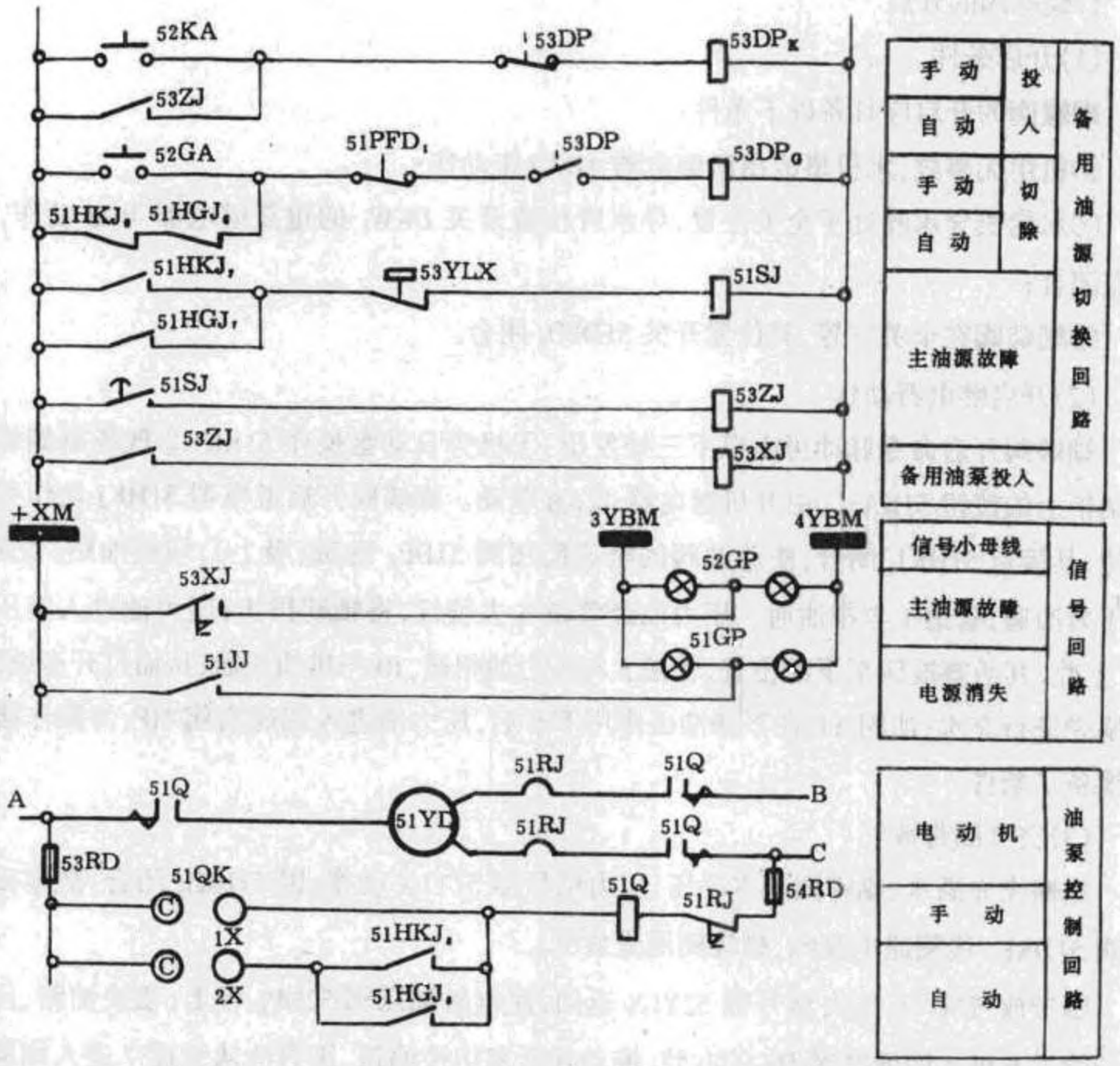
锁锭51SD接点动作图表

位置 / 接点	打开		回路号
51SD		▬	
51SD		▬	

图5-3-26 蝴蝶阀

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网



蝴蝶阀接点51DFD动作图表

位置 / 接点	全关		全开	回路号
51DFD1	▬	▬		
51DFD2			▬	
51DFD3			▬	
52DFD1		▬	▬	
52DFD2	▬			

压力信号器51YLX接点动作图表

位置 / 接点	平压		回路号
51YLX		▬	

围带压力信号器52YLX接点动作图表

位置 / 接点	大气压		回路号
52YLX	▬		

自动控制接线图

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

1.蝴蝶阀的开启

(1)开启条件

蝴蝶阀的开启应具备以下条件：

①机组无事故，水机事故出口继电器 41SCJ 未动作；

②水轮机导水叶处于全关位置，导水叶位置开关 DKW_1 的重复继电器 46ZJ 动作，其接点闭合；

③蝴蝶阀在全关位置，其位置开关 $51DFD_1$ 闭合。

(2)开启继电器动作

蝴蝶阀开启命令脉冲可由以下三处发出：①机旁自动盘操作 51KK；②现场揪蝴蝶阀控制柜上的按钮 51KA；③由开机继电器 42JQJ 联动。蝴蝶阀开启继电器 51HKJ 动作并自保持，其接点 $51HKJ_3$ 闭合，使总油阀的电磁配压阀 $51DP_K$ 励磁(吸上)，切换油路，管道 4 与压力油通，管道 1 与排油通。压力油经管道 4 去锁锭，将锁锭拔出；压力油进入液压阀 YP 上腔，其活塞被压至下部位置，管道 5 与压力油相通，10 与排油相通，从而打开旁通阀，对蜗壳进行充水；油阀 YF 在下部油压作用下开启，压力油进入四通滑阀 HF，为操作接力器准备了条件。

(3)空气围带放气

在蜗壳充满水，蝴蝶阀基本平压，压力信号器 51YLX 动作，因 $51HKJ_6$ 闭合，故电磁空气阀 $51DKF_G$ 线圈通电复归，蝴蝶阀围带放气。

围带放气完毕，压力信号器 52YLX 返回，使电磁配压阀 $52DP_K$ 吸上，切换油路，压力油经管道 6 进入四通滑阀 HF 的右腔，推动其活塞切换油路，压力油从管道 7 进入蝴蝶阀接力器开启端，将蝴蝶阀打开。

(4)开启操作结束

蝴蝶阀全开后，其位置开关 $51DFD_2$ 接通，全开位置信号灯 51HD、52HD 亮；同时 $51DFD_1$ 断开，使开启继电器 51HKJ 复归，并通过 $51HKJ_4$ 使 51DP 复归，切换油路，锁键在本身弹簧力作用下投入，液压阀 YP 在下部压力油作用下活塞上移，压力油将旁通问关闭，油阀 YF 在差压作用下关闭，切断了油源，整个开启操作就此结束。

蝴蝶阀开启操作程序见图 5－3－27。

2.蝴蝶阀的关闭

(1)关闭继电器动作

蝴蝶阀关闭命令脉冲可由以下四处发出：①在机旁盘操作 51KK；②在蝴蝶阀控制柜按按钮 51GA；③由停机继电器 41JTJ 联动；④当机组事故且调速器失灵时，由紧急停机继电器 43SCJ 发出。蝴蝶阀关闭继电器 51HGJ 动作并自保持；其接点 $51HGJ_3$ 闭合，使电磁

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

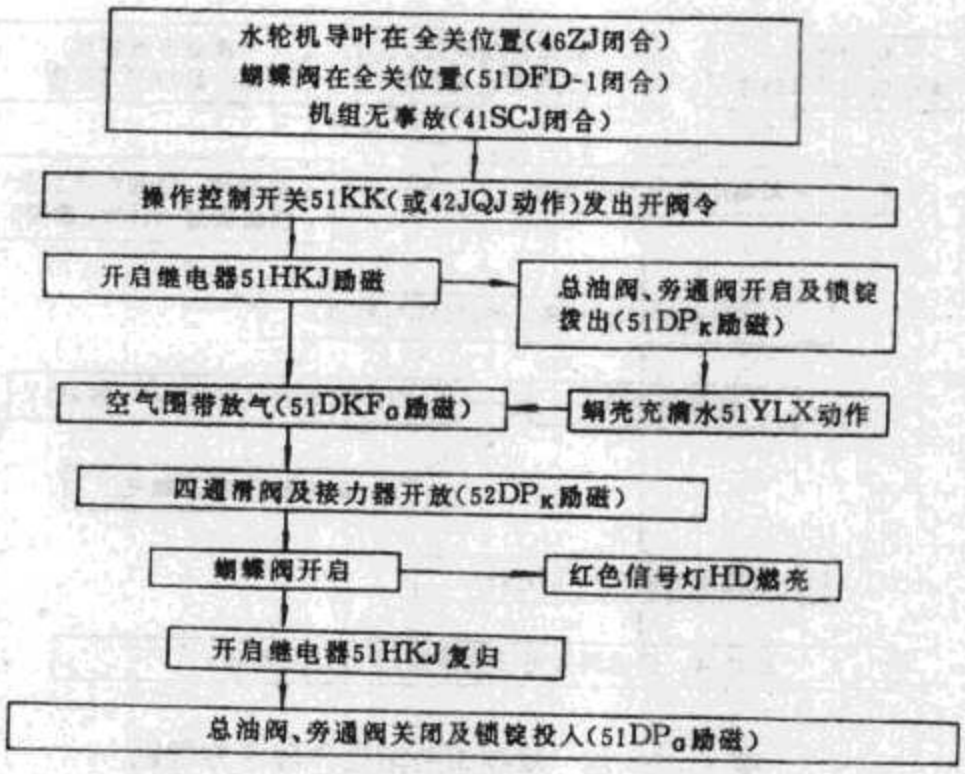


图 5-3-27 蝴蝶阀开启操作程序方框图

配压阀 $51DP_K$ 吸上，压力油将锁锭拔出，并将液压阀 YP 压下，旁通阀打开，油阀 YF 开启，以上过程和开启操作相同；接点 $51HGJ_5$ 与锁锭位置开关接点 $51SD_2$ 闭合，使电磁配压阀 52DPG 励磁，切换油路，压力油进入四通滑阀 HF 左腔，HF 活塞向有移，压力油进入蝴蝶阀接力器的关闭端，将蝴蝶阀关闭。

(2)关闭操作结束

当蝴蝶阀全关，其位置接点 52DFD—1 断开，使关闭继电器复归；另一位置接点 52DFD—2 闭合，全关位置信号灯 51LD、52LD 亮，同时使 $51DKF_K$ 励磁而吸上，空气围带充气。51HGJ 复归后，接点 $51HGJ_4$ 闭合，使 $51DP_G$ 励磁而复归，锁锭投入，旁通阀关闭，油阀关闭切断压力油路。至此，关闭过程全部完成。

蝴蝶阀关闭操作程序见图 5-3-28。

3.控制接线几点说明

在图 5-3-26 蝴蝶阀自动控制接线中，考虑了以下的运行情况和要求。

(1)开停机比较频繁的机组，如果导水叶漏水不大，正常停机一般不关蝴蝶阀，可将停机联动回路的连接片 51LP 断开。

(2)围带充气回路闭锁接点 $51HKJ_5$ 的作用是：①使开阀过程中不能充气；②防止电磁空气阀 51DKF 发生跳跃现象。因为在蝴蝶阀欲开未开之际，电磁空气阀 $51DKF_K$ 和 $51DKF_G$ 的工作状态是互相矛盾的，蝴蝶阀接到开启命令，$51DKF_G$ 励磁，围带排气。这时、$51DKF_G$ 线圈电源即为本身串联接点所切断，$51DKF_G$ 前的串联接点即行接通，为下一轮

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

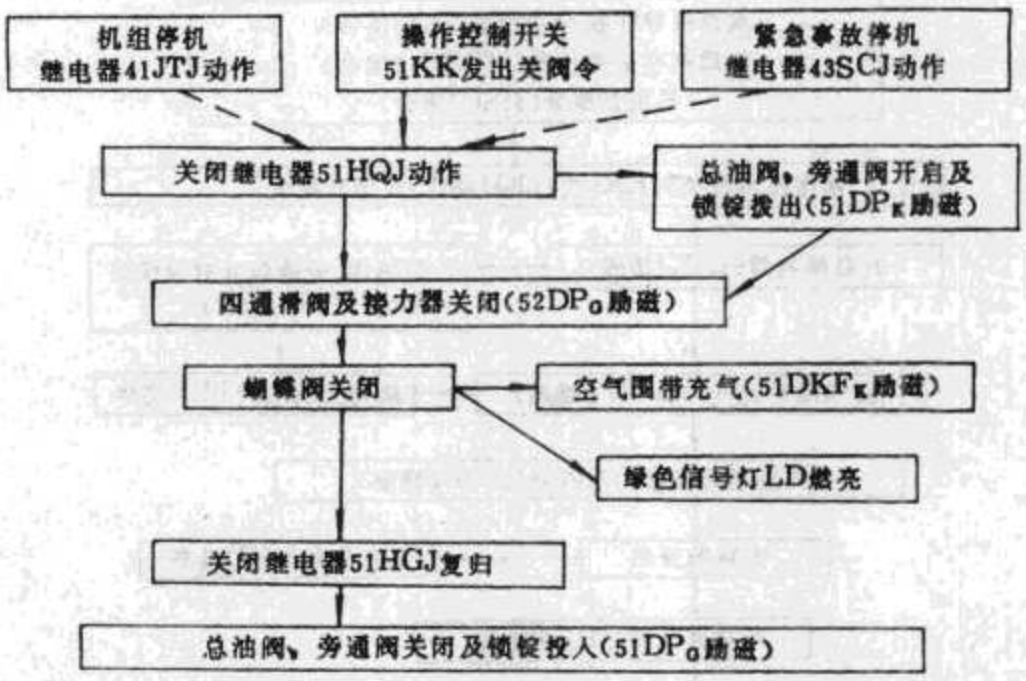


图 5－3－28 蝴蝶阀关闭操作程序方框图

51DKF 关闭作准备。但在围带排气过程中，蝴蝶阀位置接点 $52DFD_2$ 尚在接通位置，故在 $51DKF_K$ 前串联接点闭合时，$51DKF_K$ 马下励磁，使 51DKF 关闭，造成误动作，故必须用 $51HKJ_5$ 接点加以闭锁。

(3)在开启和关闭继电器的自保持回路中交叉串接相异的继电器接点，目的在于开启过程中可以关闭，关闭过程中可以开启，比较灵活。

(4)蝴蝶阀操作用压力油源，有三种取得方式：①每台蝴蝶阀设一台工作油泵，由主机压油装置作为备用；②每台蝴蝶阀设两台油泵，一为工作，另一为备用；③几台蝴蝶阀共用一台油压装置。

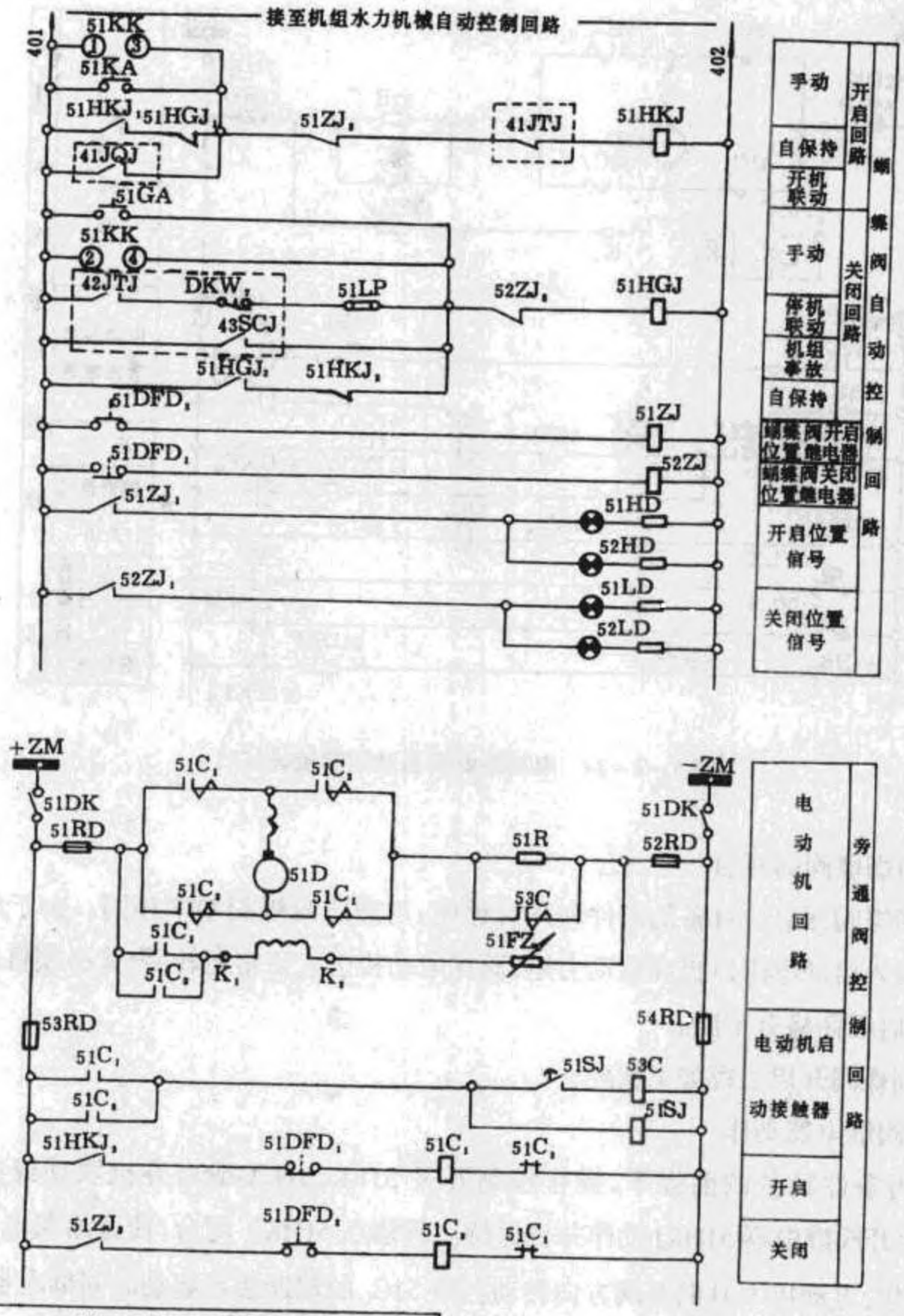
图 5－3－26 为设有一台工作油泵，另有备用油源的情况。油泵电动机可以手动或自动操作，用 51QK 切换开关选择操作方式。51QK 切至“自动”位置时，油泵电动机在蝴蝶阀开启或关闭时自动投入，连续使用。当工作油泵的主油源故障，油压消失时，监视油压正常的压力信号器 53YLX 常闭接点复归，启动时间继电器 51Q，经一定延时如压力仍不恢复，时间继电器的延时接点闭合，中间继电器 53ZJ 动作，给出主油源故障信号，并使电磁配压阀 53DPK 励磁，切断主油源，接通备用油源，一直到蝴蝶阀操作过程完成，并且旁通阀已关闭，其位置接点 $51PFD_1$ 接通，才由 $51HKJ_2$、$51HGJ_2$ 和 $51PFD_1$ 接点共同接通 $53DP_G$ 回路，将备用油源切断。

(二)电动蝴蝶阀自动控制

电动蝴蝶阀采用电动机驱动，控制方式比较简单，价格也较便宜，在小水电站中广泛应用。根据电动机型式不同，有交流和直流两种控制接线。现介绍直流电动机驱动的电动蝴蝶阀控制接线，见图 5－3－29。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网



蝴蝶阀端接点51DFD动作图表

接点＼位置	全关	全开	回路号
51DFD1	———		401－
51DFD2		———	401-
51DFD3		———	

旁通阀端接点51PFD动作图表

接点＼位置	全关	全开	回路号
51PFD1	———	———	
51PFD2	———	———	

图 5－3－29 电动蝴蝶阀自动控制接线(一)

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

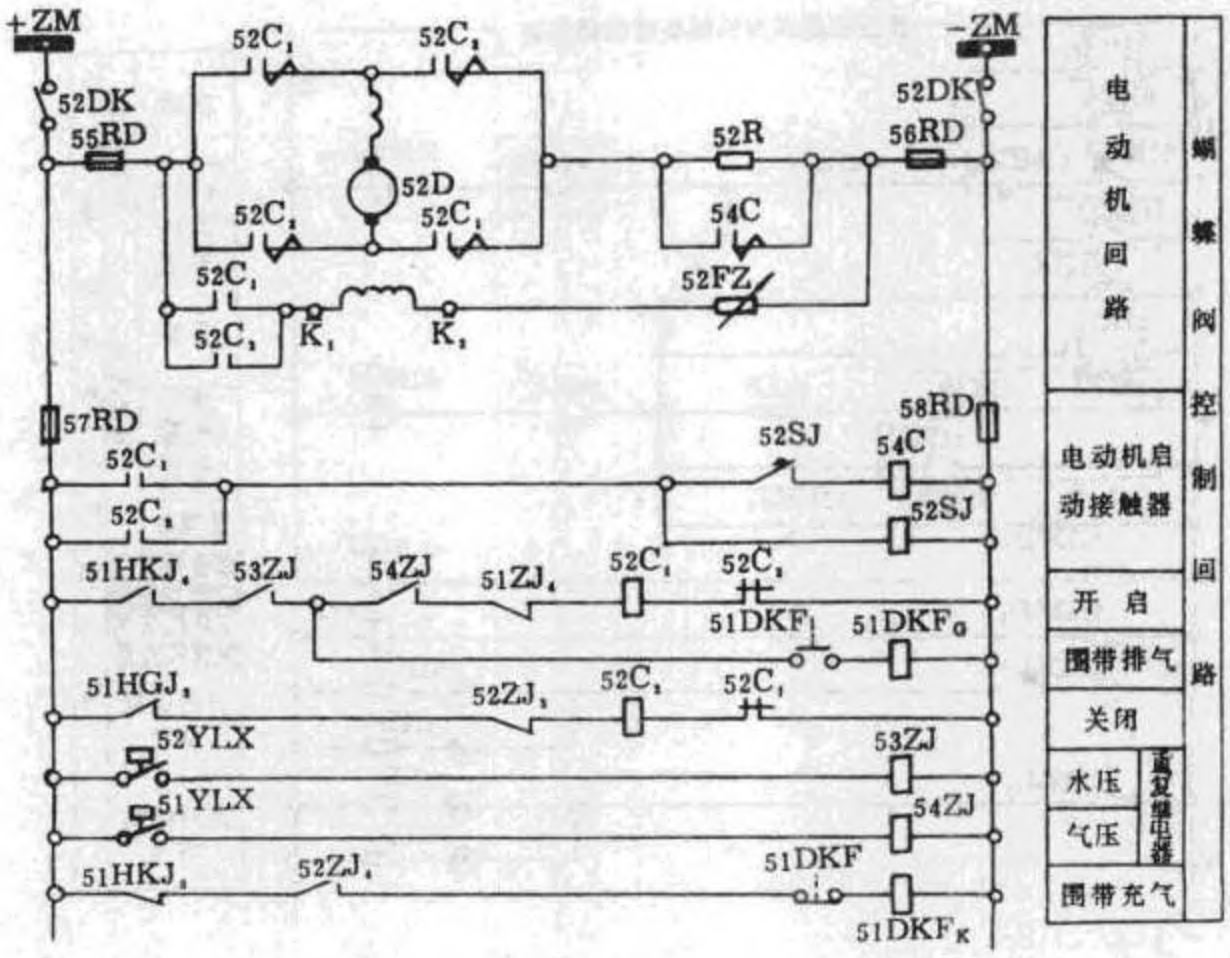


图 5-3-29 电动蝴蝶阀自动控制接线(二)

1.电动蝴蝶阀的开启

电动蝴蝶阀开启应具备的条件和开启程序,与液压蝴蝶阀基本相同。由于电动机启动时必须投入启动电阻以提高启动力矩,而在电动机进入正常运转后,又必须将启动电阻撤出,故开启程序略有不同。

电动蝴蝶阀开启过程如下所述。

(1)开阀继电器动作

在开阀条件具备的前提下,操作控制开关 51KK、51KA 或由开机联动继电器启动(41JQJ),使开阀继电器 51HKJ 动作并自保持。其接点 $51HKJ_3$ 闭合,使旁通阀电动机接触器 $51C_1$ 动作,电动机 51D 向开阀方向转动。由 $51C_1$ 的辅助接点起动时间继电器 51SJ;当整定延时达到,就使接触器 53C 动作,将启动电阻 51R 短接,电动机转入正常运行状态,直至旁通阀全开,蜗壳进行充水。在旁通阀全开后,即由其端开关 $51PFD_1$ 切断 $51C_1$ 电源,电动机 51D 停转,同时使 51SJ、53C 复归。

(2)围带排气

开阀继电器另一接点 $51HKJ_4$ 闭合,接通围带排气电磁空气阀脱扣线圈 $51DKFG_6$ 和蝴蝶阀电动机接触器 $52C_1$ 回路,为围带排气和开阀做好准备。待蜗壳充水完毕,蝴蝶阀平压,压力信号器 52YLX 动作,通过其重复继电器 53ZJ 接点使 $51DKF_G$ 励磁,围带开始排气。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

围带排气完毕，监视排气状况的压力信号器 51YLX 接点闭合，通过其重复继电器 54ZJ 接点使 $52C_1$ 起动（蝴蝶阀处于关闭位置，$51ZJ_4$ 闭合；关阀接触器 $52C_2$ 未动作，其辅助接点闭合为条件），电动机 52D 向开阀方向转动。

(3)短接起动电阻

在 $52C_1$ 动作时，其辅助开关接点起动时间继电器 51SJ，经整定延时使接触器 54C 动作，短接起动电阻 52R，电动机 52D 进入正常运转状态，直至蝴蝶阀全开。

(4)全开状态

蝴蝶阀到达全开位置时，其端开关 $51DFD_2$ 的重复继电器 51ZJ 动作。51ZJ 接点完成以下任务：①$51ZJ_1$ 点亮开阀位置信号灯 51HD、52HD；②$52ZJ_2$ 切断 51HKJ 回路，使 51HKJ 复归，$52C_1$ 同时复归；③$51ZJ_2$ 使旁通阀电动机关闭接触器 $51C_2$ 动作，电动机 51D 向关闭方向转动。由 $51C_2$ 辅助开关接点起动时间继电器 51SJ，经整定延时短接 51R，51D 正常运转至旁通阀全关，即由旁通阀全关终端开关 $51PFD_2$ 切断 $51C_2$ 电源，电动机停转，同时 51SJ、53C 复归。至此，蝴蝶阀开启过程全部结束。

2.电动蝴蝶阀的关闭

(1)关同继电器起动

蝴蝶阀关闭命令脉冲可由控制开关 51KK、51GA、停机联动继电器 41JTJ 和紧急事故停机继电器 43SCJ 等发出。关阀继电器 51HGJ 动作后，其接点完成以下任务：①$51HGJ_2$ 用于自保持；②$51HGJ_1$ 闭锁开阀回路，实现开阀过程中关阀；③$51HGJ_3$ 使关阀接触器 $52C_2$ 动作，蝴蝶阀电动机 52D 向关闭方向转动。

(2)短接启动电阻

在 $52C_2$ 动作时，其辅助开关接点起动时间继电器 52SJ，经整定延时使接触器 54C 动作，短接启动电阻 52R，电动机进入正常运转状态，直至蝴蝶阀全关。

(3)全关状态

蝴蝶阀全关后，其位置终端开关 $51DFD_1$ 接通，起动重复继电器 52ZJ，由其接点完成以下任务：①$52ZJ_1$ 点亮关阀位置信号灯 51LD、52LD；②$52ZJ_2$ 使 51HGJ 断电复归；③$52ZJ_3$ 使 $52C_2$ 断电复归，在 $52C_2$ 复归的同时，使 52SJ 和 54C 相继复归；④$52ZJ_4$ 使电磁空气阀 $51DKF_K$ 通电开启，围带充气，$51DKF_K$ 由电磁空气阀本身接点切断电源。至此，关阀过程结束。

3.其它

在图 5－3－29 中，旁通阀电动机和主阀电动机磁极线圈均分别串接磁场变阻器 51FZ、52FZ，其作用是改变电动机转速，调节旁通阀和蝴蝶阀的启闭时间。

在容量更小的机组上使用的电动蝴蝶阀，常用蜗轮蜗杆传动，以交流电动机驱动，旁

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

通阀则手动操作，控制接线更为简单。

(三)快速闸门的自动控制

水电站如采用单元输水管，且水管长度较短，一般都在压力管进口处装设快速闸门，不再在机前装设主阀。快速闸门是指关闭速度快，以便压力管或机组紧急事故时能迅速截断水流，通常要求关闭速度为 2min。快速闸门广泛采用电力卷扬控制方式，分直流操作和交流操作两种接线，具体接线大同小异，下边介绍一种交流操作的控制接线，见图 5-3-30 所示。

1.闸门的开启

(1)开启条件

闸门开启必须具备以下条件：①闸门处于关闭或充水以下开度位置，其行程开关 51JK、53JK 触点闭合；②水轮机导水叶在全关位置，DKW_1 的重复继电器 46ZJ 接点闭合；③关闭闸门继电器 5ZZJ 未动作；④给上操作电源，BK 开关投入。这时，处于闸门开启准备状态。

(2)闸门开启继电器动作

闸门开启命令脉冲可由以下三处发出：①在中控室操作控制开关 51KK；②在现场按按钮 51KA；③开机继电器 41JQJ 接点联动。闸门开启继电器 51ZJ 动作，其接点完成以下任务：①$51ZJ_1$ 自保持；②$51ZJ_2$ 接通松开制动间接触器 53Q，使制动闸线圈 DZT 接入交流电，制动问松开；③$51ZJ_3$ 使磁力起动器 $51Q_K$ 励磁，其主触头闭合，待制动闸松开联动接点 DZT 闭合，闸门电动机即向开启方向转动；④$51ZJ_4$ 接点闭合，如制动未松开，则发警报信号。

(3)充水开度状态

闸门从关闭提升到充水高度(一般提起 10cm 左右)的过程中，红、绿灯同时点亮。当闸门上升至充水高度，行程开关 51JK 断开，开闸继电器 51ZJ 断电复归，电动机停转，制动闸断电投入制动，闸门停留在充水开度。

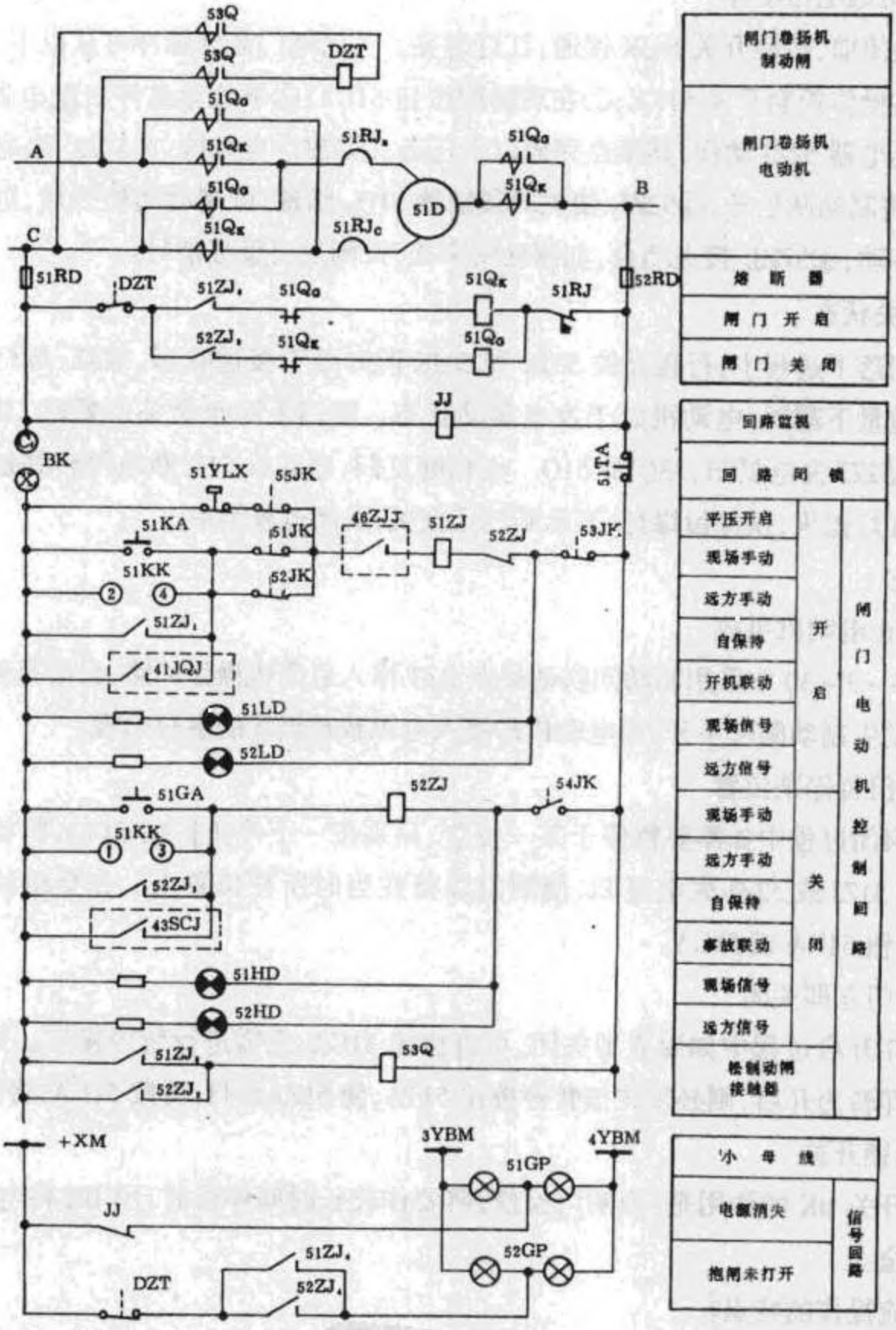
(4)全开状态

当压力管充满水，闸门前后平压，压力信号器 51YLX 接点闭合，此时行程开关 55JK 接点也已闭合，开闸继电器 51ZJ 又再次动作，闸门即从充水开度继续提升直至全开，其行程开关 53JK 接点断开，51ZJ 复归，绿色信号灯 51LD、52LD 熄灭，红色信号灯 51HD、52HH 则一直点亮，表示闸门处于全开位置。闸门从充水开度上升时，虽 55JK 半途已断开，但因 52JK 接点已先闭合，故可借 $51ZJ_1$ 自保持回路完成全开过程。

2.闸门的关闭

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网



快速闸门行程开关动作图表

位置 / 接点号	全关	充水开度	全开	回路号
51JK				
52JK				
53JK				
54JK				
55JK				

图 5－3－30　快速闸门自动控制接线(交流操作)

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(1)关闸继电器动作

闸门关闭前,行程开关 54JK 接通,红灯燃亮。关闭闸门命令脉冲可从以下三处发出:①在中控室操作控制开关 51KK;②在现场按按钮 51GA;③事故紧急停机继电器 43SCJ 用动。关闸继电器 52ZJ 动作,其接点完成以下任务:①$52ZJ_1$ 自保持;②$52ZJ_2$ 接通制动间接触器 53Q,将制动闸松开;③$52ZJ_3$ 使关间接触器 $51Q_G$ 励磁,待制动闸松开后,电动机即向关闭方向转动;④$5ZZJ_4$ 接点闭合,如制动闸未松开,则发出警报信号。

(2)全关状态

在闸门落下过程中,行程开关 53JK 和 54JK 同时处于接通状态,故红、绿灯均亮。闸门靠自身重量下落时,电动机处于发电制动状态。闸门下降至全关位置时,其行程开关 54JK 断开,52ZJ 失电复归,53Q 及 51Q。也相继复归,电动机 51D 断电停转并被制动闸制动。这时红灯熄灭,仅保留绿灯,表示闸门已全关,关闭过程结束。

3、其它

(1)防止电动机事故

在图 5-3-30 中采用制动间联动接点 DZT 串入启闭机操作回路,目的是防止电源电压过低时发生制动闸松不开,而电动机却接入电源致被烧坏的事故出现。

(2)闸门暂停某位置

闸门启闭过程中如需要暂停于某一位置,只须按一下停止按钮 51TA,将操作电源切断,即可使 51ZJ 或 52ZJ 失电复归,使闸门停留在当时所在位置上。如要继续提升或降下,可按按钮 51KA 或 51GA。

(3)闸门立即关闭

闸门在开启过程中如要立即关闭,可直接接 51GA,无需进行暂停操作。如在关闭过程中要立即转为开启,则必须先按暂停按钮 51TA,使 51ZJ 复归,再按 51KA,将闸门开启。

(4)闭锁开关

闭锁开关 BK 的作用是:当闸门检修,需要作较长时间停留时,用 BK 将电源切断,检修较为安全。

4.直流操作的特点

直流操作的快速闸门自动控制接线,原理与上述基本相同,电动机仍用交流,操作电源改用直流 110V 或 220V,元件参数应按所用电压选择。

二、水轮发电机组的自动化

(一)发电机润滑、冷却及制动系统自动化

1.发电机润滑系统自动化

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(1)润滑系统的作用

悬式水轮发电机的润滑和冷却系统见图 5－3－31。推力轴承和上导轴承共用一个油槽和冷却器，下导轴承置于另一个油槽内。推力轴承承受整个水轮发电机组旋转部分的重量和沿轴向的水推力；导轴承则承受转子机械的不平衡和转子偏心引起的单边磁拉力。在机组运行时，必须在轴承磨擦面建立油膜，并将轴承磨擦损耗产生的热量及时带走，才能保证机组长时间安全运行。油槽中的透平油同时起润滑和冷却作用，借水冷却器将油内热量带走。

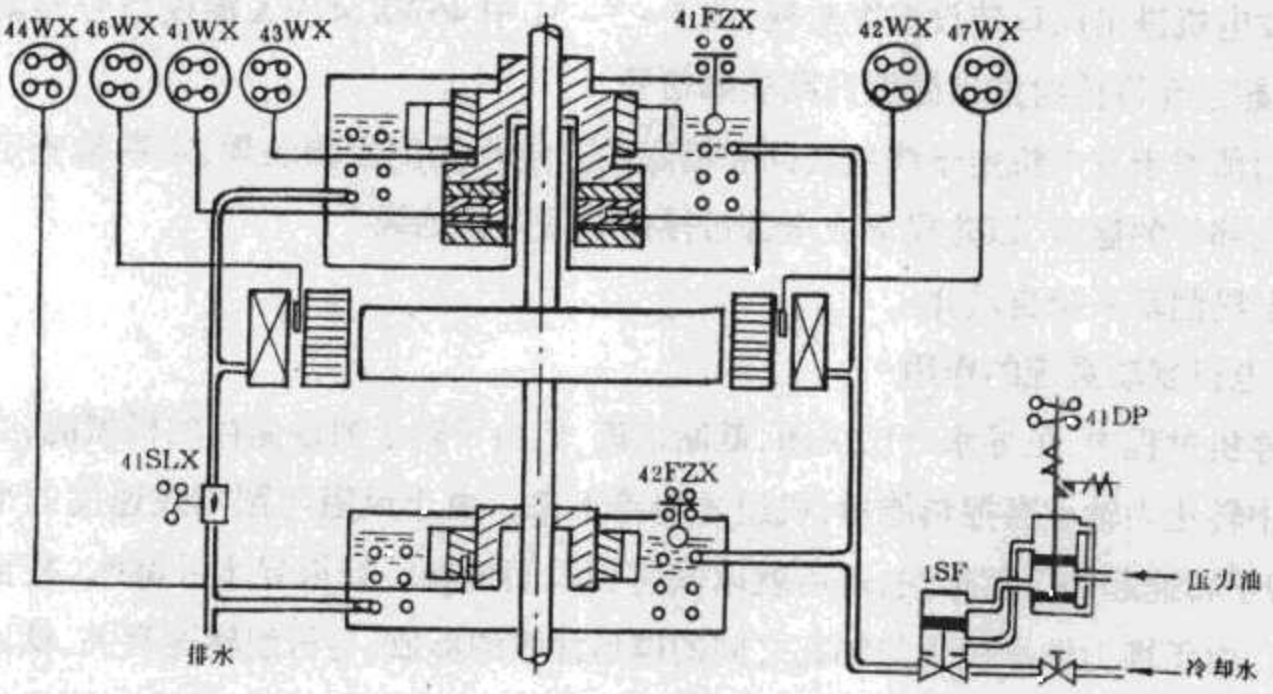


图 5－3－31　发电机的润滑与冷却系统

(2)发电机润滑系统自动化的要求

①为了保证推力轴承和导轴承良好润滑，油槽油位不能过高或过低，故装设液位信号器 41FZX、42FZX 分别监视上、下导油槽油位。

②为了保证油槽冷却器冷却水不中断，在冷却水出口装设液流信号器 41SLX，在冷却水中断时及时发出故障信号，在机组开机时打开冷却水电磁液压阀，在停机时将冷却水关闭以节省用水。

③由于某种原因，致使推力轴承或导轴承温度升高超过允许值 65℃时，通过温度信号器 41～44WX 发出故障信号；当温度急剧升高至危险值(一般为 70℃)时，发出事故信号并作用于事故停机。

2.发电机冷却系统自动化

(1)空冷水轮发电机冷却系统的作用

在空气冷却的水轮发电机，以空气作为冷却介质，带走水轮发电机定子和转子由于各种损耗而产生的热量。对于容量较小的机组，一般采用开敞式通风系统，冷空气由厂房进入，热空气排至厂外或厂房内；容量较大的机组则采用密封式自循环通风系统，借助空气

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

冷却器将热空气冷却后的冷空气，又继续进入发电机内部带走发电机热量。冷却器的正常工作对发电机安全运行影响极大，故应经常监视冷却器冷却水是否中断，监视进出口风温，并通过测温仪表了解发电机定子、转子各部位的温度，来衡量通风系统的效果。

(2)空冷水轮发电机冷却系统自动化的要求

①在开机时，应先将冷却水电磁液压阀打开，并用示流信号器对供水情况进行监视。一般情况下可与润滑系统油冷却器共用一个冷却水源及液流信号器。在停机时，为了节省用水，则将冷却水切除。

②在发电机进出风口装设温度监视，图 5－3－31 中 46WX、47WX 温度信号器就为此而设，风温超过允许值时发出温度升高故障信号。

③利用预埋于发电机定子绕组层间和槽底的热电阻温度检测装置，定期检查定子绕组及铁芯各部位的温度，以防局部或全部过热损坏发电机绝缘。

3.发电机制动系统自动化

(1)发电机制动系统的作用

机组停机过程中，虽导水叶已关闭，截断水流，但由于转子惯性储存的机械能，必须在空转过程中转化为轴承磨擦热能后，机组才能停下来。由于风阻与圆周线速度的平方成正比，故转子转速起初降落很快，随后就以低速长时间情转。如果导水叶漏水，甚至可能停不下来。由于推力轴承镜板与轴瓦之间的楔形油膜的形成，与机组转速有关，低速惰转会导致油膜破坏，而出现干磨擦，导致推力瓦烧毁事故。因此，在停机过程中，当机组转速下降到某一规定值时(一般取 35%额定转速)，在制动器内通入压缩空气，使机组制动。

(2)发电机制动系统自动化要求

立式水轮发电机制动系统见图 5－3－32 所示，其自动化要求如下。

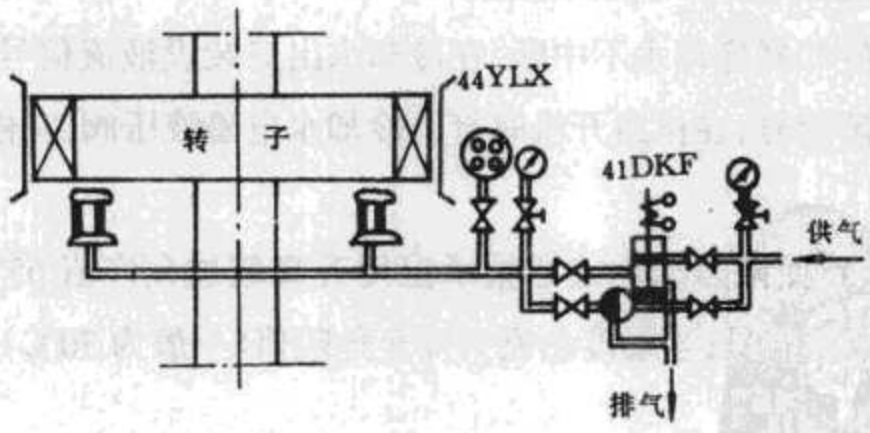


图 5－3－32 发电机制动系统

①在停机过程中，当转速下降至 35%n_e(n_e 为额定转速)时，打开电磁空气阀 41DKF，向制动器给气，使机组制动。候机组停转后再延长 30～40s，将制动器撤除。延长时间取消制动器的原因是考虑机组刚刚停转，油膜尚未消失，如导水叶有少量漏水，又可能使机组低速回转，如延缓 30～40s 取消制动，则可保证油膜消失、镜板与轴瓦磨擦增大，就不会

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

再次回转起来。

②在开机回路应将制动器已撤除作为开机条件之一，以避免在制动情况下开机造成机组损坏。监视制动器是否撤除，一般使用压力信号器 44YLX 监视给气管道是否存在气压。

(二)水轮机的润滑及排水系统自动化

1.水轮机的润滑系统自动化

(1)水润滑系统的作用

水轮机一般只有一个导轴承，有油润滑和水润滑两种型式。使用巴氏合金的导轴承用油润滑，其润滑系统与发电机润滑系统基本相同。使用橡胶轴承或尼龙轴承的，则用水润滑，如图 5－3－33 所示。橡胶轴承如中断润滑水数分钟，轴承就会烧毁，故应加强润滑水连续性监视，并应有两路水源，在主水源中断时能自动投入备用水源。

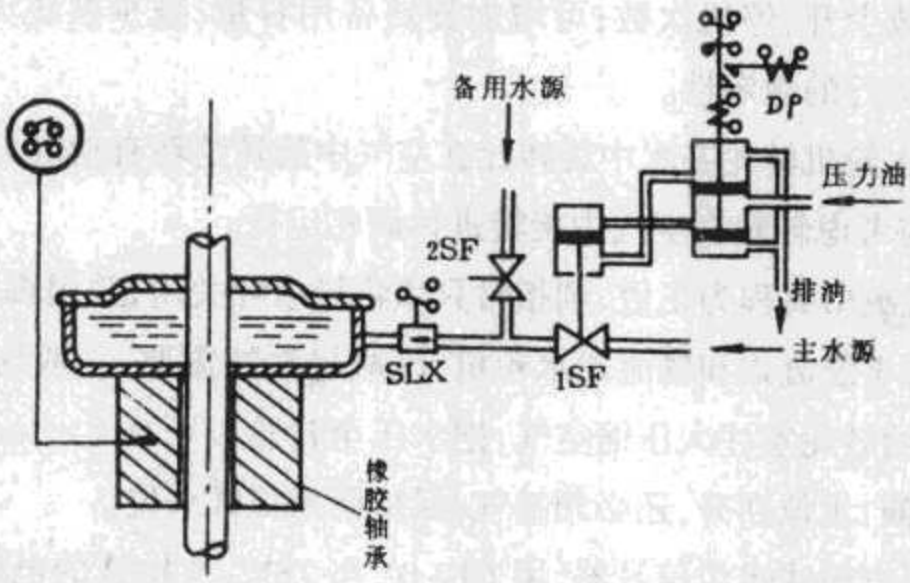


图 5－3－33　水导轴承润滑系统

(2)水润滑系统自动化要求：

①开机时，应通过开机继电器自动投入水导润滑水电磁阀 DP，示流信号器显示有水后方可开机；停机时，俟机组停转后再切断润滑水。

②当主水源中断时，自动投入备用水源，并发出故障信号；当备用润滑水投入一定时间(一般为 2～3s)后仍无水时，应作用于事故紧急停机。

③水导轴承温度过高时，通过温度信号器 WX 发出故障信号或事故停机。

2.水轮机顶盖排水自动化

(1)水轮机顶盖排水的作用

水轮机转动部分与静止部分因密封不严，常有压力水向外渗漏，在顶盖积存起来。在积水达到一定高度时，自动排水设施应将水排除。对于冲击式水轮机，因顶盖高程高于尾水，故可用管子自流排水。对于混流式及轴流式水轮机，则不能用自流方式，必须采用排

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

水泵或射流泵排水。一般采用两台水泵，或一台水泵一台射流泵。射流泵利用压力管的压力水抽水，需要消耗压力水。水头较高的水电站，用射流泵效率低不经济。在中低水头电站使用射流泵还是较好的，但水头低于10～15m时射流泵就不起作用，故更多的电站采用两台排水泵的排水方式。

(2)水轮机顶盖排水自动化要求

①在顶盖积水达到一定高度时，由液位信号器第一对接点起动主排水泵；

②如水位继续升高到备用水泵投入高度时，液位信号器第二对接点起动备用排水泵，并发出顶盖水位过高信号。

(三)水轮发电机组调相运行自动化

1.机组调相运行的作用

利用备用水轮发电机作调相运行是比较有利的，操作方便，运行灵活；对于担任系统调峰的机组，可以减少开、停机次数；可增加旋转备用容量；减少系统无功补偿电容器投资，提高电力系统运行的稳定性。

调相运行时，水轮机转轮在水中旋转比在空气中旋转消耗有功电力相差很大，后者只为前者的1/6，故应考虑转轮在空气中旋转进行调相运行。

冲击式水轮机吸出高程为正值，调相时只须将导水叶关闭，并用真空破坏阀向转轮室放入空气即可。对于混流式和轴流式水轮机，因减轻汽蚀需要，一般均采用负吸出高程，故在调相时，必须给转轮室注人压缩空气，把水压至转轮以下0.7～1m处，并经常监视水位变化，如空气泄漏，水位回升，还必须补气，保持调相正常水位。

水位监视多用电极式水位信号器，用DJ－02与ZSX－2构成的电极式水位信号器已在第五章介绍，参阅图5－3－34。

2.机组调相自动化要求

采用电极式水位信号器压水调相自动化的要求是：

①当发出调相命令，调相运行继电器动作，且转轮室水位超过电极JD_1（▽Ⅰ高程）时，水位信号器动作，打开调相压气阀42DP，把水位压至电极JD_2（▽Ⅱ高程）以下，水位信号器复归，停止压气。

②当机组由调相转为发电运行时，只须使调相运行继电器复归，将调相压水回路切除。

③为避免由于转轮室漏气，调相压气阀42DP频繁动作，有些电站还装设持续补气管路，见图5－3－34。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

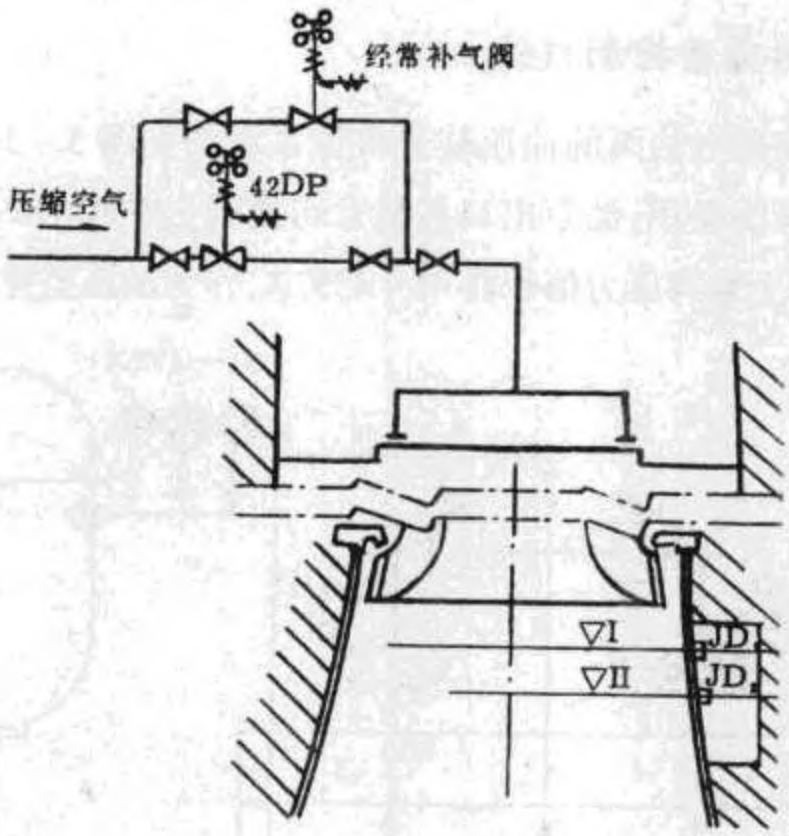


图 5－3－34　调相压气管路

第三节　机组辅助设备和全厂公用设备自动控制

一、油压装置自动控制

(一)油压装置自动化要求

油压装置是水轮机调节系统及液压阀的操作能源，必须经常保持压力正常，才能保证机组的正常运行，因此必须使油压装置的控制自动化。

对油压装置自动化的要求是：

1.当机组正常运行或发生事故时，能保证有足够的压力油来操作机组的导水叶，特别是厂用电消失情况下，应有一定的能源储备。为此，除选择适当的压油槽容量外，还必须有较完善的自动控制措施，来保证具有正常的工作油压。

2.机组不论在运行或停机状态，油压装置都应处于良好的准备工作状态，应自动保持规定的油压，不需要人工参与。

3.油压装置故障，应发出信号；在事故性压力降低时应作用于事故停机并发事故信号。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(二)油压装置的自动控制接线

水电站常用的装有两台油泵的油压装置机械系统图见图 5－3－35。两台油泵一台工作,一台备用,可以互为备用;油泵出口各装有切换阀 1ZF 和 2ZF,用以切换油路,并起安全保护作用;压油槽上装有压力信号器 41～43YLX,作为油压监视和自动控制用。

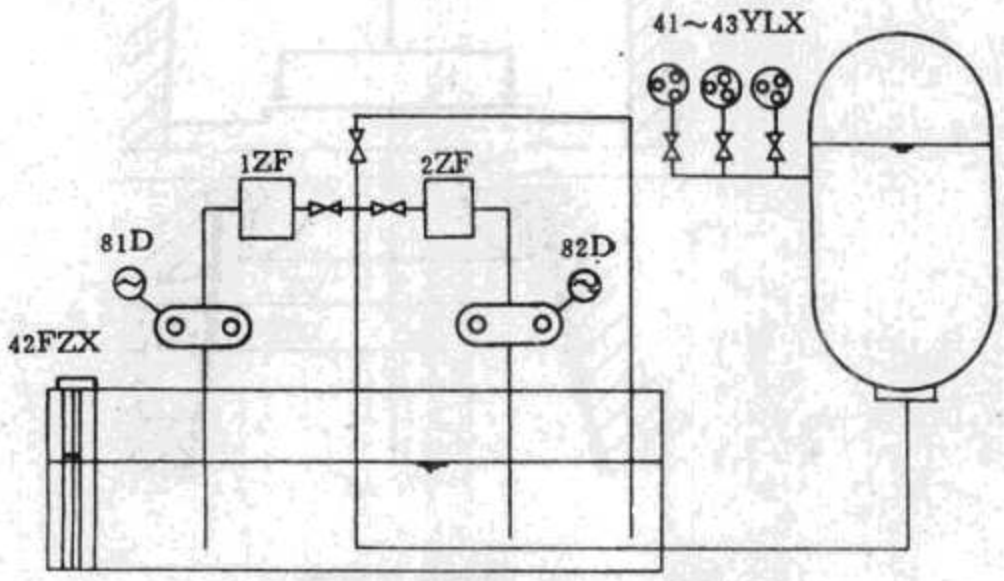


图 5－3－35 装有两台油泵的油压装置机械系统图

油泵电动机 81D、82D 的操作方式由 HZ_{10}- 10s/3 型转换开关 81QK 和 82QK 进行选择。每个开关都有"自动""手动""切开"和"备用"四个位置。电动机的自动控制接线见图 5－3－36,其操作过程叙述如下。

1.自动投入

将控制开关 81QK 切至"自动"位置(接点 $81QK_{c-2x}$通),控制开关 82QK 切至"备用"位置(接点 $82QK_{c-2x}$通)。当压油槽油压下降至工作油泵起动压力时,压力信号器 $42YLX_{2-1}$ 接点闭合,使中间继电器 81ZJ 动作并自保持,其接点使磁力起动器 81Q 动作,油泵电动机 81D 起动进行压油。油压开始回升,至正常压力时,压力信号器 $42YLX_{2-3}$。接点闭合,使继电器 83ZJ 动作,其接点断开 81ZJ 线圈回路,81ZJ 复归,磁力起动器 81Q 也随之断电复归,电动机停转,停止压油。

2.备用投入

当工作油泵投入压油后,如油压继续下降(工作油泵故障或漏油等原因引起),则在油压下降到备用油泵起动压力时,压力信号器 $43YLX_{2-1}$;接点闭合,起动中间继电器 82ZJ。82ZJ 动作后自保持,并使磁力起动器 82Q 动作,使备用油泵电动机 82D 投入压油,并发出备用投入声光信号。当压油槽油压恢复正常压力时,由压力信号器接点 $42YLX_{2-3}$起动继电器 83ZJ,使继电器 82ZJ 复归。

如备用油泵投入也不能保持最低允许油压,发生油压事故性下降,则不允许机组继续发电运行,由压力信号器 $41YLX_{2-1}$;接点作用于事故停机。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

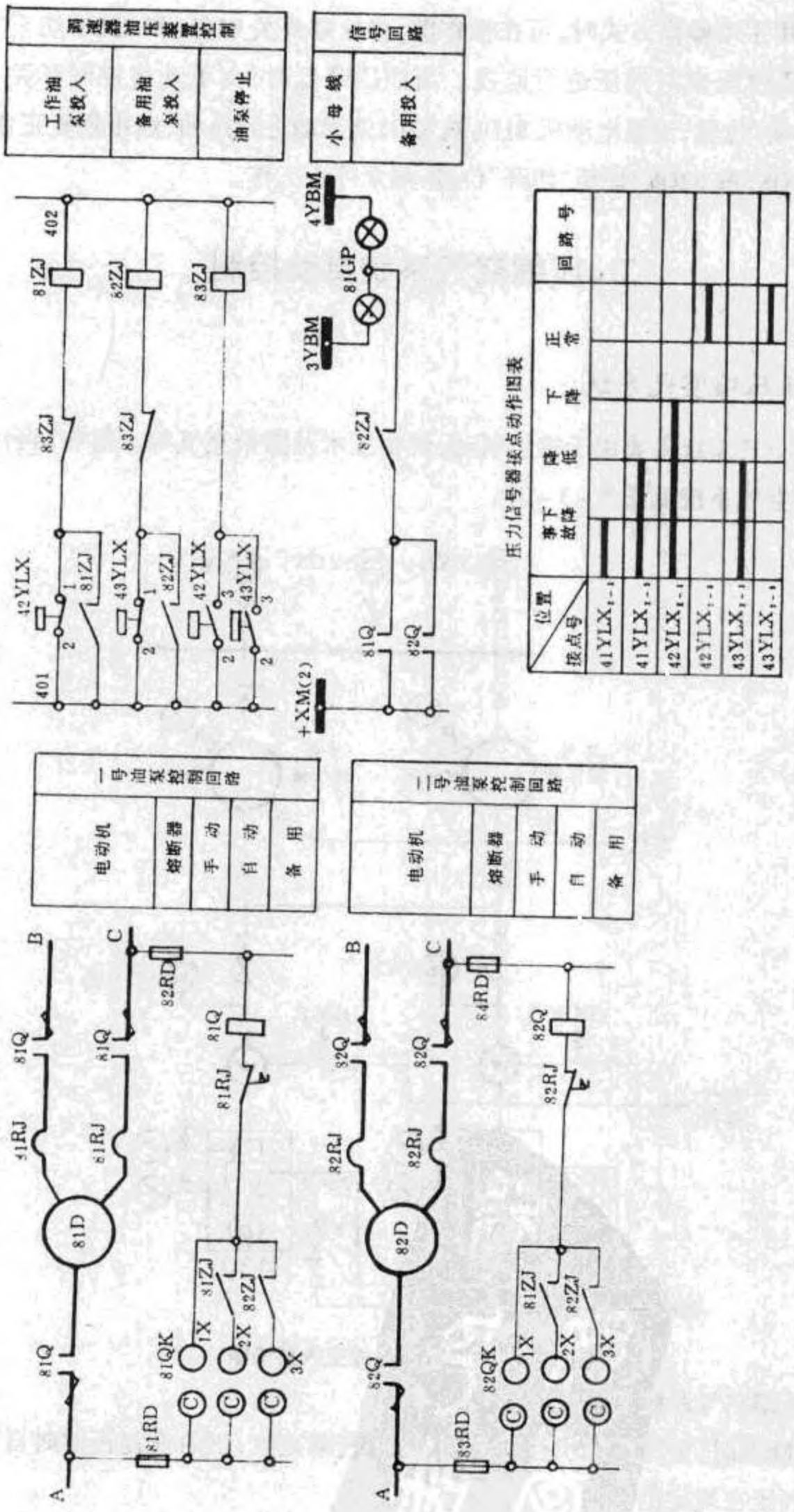


图5-3-36　两台油泵的油压装置自动控制接线

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

3.手动操作

如需要采用手动操作方式时，可在操作前，将控制开关81QK和82QK切至“切开”位置，值班人员通过压表对油压进行监视。当油压降低时，由手动将控制开关81QK(或82QK)切至“手动”位置，油泵电动机81D(或82D)就起动进行压油，油压恢复正常后，手动将控制开关81QK(或82QK)切至“切开”位置，油泵停止工作。

二、压缩空气系统自动控制

(一)低压压缩空气系统

低压压缩空气系统主要用于机组制动、调相压水及围带充气等。具有两台空气压缩机的低压压缩空气系统见图5-3-37。

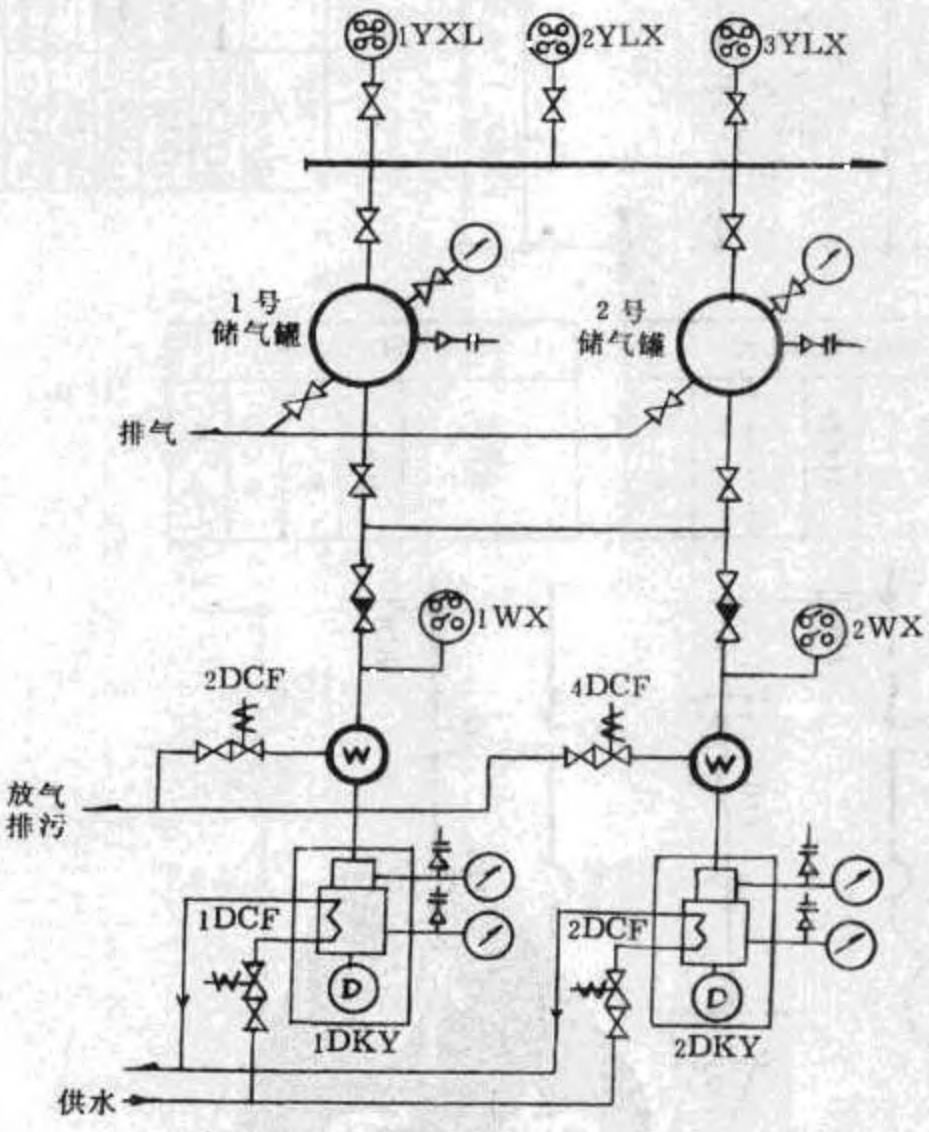


图5-3-37 低压压缩空气系统图

1.低压压缩空气系统自动化要求

(1)压力降低时，空气压缩机自动起动，向储气罐充气；压力恢复正常时自动停止，维持储气罐内气压在规定范围内。

(2)具有两台空气压缩机的系统，能互为备用；备用机在气压过低时自动起动，气压恢

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

复时自动停止。

(3)储气罐气压异常(过高或过低)时发出气压异常信号;

(4)水冷式空气压缩机起动时投入冷却水,停机时则将冷却水切除。

(5)起动时自动打开放气排污电磁阀,经一定时间自动关闭,实现空载起动。

(6)出气管温度过高时发出信号。

2.低压空气压缩机控制接线

具有两台低压空气压缩机的控制接线见图 5-3-38。两台空气压缩机的运行方式由转换开关 81QK、82QK 进行选择,各有"自动""手动""切开"和"备用"四个位置,可互为备用。其操作过程叙述如下。

(1)自动投入

将控制开关 81QK 切至"自动"位置,控制开关 82QK 切至"备用"位置。当压缩空气气压降低时,压力信号器接点 $81YLX_1$ 接通,起动继电器 81ZJ,使起动器 81Q 动作。81Q 主触头闭合起动空气压缩机电动机 81D;其辅助接点使冷却水电磁阀 81DCF 开启;另一辅助接点使起动排污阀 82DCF 打开,并起动长时间继电器 81SJ;经整定时限排污完毕,排污阀自动关闭,空气压缩机进入压气运行状态。在气压恢复时,$82YLX_2$ 接点闭合,起动 82ZJ,切断 81ZJ 线圈电源,81ZJ 和 81Q 复归,空气压缩机停止压气,冷却水电磁阀在 81Q 复归时关闭。

(2)备用投入

当工作空气压缩机投入压气后,气压如继续下降至气压过低位置,则压力信号器 $82YLX_1$ 接点闭合,起动继电器 83ZJ,使起动器 82Q 动作,电动机 81D 起动;同时打开冷却水电磁阀 83DCF,供给冷却水;打开起动排污阀 84DCF,进行排污;经整定时限排污完毕,84DCF 由时间继电器 82SJ 延时接点关闭,备用空气压缩机进行压气。在气压恢复时,由继电器 82ZJ 使继电器 83ZJ、起动器 82Q 复归,电动机停止压气;由 82Q 连动关闭冷却水电磁阀 83DCF,切断冷却水。备用投入时由继电器 83ZJ 接点发出信号。

(3)手动操作

将控制开关 81QK、82QK 置于"切开"位置。当气压降低时,由手动将控制开关 81QK(或 82QK)切至"手动"位置,磁力起动器 81Q(或 82Q)合上,电动机 81D(或 82D)起动,同时由 81Q(或 82Q)辅助接点联动冷却水和排污电磁阀打开,排污阀经整定时间自动关闭。压气完毕,手动将控制开关 81QK(或 82QK)切至"切开"位置,停止压气,冷却水电磁间自动关闭,动作过程同前。

(4)故障信号

接线具有以下故障信号:

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

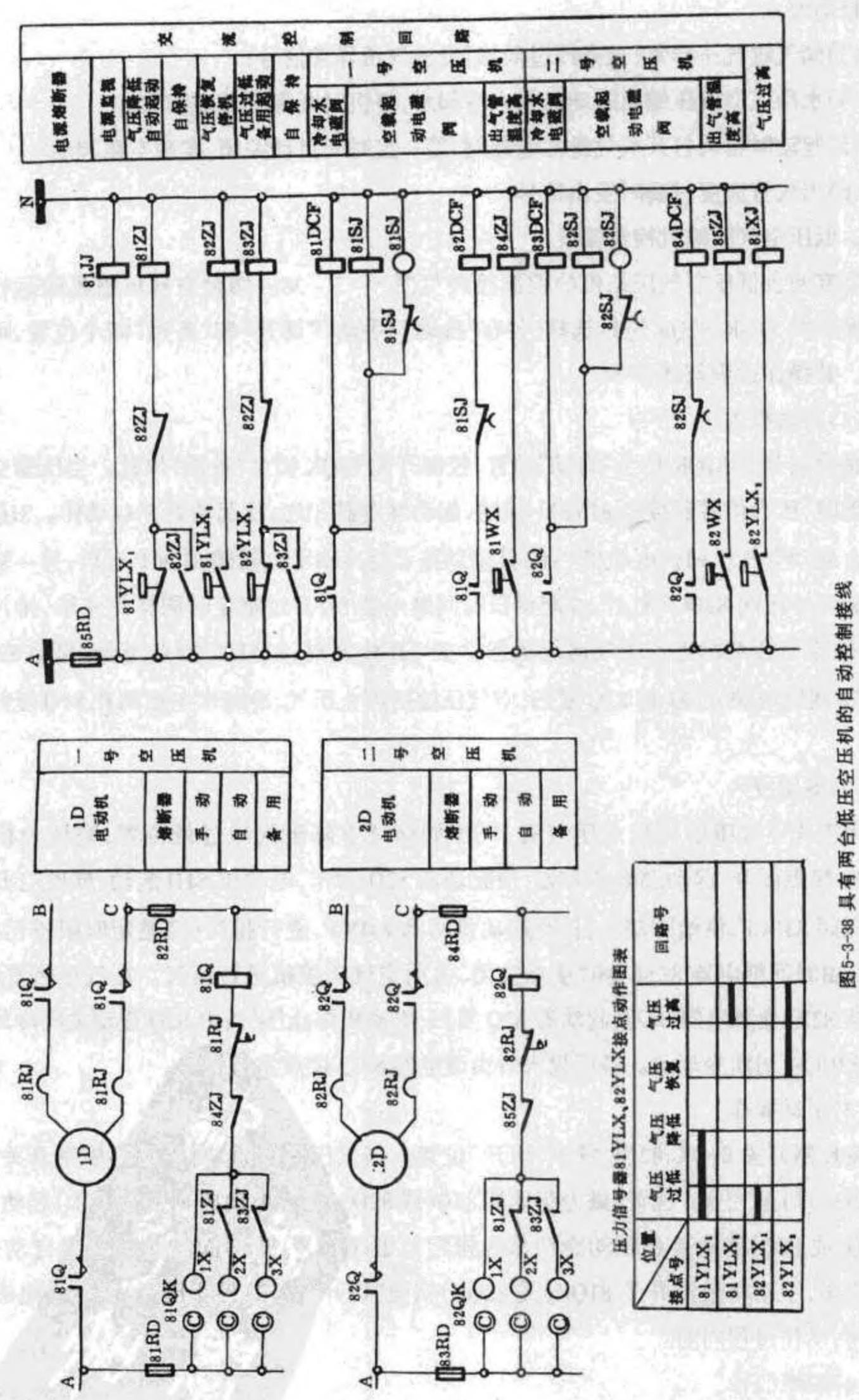


图5-3-38 具有两台低压空压机的自动控制接线

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

①气压过高时，压力信号器 $81YLX_2$ 接点闭合，通过 81XJ 信号继电器发出故障信号。

②出气管温度过高时，由温度信号计 81WX、82WX 通过继电器 84ZJ、85ZJ 发出信号。

③电源消失时，由 81JJ 监视继电器发出信号。

(二)高压压缩空气系统

高压压缩空气系统主要用于机组调速器、蝴蝶阀油压装置的供气。具有一台高压空气压缩机的高压压缩空气系统见图 5－3－39，对其自动化的要求与对低压压缩空气系统的要求基本相同，惟水电站高压空气压缩机容量较小，大多采用强迫风冷，无自动排污及空载起动的要求，故电气控制接线较为简单，参见图 5－3－40。

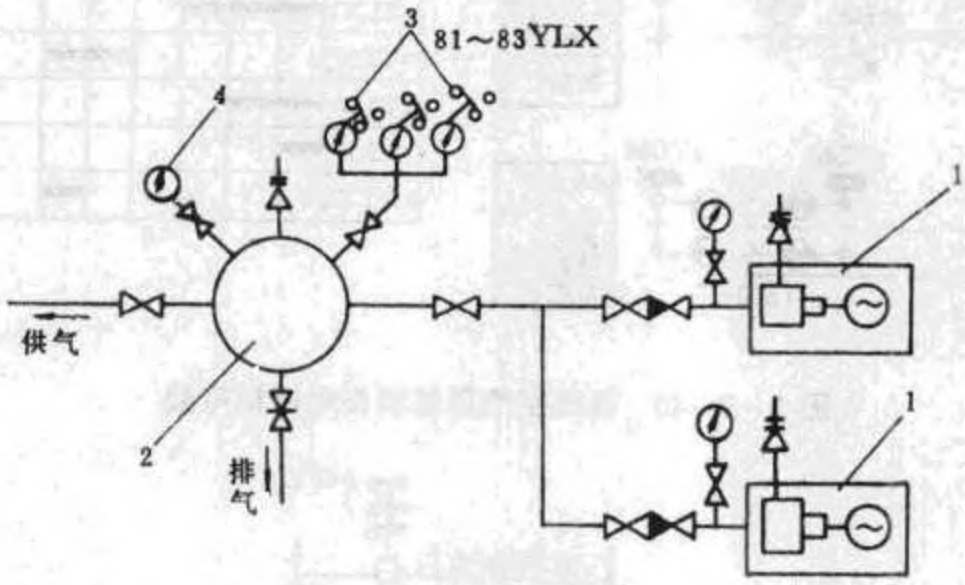


图 5－3－39　高压压缩空气系统图

1—空气压缩机；2—储气罐；3—接点压力表；4—压力表

三、技术供水系统自动控制

水电站的技术供水系统是指机组冷却、润滑、密封、灭火的用水系统。水源可用压力管自流方式；也可采用水泵供水，并设置蓄水池，自成独立的供水系统。

(一)技术供水系统自动化要求

具有两台水泵的集中供水系统见图 5－3－41，其自动化要求是：

1. 蓄水池水位降低时，能自动起动并停止工作水泵，维持蓄水池水位在规定范围内。

2. 当蓄水池水位继续下降至下限位置时，备用水泵能自动投入，水位恢复正常时停止工作。

3. 两台水泵能互为备用。

(二)技术供水泵自动控制接线

技术供水泵自动控制接线见图 5－3－42。两台水泵的运行方式用切换开关 81QK、

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

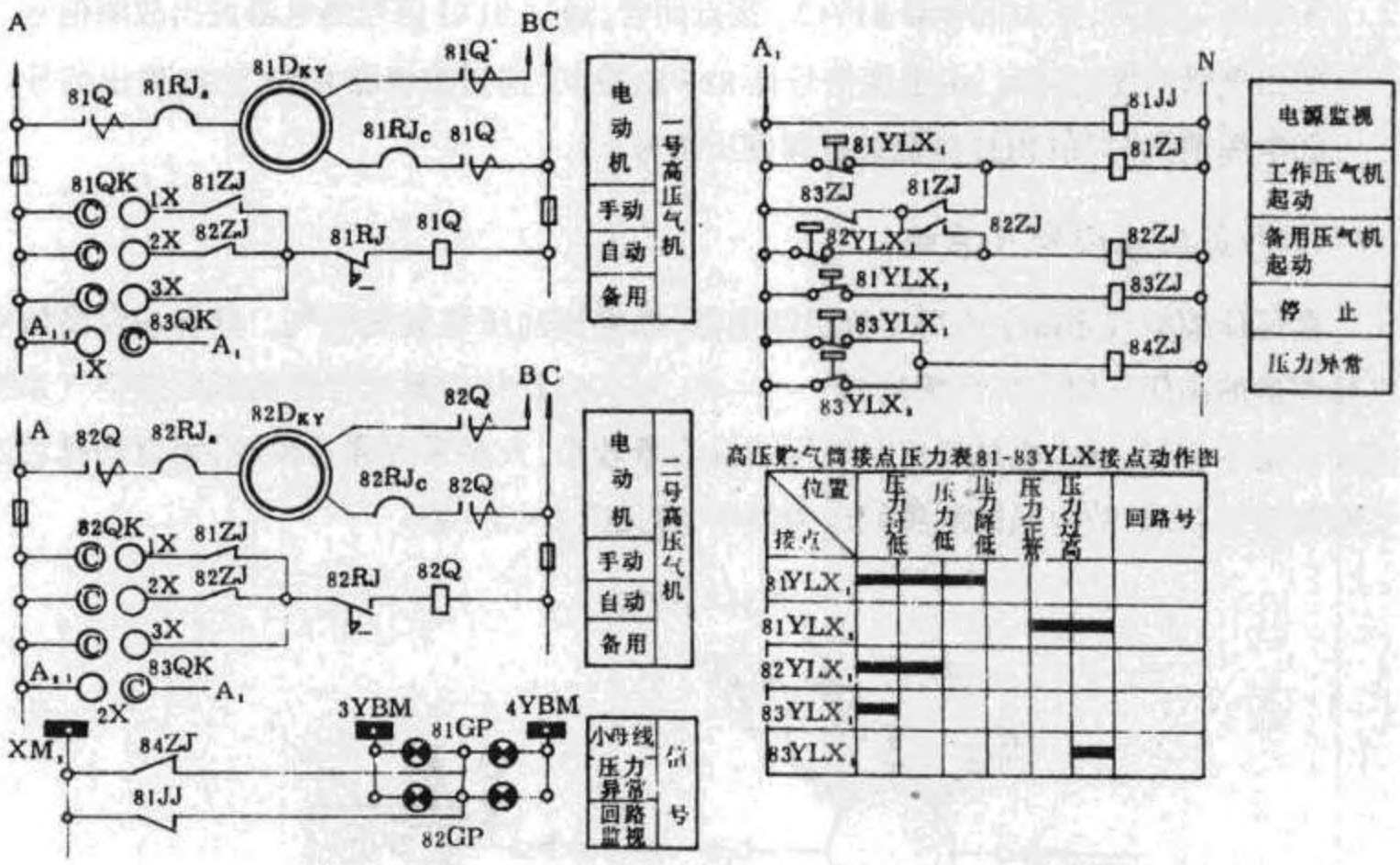


图 5-3-40 高压空气压缩机自动控制接线

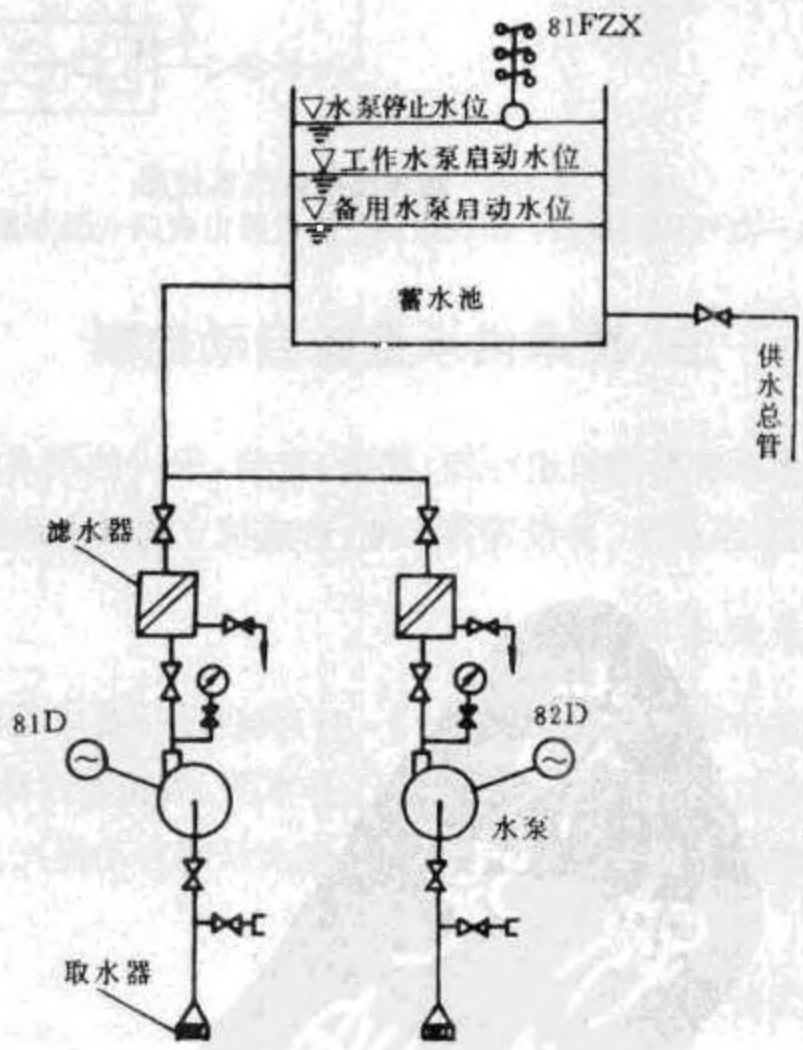


图 5-3-41 技术供水系统图

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

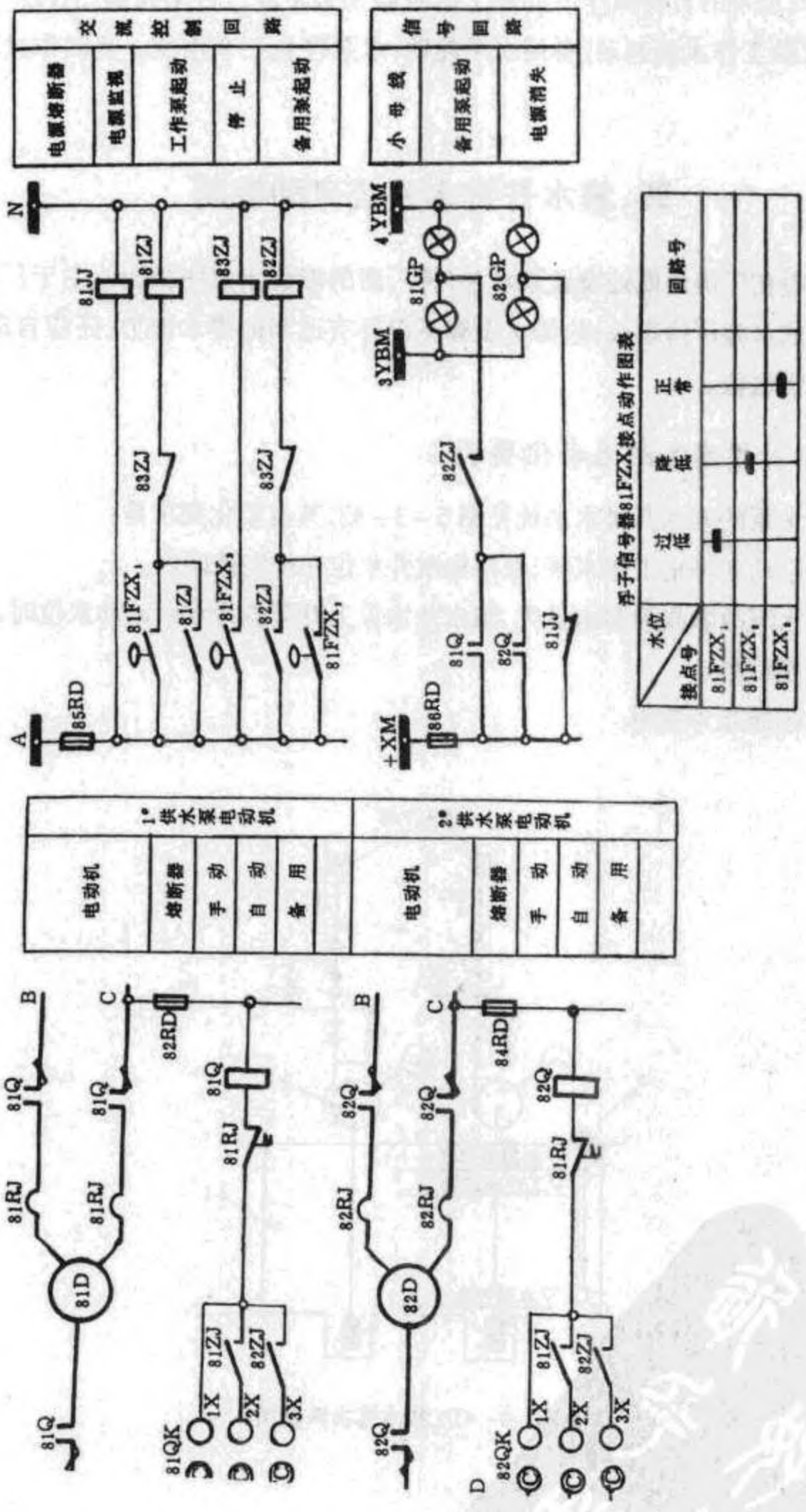


图5-3-42 技术供水泵自动控制接线

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

82QK 进行选择;水泵的自动操作借助浮子信号器 81FZX 进行自动控制,81FZX 有三个位置开关,分别反映工作水泵起动、备用水泵起动、水泵停止三个水位。其动作过程请读者自行分析。

四、集水井排水系统自动控制

水电站一般在厂房最低处设置集水井,将厂房的渗漏水集中排出。由于厂内渗漏水过大时可能造成水淹厂房事故,故排水设施不仅要有适当的排水能力,还应自动控制,以保持集水井正常水位。

(一)集水并排水系统自动化要求

具有两台水泵的集水井排水系统见图 5-3-43,其自动化要求是:

1.能自动起动和停止工作水泵,保持集水井水位在规定范围内。

2.当工作水泵故障或渗漏水量大,集水井水位上升至备用水泵起动水位时,备用水泵能自动投入并发信号。

3.两台水泵能互为备用。

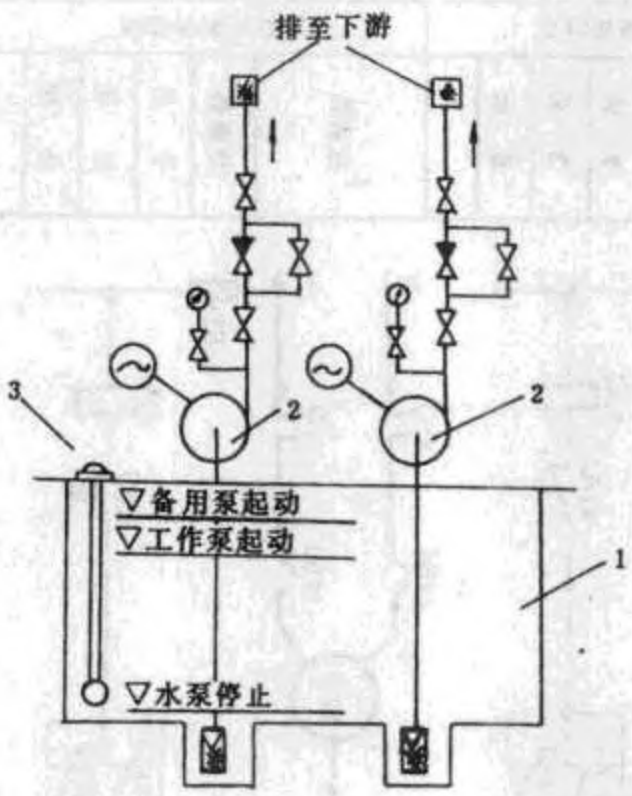


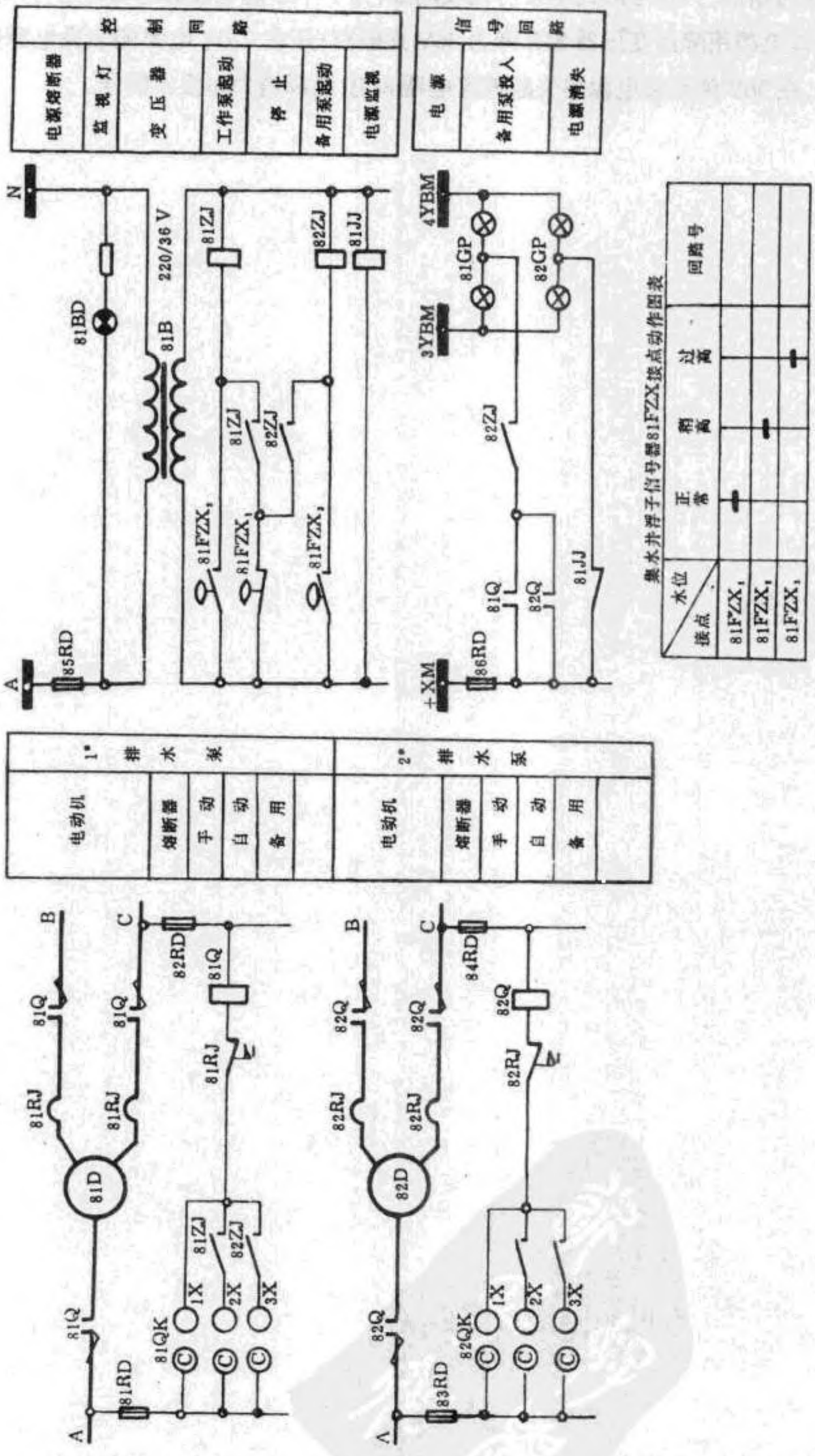
图 5-3-43 集水排水系统图

(二)集水井排水泵自动控制接线

图 5-3-44 为具有两台水泵的自动控制接线,其接线原理与前述技术供水泵的自动

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网



集水井浮子信号器81FZX接点动作图表

水位 / 接点	正常	稍高	过高	回路号
81FZX₁	—			
81FZX₂		—		
81FZX₃			—	

图5-3-44　集水井排水泵自动控制接线

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

控制接线极为相似，只是考虑到水泵房比较潮湿，为了不影响电源的绝缘和运行人员的安全，故将操作电源用降压变压器 81B 降为 36V 并隔离；还在 220V 电源侧装设电源监视信号灯 81BD，在 36V 侧装设电源消失监视继电器 81JJ，电源消失时发出信号。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第六篇

水轮发电机组的起动运行维护

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第六篇

水体富营养化的生物监测与生物评价

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第一章　水轮发电机组的起动试运行

第一节　机组起动试运行的主要内容

一、机组起动试运行的目的

水电站都是复杂的综合性工程，一般说来包括水工建筑物、机械设备、电气系统三大部分。它们各有设计要求，而又要协调一致，最终目的是保证电站正常和安全地发电。由于土建施工及机电设备的安装总是分项进行的，而且往往经历了相当长的时间，最后是否达到了设计要求？能不能正常运行？这样的问题只能由实践来回答。水轮发电机组的起动试运行，就正是在投产以前所进行的综合性试验检查。概括地讲，其目的在于：

1.根据有关的技术规程和电站的设计资料，对水工建筑物、机电设备等进行一次全面的质量检查，并在实际运行中作出总体的鉴定。

2.通过检查发现尚未完善的工作，以及工程或设备所存在的缺陷，及时处理以保证电站能顺利地投产。

3.在机组起动之前，以及试运行过程中对机电设备进行调整试验。测定相关的运行参数或特性曲线，具体掌握机组的实际性能，为今后的长期运行提供技术准备。

4.电站从试运行结束起转入试生产，施工单位与管理的业主单位之间，应在起动试运行以后进行交接验收工作。

二、起动试运行的基本内容

机组起动试运行的工作范围很广，要进行从水工建筑物到机电设备的全面检查。一般说来包括试验检查和试运行两大部分，而且以试验检查为主。其基本内容有以下各项。

1.机组起动以前的检查

(1)水工建筑物的检查，包括各种闸门的试动作。

(2)水轮机、发电机、调速器的试验检查。

(3)油、水、气等辅助系统的调整、检查。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(4)电气一次设备的检查。

(5)电气二次回路的检查及模拟动作试验。

2.充水试验

从取水枢纽到尾水渠的全部水工建筑物,以及水轮机的压力管、进水阀、蜗壳、尾水管等,依次逐步充水到设计情况。在充水过程中及充水以后进行全面检查。

3.机组起动试运转

起动机组直到额定转速运行,对机械部分进行检查及调试。

4.空载试验

使机组达到额定转速、额定电压,在空载状态下进行相关的试验、检查以及调整工作。

5.带负荷试验

使机组带负荷运行,进行同期并列,增、减负荷,以及转为调相运行等的试验检查。

6.甩负荷试验

模拟事故,让机组突然甩掉负荷,进行水、机、电方面过渡过程的检查。

7.72h 试运行

最后,让机组满负荷连续运行 72h,检查机组的实际运行情况。

水轮发电机组的起动试运行,原能源部 1993 年颁发了专门的规程 DL507－93。对容量 3000kW 及以上的机组,应按照规程进行。而较小的机组可参照执行。这里所列的七项基本内容,符合该规程,但比较概括和简单。

三、起动试运行工作的组织

机组的起动试运行是水电站建设后期所进行的总体检验,涉及电站的各个部分。而且不少试验是首次进行,存在一定的风险,再加上技术要求十分严格,因此必须作到有严密的组织领导,要按照事先的计划安排来逐步进行。

1.严密组织,统一指挥。

(1)由电站业主、建设单位、安装单位、监理部门等共同组成试运行领导班子。在人力、设备、通讯联络、后勤保障等方面都进行统一的组织安排。

(2)从水工建筑物到水轮发电机组、辅助设备、电气部分,都要分岗位设专人进行试运行的操作、测试,或者检查、监视。

(3)作好计划安排,除了安排试运行的项目和日程外,还必须对可能发生的问题及意外事故作出应急措施的准备,确保电站和人员的安全。

(4)试验现场执行统一指挥。

2.试运行要按规程规范进行,保证质量。水电站的水工建筑,金属结构,水轮发电机

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

组，调速器及辅助设备、电气设备和一、二次回路等，政府及国家电力公司都有具体的技术规程或规范，试运行及交接验收工作都应遵照执行，确保质量。

3.试运行中必须作好记录。水电站各部分在试运行期间所进行的试验检查，都必须有详细的现场记录，而且要按规范的要求整理成文字资料，作为电站的技术档案保存，为今后的运行管理打好基础。

第二节 水轮发电机组的试运行

一、开机前的检查

发电机经过72h试运行后，除了试运行前的一部分必须检查的项目外，水轮发电机组正常开机前，还必须检查：

(1)所有电器设备和电器元件无破损和异常；各引线、联接线绝缘无破损；所有短路线和临时接地线应拆除。

(2)测定发电机定子绕组及励磁回路绕组的绝缘电阻值，应符合规定要求。

(3)在发电机磁场回路中，将变阻器放在最大位置。

二、开机

起动水轮机加速至$\frac{1}{2}$额定转速并维持转速不变，如果轴承温度正常，机组运行得很平稳，就可以逐渐增加导叶开度使转速达到额定转速。

在运行中，水轮机和调速器的各种检查和调整应该按常规进行。再调节磁场变阻器使发电机端电压达到额定值。

机组空载运行数分钟，检查仪表盘上的各种仪表指示、所有配电装置、调速器及其他自动装置均正常后，投入自动励磁装置和自动调速器。接着，按机组的不同运行方式，向用户或系统供电：

(1)单机运行机组，先合上刀开关，再合上主开关，然后合上各支路开关，开始向外送电。此时会出现电压和频率下降情况，可继续调节磁场变阻器和导叶开度，使电压和频率达额定值。

(2)并列运行机组，按机组并列的要求，将水轮发电机组并入电网运行。然后，调节导叶开度，增加水轮机进水量，使发电机带上负荷。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

三、机组并列运行

把一台发电机与其他发电机或发电机与电网并联运行的操作，叫做“并列”。

1.并列的条件

发电机并列运行，要符合一定条件(即并列运行的发电机之间或发电机与电网之间必须满足电压相等、频率相等、相序一致、相位相同的要求)。这些要求，在并列前必须严格检查，正确操作。否则，将引起严重的事故。并列的方式有准同期与自同期两种。

2.准同期并列

实现发电机准同期并列通常采用灯光法和整步表法。灯光并列法分灯光熄灭法和灯光旋转法两种。

(1)灯光熄灭法灯光熄灭法接线，见图 6-1-1。

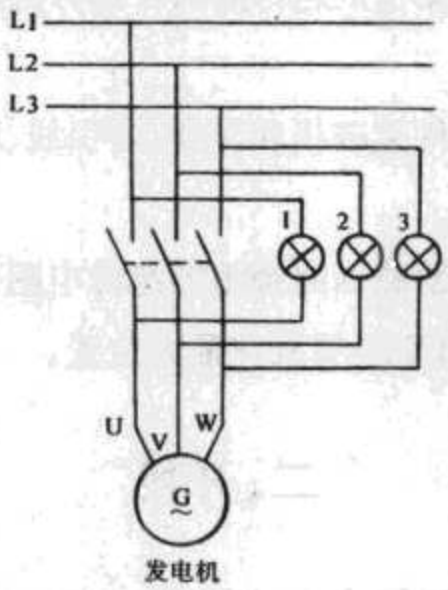


图 6-1-1 灯光熄灭法同期灯的接线图

待并发电机 G 与电网并列时，可将三只灯泡跨接在主开关的对应相的两端。当发电机 G 和电网相序一致时，三个灯泡呈同明同暗的变化。调节发电机 G 的电压和频率，使之与电网的电压和频率相接近。当调到灯光亮暗的变化很慢时，就可作合闸的准备。当三相指示灯同时熄灭时，表示开关两侧对应相之间的电压差接近为零。此时应迅速合闸，将发电机并入电网运行。

(2)灯光旋转法灯光旋转法接线，见图 6-1-2。

从灯光旋转法接线图中看到，灯光旋转法与灯光熄灭法不同的是：三只灯中，只有一只灯接在开关的对应相的两端，如图中 U 相；另外两只灯是交叉接到开关两端的，如图中的灯 2、3。一般将三只灯装在一个圆周上。

当发电机与电网相序一致时，三只灯是旋转交替亮或暗。灯光旋转的频率就是发电机和电网之间的频率差。调节发电机电压和频率，当灯光旋转速度很慢时，就可做合闸的

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

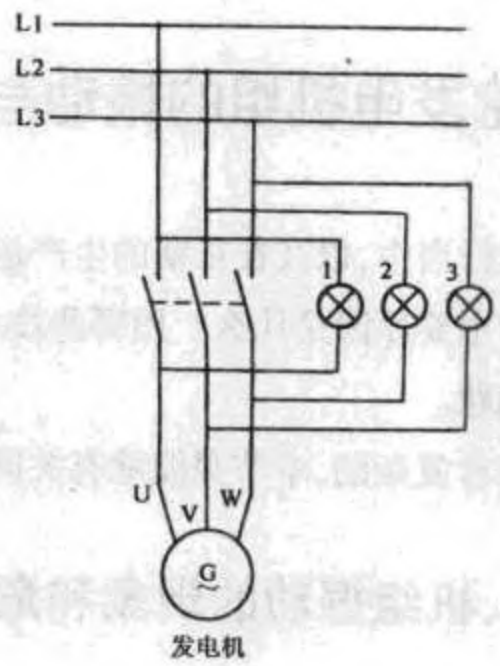


图 6-1-2　灯光旋转法同期灯接线图

准备。当 U 相灯 1 全暗，其他两相灯 2、3 一样亮的时刻，即可迅速合闸，把发电机并入电网运行。

用上面两种方法并列，也可同时检查发电机的相序。当用灯光熄灭法并列时，如三只灯泡灯光不是同明同暗，而是呈旋转发光状态，说明发电机与电网相序不一致；当用灯光旋转法并列时，如三只灯泡灯光不旋转，而是同明同暗，则也说明发电机与电网相序不一致。这时，要将发电机的任意两根引出线调换，使相序与电网相序一致。发电机之间或发电机与电网之间相序不一致时，一定不能进行并列运行操作，否则将使发电机受到严重损坏。

3. 自同期并列

自同期也是一种并列操作过程，但它不同于准同期。其操作过程是这样的：先将水轮发电机组转动起来，当转速上升至稍低于机组的额定转速时，就将断路器闭合，这时电力系统给发电机定子绕组送进三相冲击电流形成旋转磁场，然后励磁系统再给发电机转子绕组送进直流电流产生磁场，使电力系统将发电机拉入同步运行状态。

在并列过程中，发电机因有冲击电流而受到一定的损伤是自同期的缺点。优点是并列过程比较迅速，特别是在电力系统中发生事故或系统电压、频率发生剧烈波动时，采用准同期费时间多而且很困难，甚至不可能实现并列，但采用自同期方式就有可能较迅速地实现并列。

自同期也可用自动自同期装置实现自动化操作。但根据上面的分析可知：在水电厂中，自同期只能作为准同期的一种补充方式。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第三节 水轮发电机组的振动与平衡的调整

水轮发电机组在起动试运行当中，以及在长期的生产运行期间，都可能发现振动超出允许范围的情况。引起振动的主要原因是什么？用哪些技术措施去减轻机组的振动？就常常是人们必须回答的重要问题。

水轮发电机组的振动是非常复杂的，本节只能就有关问题作一些简单介绍。

一、机组振动的现象和危害

1.机组振动的现象

对水轮发电机组而言，在匀速旋转之外的任何周期性运动都是附加的振动。从方向上区分，机组的振动可有三种：

(1)轴向振动，也称为纵向振动。立式机组表现为上下跳动；卧式机组表现为前后串动。

(2)径向振动，也称为横向振动。表现为在垂直于轴线的方向上摇摆。

(3)绕轴线的扭转振动，表现为旋转不均匀、机组角速度周期性地加大和减小。

2.振动的影响及危害

上述三个方向的振动可能同时发生，也可能以某一种为主，但都是额外的周期性运动。对水轮发电机组而言，除了要消耗一部分功率使机组效率降低以外，还会带来一系列不利的影响，甚至会危及正常运行和机组的安全。

(1)机组的转动部分和轴承受周期性交变力的作用，造成螺栓松动、焊缝开裂，甚至使主轴因材料疲劳而损坏。

(2)机组固定部分的轴承、机架、地脚螺栓、连接螺栓等会团振动而变形、松动。

(3)机组输出的频率和波形会因振动而变化，降低供电的质量。

(4)严重的振动还会破坏机组运行的稳定性，致使机组无法运行。

二、引起机组振动的原因

造成水轮发电机组振动的原因是多方面的，非常复杂的。同一台机组可能有多种原因共同影响；而相同的原因在不同机组上的表现又可能不同。要分析机组振动的主要原因，必须将各种因素归类，掌握各类原因的基本特征和主要表现。一般情况下可从以下三方面去分析：

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

1.水力原因

水轮机是机组转动的动力来源，它工作不稳定必然影响整个航组。水轮机及通过的水流方面，常见的主要问题有：

(1)转轮四周水力不平衡。混流式转轮上、下止漏环间隙不均匀；轴流式转轮与转轮室之间的间隙不均匀，必然使转轮受横向力作用而摆动。

混凝土蜗壳的包角大小，断面设计不合理；活动导叶开度不均匀，都会使转轮四周的进水不均匀。有的电站在试运行期间还发生过导叶被异物堵塞，因而引起机组剧烈振动的现象。

(2)反击型水轮机发生空腔气蚀。机组空载或低负荷运行时容易发生空腔气蚀，转轮室及尾水管发出明显的金属敲击声，尾水管真空度很大而且不稳定，机组的振动幅度大，但频率较低。水轮机如果超出它的限制出力运行，可能引起更严重的空腔气蚀。

(3)导叶或轮叶产生不稳定的涡流。在一定条件下，导叶或轮叶的后面会产生一系列不稳定的涡流，称为“卡门涡列”。它们使导叶或轮叶受力不稳定而形成振动，当这种振动引起机组共振时，就会表现出强烈的振动现象。这通常因机组而异，而且只在某个出力的附近发生。

(4)高水头长输水管道的机组，在负荷变化时可能因水锤现象而造成振动。此时压力管道内压力上下波动，水轮机工作水头不稳定，机组因而在一段时间内振动。

2.电气原因

发电机、电网和电能用户是机组的负载，它们消耗功率的不稳定也必然影响机组。常见的问题有：

(1)发电机气隙不均匀。

(2)励磁系统工作不稳定。此时机组输出的电压、电流有周期性变化。

(3)三相负荷不平衡。

(4)电力系统发生波动。这往往是短时间的，但可能比较剧烈。

3.机械原因

机组制造或安装不良会引起机组振动，而这正是人们在机组起动试运行阶段最关心的问题。一旦发现机械振动，就须查明具体问题并尽力消除。常见的主要问题有：

(1)转动部分静不平衡。机组的转动部分包括转轮、主轴和发电机转子，如果组合成整体但重心不在旋转轴线上，这就是静不平衡。机组运行时，转动部分将受离心力作用，轴线可能弯成弧形而造成“弓状回旋”，如图 6－1－3 所示。

(2)转动部分动不平衡。动不平衡是由质量分布不当造成的。以图 6－1－4 所示的发电机转子为例，转子的重心在轴线上，满足了静平衡的要求。但它的质量分布不对称，分开来看，左侧的重心偏高、右侧的重心偏低。当它旋转时，左、右侧都受离心力作用，但

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

大小相等，方向相反，作用于两条线上，构成了一个离心力偶。转动部分在旋转的同时必然左右摇摆也即是产生“振摆”现象，如图 6-1-4 所示。

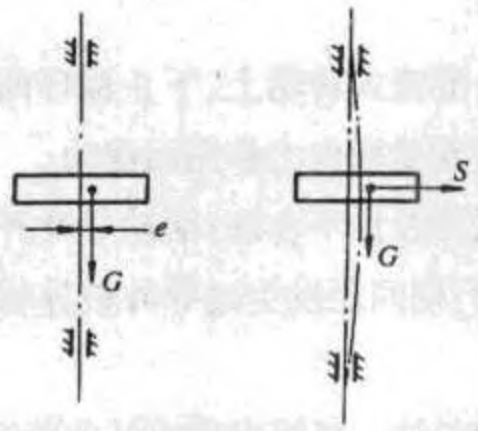


图 6-1-3 弓状回旋

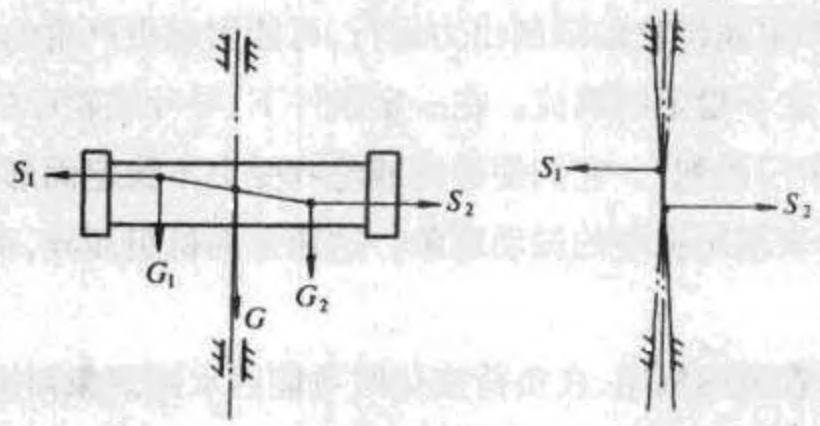


图 6-1-4 振摆

弓状回旋和振摆在原因上不相同，但所引起的振动现象很难区分，而且都随转速的升高而加强。

(3)机组轴线缺陷。机组的轴线成折线；立式机组的轴线不垂直；卧式机组的轴线不水平，这些都会引起振动。

(4)轴承缺陷。推力轴瓦受力不均匀；导轴瓦间隙不均匀；轴瓦及螺栓松动；轴承润滑和冷却不良等也都会造成振动。

轴线不符合要求和轴承缺陷引起的振动，往往与机组的转速和出力相关，转速提高、出力加大时振动更严重。

(5)调速器调试不良。调速器如果不稳定，会使导叶开度来回变化，机组也就不可能平稳地运行。

三、关于振动原因的分析方法

如前所述，引起机组振动的原因各式各样，振动的现象也千差万别，但其中总有基本的规律。为了找出一台机组发生振动的主要原因并加以消除，通常可以由以下几方面着手进行分析：

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

1.测量和分析振动的频率

振动的频率应该用测振仪测量,但须在不同部位和不同方向上测量,以求全面掌握机组的振动情况。经验丰富的人凭感觉可以有一定程度的区分,但不可能十分准确。

一般说来,不同原因引起的振动在频率上是有区别的,如:

(1)水力振动的频率一般较低,常为机组转动频率的1/6~1/2,或者更低。

(2)电气振动的频率常等于机组的转动频率。

(3)机械振动的频率可能就是机组的转动频率。但由某些部件引起的振动,其频率往往是转动频率的若干倍。

2.掌握振幅与机组运行参数的关系

机组振动的幅度,尤其是振动严重部位的振幅,往往随某些运行参数变化。如:

(1)水力振动往往与出力相关,在机组低负荷运行时严重;或在某个出力附近严重;或者振动随出力增加而加大。

(2)电气振动常随发电机电流情况变化,电流加大振动加剧,而不励磁时振动就明显减小。

(3)机械振动可能随转速变化,也可能随出力变化、转速及出力加大时振动严重。

3.要在试验中查找和消除主要的振动原因

由以上内容不难看出,查找振动原因的工作应该结合试验来进行。要不断改变机组的运行状态或工作参数,有意地排除某些原因,突出另一些原因。这样反复试验和比较,直到找出引起该机组振动的主要原因,从而采取相应措施去减轻机组振动。

四、水轮发电机组的静平衡

转动部分的重心不在其轴线上,是机械振动中最常见也是最主要的原因之一。国家在水轮发电机组的制造标准中,就明确规定了对不平衡重量的限制,产品在出厂前都应该通过"静平衡"检查。

从机组转动部分的组成情况分析,主轴以及轴上的附件都是轴对称的,只要材料均匀一致,重心必然在其轴线上。影响转动部分静平衡的主要部件有两个:一是发电机转子,尤其是叠片而成的磁轭,以及挂装在磁轭上的磁极;另一个是水轮机的转轮。但是,发电机转子和水轮机转轮是用不同方式来实现静平衡的。

1.发电机转子的静平衡

除容量很小的以外,发电机的转子都是尺寸很大、重量很重的,其静平衡无法用试验的方法检查调整,只能依靠组装的工艺过程来实现。

(1)磁轭叠片以前对冲片逐片称重,再按重量分组。叠片时尽可能在对称方向布置重

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

量相同的冲片，对无法均匀分布的则记录不平衡重量的大小以及它所在的位置。

(2)磁极在挂装前逐个称重，并按极性和重量配对，使任何45°或22.5°范围内磁极重量之和，与对称侧的差符合规范要求。对实在不能均匀分布的重量同样要记录其大小和方位。

(3)就前两步中遗留的不平衡重量作计算，求得总的不平衡力矩的大小和方向，进而在转子上加焊平衡配重，使转子的重心调整回转动轴线。

如图6-1-5所示，组装过程记录的不平衡重量为G_1、G_2、…、G_i，相应的位置由所在半径r_i以及角度a_i表明。各不平衡重量都对转动轴线偏心，因而构成不平衡力距。为了便于计算，按对X轴和Y轴的力矩来统计，总的不平衡力矩为

$$M_X = \Sigma G_i r_i sina_i$$

$$M_Y = \Sigma G_i r_i cosa_i$$

拟在半径R的地方加配重P，用以抵销不平衡力距，则P的大小和方位角β可计算如下

$$P = \frac{\sqrt{(\Sigma G_i r_i sina_i)^2 + (\Sigma G_i r_i cosa_i)^2}}{R}$$

$$\beta = 180^\circ + tg^{-1}\frac{\Sigma G_i r_i sina_i}{\Sigma G_i r_i cosa_i}$$

2.水轮机转轮的静平衡

水轮机转轮的形状非常复杂，以混流式转轮为例，它由上冠、下环、若干片轮叶等组成，制造的工艺过程无法保证其重心落在轴线上，也不便于计算.其静平衡就只能通过试验来检查和实现。

对尺寸和重量不太大的转轮，可以用卧式的静平衡试验台。如图6-1-6所示，设置两根互相平行的水平导轨，用试验轴将转轮支撑在导轨上。如果转轮的重心不在它的轴线上，转轮势必在重力作用下旋转，最后停在重心向下的位置。试验时反复搬动转轮，在不同位置上放手让它自由摆动并最后静止，就可以找出重心所在的方向。再在反方向拟加配重的半径R处试加一个重量，重复前面的检查，当配重P适当时，转轮可停在任意位置，即构成力矩平衡关系

$$PR = Ge$$

当然，这样的试验会受摩擦力影响，应该反复调整配重P的大小，并且顺、反时针搬动转轮来进行检查。

尺寸及重量较大的大中型转轮则只能用立式的试验台进行静平衡。试验如图6-1-7所示，将转轮体安装在托架上，最终由平衡球和水平的底板支撑，平衡球对转轮的高低可搬动螺杆来调整。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

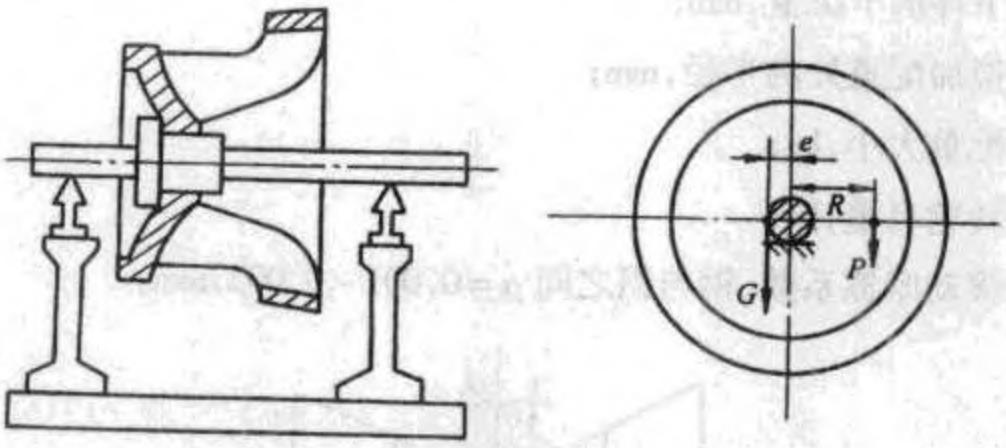


图 6-1-6 转轮静平衡的卧式试验台

静平衡试验的原理如图 6-1-8 所示。设转轮的重心 O_1，偏离理想位置 O 的偏心距为 e，它支撑在球面上后势必发生偏转，直到重心 O_1 与球心 O_0 的连线铅直为止，此时转轮下环也偏离了水平位置，重心的一侧下沉 ΔH，而相反的一侧上升 ΔH。如果在下环上半径为 R 的地方加一个平衡重量 P，当 P 的大小适当时可以使转轮回到水平状态，即由配重去平衡原重心偏离理想位置所形成的力矩。这里就有了两个基本关系式：

三角形 O_0OO_1 与三角形 O′AA′相似

$$\frac{e}{h} = \frac{\Delta H}{R}$$

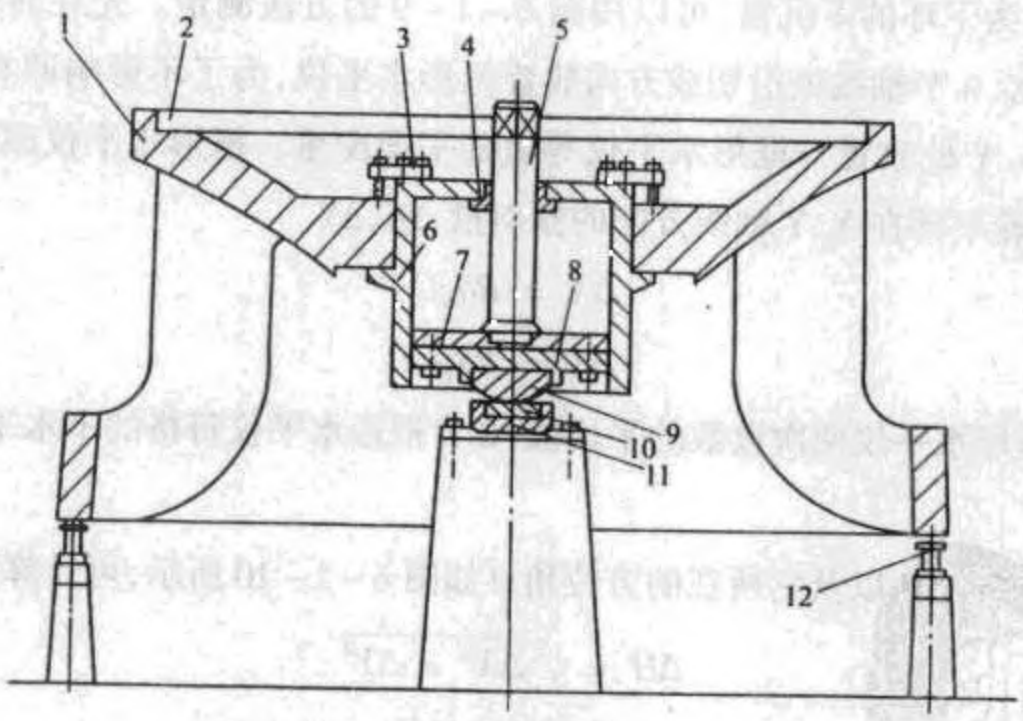


图 6-1-7 转轮静平衡的立式试验台

1—转轮；2—加配重处；3—压盖；4—螺母；5—螺杆；6—托架；7—定心板；8—平衡板；9—平衡球；10—底板；11—底座；12—千斤顶

力矩平衡

$$PR = Ge + \mu G$$

两式中 e——转轮重心的偏心矩，mm；

h——重心 O 至球心 O_0 的距离，mm；

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

ΔH——下环的下沉量，mm；

R——拟加配重处的半径，mm；

P——配重大小，kg；

G——转轮自重，kg；

μ——滚动摩擦系数，钢与钢之间 $\mu = 0.001 \sim 0.002$，mm。

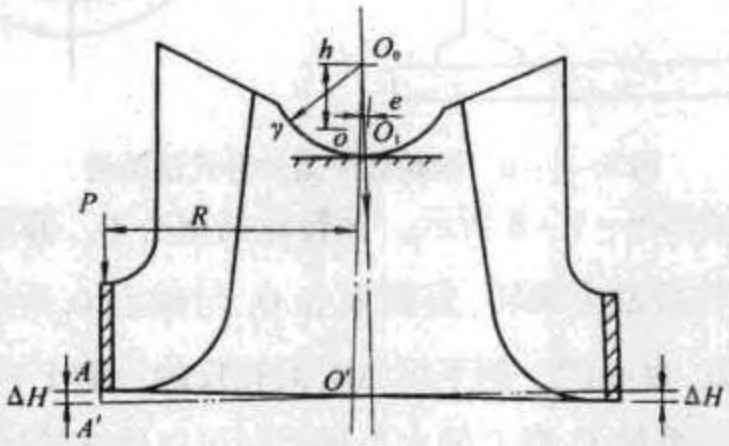


图 6-1-8 转轮静平衡试验的原理

将两式合并，得到

$$P = \frac{h\Delta H + \mu R}{R_2} G$$

式中的 ΔH 为下环的下沉量，可以用图 6-1-9 的方法测定。先在转轮上标注 X、Y 轴线，分别在 +X、+Y 轴线处沿切线方向放置框形水平仪，为了不影响原有的倾斜情况，应同时在 -X、-Y 处放置与框形水平仪等重的平衡配重。框形水平仪原地调头测量两次，即可测得转轮下环在 X、Y 轴线方向的倾斜量 ΔX、ΔY

$$\Delta X = R\delta_X C$$

$$\Delta Y = R\delta_Y C$$

式中 δ_X、δ_Y 为框形水平仪两次读数的平均值，C 为框形水平仪每格的不水平误差量，如 0.02mm/m。

下环的下沉量 ΔH 以及它所在的方位角 β 如图 6-1-10 所示，可计算如下

$$\Delta H = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$$

$$\beta = tg^{-1}\frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

式中的 h 是转轮重心到球心的距离，它对试验过程有很大的影响。h 过小，试验装置稳定性差，甚至不稳定；h 过大，试验装置的灵敏度差，难于准确测定下沉量 ΔH。试验装置的 h 值应符合表 6-1-1 的要求。

为了测定并检查试验装置的 h 值，转轮支撑在球面上后，根据初步测量的结果在转轮上加平衡重，直到下环大致成水平状态。再分四次，在下环互成 90°角的位置上加 1kg 重

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

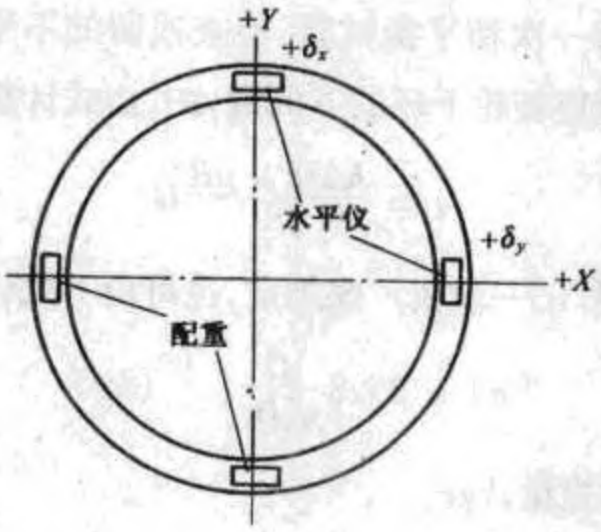


图 6-1-9　下环下沉量 ΔH 的测定

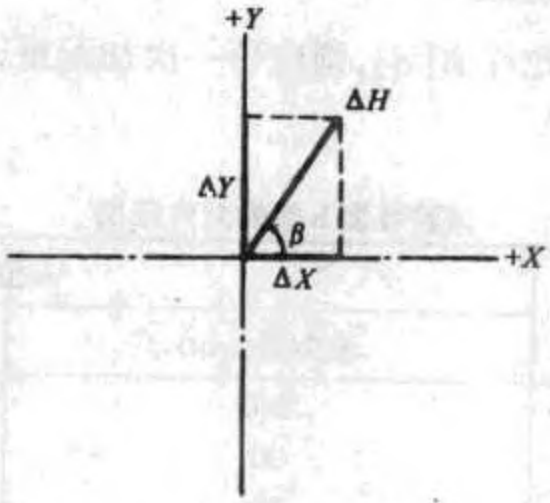


图 6-1-10　ΔH 的计算

的配重，测出每次加配重后引起的下沉量——这可以用百分表顶在下环上直接测。计算四次下沉量的平均值 ΔH_{cp}，并由式算得试验装置的 h 值

$$h = \frac{(R - \mu G)R}{G\Delta H_{cp}}$$

如果 h 值不符合表 7-3 的要求，则应转动图 6-1-7 中的螺杆与予以调整，并再一次校核。h 值符合要求，则可以对转轮进行实际的静平衡试验，这一般分粗平衡和精平衡两个阶段。

粗平衡试验又分两次进行。如图 6-1-9 所示，放置框形水平仪和平衡配重，但第一次将水平仪放在 +X、+Y 轴向，第二次将水平仪放在 -X、-Y 轴向。分别测定并计算下沉量 ΔH_1、β_1；ΔH_2，β_2。利用已经测定的 h 值，由式分别计算出两个应加的平衡配重 P_1 和 P_2 来。两次测量都可能存在误差，可按矢量平均的方法作图求解出应加的平衡重量 P 及其方位，这如图 6-1-11 所示。

取一定的重量比例尺，按角度 β_1 和 β_2 划出矢量 $\vec{P}_1$、$\vec{P}_2$，将端点连接成直线，以该连线的中点为端点划新的矢量 $\vec{P}$，这就是应加的平衡重量，它与 X 轴的夹角 β 即应加的方位角。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

加上配重 P 以后再进行一次精平衡试验，检查残留的不平衡重量 q 是否符合要求。方法仍然是用框形水平仪测定转轮下环的下沉量 ΔH，由式计算残留的不平衡重量 q

$$q = \frac{h\Delta H + \mu R}{R^2} G$$

转轮允许的不平衡重量[q]一般由厂家规定，也可由下式计算

$$[q] = 35.8 \frac{G}{n_p^2 D_1} \quad (kg)$$

式中 G——被平衡系统总重量，kg；

D_1——转轮名义直径，m；

n_p——机组飞逸转速，r/min。

实测出的 q 值如果大于允许值[q]，则应再一次加配重，并重新检查校验，直到 q≤[q]为止。

表 6-1-1 试验装置 h 值的允许范围

被平衡系统总重量(t)	h 值	
	最小值(mm)	最大值(mm)
≤5	2/0	40
≤10	30	50
≤50	40	60
≤100	50	80
≤200	70	100

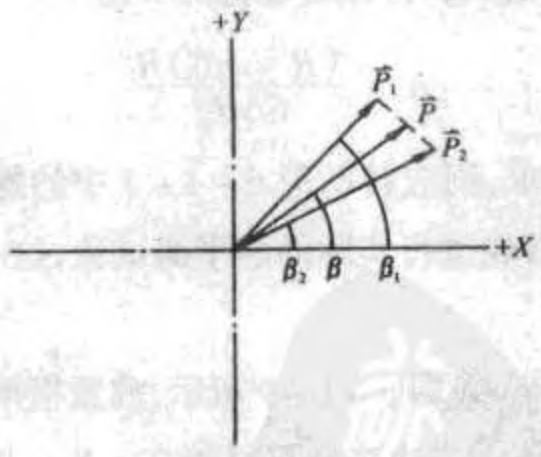


图 6-1-11 图解法求平衡重量

五、水轮发电机组的动平衡

转动部分的动不平衡只在转动时才表现出来，也就只能用试验的方法去检查，也只能通过试验进行纠正。一般的水轮发电机组都不作动平衡试验，只有在必要时才进行。如起动试运行过程发现机组的振动很严重，初步分析后又认定主要原因是动不平衡时，则有

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

必要进行机组的动平衡试验。

水轮发电机组的动平衡试验比较复杂，必须用高精度的测振仪等设备，而且要在机组稳定于额定转速下旋转时反复进行测试。

1.试验的假定

(1)转动部分的动不平衡是由于存在某个不平衡重量引起的。

(2)动不平衡所引起的振动幅度与存在的不平衡重量成正比例。

(3)如果存在两个(或更多)不平衡重量，则总的振幅是各个不平衡重量引起振幅的矢量和。

2.试验的基本方法

(1)首先找出机组振动幅度最大的部位，以该部位的振幅为准进行试验检查。加上配重以后，如果此振幅大大减小并符合规范要求，则机组就算作到了动平衡。

(2)选择并准备试验配重 P_0，P_0 应该足够大，在预定位置加上它可以引起机组振幅明显变化。如

$$P_0 = \frac{(0.5 \sim 2.5)G}{100Rn_r^2} \quad (kg)$$

式中　G——转动部分总重量，kg；

n_r——机组额定转速，r/min；

R——发电机转子上预定加装配重处的半径，m。

(3)测定机组原振幅 μ_0。

(4)在发电机转子上半径为 R 的圆周上，分三次在互成 120°角的位置上加配重 P_0，测定相应的振幅，并按大小排列为 $\mu_1 > \mu_2 > \mu_3$。

3.应加平衡重量的求取

由前述的假定，如果配重 P_0 引起的振幅为 μ_P，则实测的四个振幅 μ_0、μ_1、μ_2、μ_3 有如下的矢量关系

$$\begin{cases} \vec{\mu}_1 = \vec{\mu}_0 + \vec{\mu}_{p1} \\ \vec{\mu}_2 = \vec{\mu}_0 + \vec{\mu}_{p2} \\ \vec{\mu}_3 = \vec{\mu}_0 + \vec{\mu}_{p3} \end{cases}$$

假定 $\vec{\mu}_0$ 与 $\vec{\mu}_{p1}$ 之间的夹角为 θ，式就可表达为图 6－1－12 的形式。用余弦定理解图中的三角形，得到

$$\begin{cases} \mu_1^2 = \mu_0^2 + \mu_{p1}^2 - 2\mu_0\mu_{p1}\cos(180^\circ - \theta) \\ \mu_2^2 = \mu_0^2 + \mu_{p2}^2 - 2\mu_0\mu_{p2}\cos(60^\circ + \theta) \\ \mu_3^2 = \mu_0^2 + \mu_{p3}^2 - 2\mu_0\mu_{p3}\cos(60^\circ - \theta) \\ \mu_p = \mu_{p1} = \mu_{p2} = \mu_{p3} \end{cases}$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

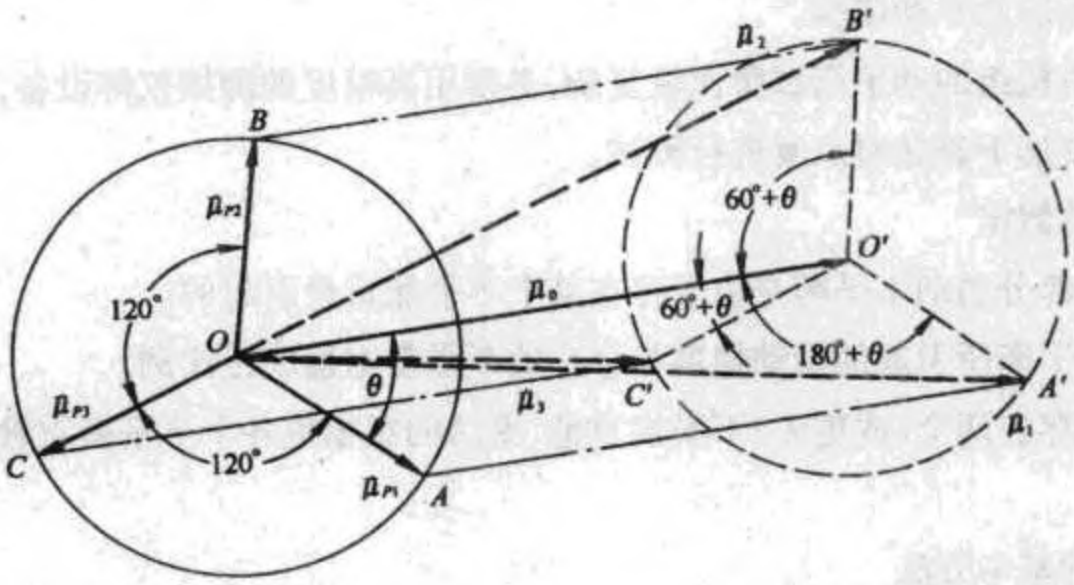


图 6-1-12 动平衡原理图

综合并化简后有

$$\mu_p = \frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2 + \mu_3^2 - 3\mu_0^2} \quad \theta = cos^{-1}\left(\frac{\mu_1^2 - \mu_0^2 - \mu_p^2}{2\mu_0 U_p}\right)$$

由正比例关系,机组原有的不平衡重量 q 为

$$q = \frac{\mu_0}{\mu_p}P$$

q 所引起的振幅是 μ_0,而 μ_0 与 μ_{p1} 的夹角为 θ。为了抵销它的影响,应该在相反方向上,半径为 R 的地方加上平衡配重 q,从而使机组达到动平衡。

4.图解解析法

由于振幅的测量很难达到高精度,μ_1、μ_2、μ_3 的差别又比较小,上述公式的计算结果并不一定很准确。机组的动平衡总是一个反复试验、反复加配重的过程。为了比较快速而且直观地求出应加的平衡重量,实践中往往运用图解解析的方法。以"四圆作图法"为例,介绍如下:

(1)选取适当的重量比例尺和长度比例尺。

(2)以 O 点为圆心,配重 P_0 对应的长度为半径划圆,见图 6-1-13。

(3)将该圆周三等分,得到 A、B、C 三点,连接或正三角形。

(4)在 A、B 两点分别作 AB 边的垂线,按长度比例尺在上面切取振幅 μ_1 及 μ_2。其中 $AA' = \mu_1$,$BB' = BB'' = \mu_2$。

(5)连接 A'B'讲延长,与 AB 的延长线相交于 E。连接 A'B'',与 AB 相交于 E'。

(6)以 EE'为直径划圆 O_1。

(7)用同样的方法在 A、C 两点作 AC 边的垂线,切取振幅 μ_1 和 μ_3,连接 A''C'和 A''C''与 AC 边及延长线相交于 F 和 F'点。以 FF'为直径划圆 O_2。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

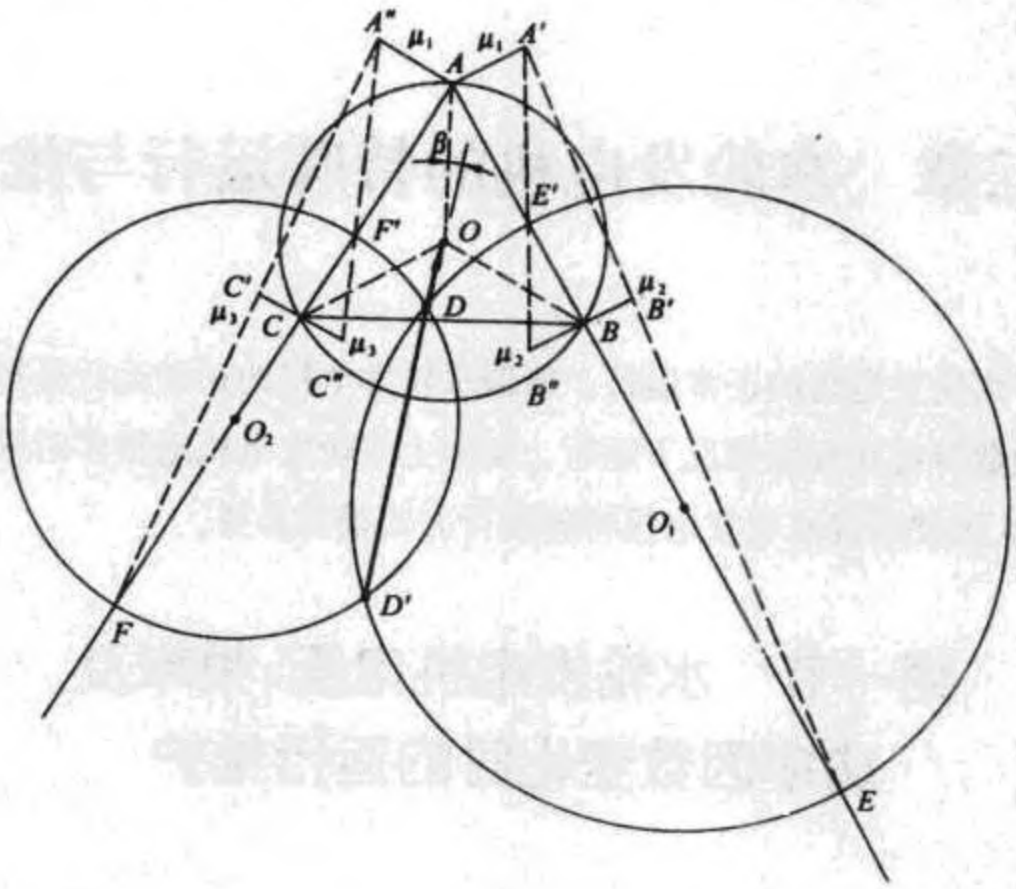


图 6－1－13　四圆作图法

(8)圆 O_1 和圆 O_2 相交于 D、D′两点，而且它们与圆心 O 在同一条直线上。

(9)如果用同样的方法在 B、C 两点作 BC 边的垂线，切取振幅 μ_2 和 μ_3，还可以划出第三个圆来，它与圆 O_1 圆 O_2 仍就相交于 D、D′两点。

(10)矢量 $\vec{D}O$ 或者 $\vec{D}'O$ 就代表了原有不平衡重量的大小和方向。这两个解方向一致，大小不同，可以由下式进行验算来选出真解，符合比例关系的是真解。

$$DO(\vec{D}'O)=\frac{\mu_0}{\mu_1}DA(\vec{D}'A)=\frac{\mu_0}{\mu_2}DB(\vec{D}'B)=\frac{\mu_0}{\mu_3}DC(\vec{D}'C)$$

(11)应加平衡重量的大小和方向，判定 DO 或 D′O 为真解后，按重量比例尺计算其大小

$$q=\frac{DO(D'O)}{DA}P_0$$

应加的平衡重量为 q，但方向应与矢量 $\vec{D}O(\vec{D}'O)$ 相反。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第二章 水轮发电机的特殊运行与维护

前面叙述了水轮发电机的正常运行。所谓水轮发电机的正常运行是指功率、电压、电流、频率、功率因数等都在额定情况下运行。实际上水轮发电机组很多时候是在非额定运行情况下运行的，因此研究水轮发电机特殊运行方式很有必要。

第一节 水轮发电机电压、频率及功率因数变化时的运行维护

一、电压变化时的运行情况

中小型水轮发电机正常运行的端电压容许在额定值的±5%的范围内变动而保持发电机额定功率不变。当电压低到95%以下时，为了维持额定功率不变，势必相应增大定子电流。在电压降低时铁耗固然可以减少，但由于走子电流增大，相应铜耗加大。通常铜耗引起的温升常大于铁耗引起的温升，因而使定子绕组总温升仍要增大。在一定的功率因数下，当定子电流增加时，电枢反应去磁效应增加，因而转子励磁电流也要增加，由此励磁绕组温升也难于保证不超过容许值。因此当电压低到95%以下运行时，发电机应降低额定功率。水轮发电机电压过低除对温升影响较大以外，还会影响励磁调节的稳定、机组运行的静态稳定以及电厂厂用电动机的运行。

当电压高于额定值时，发电机势必增加磁通，使得磁场增强。若保持发电机有功功率不变而提高电压，那么就要增加励磁电流，从而会使励磁绕组温度升高。若要维持原来的励磁电流不变，则升高电压势必降低定子电流，即降低有功功率输出。过分提高电压也是不允许的。升高电压还可能使发电机由于铁心饱和而使部分磁通逸出轭部，在结构部件中产生涡流而出现局部高温。对电压为6300V的发电机来说，若电机原来就有绝缘老化或有薄弱环节的话，升高电压运行是有击穿危险的。例如一台6500kW(375r/min)立式水轮发电机，当电压上升10%时，发电机磁路各部分都相当饱和，励磁绕组温升比额定电压时上升1.4倍。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

二、频率变化时的运行情况

频率的变化和整个电力系统的有功平衡情况有关。在电力系统运行频率变化±0.5%的范围内，发电机的有功功率输出可保持不变。当频率低到超出容许范围时，电站运行人员应注意监视有关部分的温度。

频率降低对发电机有以下影响。

(1)由于发电机电压与频率、磁通成正比，所以当频率降低时，若要维持额定电压不变，必须增大磁通。这就需要增加励磁电流，要受到励磁绕组温升的限制。

(2)频率下降引起转子转速下降，从而引起发电机的风量下降，其结果是发电机的冷却条件变坏，各部分温度升高。

三、功率因数变化时的运行

一般发电机都在功率因数滞后的状态下运行。水轮发电机在运行中，若功率因数与额定值不一致，应调整发电机的负载，使定子电流和励磁绕组电流不超过在一定冷却风温下所允许的数值，一般要绘制发电机的调整特性曲线。

功率因数低于额定值意味着感性负载增加。为了维持输出电压恒定，必然要增加励磁绕组电流，而降低了发电机有功功率和发电机容量。当功率因数减小至零时，则进入调相运行。这是一个运行的极端状态。

功率因数大于额定值意味着无功功率减少，由于水轮机限制了对有功功率的输出，则发电机总的容量也要减少。当功率因数变为超前时，发电机就进入进相运行。这是另一个运行的极端状态，见图6-2-1。

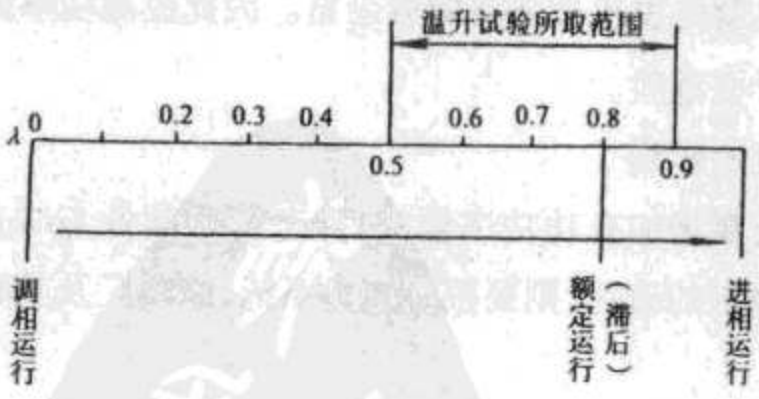


图6-2-1　功率因数与不同运行状态关系图

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第二节 超负荷运行与维护

所谓水轮发电机的超负荷运行是指发电机实际发出的有功功率超过该发电机额定功率的情况。这种情况只有水电厂的实际运行水头超过了水轮机的设计水头时才有可能产生。

对于年利用小时数很高的水电厂或在径流式电厂及在调节水库库容很小的电厂，可考虑到超负荷运行的情况。因为这些水电厂往往有较长时间的弃水现象，利用一部分弃水超负荷运行多发电可以得到较大的经济效益。

一、提高功率因数的超负荷运行

要水轮发电机超负荷运行首先考虑的是提高功率因数运行，即减少发电机的无功功率输出，而增加发电机的有功功率输出，保持发电机的额定电压和额定电流不变。例如一台额定功率因数 $\lambda_N = 0.85$ 的发电机，如果实际将其功率因数提高至 $\lambda = 0.95$，则发电机的有功功率输出将增加 11.8%。提高功率因数超负荷运行应从下述三方面考虑。

1.是否影响发电机绕组的绝缘寿命

提高 λ 运行，但运行电压和电流还是额定值。因为发电机的电磁功率损耗与运行电压、电流成比例关系，所以要是电磁损耗不变，那么发电机的温度就不会变，而仍然是额定运行条件下的额定温度。也就是说提高功率因数的超负荷运行并不影响电机的寿命。

2.是否影响电机结构的机械强度

一般设计发电机大轴等部件的受力条件时，其额定转矩是把额定视在功率 S_N 作为额定功率 P_N 来计算的，也就是说机械强度留有余量。因此提高功率因数运行并不会给电机结构的机械强度带来什么危险。

3.对电力系统稳定的影响

提高功率因数运行要增加有功功率输出，静态稳定储备 kp% 就会减少，这样是否会引起静态稳定或动态稳定的破坏，则要根据电力系统、水电厂及其联接的具体情况进行分析验算来确定。

二、超过额定视在功率的超负荷运行

当水轮发电机超负荷运行输出的视在功率 S 超过该发电机的额定视在功率 S_N 时，如果没有相应的措施，则发电机定子绕组和转子绕组的实际运行温度就会超过额定工况运

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

行时的温度。如果温度超过绝缘材料规定允许值，就会加速绝缘材料的老化，影响电机的使用寿命。若温度超过很多，将会引起电机事故甚至烧毁电机。如果采取措施改善通风冷却条件，超负荷($S > S_N$)运行也不会引起电机温度过高。

第三节　水轮发电机的调相、进相与充电运行及维护

一、调相运行

水轮发电机投入运行后，当功率因数减小到零时，即开始进入调相运行。此时它向电力系统输送无功功率(感性的)，以改善系统的功率因数。将水轮机的导叶逐渐关闭，水轮发电机输出的有功功率也相应地减少。当水轮机输入的功率仅能补偿发电机的损耗时，水轮发电机不发有功功率，处于无载状态。当导叶完全关闭而无原动力时，水轮发电机从电力系统吸收有功功率，产生电磁转矩维持转动，以补偿其铜耗、铁耗和风摩擦损耗等。这时水轮发电机即进入同步电动机运行状态。它不带机械负载，主要任务是调节无功功率。为了减少水轮机的水阻损耗，通常将 0.7MPa 的压缩空气注入转轮室中将水面压低，使转轮在空气中转动。

水轮发电机作调相运行时，通过调节发电机本身的励磁电流向系统供给无功功率。因此作调相运行时，主要受到励磁绕组温升允许值的限制。

调相容量的大小由水电勘测设计院向制造厂提出；由制造厂进行校核，以求发电机励磁绕组温升不超过允许值。此时可认为 $\lambda = 0$。确定调相容量的近似方法，见图 6-2-2。

$$OL = \frac{1}{X_d^*}\text{(相当于空载励磁电流)}$$

$$O_1L = \frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*}\text{(失励圆直径)}$$

A 点为发电机的额定工作点。

$$O_1A = O_1K_c$$

调相容量：$Q_K = (OK_c)S_N(\text{kvar})$

通常水轮发电机的调相容量范围为：

$$Q_K = (0.6 \sim 0.75)S_N(kvar)$$

作调相运行时，电站运行人员应密切监视电机各部分温度变化的情况。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

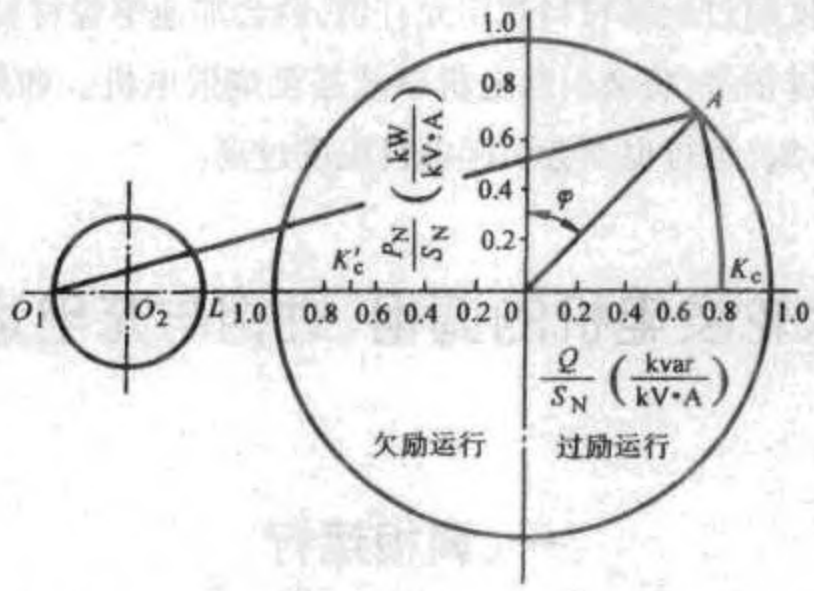


图 6-2-2 发电机调相容量和充电容量的近似确定方法

二、进相运行

当发电机逐渐增加功率因数并进入超前状态时，就开始进入进相运行。进相运行时，发电机处于欠励状态向系统输送容性的无功功率和部分有功功率。水轮发电机进相运行时，具有下列特点。

(1)进相运行时，由于定子端部漏磁和由漏磁引起的损耗要比调相运行时大，所以定子端部附近各金属件温度将升高，最高温度一般发生在铁心两端的齿部，这种情况随发电机容性无功功率的增加而更为严重。

(2)由于水轮发电机是凸极式结构，其交直轴电抗不相等，电磁功率中有附加分量，因而它比汽轮发电机有较大的进相运行能力。

(3)由于发电机进相运行时处于欠励状态，为保证进相运行的安全，机组的视在功率输出应经试验分析确定。

三、充电运行

水轮发电机投入空载高压长距离输电系统运行称为“充电运行”，这也是进相运行的一种方式。在一定励磁方式所能提供的最低稳定电压条件下，为了使发电机端电压不超过额定值，应满足

$$Q_C > Q_C'$$

式中 Q_C'——输电线路的容性负荷，可以根据线路的电压和结构尺寸计算；

Q_C——发电机的充电容量，可按图 18-2 进行核算。

$$Q_C = (0K_C')P_C$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

其中 $$0K_C' = 0L\left(1 - \frac{U_{fmin}}{I_{f0}R_{f(15)}}\right)$$

式中　U_{fmin}——最低励磁电压(V)；

I_{f0}——发电机空载励磁电流(A)；

$R_{f(15)}$——温度为15℃时的励磁绕组电阻(Ω)。

第四节　调频与不对称运行与维护

一、水轮发电机的不对称运行

前面我们叙述的水轮发电机运行都是对称运行情况。实际上，对称运行情况很容易由于某些原因而被破坏。例如当发电机或系统接有较大的单相电炉、交流电气铁道干线或者由于雷击而发生不对称短路时，都会出现发电机的不对称运行。不对称运行时，除正序电流和正序电压外，发电机内还有负序、零序电流和电压。负序电流所产生的反向旋转磁场，可在励磁绕组和阻尼绕组内引起损耗，使运行效率降低，温升升高，而影响到发电机的出力，甚至烧坏阻尼绕组造成事故，而且还会引起振动和过电压现象。因此就发电机而言，一般希望避免不对称运行。但从保证电力系统稳定和供电可靠性这个角度来看，则希望发电机能忍受较长时间和较大的不对称负载。我国国标规定：对100MV·A以下的三相同步发电机和补偿机，若每相电流均不超过额定值，且负序分量不超过额定电流的12%时，应能长期工作。

水轮发电机三相不对称运行的原因，除因单相负载常出现外还会由两相短路、一相接地和一线断开等引起，也可能是由于一些临时措施，例如由于利用二线及地线送电等引起。

水轮发电机三相完全对称时，定子磁场分量系由定子三相对称电流所产生，它与励磁绕组是同步的，即定子磁场不切割转子，因此转子励磁绕组的发热仅由励磁电流所产生的损耗造成。

不对称运行时，正序电流的磁场与转子同步旋转，负序电流的磁场则为反同步旋转。发电机在不对称情况下，电磁转矩中除平均转矩分量外，还包含脉振转矩分量，这有可能会引起严重的机械振动。从这个角度来分析，同样大小的负序电流，在水轮发电机中引起的振动一般比隐极同步发电机要大。

在不对称运行时，水轮发电机的某点有可能产生很高的电压而将绝缘击穿。尤其是

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

某些谐波的存在使其中某些部分发生的共振现象会使电压的最大值大大提高而造成危险。不对称运行时，还会引起发电机绕组内部应力过大。

非对称运行状态的所有特点与负序电流的磁场有关。这一磁场以反同步转速旋转，并以两倍同步速度切割转子，在转子励磁绕组中感应出 100Hz 的单相电流。特别是在极靴部分产生附加损耗。这些损耗的大小随着负荷电流的增加而急剧增加。负序旋转磁场出现的另一后果是使转子产生脉动力矩而造成振动。而脉动力矩的产生与转子磁路的不对称有关。负序磁场和转子之间的作用力时大时小，以两倍频率(100Hz)脉动，而造成转子振动。对于凸极式水轮发电机，不对称负荷的限制是由振动条件决定的。按照电力部门运行规程规定：水轮发电机允许不平衡电流，不得超过额定值的 20%，其中任何一相的电流不得大于额定值。

二、水轮发电机的调频运行

实际电力系统的容量总是有限的，并不是不加控制调节就能经常保持在额定频率下运行的。

当实际频率低于额定频率时，用户交流电动机的转速将下降，影响产品的质量和数量，还会影响火电厂的安全运行；反之，实际频率高于额定频率也会有不良影响。因此国家规定电力系统的频率应经常保持在 49.8～50.2Hz 的范围内运行，即允许频率偏移为 ±0.2Hz。在电力系统中，所有用电单位消耗的功率，电网输配电过程的功率消耗和发电厂的厂内用电的总和，称为(总)发电负荷。当发电负荷大于所有发电机发出的总功率时，系统频率就下降；反之即上升。

(一)有功功率电源和备用容量

电力系统中所有发电机额定功率之和总是大于日最大发电负荷的。即这些发电机中有一部分是备用容量。备用容量中又分负荷备用、事故备用、检修备用及国民经济备用等。

负荷备用是为了保证电力系统频率稳定而设置的备用容量。因为系统实际发电负荷会在预计每天计划的负荷曲线之外出现脉动和短时冲击负荷。由此而产生的发电容量和总负荷之间的正负差值会引起频率波动，这时系统总发电设备如能立刻送出事先准备好的负荷备用功率和这些脉动负荷相平衡，就能保证系统频率继续保持在额定值附近运行(当发电容量大于总负荷时，频率升高，这时应该减少发电容量)。这种为保证系统在额定频率下运行的负荷备用容量，一般为系统最大负荷的 2%～5%(大系统采用较小数值，小系统采用较大数值)。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

当电力系统中运行着的发电设备发生偶然事故时，系统将因缺电而受严重影响。为了补充缺电和减少影响，系统中设有事故备用容量待命投入，以维持系统正常供电，这个容量一般为系统最大负荷的5%～10%。

所有参加电力系统运行的发电机，有热备用和冷备用容量两种形式。热备用容量是指运转中的所有发电设备可能发出的最大功率与系统发电负荷之差(即系统中某些运行发电机的输出功率是小于它们的额定容量的)，因而热备用也称运转备用。冷备用容量是指平时在停机状态，但又可以较快地投入运转的发电容量。对水电厂说来，由停机状态到发最大功率只需几分钟或更短；对火电厂来说，这过程可能长达十余小时。显然，把冷备用容量安排在有条件的水电厂对电力系统的安全运行较为有利。

检修中的发电设备不属于冷备用，因为它们不能接受系统调度的命令立刻起动。

检修备用是根据电力系统中各发电厂的运行方式、设备特点统一安排的；国民经济备用容量一般应取电力系统总容量的3%～5%。

综上所述，电力系统在运行中总负荷和发电设备容量之间有这样的关系；即系统最大发电负荷、负荷备用容量及事故备用容量中的热备用部分，这三者之和应等于系统中所有运转着的发电设备可能发出最大功率之和。可以想像，要出现这种关系，系统中必有许多发电机组是不应该满负荷运行的。

(二)电力系统频率调整原理

1.颁率特性和调差系数

现在介绍如何保持电力系统的频率在额定值下运行的过程。从保持额定频率运行的角度看，我们把电力系统的元件分成三类，并简单分析它们的频率特性。这里所称的频率特性是指电力系统频率变化后，它们在输出功率或吸收功率上所做的反映。这三类元件分别是如下几个。

(1)汽轮发电机组　它们的频率特性是调差特性较陡(即系统频率下降时，机组转速下降)。这时机组调速器能自动地使汽轮机汽门稍稍打开，增加蒸汽量进入，发电机增加有功功率输出，但增加量较少。

(2)水轮发电机组　它们的频率特性是调差特性较平坦。即系统频率下降时，机组调速器能自动地将水轮机导水叶稍稍打开，增加进水量，增加发电机有功输出，而且增加量则较多。

(3)综合负荷　一般负荷的频率特性是电力系统频率下降后，该负荷吸收的有功功率要减少。

为了定量地表示上述各种机组的频率特性，以便于系统调度控制各电厂都能经济安全地运行，我们采用技术参数调差系数 σ(σ 的大小表示机组适应负荷变化的能力)，它可

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

由机组调速器的整定值反映出来，其物理意义可用公式表示：

$$\sigma\% = \frac{f_0 - f_N}{f_N} \times 100\%$$

式中 f_0——机组空载时的频率(Hz)；

f_N——机组带额定功率 P_N 的频率(Hz)。

汽轮发电机组因锅炉及汽轮机适应负荷变化的能力较差，例如汽轮机一般由50%的额定功率增加到100%，大约需要10～25min，因此调差系数一般为 $\sigma\% = 3\% \sim 5\%$。

水轮发电机组因其水轮机及引水系统(特别是坝后式水电厂)适应负荷变化的能力较强，例如水轮机由50%额定功率增加到最大限制功率，所需时间不到1min，因此其调差系数一般为 $\sigma\% = 2\% \sim 4\%$。

2.系统频率的一次调整和二次调整

我们了解了发电机组和综合负荷的频率特性之后，就能进一步理解电力系统在正常运行情况下，从负荷的不断变化引起频率的波动到恢复额定频率的过程。

电力系统进行调频时的一次调整及二次调整过程，见图6－2－3。$\overline{AB}$直线表示调频电厂的综合调差特性线，$\overline{CD}$直线表示电力系统中所有非调频机组综合调差特性线。在一般情况下，AB线的调差系数 σA 要比$\overline{CD}$线的 σC 为小，而在额定频率 f_N 时，调频电厂输出的功率 P_1 要比非调频机组总输出功率 P_1' 小得很多。假定原电力系统所有发电设备总输出功率 $\Sigma P_1 = P_1 + P_1'$ 等于所有负荷吸收功率的总和，而且频率保持在额定值 f_N。这时，系统中如果新增加一个较大的负荷量，那么由于发电总功率小于总负荷，系统频率就要下降。所有发电机组的频率特性将因系统频率下降而使发电总功率增加，调频电厂的输出功率由 P_1 增加至 P_2，非调频机组总输出功率由 P_1' 增加至 P_2'。系统中原有各负荷的频率特性将因频率下降而使吸收的总功率减少。一个增加，一个减少就会出现新的负荷平衡状态，这时系统频率将稳定运行在 f_2，f_2 稍低于 f_N，系统的总输出功率为

$$\Sigma P_2 = P_2 + P_2' = P_1 + \Delta P + P' + \Delta P' > \Sigma P_1$$

这一过程就称为系统频率的一次调整。如果系统负荷减少，同理一次调整可使系统达到另一新的平衡状态，这时稳定运行的频率 f_3 却要稍高于额定频率 f_N，而系统总输出功率为

$$\Sigma P_3 = P_3 + P_3' < \Sigma P_1$$

电力系统虽经一次调整可达到新的平衡，但是频率却偏离了额定值，而使电能质量的降低，因此必须经过二次调整，使系统频率恢复到额定值。

当系统经一次调整频率低于额定值而稳定运行时，要通过外部操作调频机组的调速器，使调频机组的调差特性$\overline{AB}$直线往上平行移动至$\overline{A'B'}$直线，亦就是使调频机组增加有

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

功功率的输出至 P_4。由于电力系统发电总功率大于总负荷所需总功率，因此系统频率上升至额定值后，非调频电厂将根据调差特性$\overline{CD}$方直线自动减少一次调整中增加的功率输出而恢复到按原计划输出功率 P'_1，这样一次调整前的负荷增量就全部由调频机组来承担了。即

$$\Sigma P_4 = P_1' + P_4 \approx \Sigma P_1 + \Delta P + \Delta P'$$

不难理解，当系统负荷减少时，也会经历一次调整和二次调整的过程。调频电厂将减少功率输出，而非调频电厂仍按原计划输出功率，并且系统频率仍保持额定值。

前述外部操作调速器使调频机组的调差特性上下移动，就是用手或自动调频装置来操作调速器里的机构(例如俗称的伺服马达)，并由它来增大或减小导水叶开度，达到调节调频机组输出功率的目的。

由于水轮发电机组适应负荷变化的能力较强，因此一般选用水轮发电机组作为调频机组。

第五节　启动试运行前的检查及试验时的监视检查

一、启动试运轮前的检查

(一)启动试运转的目的和内容

1.启动试运转目的

(1)全面检查鉴定机组的结构可靠性和制造、安装与调整质量，检查机组是否符合设计要求和有关规程、规范的规定。

(2)试验和调整主机与有关电气及辅助设备协联动作的正确性，并检验自动化元件的可靠性。

(3)掌握机组的运转性能，测定某些技术参数，特性曲线等，为正式运行提供依据。

(4)及时发现和处理设备本身在安装检修后影响机组安全运行的一切问题。

2.水轮发电机组启动试运转内容

(1)引水设备充水前，有关设备的调整，试验和过水系统的封堵。

(2)引水设备的充分检查。

(3)机组第一次启动及空载运转试验，内容有机组首次启动试验，动平衡试验、机组过速试验以及一系列电气试验。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(4)机组带负荷试验。包括同期并列试验,甩负荷试验,动水关闭快速闸门(或蝴蝶阀、球阀)试验,低油压事故停机试验,发电机作为调相机运行试验及72h带负荷运行试验等。通过试运转证实机组质量符合设计及有关规程和规范要求后,就可移交给水电厂,投入正式生产。

(二)水轮发电机第一次启运试运转前的检查项目

1.清洁检查

发电机是水电厂的主要设备,清洁情况对运行的安全有很大影响。在第一次启动运转前应仔细清理,全面清扫,发电机内部无金属微粒及尘土,机坑内无任何遗留物。

进入机组内部清扫检查时应注意,除必需的工具外,不准带入任何物件。检查者本人应将口袋内零星物件放在外面,进去和出来时清点身上钮扣证章等,以便核对是否有上述东西掉进机组里面。

2.转动部件的检查

(1)转动部件所有螺母(特别是上挡风板及转动部件下部螺母),应点焊牢固(无开裂),所有止动垫片均已妥善地折角。

(2)转动部件所有焊缝应无裂纹及其他严重缺陷。

3.转动部件与固定部件的缝隙检查

(1)检查发电机和励磁机空气间隙均应无任何异物。检查方法是:励磁机在顶部,间隙可用手电筒照着检查。可用不含水分的压缩空气往间隙中吹扫,将异物、灰尘等吹落清除。发电机转子和定子气隙,可用白布折成长条,将其穿过转子和定子间隙,上下端各有一人拿着布条沿转子圆周转一圈,若有异物,即会被布条带下,或被布条挡住。

(2)转动部件与固定部件间隙应均匀一致,确保运行时不会碰撞。内容包括:转子风扇与上、下挡风圈的间隙;轴承盖板与主轴间隙;轴承内挡油圈与主轴的间隙,密封环与主轴间隙;励磁机风扇与固定部分;刷架与转动部分等等。

(3)其他如机组内部管路与转动部分;磁极键及磁轭键与挡风板;制动器与转子制动环及风扇等。

4.油槽检查

油槽安装完毕充油前,首先检查各阀门开关位置是否正确,严防油流往别处。第一次充油时可先用油冲刷轴承各零件,再由排油管排出,然后注油到规定油位。检查时首先要看油槽各部有无渗漏现象,如油槽进、排油阀门,示油窗,油面计等。然后检查油面高度是否符合要求(不得低于设计油位20mm)。并记录开机前各轴承的油位。

5.其他检查

(1)检查制动器动作应灵活可靠。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(2)上机架空气区分板所有固定螺栓均应点焊或加垫折角。

(3)各油、水、气系统阀门应操作灵活,开关位置应正确。

(4)励磁机整流子及滑环炭刷应提起,并绑扎牢靠。

(5)检查下部风洞盖板、外罩盖板和通风道的密封情况,不应有缝隙。各密封圈与转动部分应搭贴良好,并涂有油脂。

(6)对装有液压减载装置的机组,应检查其油泵及电机处于正常状态。

(7)顶起转子测推力轴承绝缘电阻,其值应符合要求。

(8)其他发电机电气部分及自动化装置的测量与检查。

二、启动及试验时的监视与检查

(一)启动时水轮发电机的监视

水轮发电机第一次启动,是检查转动部件与固定部件是否有碰磨,轴瓦温度是否稳定,摆度和振动是否合格等为主要目的。因此,第一次启动均为手动。机组启动后,在50%额定转速下运行2~3min,仔细检查机组无异常情况后逐步增加至额定转速下作空载运行。

在启动和运行过程中,应重点监视和检查下列各项:

(1)启动前,用油泵将油压入制动器内,将机组转子顶起5~10mm,使镜板和推力轴承摩擦面间进入润滑油,粘附一层油膜,以减小启动时的静摩擦系数(机组停机24h以上再启动,都必须先将转子顶起)。然后排除制动器内的油,转子自动落下,制动块回到原来位置。若推力轴承有液压减载装置,则在开机前,需将液压减载装置投入,强迫在镜板与轴瓦之间形成油膜。

(2)在发电机下风洞及定子四周,设专人监听第一次启动过程中的音响。如发现不正常声音,如摩擦声、撞击声以及其他不正常的噪声等,应迅速判别部位及原因,紧急情况下应立即告知运行值长停机,以便检查处理。

(3)在测温盘处设专人监视轴瓦温度上升情况。前一小时每隔10min记录一次,以后每隔半小时记录一次。对某些温度上升较快或较高的轴瓦需特别注意。空载瓦温超过60℃时,就应提请有关人员研究;超过65℃时,则应停机处理。

(4)每隔半小时测量机架支腿内端或轴承座垂直和水平振动,其值不得超过允许值,若超过允许值,须做动平衡试验。

(5)每隔半小时测量上导、法兰及整流子摆度。摆度值小,说明机组运转平稳,主轴曲折度小,机座中心位置正确,转子动平衡良好,上导及法兰处摆度不得超过附近轴承的设

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

计间隙;整流子摆度最大不得超过0.5mm。

(6)检查并调节各冷却器的水压,使其符合设计要求。

(7)检查轴承油位变化及甩油情况,如遇轴承油槽油面急剧下降或严重甩油,以及因油冷却器漏水使油面不正常升高时,应立即停机,查明原因。

(8)检查油、水、气管路接头及阀门的渗漏情况,并作处理。

(9)对密封式循环空气冷却的发电机检查其密封情况,要求基本上无漏气现象。

(10)用细砂纸磨整流子及滑环接触面,并磨装炭刷,使炭刷与整流子及滑环接触良好,弹簧压力合适。炭刷在刷握中伸缩灵活,无卡阻及摇晃现象。

(11)待轴瓦温度稳定后停机,机组第一次停机采用手动操作方式。停机时设专人监视制动器工作情况。当机组转速下降到额定转速30%左右时,手动加闸,并记录从停机开始到加闸及从加闸开始到机组完全停转的时间。对有液压减载装置机组,在这之前,机组转速下降至额定转速50%时应先投入减载装置油泵,直至转速降为零时停止油泵。

(12)机组停机后除对第一次运转中发现的问题进行处理外,还必须检查发电机转子的磁极,风扇及连接螺栓等有无松动和破坏处,各轴承油槽油位是否仍在规定范围内。

(二)过速和甩负荷试验时的检查

机组自动开、停机试验时,当自动开机完成后要做过速试验,其目的是校验转速继电器的整定值,并检查机组过速情况下各部分的摆度、振动、温度以及转动部分有无松动。当机组进入带负荷试验阶段时,要做甩负荷试验。甩负荷试验可以考验调速机调整的稳定性。机组过速试验和每阶段甩负荷试验,都将使机组加速而在高速下运转。试验时测量并记录发电机各部分摆度、振动和温度,每次试验完后都应停机仔细检查发电机转动部分和固定部分的状况,磁极,风扇及各连接螺栓等有无松动现象,个别零件是否破坏等情况。

当机组所有试验进行完毕,并停机对试验期间发现的问题和缺陷加以处理完后,就可开始72h试运转。在此期间,应根据运行规程,连续地观察机组各部分的温度、声音、摆度及振动,油、水、气系统的工作情况以及电气部分和自动装置的运行情况。如经72h运一切正常,则可按规定正式投产发电。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第三章　水轮发电机的运行监视与维护及故障处理技术

象所有的机器一样，要使发电机安全和长期运行必须要正确地使用和维护。

第一节　水轮发电机的运行监视

运行中的水轮发电机必须定期进行巡回检查（一般是每小时一次），监视发电机运行情况，记录各仪表指示，写好运行日谋。巡视中要集中精力，仔细观察，及时发现问题，以保证安全发电。

1.温度监视

发电机的绕组、铁心、轴承应经常监视温度。其值不能超过规定的数值，如果温度发生迅速或倾向性的变化（局部过热或突然升高），应及时停机检查并找出原因进行处理。

2.轴承油面监视

轴承油面应经常监视，如油面高出正常油面，可能是由于油冷却器漏水引起；如果油面低于正常油面，可能是油槽漏油或是管路阀门没有关好引起。

3.振动与音响监视

发电机在运行中应定期测量振动和音响，所测数值应不超过规定数值，如果振动和音响发生变化（强烈振动，噪音和摆度显著加大）应停机检查并处理。

4·绝缘监视

应定期检查发电机绕组的绝缘电阻，如果发电机绝缘电阻发生显著变化，如异常下降、转子一点接地时，应停机检查和修理。

5.电流引出装置监视

应经常查看刷下火花、电刷工作情况（电刷和集电环接触情况、磨损量、电刷在刷握内移动灵活情况）和集电环的表面情况（有无烧伤、磨出沟槽、锈蚀或积垢等情况）。如发现异常情况应及时处理。

电刷磨损后应换同样牌号和同样尺寸的新电刷，为了使集电环的磨损程度均衡，每年应调换1～2次集电环的极性。

6.冷却器监视

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

冷却器应经常检查，如发现冷却器流量减少或堵塞，冷却后的空气或油温明显升高应及时处理。

发电机在运行中，推力轴承的油温应为 20～45℃，导轴承的油温允许至 50℃，应用调节冷却水流量的办法使轴承各轴瓦和油的温差保持在 20℃左右。当发电机起动时应注意轴承油槽内的温度不低于 10℃，以免引起不容许的轴瓦热变形。停机时应关闭冷却器的进水阀门，对油冷却器而言是为避免引起轴瓦过分变形；对空气冷却器而言是为避免引起空气冷却器过分结露。

7.制动系统监视

应经常检查制动器，尤其在每次起动前必须检查制动器系统是否正常。当制动系统不正常或在升起情况下（有压力），是不允许起动发电机。在停机 24h 以上再起动机组前，须用制动器顶起转子 5～10mm，然后将制动器压力去掉使制动器的制动块返回到原来位置后再起动。

第二节　水轮发电机的日常维护

除在日常运行过程中对发电机进行监视、及时处理缺陷外，还应当定期对发电机进行全面的检查和修理。每次检修的时间间隔及项目应根据发电机各零部件的结构特点和磨损情况而定。每次检修应有记录。除了因发生事故及时检修外，一般每三年进行一次大修，每一年至一年半进行一次中修，每三个月至半年进行一次小修。以便及时发现问题，消除隐患，防止因事故停机。

机组检修工作大致可分为四类：

1.维修检查

维修检查是在运行机组不停机的情况下，经常性的维修工作。目的是消除和防止机组运行过程中可能发生的故障，发电机维修项目及质量标准，见表 6－3－1。

表 6－3－1　　发电机维修项目及质量标准

编号	项　目	质 量 标 准
1	各部轴承检查	油面合格，油色正常，轴承无异声，瓦温正常，无漏油甩油，冷却器水流通畅
2	机组外观检查	振动、声响无异常
3	测量导轴承摆度	符合规定标准，无异常增大
4	制动器外观检查	无异状、无漏油
5	表计检查	指示正确，无渗漏
6	发电机冷却水管预备水源检查	各阀位置正确，无漏水现象

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 6-3-2 发电机小修项目及质量标准

编号	项目	质量标准
1	推力轴承及导轴承外部检查清扫	无异状,将油污、灰尘擦干净,漏油严重时应进行处理
2	制动器、制动环检查、清扫	制动环表面无毛刺,螺杆头与磁轭键均未凸出制动环表面,制动器连接螺钉无损伤、折断,油污灰尘应擦干净
3	制动器给风动作试验	制动器动作灵活,给风后,风压能保持在 600kPa 以上
4	油、气、水管路及各阀检查	不渗漏,管阀外部擦干净
5	发电机盖板及挡风板检查	螺钉紧固,焊缝无裂缝,钢板无裂缝
6	转子各部检查	螺栓紧固、结构焊缝与螺母点焊无开焊,磁轭无松动或下沉现象,风扇无松动变形,铆钉完整无缺。转子各部清扫干净
7	定子与机架结合螺栓、销订及结构焊缝检查	销订无松动,结构焊缝与螺母点焊无开焊,灭火水管不松动,且经通风试验畅通无阻
8	空气冷却器外部检查	不漏水
9	各表计检查	指示不准的应拆下进行校验,装后接头不漏
10	过滤网清扫	将灰尘清扫于净

2.小修

小修一般在停机状态下进行。一般是设备发生了故障(或事故)需立即处理的项目或有目的地检查和修理发电机的某一些重要部件。通过小修能掌握被修部件的使用情况,并可为编排大修项目提供依据。发电机小修项目及质量标准,见表 6-3-2。

3.大修

大修主要是为解决运行中出现并经小修无法予以消除的严重设备缺陷,将在第四篇中予以详细叙述。

4.扩大性大修

扩大性大修是全面、彻底地检查每一部件结构及技术数据,第四篇也将详细介绍。

根据维修检查和小修项目,下面将分别予以介绍。

一、通常维护

(1)做好记录是电站的必须进行的工作。记录应包括仪表的读数,如负荷、温度、流量及磨损零件的更换等等,还应记录运行中的干扰、故障和修理故障的措施说明。

(2)当机组过速或发生飞逸转速后,应检查发电机转动部件是否松动或被损坏。

(3)经常保持厂房和发电机的清洁,定期擦抹各部件表面灰尘。对发电机外露的金属加工面,应经常涂抹黄油,以防锈蚀。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

二、发电机主要部件的维护

(一)定子

1.定子绕组的检查与维护

(1)检查绕组端部是否发生变形,并清扫绕组上的灰尘和污物。

(2)检查端箍的绑扎是否发生松动。

(3)检查槽楔是否松动。

(4)检查绕组绝缘老化情况。检查绝缘是否有损伤,如果有损伤应予以修理。

2.定子铁心的检查与维护

(1)检查定子通风沟内是否有灰尘、污物等,并用干燥的压缩空气吹干净。

(2)检查齿压片、齿压板与铁心间有无松动锈蚀;如果压指与压板为点焊结构,应检查焊点是否开裂,压指是否歪斜或突出;还要检查压指的颜色,是否有因温度过高形成的蓝色。

(二)转子

1.检查转子零部件固定情况

(1)转子上所有固定螺母是否紧固并锁定。如果松动,应查明原因并紧固锁定。

(2)检查磁轭键、磁极键是否松动,如松动应打紧并点焊锁定。

(3)转子上所有焊缝有无开裂现象。

2.检查磁极绕组

(1)绕组间的联接线和转子引线的联接是否完好。

(2)检查匝间及对地绝缘,如果磁极绕组的对地绝缘电阻低于0.5MΩ,应找出原因并修理。

(3)清扫磁极绕组上面的灰尘和污物,保持磁极绕组清洁干燥。

3.检查制动环的摩擦面是否有损害。

4.检查风扇应牢固无松动及变形。

5.检查转子与定子铁心之间的间隙应均匀符合规定要求。

3.推力轴承

(1)检查推力轴承瓦面,如果发现瓦面有明显的磨损,应及时修理并找出原因。

(2)测量轴承绝缘电阻,其值不应小于0.2MΩ(油槽充油后)。

(3)检查镜板摩擦面应无划痕及其他缺陷,并检查与推力头组合面的质量。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(4)用反光镜检查推力头表面的质量。

4.导轴承

(1)检查导轴承瓦面,如果发现瓦面有明显的磨损,应及时修理并找出原因。

(2)测量导轴承绝缘电阻,其值不应小于4MΩ。

(3)测量导轴承瓦与滑转子之间的间隙应符合要求,支柱螺丝第一次运行三个月后必须紧固一次,并调整好间隙。

5.润滑油

润滑油应该定期抽样检查,一般是每年检查一次。润滑油的质量可以通过颜色、气味、混浊度、泡沫和水份含量等方面来检查。

油的颜色除了稍有一点加深外应无其他改变,颜色的加深不能再发展下去。

油的气味不应有腐败或烧焦味。

清洁的油应该是清的、透明的。油的混蚀可能在油中混有颗粒、杂质或水份。油中的颗粒可能是由于轴承内部的磨损、破坏或腐蚀引起的或由于充油前油槽没有清理干净引起的。在油中还会发现其他沉积物,如清漆、胶木、纤维体。在油的抽样检查中发现金属沉积物或金属化合物的含量超过油量的0.05%时,就应该将油从油槽中排出进行过滤使之符合要求或更换清洁的符合要求的新油。脏油然完后,应对油槽进行彻底清扫。通常在油中的金属颗粒在初始运行时会出现,如果这种现象继续下去或重新出现,应对轴承进行检查。

油有没有水份可以用实验证明。将5mL的油倒进试管并小心加热,当油加热到一定温度时,有水份存在就会发出僻啪的响声。如果油完全没有响声,就可以认为合格。

润滑油使用一定时间后会发生老化而逐渐变质,一般经过50000h后必须更换新油。

6.冷却器

(1)所有冷却器必须定期清洗。一般用1.2倍额定工作水压反向冲洗或用压缩空气吹干净管内的泥沙杂物,对于直管的空气冷却器最好在铁丝上捆绑布条来回拉动将管内壁粘附物清除掉。在来回拉动捆绑布条时要防止铁丝拉断将布条留在管内使管子堵塞。

(2)所有冷却器管内的水垢应及时清洗以免影响冷却效果。

7.集电环和电刷

(1)集电环外表应保持干净;如出现不圆、偏心、粗糙或烧灼现象时应及时处理;应定期测量集电环绝缘电阻,其值不应小于1MΩ。为了避免集电环不均匀磨损,应该经常倒换集电环的极性。

(2)经常检查电刷弹簧的压力,可采用平衡弹簧来测量,其电刷表面压强应为15~20kPa。如果不符,应仔细调整电刷弹簧的压力。

(3)检查刷盒的底边离集电环表面的距离,一般为3~4mm;如果不符,应调整刷握。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(4)电刷在刷盒内应能自由移动,电刷必须保持清洁以免电刷下产生火花。更换新电刷时应使用相同牌号和尺寸的电刷,并将细砂布放在电刷和集电环中间反复摩擦电刷表面,使电刷磨成圆弧形,达到电刷底面全部与集电环良好接触。

8.制动器及管路

(1)经常检查制动器及所有管路是否漏气和漏油。

(2)检查制动器活塞是否在气缸内自由移动;如果发现卡死,应及时处理。

(3)检查制动器的制动块厚度,如果制动块的厚度小于15mm就必须更换新的制动块。

(4)制动器将转子顶起后应加以锁定,防止水轮机导叶漏水使水轮发电机组转动而造成事故。

9.上盖板和上挡风板

检查上盖板和上挡风板的全部螺栓、螺母是否松动,如果松动应重新紧固锁定,以防止松动掉下造成事故。

第三节 运行中常见故障与处理措施

一、发电机电压不正常

(一)发电机起动时升不起电压

发电机起动时升不起电压的原因及处理方法如下所述。

(1)发电机或励磁机转子铁心剩磁消失。发电机在制造中,有时要充磁,使得磁极上保留一点剩磁。但由于突然甩负荷或在运输过程中,机组受到振动或长时间不发电,剩磁可能消失,导致在发电机起动转速正常后,不能自励建压。

处理方法:给予开机充磁,起动机组达额定转速,把励磁机的磁场变阻器电阻调到最小值,然后将4~5节干电池串联起来,把电池的正、负极,分别接到励磁机的"+"极和"-"极上(注意极性不能接错),这样励磁机和发电机的励磁绕组就通入直流电而进行充磁。充磁所加的直流电压不能高于本机的额定励磁电压。充磁时间一般只需要几秒钟即可。充磁时要注意观察发电机交流电压表的电压值,当发现电压开始升高时,即应迅速把磁场变阻器电阻加大,并立即断开充磁的外接直流电池电源,以免电压过高击穿发电机的绝缘。

半导体励磁装置的发电机,充磁时只要把电池的正、负极,分别接到发电机接线盒上

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

的“+”极和“-”极即可。

(2)定子绕组到配电盘之间的联接线头有油泥或氧化物;接线螺丝松脱;联接线断线;定子绕组断线。

处理方法:清除接线头的油泥或氧化物,拧紧接线螺钉。对于断线部位,可用万用电表或试灯法查出,予以修复。

万用表法是用万用电表检查断线部位,就是用测量电阻的办法来检查。检查时,要在发电机停止转动,主开关在断开位置时进行。把万用电表的切换开关拨到电阻(R×1)挡,将测电笔的一头搭在发电机中性点上,另一头分别与发电机三相绕组的引出线端子搭接。正常时,三相绕组的电阻值都很小。如测得某相电阻值很大时,则表示这一相已开路断线。

检查转子绕组是否断线应先将电刷提起,或用数层纸垫在电刷下面与转动部分隔开进行测定。

试灯法检查断线部位,如图6-3-1所示。用两节干电池串联一个3V的手电筒小灯泡,对各相绕组通电检查。如果灯泡亮,说明该绕组通路;如灯泡不亮,说明该绕组开路断线。

用同样方法,也可检查转子绕组是否发生断路故障。

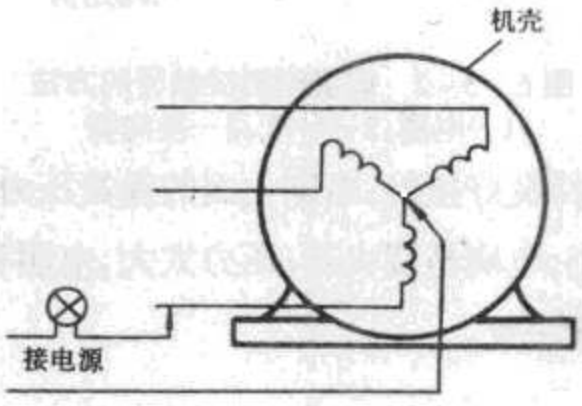


图6-3-1 用试灯法检查发电机绕组断线

当查出某绕组断线后,需拆开绕组线圈,逐段进行检查,才能查出具体断线部位,予以修复。

(3)励磁机励磁绕组或励磁回路断线和接触不良。

处理方法:同上述检查发电机绕组断线方法一样,查出励磁绕组或磁场变阻器断线处,予以修复。对于接线头脱焊、磁场变阻器或灭磁开关接触不良的,要重焊接线头、磨光变阻器及灭磁开关的触点。

(4)励磁机励磁绕组极性接反

处理方法:在发电机接近额定转速时,用万用电表测量正、负极电刷间的电压。若电压略大于额定值,且减小磁场变阻器电阻时电压反而降低,说明励磁绕组和换向器的正负

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

极接反了，可将极性互换再接上。

(5)磁场变阻器未调好。

处理方法：在水轮发电机达额定空载转速时，将磁场变阻器电阻调到使发电机达空载额定电压时的标准位置上。

(6)电刷接触不良，弹簧压力太小。

处理方法：电刷与换向器的接触面应无油污和锈渍、无毛刺。对于新更换的电刷，一定要将电刷与换向器的接触面用00号玻璃砂纸研磨，而不能用金刚砂布研磨。研磨时，可在接触面放砂纸，有砂的一面朝着电刷，加大弹簧压力，用手往返移动砂纸，直到电刷底面与换向器圆弧面相符为止，如图6-3-2所示。研磨时拉动方向，只能沿换向器的弧面移动，而不能离开换向器的弧面拉动。接触面研磨好后，可用气筒吹去炭屑。

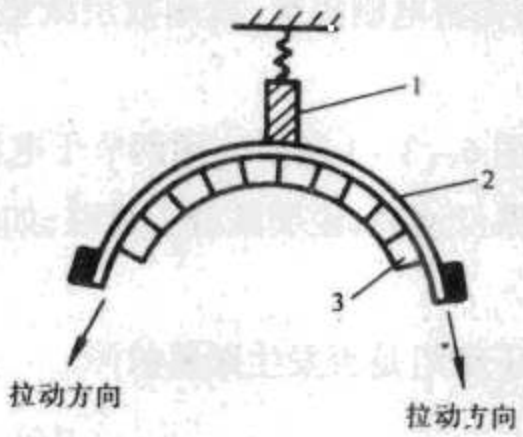


图6-3-2 研磨电刷接触面的方法
1—电刷；2—砂纸；3—换向器

为了使电刷与换向器保持良好接触，电刷上面的弹簧压力应保持适当，一般电刷压强应为20~30kPa。如压力太小，电刷易冒火花；压力太大，电刷和换向器易磨损和发热。各电刷与换向器的压力，应尽量一致。

(7)电刷位置不正。

处理方法：松开刷架的固定螺钉，将电刷沿发电机旋转方向慢慢移动，在电刷火花最小时即是其正确位置。一般只要移过1~2个换向片的距离即可。

(8)励磁机换向器铜片磨损，使云母片高于铜片。

处理方法：将换向器的钢片车平，用锯条轻轻割低云母片，使之比钢片约低0.8~1.0mm。

(9)发电机定、转子或励磁机绕组接地。

检查绕组接地的方法是：把兆欧表的接地端接到机壳上，另一端与需检查的部位联接。如兆欧表指针指示为“零”，说明所查部位已接地。当检查发电机定子时，需把绕组中性点拆开，把兆欧表接地端(E端)接到机壳上，线路端与所检查的绕组联接，再摇动兆欧表，如果指针为“零”，就表示该绕组接地，以此检查每组绕组，直到查出为止。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

如无兆欧表，也可用试灯法检查接地，见图 6－3－3，检查部位灯泡亮则说明该部位已接地。

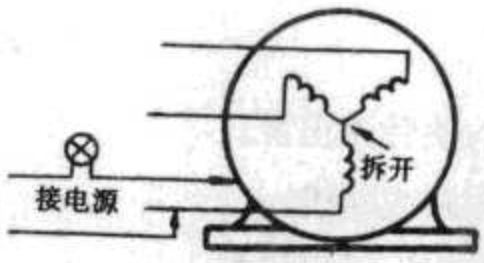


图 6－3－3　试灯法检查绕组接地

(10)部分或全部半导体硅整流管击穿。

对采用半导体励磁装置的发电机，常因过电压或过电流事故使半导体硅整流管被击穿，使发电机不能建压。

处理方法：可用万用电表测量电阻的方法进行测定。将硅整流管的两端接线拆开，再把万用表拨到电阻挡，用其测棒的正、负极，分别与硅整流管的正、负极搭接，测得正向电阻值。然后再反接测得反向电阻值。如正、反向电阻值相差极大(几千欧或几十万欧)，说明硅整流管完好。如正、反向电阻值相差不大，且电阻值都较小，说明硅整流管已被击穿，就需调换同型号的硅整流管。调换时，要注意硅整流管的正、负极性，切不要接反。

以上测试方法，并非绝对可靠。有时测得硅整流管虽尚未发现损坏，但发电机电压仍不能上升或当电压很低时带上一部分负荷电压迅速下降，且增大调速器开度后电压仍不能回升时，可以停机用手摸硅整流管，当发现某一只管子温度与其他管子相比有显著升高，就说明该管子已损坏。

(二)发电机电压太低

发电机电压太低的原因及处理方法，有以下几方面。

(1)水轮机转速太低或传动皮带太松；水量不足和超负荷。

处理方法：调整进水量和传动皮带的松紧，防止皮带打滑，提高发电机转速；当水量不足时，可切除部分负荷或轮流供电。

(2)励磁回路电阻太大。

处理方法：减小磁场变阻器电阻值。

(3)励磁机电刷位置不正或弹簧压力不足。

处理方法：见上述一中(6)、(7)。

(4)部分半导体硅整流管被击穿。

处理方法：见上述一中(10)。

(5)定子绕组和励磁绕组中有短路或接地等故障。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

处理方法:查出短路或接地部位,予以修复,见上述一中(1)、(9)。

(三)发电机电压过高。

(1)转速过高。

处理方法:减少水轮机流量,使转速正常。

(2)磁场变阻器调压失灵:短路或断线。

处理方法:查出短路或断线部位,予以修复。

(3)发电机飞逸。

处理方法:作紧急事故处理。

(四)发电机三相电压不平衡

发电机三相电压不平衡的原因及处理方法如下所述。

(1)定子绕组短路或断线。

处理方法:查出短路及断线部位,予以修复。详见上述一中(2)、(9)。

(2)外电路三相负荷不平衡。

处理方法:调整三相负荷,使之基本相等

二、发电机励磁不正常

(一)励磁机逆励磁

发电机运行中,如出现励磁电流表、励磁电压表的指针指向反向,而其他仪表指示正常,说明励磁机极性反向,出现逆励磁。

产生逆励磁的原因是:

(1)发电机停机时,如果磁场变阻器手柄转过空载额定电压值位置才跳开关,说明发电机处于欠激状态,它是从系统吸收无功电流激磁的。当突然跳开关时,由于电枢反应使磁通很强,可能使励磁机剩磁改变极性。

(2)励磁回路突然断开后重又接通,如由于换向器片间凸出与电刷接触不良造成短时失磁,从系统吸收无功电流的电枢反应有可能使励磁极性变反向。

(3)励磁回路突然短路,当电刷不放在几何中心线上时,由于很强的电枢反应的去磁作用超过了主磁场,使励磁极性改变。

(4)当外电路发生突然短路时,由于发电机突然增加的定子电流在转子绕组中感应出一个直流分量的电势,其方向与励磁磁场方向相反。当这个电势达到比励磁机电枢电势还大时,就有可能出现励磁极性变反的现象。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

励磁机出现逆励磁，一般不必停机处理，只需把联接励磁电压表和电流表的接线端子互换即可，但必须做好运行值班记录，在今后发电机停机后，再把励磁机的磁场绕组极性改变过来。同时，将各表接线端子重新互换回去。

(二)发电机失去励磁

运行中的水轮发电机组出现下述现象：励磁电流表、励磁电压表指针突然下降到零且有摆动；定子三相电流剧增，无功功率表指示为负值，功率因数表指示为进相，发电机从电网吸收无功功率运行；各仪表指示均产生周期性摆动；转速高于电网同步转速，变为异步发电机运行；单机运行时发电机仪表盘上的所有仪表指示为零，且发电机严重过速。上述现象都表明发电机失去励磁，应迅速查明原因予以处理。

(1)灭磁开关误动作

处理方法：检查灭磁开关有无跳闸，如已跳闸，应迅速合上。

(2)磁场变阻器接触不良。

处理方法：检查变阻器

(3)磁场变阻器或励磁绕组断线。

处理方法：停机检查断线处，予以修复。

(4)励磁自动调整装置故障。

处理方法：检查励磁自动调整装置是否失灵。应立即切除失灵装置，改用励磁变阻器手动增大励磁。

对于单机运行的水轮发电机组，当发生失去励磁时，应立即关闭水轮机导叶，停机检查处理。

(三)发电机转子绕组接地

当发电机转子发生一点接地时，因电流未形成回路，尚可继续运行。但是，往往在转子一点接地后，很容易引起另一点接地或励磁回路中任一部位发生接地(即形成两点以上接地)，使转子绕组被短路，引起转子过热和产生强烈振动。

转子绕组产生接地的原因主要有以下几方面：

(1)集电环绝缘套管积灰、油污或受潮破裂。

(2)转子过速旋转时，励磁绕组因离心力作用发生晃动，而使内套绝缘擦伤。

(3)转子长期处在温度偏高情况下运行而致绝缘老化产生裂纹，发生接地。

(4)磁极间联接线与风扇相摩擦时，造成绝缘损坏。

(5)转子引线进出轴处，因开停机时与轴相碰造成绝缘磨损接地。

(6)励磁回路其他部位发生接地。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

当发现发电机励磁电流和定子电流突然增大、励磁电压和交流电压突然下降、功率因数表指示升高或进相时，说明转子已发生两点接地，应立即停机检查出接地点，予以排除和修复。

三、发电机产生异常声响及其他故障

(一)发电机在异常运动方式时产生的异常声响

发电机在运行时产生的异常声响的原因及处理方法如下：

(1)非同期并列，产生较大冲击电流，发电机发出强烈吼声。

处理方法：重新要同期并列。

(2)外部线路短路或雷击，发生瞬间异响。

处理方法：恢复正常运行。

(3)外部线路故障，发电机三相电流严重不平衡。

处理方法：消除线路故障。

(二)发电机运行时发出严重噪声

发电机运行时发出严重噪声的原因及处理方法如下所述。

(1)发电机或励磁机的定子和转子相摩擦，或有异物落进间隙中。

处理方法：多为轴承磨损引起，应更换轴承，对间隙中异物应予以清除。

(2)换向器凸凹不平或云母片凸出。

处理方法：挫平换向器并磨光；用锯条将云母片割低，使之比铜片低0.8～1.omm。

(3)电刷太硬或压力太大

处理方法：更换软的同型号电刷；调整压紧弹簧，减小电刷压力。

(三)发电机振动较大

运行中的水轮发电机组的正常振动是允许的。但当机组振动超过制造厂提供的机组允许最大摆度和振动值时或超出规范规定的允许振动值时，应查明原因予以处理。发电机振动产生原因及其处理，有以下几方面。

(1)发电机定子与转子或发电机转子与水轮机转轴不同心。

处理方法：重新校正并调整同心度。

(2)地脚螺栓松动或基础产生不均匀沉陷。

处理方法：拧紧地脚螺栓；加固地基。

(3)轴颈弯曲。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

处理方法:用千分表检查轴是否弯曲或不圆,进行修直或车圆。

(4)转子绕组匝间短路,有两点接地或接线有错误。

处理方法:检查转子绕组及集电环对地绝缘,用交流阻抗法检查转子绕组有无匝间短路,并解除故障。

(5)发电机定子三相电流严重不平衡。

处理方法:调整三相负载,使之基本平衡。

(6)定子绕组短路或接地。

处理方法:按本章第一节中一中(1)、(9)方法,查出故障部位予以排除。

(7)传动皮带联接头不正或木制皮带盘偏心。

处理方法:重新联接,削正木制皮带盘,保证同心。

(四)发电机与电网非同期并列引起严重电流冲击

发电机与电网非同期并列瞬间,出现定子电流突增,定子电流表指针激烈摆动,电网电压下降,发电机发出强烈吼声等现象。非同期并列是发电厂的严重事故,因为它将使发电机及变压器、开关等设备受到冲击破坏,严重时会使发电机绕组绝缘损坏或烧毁以及端部变形,甚至会因发电机和系统间产生功率振荡而使电网瓦解。因此,必须特别引起注意。

当出现非同期并列而不能牵入同步时,应立即拉开发电机主开关、灭磁开关,关闭水轮机导叶,停机检查。

非同期并列产生的原因及处理

(1)同期并列时,没有满足电压、频率、相位、相序相同的要求。

处理方法;严格按同期并列条件进行操作。

(2)同期回路故障

处理方法:检查同期回路接线。

(3)发电机主开关有一相未接触。

处理方法;检查主开关触头。

(五)发电机正常起动接通外电路后熔断器熔断或断路器跳闸

(1)外线有短路。

处理方法:查出外线短路处,予以修复。

(2)负荷太大。

处理方法:减负荷运行。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(六)发电机温度过高

发电机温度过高的原因及处理方法如下所述。

(1)发电机超负荷运行,定子电流和励磁电流都超出额定值,且超出允许过负荷运行时间。

处理方法;减负荷运行。

(2)三相电流严重不平衡

处理方法:调整外电路三相负荷,使得基本平衡。

(3)通风冷却系统不良,如通风道堵塞、进出风短路或发电机内部绕组间灰尘堆积等。

处理方法:查明原因,排除故障,改善通风条件。

(4)轴承安装不良或损坏。

处理方法:重新安装或更换轴承。

(5)轴承润滑油缺少或油号不对,油质变坏以及油中有其他杂质,使轴承运转不良。

处理方法:清洗轴承,加入合格的润滑油脂。

(七)发电机冒烟或着火

发电机产生冒烟着火时,应紧急停机,与电网解列,切断通气道,迅速灭火。要用喷水灭火或四氯化碳灭火器,干粉灭火器灭火,不得使用泡沫灭火器或砂子灭火。因为泡沫灭火器有的化学物质是导电的,将使绕组绝缘性能大大降低,而用砂子灭火,将会给检修绕组造成极大困难。

发电机冒烟或着火的原因及处理如下。

(1)发电机超负荷运行时间过长。

处理方法:减负荷,短时过载运行时间不能超出允许范围。

(2)定子绕组匝间或相间短路。

处理方法:查出短路部位,予以修复。

(3)雷击或过电压后或机械原因引起绝缘损坏击穿。

处理方法:安装防雷措施。查出绝缘损坏处予以修复。

(4)发电机转子和定子摩擦严重或绕组被异物擦伤。

处理方法:检查故障部件予以消除。

(5)并列误操作

处理方法:按发电机并列条件正确操作。

(八)电刷产生较大火花

电刷产生较大火花的原因及处理方法如下所述。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(1)电刷与换向器接触不良。

处理方法:将换向器(或集电环)磨光、整平,用干净布沾少量汽油或酒精,擦干净积垢和油污。

(2)电刷磨损或破裂,压力不足。

处理方法:更换同型号电刷,调整压紧弹簧压力。

(3)电刷压力调整不匀。

处理方法:电刷各压紧弹簧压力要调整得尽量一致,可用弹簧称来均匀调整。

(4)因电刷过热,引起电刷压紧弹簧退火,失去弹力。

处理方法:更换新弹簧,并重新调整弹簧压力。

(5)电刷位置不正。

处理方法:调整电刷至正确位置,拧紧固定螺栓。

(6)电刷规格、型号不符。

处理方法:采用型号规格合格的电刷。

(7)换向器铜片间有金属粉沫、石墨粉等导电杂质。

处理方法:刷清或吹净铜片间导电杂质。

(8)换向器铜片后面联接线短路或断线。

处理方法:查出短路或断线部位,予以修复。

(9)换向器的云母片损坏或短路。

处理方法:修理换向器

(10)励磁机电枢绕组开焊,接触不良。

处理方法:查出开焊部位予以补焊。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第七篇

水轮发电机组检修技术

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第一章 水轮发电机一般检修项目及其程序

要保证水轮发电机在运行中安全可靠地发电，使机组长期高质量的运转，就必须使机组处于良好的工作状态，坚持该修必修、修必修好的原则，严格按照规章制度办事，做到有目的、有计划的进行检修工作。只有高水平、高质量的检修工作才能确保水轮发电机组的安全运行。水轮发电机的检修工作分为小修、大修和扩大性大修。小修工作已在前面作了介绍，下面将介绍大修和扩大性大修。

第一节 大 修

大修是全面地检查机组各组成部分的结构及其技术数据，并按照规定的数值进行调整工作的过程。它主要是为解决运行中出现并经小修无法予以消除的严重设备缺陷。这步工作往往在不吊出水轮机转轮的情况下进行。检修项目与质量标准，见表 7－1－1。每 2～3y 一次，每次 20～30d。

表 7－1－1 发电机大修项目及质量标准

项目		质量标准
推力轴承与导轴承	1.轴瓦刮研	刮研挑花，前后两次的刀花应垂直，进油边的研刮应按图纸进行。推力瓦要求 2～3 个/cm² 接触点。分块式导轴承瓦要有 2 个/cm² 接触点，其不接触面积每处不大于轴瓦面积的 2%，其总和不得超过该轴瓦面积的 8%。筒式瓦刮研后，其间隙应符合图样要求，轴瓦接触点应为 1～2 个/cm²
	2.推力轴承高程及水平	高程应符合转子安装高程，水平应在 0.02mm/m 以内
	3.卡 环	受力后用 0.03mm 厚塞尺检查，有间隙的长度不得超过圆周长的 20%，且不得集中在一处
	4.推力瓦受力调整	刚性推力轴承推力瓦支柱螺栓拧紧最后二、三遍时，用力应均匀，其位移应一致；液压支柱式在承受转动部分重量之后，各弹性油箱的伸缩值，相互间最大差值小于 0.3mm
	5.导轴承间隙调整	轴承总间隙值按图样要求确定，分块式单侧间隙应按轴线的实际位置及方位确定，调后误差不得超过 ±0.01mm，轴瓦下部托板与轴瓦间无间隙，上部压板与轴瓦间保持 0.5mm 左右间隙
	6.轴承绝缘	推力油槽充油后，推力轴承与之绝缘值不得小于 0.3MΩ(用 1000V 兆欧表测量)。有绝缘的导轴瓦绝缘值在 50MΩ 以上
	7.推力瓦温度计	正常温度应当在 60℃以内，最高不得超过 70℃

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

项目		质量标准
机组轴线	1.盘车测量轴线	记录无误,计算准确
	2.轴线处理	修刮推力头或主轴法兰的位置与深度应正确,接触面要大于70%,加垫位置应正确
	3.轴线调整	各部分摆度不得超过书中介绍相关部分的规定值
转子	1.转子圆度	各半径与平均半径之差,不得超过设计空气间隙的±5%
	2.磁极铁心中心高程	允许误差不大于±2mm
	3.转子对定子相对高差	磁极中心低于定子铁心中心的平均高差,其值应为铁心有效长度的0.4%以内
	4.发电机空气间隙	各实测点间隙与实测平均间隙值偏差小于±10%
定子及机架	1.定子铁心合缝间隙	局部间隙在0.2mm以下的长度不大于全长的2%
	2.定于铁心的椭圆度	定于铁心内径最大、最小值之差应小于设计空气间隙的10%
	3.铁心及绕组检查	铁心组合应严密,无铁锈,齿压板不松动,绕组应完整,绝缘无破损、胀起及开裂现象。绕组表面无油垢
	4.机架轴承座的水平误差	应小于0.15mm
	5.机架轴承座的高程误差	按水轮机法兰盘找正,偏差值小于1.5mm
	6.机架中心偏差	应小于1.0mm
	7.机架及定子振动	振动应在规定范围之内
发电机的辅助设备	1.制动器分解检查	各零件无损坏,皮碗或密封圈变质或损坏应更换
	2.制动器及管路耐压试验	根据厂家标准进行。厂家如无规定,按顶转子最大油压的1.25倍耐压10min
	3.空气冷却器清洗及耐压试验	清洗干净,按工作压力的1.5倍进行通水试验,历时10min,应无渗漏
	4.油冷却器清洗及耐压试验	清洗干净,按工作压力的1.5倍进行通水试验,历时10min,应无渗漏
	5.各油槽清洗	清洗干净,并刷上耐油漆
	6.温度计校验,压力表、转速表及转速继电器校验	按厂家标准进行,如无厂家标准,膨胀型温度计可按2~3次校验的平均值,误差为±4℃。压力表、转速表及转速继电器的误差应符合厂家规定,如无规定,应按2.5级计算
机组中心测定及调整	1.上、下机架水平	检修前后无明显变化
	2.测前准备工作	钢琴线对中找正后与固定止漏环中心之偏差小于0.03mm
	3.测量结果	发电机定子测量误差为±0.10mm,其余各部为±0.02mm;水轮机的止漏环中心偏差小于0.10mm,止漏环不圆度小于平均间隙的5%,定子中心偏差小于1.0mm;各导轴承中心偏差在图样规定范围之内

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第二节　轴承及其部件的检修

一、推力轴承、导轴承的检修

(一)推力轴承的检修

1.推力轴承的一般检修项目与检修工艺

(1)油槽排油

检查推力油槽外部各阀门的开、闭位置正确无误后,与油库联系排出油槽内的油。在排油时,要先打开通气孔并设专人监视,以防跑油(悬式机组排油时,应以先上后下的原则逐个将推力油槽、上导、下导油糟内的油排掉,注油时顺序相反)。排油前应取出油样以供油质化验。

(2)推力轴承冷却器的分解清扫和耐压试验

关闭推力轴承冷却器给水阀,拆除给、排水管,分解出推力轴承冷却器,分解上、下水箱盖,清扫干净并去锈,涂船底漆。铜管外部擦干净,组装好后,用冷却器额定工作压力的1.25倍的水压耐压30min,检查渗漏情况并据具体情况做补焊还是更换新钢管或更换整台冷却器的处理。

(3)镜板标高的测量

机组转动部分落于推力轴承上,用内径千分尺在X-Y四个对称方向的控制点测量推力轴承座的上表面与镜板间的距离,应符合原始记录。目的是检查弹性油箱有无渗油或平衡块式轴承是否处于正常状态。对于刚性支柱式推力轴承座则无需进行本工作。

(4)推力轴承弹性油箱压缩值的测量

①测量弹性油箱压缩值前应具备的条件。①导轴瓦在对称方向抱四块瓦,单侧留有0.03~0.05mm的间隙;②转动部分没有其他的人或物体;③转子落到推力轴承上,处于自由状态。

②推力轴承弹性油箱压缩值的测量方法。在每个弹性油箱旁边设置一块百分表,测量前百分表短针应有预留行程,长针调到"0"位以便读数。用顶转子高压油泵顶起转子,顶起高度以推力瓦脱离镜板为宜,防止过大,使转子荷重落在制动板上,所有推力瓦脱开镜板,表针稳定后,可读出百分表数值,并作记录。然后再撤去油压,转子荷重又落到弹性油箱上,待表针稳定后读数记录。这样重复2~3次。表针顺时针转读数为"+",表示弹性油箱压缩,反之,表示弹性油箱伸长,两读数的差值就是所测的弹性油箱压缩值。如反

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

复几次所测数值相近即可。若发现个别弹性油箱压缩值与平均压缩值相差很多，就需要调整。调整压缩值的方法是：将转子落在制动闸上，卸松抗重螺栓锁定板，一般一次调三个，根据所测压缩值的大小，先调整差值最大、最小的为宜，抗重螺栓转动角度可根据螺栓的螺距和所需调整值来确定。调整后，再复测各油箱压缩值，直到压缩值合乎要求，方可背紧抗重螺栓的螺母，并用锁定板锁好。

(5)推力瓦检查和修刮

转动部分落在制动器上，待弹性油箱压缩值测完后，在水涡轮迷宫环处打入楔子板，同时监视主轴位移。抽出推力瓦检查瓦面有无划痕、硬点、裂纹、脱壳等现象。对于巴氏合金瓦要求瓦面每平方厘米内应有1~3个接触点，局部不接触面积每处不应大于轴瓦面积的2%，其总和不得超过轴瓦面积的5%。瓦花应呈交错排列，不符合要求的要重新进行修刮，直到合格。瓦花形状主要有三角形、燕尾形和月牙形等。对于弹性金属塑料推力瓦，则进行轴瓦总体温度测量、瓦面磨损情况测量(检查磨损圆)、瓦基与弹性层的黏结情况等。做好记录，无需刮瓦，并进行相关的清扫工作。如发现瓦面脱层超过瓦面积的4%时，应更换瓦。

(6)镜板检查

检查有无磨损、锈蚀以及局部烧损等痕迹，严重时可进行镜板的手工研磨，将氧化铬M_5~M_{10}。研磨膏用透平油稀释，为增强抛光效果可加入少许猪油，经绢布滤除颗粒杂质，用包有绢布的专用平板，顺着机组旋转方向均匀推磨，直到研磨光亮为止。检修中对镜板的短期保管，镜面可涂以透平油用纸覆盖，再盖上毛毡防止磕碰，放置时镜面应朝上。如果在镜极与推力头之间垫有绝缘垫，应检查该垫有无蠕变、裂纹及空蚀。

(7)检查推力头与主轴配合面

检查有无锈蚀情况，并用纱布、油石、汽油进行清扫处理。必要时可测量推力头孔径及主轴配合段轴径，看其变化情况，供检修参考并留作记载。

(8)全面检查

全面检查抗重螺栓、锁紧螺栓、托瓦、弹性油箱(或平衡块)等部件，应无异状；彻底清扫油槽，如有锈蚀脱漆，应去锈补漆，漆膜均匀不宜太厚；信号温度计进行校验后装复；装复推力冷却器，油槽盖板并检查密封毛毡是否完好；充以合格的透平油，油槽不得渗漏，油面合格，油位应在零位线±10mm。

2.推力轴承检修中的注意事项

(1)顶转子

在顶转子时，为防止转动部件与固定部件相碰撞，应测量并了解主轴中心情况和测量顶起高度，并注视油泵的油压表在顶起转子后有无再突然上升的现象。如发生这种现象，

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

应立即停止油泵运行，进行检查。

(2)膨胀型温度计

在拆除膨胀型温度计时，毛细管弯曲度不易过大，不要扭折，以防损坏。拧温度计绝缘帽时不要用力过猛，以防拧坏。

(3)推力头

如果拔推力头，应记录好绝缘垫的相对位置；有的推力头卡环下面加有铜垫片，要注意做好记号记录；如果轴线的稳定性良好，推力头与镜板也可不分解，一并吊走。

3.推力瓦的修刮与镜板研磨

在机组大修或扩大性大修期间，要对推力瓦进行检查。对于摩擦面是巴氏合金的轴瓦，如发现瓦面有局部研伤，轴电流烧痕，瓦花模糊或瓦花被磨平等现象；发现镜板工作面发乌不亮或是轻微擦伤，或其背面锈蚀，斑痕较重等；可进行推力瓦的修刮和镜板研磨工作。

(1)巴氏合金推力瓦的修刮

①刮瓦的工艺。水电厂在机组检修中对轴瓦的刮瓦工艺，一般指挑花。当瓦面普遍已被磨光，原瓦花已不明显时，可普遍进行一次挑花处理，否则只需将已连片磨光部分进行挑花即可，如图7-1-1所示，瓦花应均匀整齐。如图7-1-2所示，瓦花主要有三角形、燕尾形和月牙形等几种形状。三角形刀花应用较广泛，这种花纹形大纹深，运行时瓦面易于存油，既实用又易于掌握。刀花最深处约为0.03~0.05mm，位置在下刀侧与花纹中部之间，深度应用缓弧过渡，其边缘应无毛刺和棱角。为避免刀迹的重复，刮瓦时前后两次刀花应成90°方向。对于三角形刀花方向性不明显，可不规定刮瓦方向；燕尾形和月牙形刀花，前后两次刀迹可按大致成90°方向控制。

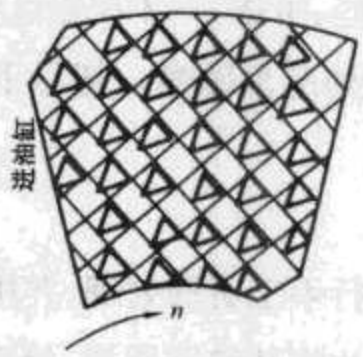


图7-1-1　刀花排列示意图

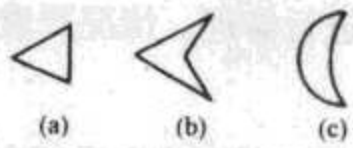


图7-1-2　刀花种类示意图
(a)三角形；(b)燕尾形；(c)月牙形

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

②刮刀的选用及操作方式。轴瓦进行粗刮时，一般采用平板刮刀，这种刀多用废旧机用锯条改制而成。它比弹性刮刀富于刚性，刮削量大。轴瓦精刮时，一般选用弹性刮刀，其刀身为弹簧钢打制而成，具有一定的弹性。弹性刮刀又有平头和弯头刮刀之分，平头弹性刮刀适用于大面深的刀花，弯头弹性刮刀适用于窄而长的刀花，如图7-1-3所示。

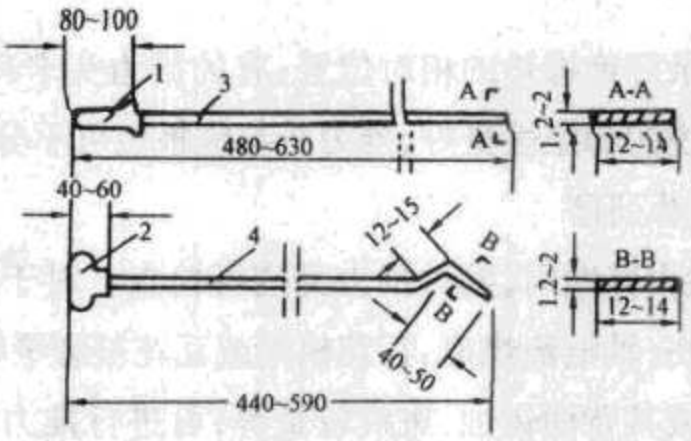


图7-1-3 弹簧刮刀形式(单位:mm)
1—长柄;2—圆柄;3—平头弹簧刮刀;4—弯头弹簧刮刀

刮瓦姿势通常为:右手握住刮刀柄，四指自然轻握且大拇指在刀身上边，左手在右手上前面压住刀身并距刀头约50~100mm，刀柄顶于腹部，挑花时，左手控制下压，右手上抬，同时利用刮刀的弹性与腹部的弹性相配合。要求下刀要轻，然后重压上弹，上弹时速度要快，这样的瓦花在下刀后上弹时的过渡呈圆弧，这也是刮瓦的难点所在。修刮时应保持刀刃锋利，找好刀的倾角，否则常常会造成打滑不吃刀或划出深沟而挑不起来等不良现象。

③要求标准。挑花后，瓦面接触点的要求由制造厂家规定，一般轴瓦面积较大的，刀花也要大些，单位面积上的点数要少些，可按1~2接触点/cm^2控制；轴瓦面积较小的，刀花也要小些，单位面积的点数要多些，可按2~3接触点/cm^2来控制。瓦花应交错排列，整齐美观。瓦花断面应成楔形，下刀处应呈圆角。切忌下刀处呈一深沟，抬刀时刮不成斜面。

(2)弹性金属塑料瓦的修理

①用普通牙膏、白布对瓦面进行手工研磨处理，并用酒精清洗干净。

②对运行中磨出的沟槽，用刀片将其修磨圆滑，修磨处可用水砂纸将其打磨，再用白布、普通牙膏进行手工研磨光滑。

③其他缺陷严格按制造厂要求进行修理。情况严重者应更换瓦。

(3)镜极研磨

由于镜板在推力瓦面上以相当高的线速度作旋转摩擦，如果镜面有伤痕或粗糙度下降以后，就有可能促使研瓦、烧瓦现象的发生，而危及机组的安全、稳定运行，所以，在机组大修或扩大性大修期间有时需要对镜面作研磨处理。镜面研磨的方法如下：

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

将镜板镜面朝上，平稳放置在牢固的支架上，先用洁净于燥的布将镜面擦净，再用细白布蘸酒精球净，然后用几个外面包有细毛毡的圆形金属平台并均匀涂以研磨溶液。研磨溶液的配制如下：将粒度为 M5～M10 的 Cr_2O_3（三氧化二铬）研磨膏用刀切碎，压成细末后倒入洁净的适量的煤油中搅拌均匀，然后用绢布过滤，即配制成研磨溶液。有时，为了提高镜面研磨后的亮度，可加适量猪油。研磨镜板镜面的工作实践表明，用人工推磨的办法是很难收到实效的，最好制作一个研磨镜板的机械化工具，研磨镜板的平台直径可接近镜板内外半径之差。两个研磨平台分别放置于直径两端。转速可选择在 10r/min 左右为宜，转动方向为顺时针方向（与机组转动方向相同）。机械化研磨镜面后，研磨膏溶液将由绿色变成黑色，这说明已研磨下镜面的金属微粒，故机械化研磨镜面一般 4～6h 即可使镜面粗糙度有明显变化。在研磨过程中，应每隔一段时间加一次研磨膏溶液。在可能掉落研磨膏溶液的地面上撒些锯末，以便清扫。研磨工作结束后，最后应用无水酒精擦拭干净，镜面涂以透平油或洁净猪油，并盖上纸和毛毡，妥善放置保管。

（二）导轴承的检修

首先，针对本厂机组的容量、导轴承的结构型式和安装位置不同，确定自己的拆装工艺及选用专用工具，并在检修工艺和检修质量标准方面也有所区别。

1.导轴承的拆装工艺及检修项目。

（1）准备工作

在导轴承分解之前，首先排去油槽内的透平油，检查输、排油管路上各阀门的开闭位置是否正确，并设专人监视，严防跑油。

（2）油槽及盖板的拆卸

悬式机组的分块瓦式上、下导轴承及半伞式机组的上导轴承，多装置在机架中心体内。油槽的结构型式不一，有的油槽法兰固定在轴承座圈下环面上；有的油槽大部分由机架中心体立筋割出一个环形空间，用轴向和水平环板围成，在上下分别配装盖板、挡油管和抽屉式冷却器，这种轻型油槽拆卸时比较容易。常见的方法有以下三种：

①如图 7－1－4 所示，在油槽 1 的下部均布两个或三个千斤顶 3，当排油和分解组合螺栓后，可同时降低几个千斤顶将油槽落下，然后再分解对口、冷却器及其他附件。

②有的油槽可用 3 或 4 根长螺杆拧入油槽底板或法兰，顺螺杆在底板或法兰外面拧上专用螺母作依托，当拆下油槽法兰的组合螺栓后，可通过同时拧动依托螺母的办法逐渐将油槽落在事先准备好的长铁凳上。

③将三个链式起重机于 120°位置挂在机架上，在油槽外壁上焊吊耳，通过两个链式起重机同时拉链操作，将油槽逐渐下落。

④拆卸结合螺栓后，先用顶丝将油槽盖板顶起，然后拆对口螺栓分瓣后分别外移放

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

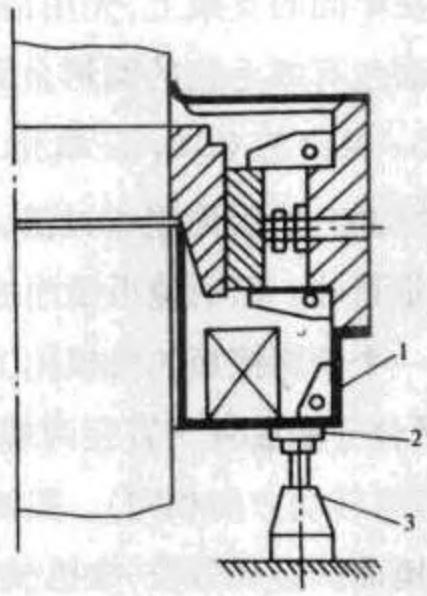


图 7-1-4 用千斤顶下落油槽示意图
1—油槽;2—木方;3—千斤顶

下。

⑤组装时,工序拆装基本相反,不再叙述。

(3)导轴瓦的拆装

由于导轴承所处位置空间狭小,操作不便,导轴瓦拆装往往要借助于自制的专用工具来进行。常见的拆瓦措施有以下几种:

①用一根长方形木板,一端托在瓦底,下部支点用方木,方木可放在已落下的油槽上部跳板上或视现场情况安排,木板的另一端用人力压住,通过减少压力使瓦渐渐下落。

②如图 7-1-5 所示,将一自制专用工具放在油槽上部跳板上,用小螺杆千斤顶把轴瓦顶靠在轴领上,卸下轴瓦托板,再将专用工具的直角托板拧上去托住轴瓦斤部,拆下小螺杆千斤顶,然后慢慢旋转手柄便可将轴瓦落下取出。

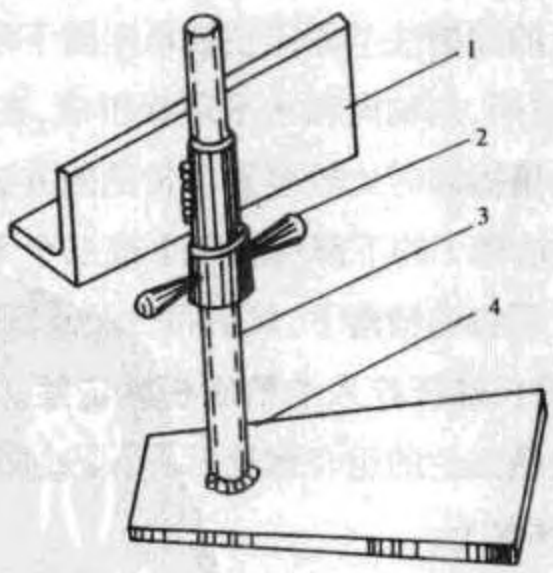


图 7-1-5 拆装导轴瓦专用工具立体图
1—托板;2—旋柄;3—丝杠;4—底座

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

③还有一种专用工具，如图 7－1－6 所示。将外端面有圆弧的平板靠在轴领 2 上，另一端放在机架轴承座上部，设专人把稳，在轴瓦上端面拧入一吊环，吊环上系一吊绳 4 绕过滑轮 7，绳的另一头用人拉着，卸下托板后，慢慢松绳后便可将轴承瓦落下。

④有的导轴瓦上方有较大的空间时，待轴瓦上部挡板卸掉后，可用滑轮或人力直接提出。

安装导轴瓦的工序与拆卸工序大体相反，不另介绍。

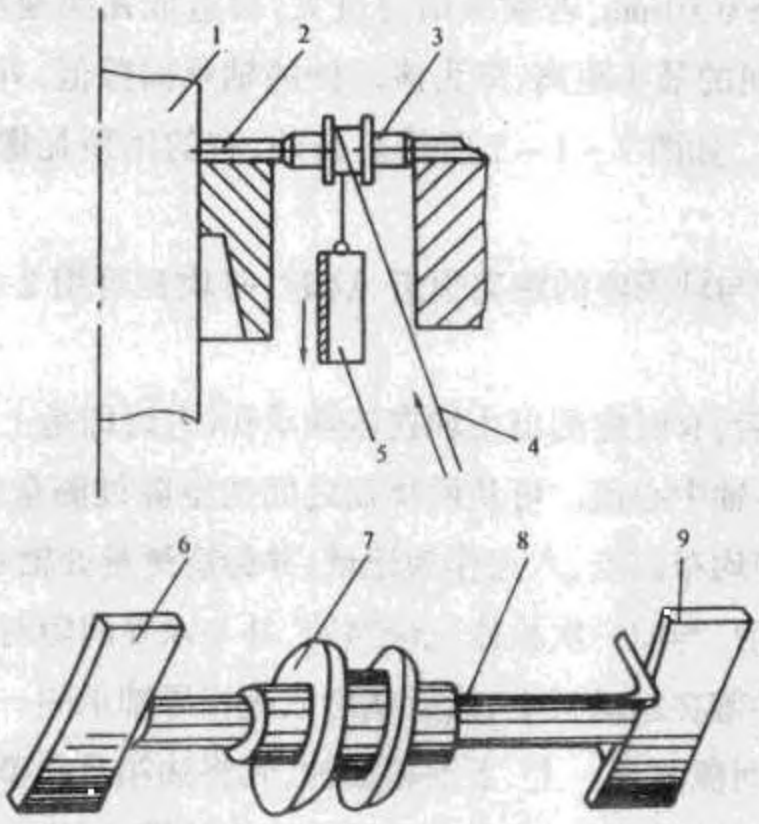


图 7－1－6　拆装导轴承的另一种专用工具及布置示意图
1—主轴；2—轴领；3—专用工具；4—吊绳；5—导轴瓦；6—靠于轴领上的托板；
7—滑轮；8—连接杆；9—卡在轴承座上面的托板

(4)悬式和半伞式机组的上导轴瓦和全伞式机组的下导轴瓦的检查

检查导轴瓦表面有无脱壳、裂纹，并做好记录。如有轴电流烧痕，可用细油石打磨，再用无水乙醇或苯及白布擦干净，然后用弧面磨具包细毛毡，配适量研磨膏磨光，最后再挑花。如刀花局部不清或磨平，用刀刃为弧面的刮刀修刮。为了检查高点，可在轴领下部固定临时依托，将轴领或轴瓦清洗干净。当导轴瓦面被轴电流严重烧伤时，可用弧形板刮刀修刮平整后，在轴领上均匀涂以显示剂，用双手将导轴瓦挟压在轴领面上道时针方向多次研磨并修刮高点，导轴瓦的刮削方法与推力瓦的刮削方法相同，要求瓦面接触面积达到整个瓦面的 70%以上且接触点达到 1～3 点/cm^2 时，方可认为合格。

(5)悬式和半伞式机组上导轴承轴领及悬式机组的下导轴承轴领和全伞式机组的下导轴承轴领的检查

轴领应用绸布蘸浸乙醇溶液清洗，检查有无局部烧损痕迹，若有应用天然细油石打磨

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

高点或毛刺，然后用氧化铬 MS～M10 的研磨膏与透平油调和，倒在细毛毡上进行抛光处理。

(6)导轴承的间隙测量

①分块瓦式上、下导轴承间隙测量。轴瓦拆装前后，需测量每块瓦的间隙，为防止轴位移，在轴领处互成 90°的方向上设百分表监视。先将导轴瓦向主轴旋转方向推靠，然后用小螺杆千斤顶在对称方向将四块瓦都顶靠轴领，再对称的逐块瓦都顶靠轴领，监视百分表指示变化不应大于 ±0.01mm，若顶靠用力过大，会造成瓦架变形。用塞尺测量抗重螺栓头部与瓦背支撑点间的最小距离，即为该瓦处的轴承间隙值，并作好记录，测量后校核允许误差为 ±0.01mm。如图 7－1－7 所示。另外，有的用顶瓦螺栓抱导轴瓦，方法与小千斤顶相似。

有的导轴承，瓦背与轴承座的距离很近，这时，每块瓦可用 2 个或 4 个楔子板将导轴瓦顶靠轴领再施测。

导轴承间隙测定后，有时应测出主轴在该轴承孔(有时即是上、下部机架的中心孔)内的位置，即该轴承处主轴中心值。可从两块瓦之间的空隙处测量轴领与轴承座(壁)之间的垂直距离，一般可测均布四点、六点作为记录，并标清测量处轴号位置。

轴瓦间隙测量完后，与前一次检修记录对照，并与水导间隙对比找出轴线位置。将转子用高压油泵顶起，并落在制动板上，然后就可以进行导轴承的一系列检修工作。

②筒式导轴承的间隙测量。上、下油箱排油，先将油箱及碍事附件拆卸。有的老式机组筒式导轴承下部不是旋转油箱，而是止油环和固定油箱，同样也拆卸。然后，从轴承上、下分别测量钨金瓦与轴面之间的等分 6 点或 8 点间隙。

有时为了了解筒式导轴承的磨损量的大小，可在筒式导轴承分解拆出后再重新组合成整圆，用内径千分尺测出轴瓦内圆上、中、下等分 3 个或 4 个直径，若再在与此相对应的位置测出轴径的大小，即可求出轴承间隙。看是否符合本厂规程或设计的规定，为决定是否需要处理及制定处理方案提供依据。

(7)油槽的检查

检查油槽内壁有无锈蚀、脱漆现象，若有则应去锈和涂耐油漆。如有开焊，裂纹则应补焊处理。导轴承装复前应检查油槽内有无遗物，并彻底清扫干净，用白面黏尽脏物。装复完毕做 4～8h 煤油渗漏试验，要求无渗漏现象。

(8)导轴承的绝缘测量

检查分块瓦式上导轴瓦、筒式上导轴承支持环、悬式和全伞式机组下导轴瓦的对地绝缘，用 1000V 摇表测量电阻，电阻不得低于 50MΩ，否则应进行绝缘处理。

(9)导轴承油冷却器的拆装、分解

清扫水槽并去锈涂船底漆，冷却器铜管外部应擦净，装复后用额定工作压力的 1.25

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

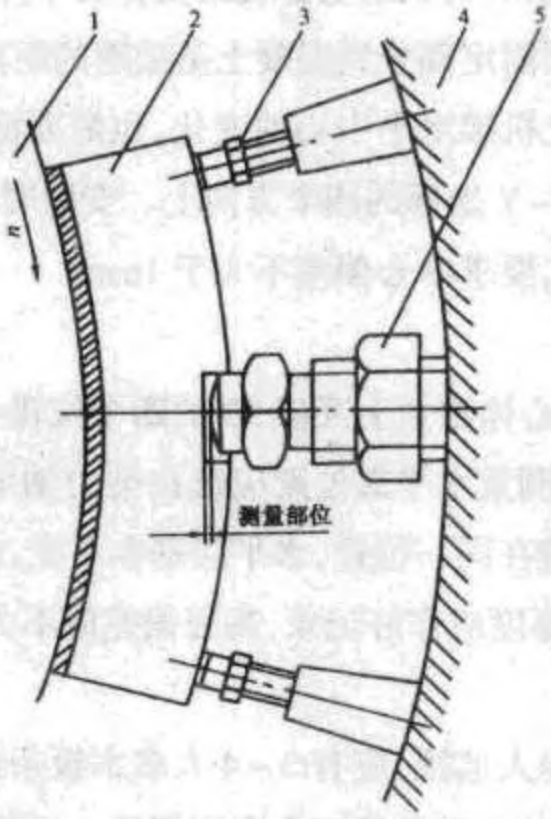


图 7-1-7　分块瓦式导轴承间隙测量示意图
1—轴领;2—导轴瓦;3—小千斤顶;4—轴承座;5—支柱螺栓

倍水压耐压 30min 无渗漏现象。

(10)导轴承各输排油管路及冷却水管路阀门的检修

各阀门分解、清扫,检查阀体应完整无缺损,阀口严密,阀门动作灵活正确,盘根压入量合适。油管路的阀门应作煤油渗漏试验合格,装复后充水充油不渗漏。

2.导轴承检修的注意事项

(1)油槽充油后,应检查油面是否符合规定要求,要求油面偏差不大于 ±5mm。

(2)注意检查筒式导轴承瓦内径,圆度是否符合要求。

(3)注意油槽组合时,对口一定要清洁,盘根平整,位置正确并涂以电木液,组合螺栓应对称且均匀地上紧。

(4)在拆装导轴瓦时,注意不要磕撞瓦面及冷却器铜管。

(5)在进行筒式导轴承间隙测量时,注意塞尺不要插入瓦面润滑油沟内。

二、固定部件的检修

(一)发电机上、下部机架的检查

1.上部机架的拆装

上部机架在吊出之前,要拆除上部机架与定子基础的销钉和楔子板,连接螺栓全部松

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

开。根据机组的具体结构型式，有的机组上部机架支臂的千斤顶要拆除或拧松，在拧松之前技术人员需测量每个千斤顶固定部分到混凝土基础壁的距离，并作好记录，以备上机架恢复时作参考，另外，考虑到上机架水平中心的变化，也需要测量上机架中心体内壁与轴的距离，测量位置可以选在 X－Y 坐标的四个方向上。安装时，如水平中心有变化或不合要求，应分析原因并进行调整，要求中心偏差不大于 1mm。

2.上部机架的拆装

对于非负荷机架，应在中心体法兰上互成 90°的四个位置上，用方型水平仪测量水平，并作好记录。对于负荷机架，测量水平部位则应选在推力轴承座垫板处或经加工的油槽顶面上。注意拆装前后测量应在同一位置，水平应基本不变，水平偏差应不大于 0.10mm/m。如果需加垫片，其位置和厚度应作好记录，高程偏差应不大于 ±1.5mm。

3.上部机架的吊装

上部机架各支臂处要有专人监视，应有 3～4 人拿木板条在机架与轴领的空隙中不停晃动。起吊上机架时，在对称的支臂处留四个专用螺栓。机架吊出安放在安装场，应考虑到场地设计承载和垫起高度。

4.上部机架的检查

检查机架与基础的组合螺栓、销钉应无松动，固定挡块点焊在固定部件上。空气分流板的连接螺栓，锁定垫片是否紧固。焊缝处应无裂纹和开焊等其他异常现象。机架与定子的结合面要清扫干净、去锈并涂以防锈油。

5.下部机架的拆装

下部机架在吊出之前要拆除基础销钉与组合螺栓。调整检查水平的方法同上述 2。

6.下部机架的拆装起落

应注意在定子四周设专人监视，防止机架支臂与定子绕组相碰撞，装复时要检查基础板结合面是否干净，基础螺栓和销钉应打紧，并点焊于基础上。

(二)发电机定子的检修

发电机定子一般不吊出机坑。机组大修期间应对定子的各部件进行全面检查，对威胁到机组安全稳定发供电的问题做及时彻底的处理。比如定子铁芯的冷态振动、线棒的更换等问题一般都可以在机坑内进行完成。

发电机定子的一般检修项目及注意事项如下：

(1)定子铁芯衬条、定位筋的检查。检查定子铁芯衬条，定位筋应无松动、开焊，拉紧螺栓亦无松动，点焊处无开焊。如果定子铁芯松动应进行拉紧螺栓的打紧处理，其方法是可先选 2～3 个拉紧螺栓，作应力测量的打紧力试验，应力应达到设计规范要求，然后再对其他螺栓进行统一打紧。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(2)齿压板的检查。检查齿压板螺栓应无松动。如果有个别齿压板的压指与铁芯都有间隙,可以调整紧固顶丝,如果有个别压指与铁芯有间隙,可在局部加垫并点焊固定处理。

(3)定子铁芯组合缝的检查。对定子铁芯与机座的组合缝间隙进行测量检查,机座组合缝用0.05mm塞尺检查要求不能通过。允许有局部间隙,用不大于0.10mm塞尺检查,深度不应超过组合面宽度的1/3,总长不应超过周长的20%,铁芯组合缝间隙要求为零,组合缝螺栓及销钉周围不应有间隙。若不合格,则应进行定子铁芯组合缝的加垫处理工作。加绝缘纸垫的厚度应比实际间隙大0.1~0.3mm,加垫后铁芯组合螺栓紧固,铁芯组合缝不得有间隙。

(4)注意定子检修时,应严禁铁屑、焊渣掉入定子铁芯的各处缝隙,线棒端部应防止铲焊或锤击时碰伤。检查定子基础螺栓、销钉应无松动,点焊牢固。

第三节　扩大性检修

全面彻底地检查每一部件结构及技术数据。这是一种为消除运行过程中,由于零部件的严重磨损或损坏导致整个机组性能和技术经济指标严重下降的机组修复工作。机组扩大性大修时,通常要将机组全部分解和拆卸,转子吊出来检修所有被损坏的零部件。协调机组各部件和各机构间的相互联系;修复和改造机组的某些部分。

机组的大修可分为三个阶段:大修准备阶段、修理阶段和大修后的检查和试验阶段。

在大修准备阶段,首先必须了解设备设计、制造、安装、运行中的问题,如设备结构的合理性、原发电机安装质量、以往大修后的质量和问题、机架振动、机组摆度、温升等情况;其次要明确本次大修工作主要处理问题,制定大修计划表,然后做好检修工具、材料、备件、检修用设备和场地布置等准备工作。

检修阶段按照大修计划和质量标准进行。

检修完后需进行质量检查,通过试运转和一系列试验,检查机组运行状况。如在运行中发现仍存在缺陷,则还需继续处理直至合格。检修周期为每5~8y一次,每次45~75d。

第四节　制动、油、气、水系统的检修

一、制动系统的检修

制动系统检修前必须先切断电源、气源,做好安全措施。由于各厂机组制动系统结构

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

各有差异，在检修工艺和检修技术等方面也会有各自的特点。在此，简要介绍如下：

(一)制动柜的检修

制动柜内集中了制动系统的控制设备，如电磁阀、压力表、各种手动操作间以及空气过滤装置等。

1.制动柜内空气过滤网的检修。清扫于净，检查铜丝网有无破损，如有破损，应更换新的。

2.电磁阀的分解检修。检查电磁阀内止封橡皮圈是否完好，各孔道是否畅通，否则应更换处理，清扫干净。装复后，阀口应严密，要求动作灵活正确。

3.阀门的检修。拆除分解各阀门，检查有无缺损，阀口应关闭严密，阀门的盘根、填料应适量。

4.压力仪表的校验。要求其误差值不得大于±0.02~0.03MPa，否则需要更换处理。

(二)制动闸的检修(以气压复位式制动器为例)

制动闸拆装时，首先拆除制动闸与各管路的接头，用专用弯柄扳手拆除基础螺栓，然后用自制起重升降器进行风闸整体拆装。注意不得碰坏转子制动环，撞弯各管路接头。

分解制动闸时，拆除挡板、托板、压板的连接螺栓，用吊环螺栓取出风闸活塞，拆除压圈，检查闸瓦是否磨损严重，磨损量应不大于5mm。橡胶皮腕或密封圈有无变质、断裂，不合格的应更换。缸体内有无锈迹，有无毛刺高点等，否则应用砂纸打磨，用汽油清扫干净。装复时压入皮腕或密封圈的活塞进入缸体前，应在配合面涂以透平油，注意不要损坏橡胶皮腕或密封圈，手提活塞30~50mm，活塞能靠自重下落。装入弹簧的风闸必须将弹簧压板的四角固定螺栓拧紧锁住，活塞要装复到位。制动闸装复原位后要求挡块挂钩固定牢靠，基础螺栓紧固，各制动闸闸面高程差不大于±1mm，闸瓦与转子制动闸板的间隙，应在设计值的±20%范围内。

(三)制动闸的打压试验

新装配的以及检修过的制动闸，都应做打压测试。首先将制动闸放在自制的试验架内，用高压油泵给制动闸打压，当制动间内油压按试验值打足后(油压试验值可按1.25倍高压油泵顶转子工作压力确定)即与油泵油路隔开，检查制动闸是否漏油。一般要求在规定的时间不能有明显的压力下降。如达不到要求，则说明风闸不合格，应再拆开检查，检查皮腕或密封圈是否合格，查找原因处理后再重新打压试验，直到合格为止。

(四)消音筒的检修

消音筒应无漏油，无油污积存，清扫干净。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(五)制动系统的动作试验

1.手动、自动给风试验,系统工作压力应能保持在0.7~0.8MPa,检查各管路接头、阀门、风闸等均无漏风,撤除压力后活塞能自由下落,起落灵活。

2.用高压油泵顶转子,以高压油顶起转子、转子顶起高度一般在8~10mm,然后停止油泵打油,保持30min,检查风闸与管路接头应均不漏油。最后油压撤掉,并用风将制动系统管路中的油吹干净。

二、空气冷却器、油水管路及阀门的检修

(一)空气冷却器的检修

以绕簧式紫铜管丝材料的空气冷却器为例,简要介绍如下:

1.空气冷却器的拆除。在拆除空气冷却器之前,应关闭进水阀,切除水源。拆除上部的发电机风洞花纹盖板、冷却器与供排水管的连接螺栓、冷却器与定子机座的连接螺栓。然后,冷却器整体吊出机坑,结合面的毛毡垫应完好,并保存好,最好粘贴在机座结合面上。

2.空气冷却器的清洗。如果空气冷却器过于脏则需要放在碱水溶液中清洗。清洗的方式是在一特制的水槽中,盛有按无水碳酸钠(面碱)1.5%,氢氧化钠(火碱)2%,正磷酸钠1%,水玻璃0.5%,其余95%为水的碱水溶液,并用电炉加热到60℃~80℃,冷却器吊入水槽中浸泡10~20min,并升降几次再吊出放到专用的小推车上运出,并用压力清水反复冲洗,要求于净后无白碱出现。最后进行耐压试验,在额定工作压力1.25倍压力下持续30min不渗漏。如有渗漏处应及时处理并分析渗漏的具体原因,若是铜管渗漏,可将铜管两头堵死,如铜管损坏根数占每一路总数的1/5时,则应整体更换。

3.空气冷却器的分解。空气冷却器分解前应做好编号和配合记号,拆除上、下水箱盖除锈清污涂船底漆,水箱盖的橡胶垫如有变质,损坏则应更换。组装时,螺栓紧固。检查完好后做耐压试验。

4.空气冷却器整体吊入机坑装复。安装时空气冷却器与定子机座结合面毛毡应完整,不漏风,法兰螺栓对称上紧。装复后,应充水试验,注意开始时用,排水阀应先打开,以便排掉管路中的空气。

(二)油水管路的检修

1.油水管路检修应在拆除前,首先排掉管路中的油和水,做好编号和配合记号。管路应去锈清扫干净,并按规定涂漆。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

2.油水管路的环管安装时,应由带有三通的支管定位,所有法兰连接螺栓都带上,再从三通向两侧紧固,所有管卡应上紧,法兰盘根垫不准超过两层,不得使用楔形垫。

3.为防止管路表面凝结露水,可在外包石棉布,用铁丝扎紧,外层用白布再包一层,白布带缠紧,以便涂漆,最后达到整齐美观。

(三)阀门的分解检修

阀门检修在无压力条件下进行,阀门开关动作应灵活正确,否则应分解检查操作杆和螺母块的螺纹是否良好,若有损坏应更换。阀杆应无弯曲、变形、磨损等缺陷,若有应处理或更换新的。检查阀杆处的止漏装置应无渗漏,盘根应有足够的压紧余量。检查阀体止口应严密不漏,如果结合不严应处理。处理方法是研磨阀板止口环和阀壳的止口环。对闸阀要检查舌形件和钢丝卡环(或连接板)是否良好,若已锈蚀或磨损应更换新的。最后阀门涂漆。

管路系统安装完后,一般要进行充水、充油试验,逐步升压至工作压力,应无渗漏现象,各表计的指示正确。

(四)管道法兰用垫片材质及涂料规定

管道法兰用垫片材质及涂料规定见表7-1-2。

表7-1-2　　管道垫片材质及涂料表

管道名称	工作压力(MPa)	垫片材质	厚度(mm)	涂料
油管	≥1	绝缘纸垫 石棉橡胶板	1~2	耐油漆或 酒精漆片
油管	<1	耐油橡胶板	2~4	
气管		绝缘纸垫 石棉橡胶板	1~3	耐油漆或铅油
水管		橡胶板	1~4	
水气管螺纹		线麻		铅油
油管螺纹		线麻	耐油漆	

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第五节　检修前的准备工作

一、发电机检修材料的准备

发电机所用材料繁多，就其性能和用途大体可分为：①导电材料；②磁性材料；③绝缘材料；④结构材料。了解和掌握常用材料的性能与用途，并作一定数量的储备，对保证检修进度，及时处理设备出现的缺陷等，都是十分重要的。

(一)导电材料及其焊料

水轮发电机定子及转子绕组的导电材料，基本上均为纯铜加工的型材。纯铜外观呈紫红色，故习惯称为紫铜。它具有：①较高的导电性和导热性；②适当的机械强度；③不易氧化和腐蚀；④良好的延展性，便于弯制加工和焊接；⑤电阻随温度的升高而增大，当温度不是极高(接近于熔点)或极低(接近于绝对零度)时，电阻(电阻率)与温度呈下式所示的线性关系：

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

式中　R、ρ、R_0、ρ_0——温度为 T 和 T_0 时的电阻、电阻率；

α——电阻的温度系数，一般在 0℃时的电阻温度系数 $\alpha = (4.25 + 0.01) \times 10^{-3}$。

导电材料按其性能、结构、制造工艺及使用特点，分为三大类：①裸电线和裸导体制品；②电磁线；③橡皮、塑料电线电缆。

1.裸电线和裸导体制品

因为这类产品只有导体部分，没有绝缘和护层结构，所以称为裸电线和裸导体制品。按产品的形状和结构，分为圆单线、软接线、型线和裸绞线四种。水轮发电机常用的是前三种。

(1)圆单线

圆单线主要是给各种电线电缆作导电线芯用的，但也可以直接用作产品。常用材料规格，见表 7－1－3。

(2)软接线

凡是柔软的铜绞线和各种编织线都称为软接线。它们是由多股铜线或镀锡铜线绞合

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

或编织而成，其特点是柔软。耐振动，耐弯曲。常用的有三类7种，它们的名称、型号、规格及主要用途，见表7-1-4和表7-1-5。其中TS、TSR、TRJ、TRJ—3、TRJ—4五种是圆线，TRZ—1、TRZ—2两种是扁线。

(3)型线

型线是非圆形截面的裸电线。常用的型线有四类11种，其类别、名称、型号及主要用途，见表7-1-6~表7-1-8。选用规格，见表7-1-9~7-1-12。

表7-1-3　　圆铜线

标称直径 (mm)	直径偏差 (mm)	标称截面 (mm^2)	参考重量 (kg/km)	电阻率 ρ(Ω·m)	电阻温度系数 α(1/℃)
0.57	±0.006	0.2553	2.2692		
0.66	±0.007	0.3526	3.1343		
0.85	±0.009	0.5675	5.0446		
1.03		0.8333	7.4041		
1.22		1.1791	10.4822		
1.31		1.3583	12.0250		
1.41	±0.01	1.5394	13.6853		
1.50		1.7672	15.7095		
1.70		2.2698	20.1785		
1.83		2.6032	23.3825		
2.00		3.1416	27.90		
2.12	±0.02	3.5299	31.40		
2.24		3.9408	35.00	1.748×10^{-8}	0.00395
2.50		4.9087	43.60		
2.65		5.5155	49.00		
2.85	±0.03	6.3794	56.70		
3.00		7.0686	62.80		
3.35		8.8141	78.40		
3.55		9.8980	88.00		
3.75	±0.04	11.0447	98.20		
4.00		12.5664	112.0		
4.50		15.9043	141.0		
4.75	±0.05	17.7206	158.0		
5.30		22.062	196.0		
6.00	±0.06	28.274	251.0		

表7-1-4　　常用软接线品种表

名　称	型　号	主　要　用　途
裸铜电刷线 软裸铜电刷线	TS① TSR	供电机、电器线路连接电刷用

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

名 称	型 号	主 要 用 途
裸铜软绞线	TRJ②	供移动式电器设备连接线之用，如开关等
	TRJ—3	供要求较柔软的电器设备连接线之用，如接地线、引出线等
	TRJ—4	供要求特别柔软的电器设备连接线之用，如可控硅的引线等
软裸铜编织线	TRZ—1③	供移动式电器设备和小型电炉连接线之用
	TRZ—2	

①“S”表示电刷线。
②“J”表示绞线。
③“Z”表示编织线。

表 7-1-5 常用铜电刷线和铜软绞线 (mm)

材料名称	牌号	主要技术参数				备 注
		标称截面 (mm^2)	导电线芯 股数×根数/单线直径	计算外径	20℃时导体电阻 (Ω/Km) 不大于	
钢电刷线	TS	0.50	7×19/0.07	1.4	36.40	TS—硬铜电刷线 TSR—软铜电刷线 TSX—纤维编织硬铜电刷线
		1.00	7×18/0.10	1.7	18.80	
		2.50	7×46/0.10	2.8	7.36	
		4.00	7×72/0.10	3.6	4.70	
	TSR	0.50	12×22/0.05	1.4	37.20	
		0.75	12×32/0.05	1.5	25.60	
		1.00	12×43/0.05	2.0	19.00	
		2.50	19×67/0.05	3.0	7.70	
	TSX	0.50	7×19/0.07	2.2	36.40	
		1.00	7×18/0.10	2.5	18.80	
		1.50	7×27/0.10	2.9	12.60	
		2.50	7×46/0.10	3.6	7.36	
铜电刷线	TSX	4.00	7×72/0.10	4.4	4.70	TS—硬铜电刷线 TSR—软铜电刷线 TSX—纤维编织硬铜电刷线
		6.00	7×75/0.12	5.1	3.14	
		10.00	12×75/0.12	6.8	1.90	
		16.00	19×75/0.12	7.9	1.20	
铜软绞线	TJR—1	50	19×7/0.68	10.20	0.38	牌号的新旧对照 新标准 旧标准 TJR—1 TRJ—1
		95	37×7/0.68	14.28	0.19	
		185	27×12/0.85	21.73	0.099	
		240	37×12/0.85	24.72	0.072	

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 7-1-6 常用型线品种表

类别	名称	型号	主要用途
扁线	硬扁铜线 软扁铜线 硬扁铝线 软扁铝线	TBY① TBR LBY LBR	适用于电机电器、安装配电设备及其它电工制品
母线	硬铜母线 软铜母线 硬铝母线 软铝母线	TMY② TMR LMY LMR	适用于电机电器、安装配电设备及其它电工制品，也可作输配电的汇流排
铜带	硬铜带 软铜带	TDY③ TDR	适用于电机电器、安装配电设备及其它电工制品
铜排	梯形铜排	TPT④	供制造直流电机换向器用

①“B”表示扁形。
②“M”表示母线。
③“D”表示带状。
④“P”表示排状，后面的“T”表示梯形。

表 7-1-7 常用铜扁线和铜母线牌号及主要技术多数

材料名称	牌号	主要技术参数						备注
		标称尺寸 (mm)	电阻率 ρ20 (Ω·m) 不大于	电阻温度系数 (1/℃)	抗拉强度 (N/mm^2) 不小于	伸长率 (%) 不小于	布氏硬度 (HBS) 不低于	
铜扁线	TBY_2	$0.80 \leqslant a \leqslant 2.00$	0.1777×10^{-5}	0.00381	373	0.4	—	材料状态分： Y—硬 R—软
		$2.00 < a \leqslant 4.00$			333	0.7		
		$4.00 < a \leqslant 6.00$			304	1.7		
		$6.00 < a \leqslant 7.10$			275	1.7		
	TBR	$0.80 \leqslant a \leqslant 2.00$	0.17241×10^{-5}	0.00393	275	30.0		
		$2.00 < a \leqslant 4.00$			255	34.0		
		$4.00 < a \leqslant 6.00$			245	36.0		
		$6.00 < a \leqslant 7.10$			245	36.0		
铜母线	TMY	—	0.1777×10^{-5}	0.00381	—	—	65	
	TMR		0.17241×10^{-5}	0.00393	206	35	—	

表 7-1-8 常用铜带牌号及主要技术参数

材料名称	牌号	主要技术参数						备注
		标称尺寸 (mm)	电阻率 ρ20 (Ω·m) 不大于	电阻温度系数 (1/℃)	抗拉强度 (N/mm^2) 不小于	伸长率 (%) 不小于	布氏硬度 (HBS) 不低于	
铜带	TDY_2	$0.80 \leqslant a \leqslant 1.32$	0.1777×10^{-5}	0.00381	309	—	—	①材料状态分： Y—硬 R—软 ②牌号的新旧对照： 新标准 旧标准 TDY_2 TDY
		$1.32 \leqslant a \leqslant 3.55$			289			
	TDR	$0.80 \leqslant a \leqslant 1.32$	0.1737×10^{-5}	0.00393	—	35	—	
		$1.32 \leqslant a \leqslant 3.55$						

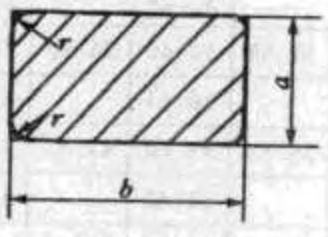
www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 7-1-9

铜 扁 线

a R20 R40		0.80		0.90		1.00		1.12		1.25		1.40		1.60
S r			0.85		0.95		1.06		1.18		1.32		1.50	
b R20 R40		1/2a					0.5							
2.00		1.463	1.545	1.626	1.706	1.785	1.905	2.025	2.145	2.285	2.425	2.585		
	2.12	1.559		1.734		1.905		2.160		2.435		2.753		
2.24		1.655	1.749	1.842	1.934	2.025	2.160	2.294	2.428	2.585	2.742	2.921	3.145	3.369
	2.36	1.751		1.950		2.145		2.429		2.735		3.089		3.561
2.50		1.863	1.970	2.076	2.181	2.285	2.435	2.585	2.736	2.910	3.085	3.258	3.535	3.785
	2.65	1.983		2.211		2.435		2.753		3.098		3.495		4.025
2.80		2.103	2.225	2.346	2.446	2.585	2.753	2.921	3.089	3.285	3.481	3.705	3.985	4.265
	3.00	2.263		2.526		2.785		3.145		3.535		3.985		4.585
3.15		2.383	2.522	2.661	2.799	2.935	3.124	3.315	3.502	3.723	3.943	4.195	4.510	4.825
	3.35	2.543		2.841		3.135		3.537		3.973		4.475		5.145
3.55		2.703	2.863	3.021	3.179	3.335	3.548	3.761	3.974	4.223	4.471	4.755	5.110	5.465
	3.75	2.863		3.201		3.535		3.985		4.473		5.035		5.785
4.00		3.063	3.245	3.426	3.606	3.785	4.025	4.265	4.505	4.785	5.065	5.385	5.785	6.185
	4.25	3.263		3.651		4.035		4.545		5.098		5.735		6.585
4.50		3.463	3.670	3.876	4.081	4.285	4.556	4.825	5.095	5.410	5.725	6.085	6.535	6.985
	4.75	3.663		4.101		4.535		5.105		5.723		6.435		7.385
5.00		3.863	4.095	4.326	4.556	4.785	5.085	5.385	5.685	6.035	6.385	6.785	7.258	7.785
	5.30	4.103		4.596		5.085		5.721		6.410		7.205		8.265
5.60		4.343	4.605	4.866	5.126	5.385	5.721	6.057	6.393	6.785	7.177	7.625	8.185	8.745
	6.00	4.663		5.226		5.785		6.505		7.285		8.185		9.358
6.30		4.903	5.200	5.496	5.791	6.085	6.463	6.841	7.219	7.660	8.101	8.605	9.235	9.865
	6.70			5.856		6.485		7.289		8.160		9.165		10.51
7.10				6.216	6.551	6.885	7.311	7.737	8.163	8.660	9.157	9.725	10.44	11.15
	7.50					7.285		8.185		9.160		10.29		11.79
8.00						7.785	8.265	8.745	9.225	9.785	10.35	10.99	11.79	12.59
	8.50							9.305		10.41		11.69		13.39
9.00								9.865	10.41	11.05	11.67	12.39	13.29	14.19
	9.50									11.66		13.09		14.99
10.00										12.29	12.99	13.79	14.79	15.79
	10.60											14.63		16.75
11.20												15.47	16.59	17.71
	11.80													18.67
12.50														19.79
	13.20													
14.00														
	15.00													
16.00														



www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(TBY、TBR) (mm)

	1.80		2.00		2.24		2.50		2.80		3.15		3.55
1.70		1.90		2.12		2.36		2.65		3.00		3.35	
0.65						0.8							

www.789pdf.com 789书库网

表 7-1-10　　铜带（TDY、TDR）的

S \ a		0.80	1.00	1.06	1.12	1.18	1.25	1.32	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80
b		±0.03						±0.04					
9.00	±0.10	6.984	8.786	9.326									
10.00			9.786		10.986	11.586							
11.20		8.744	10.986	11.658	12.330		13.786						
12.50			12.286		13.786	14.536	15.411	16.286	17.286	18.536			
14.00		10.984	13.786	14.626	15.466		17.286		19.336		22.186		
16.00			15.786		17.706	18.666	19.786	20.906	22.186	23.786	25.386	26.837	28.437
18.00		14.184	17.786	18.866	19.946		22.286		24.986		28.586		32.037
20.00			19.786		22.186	23.386	24.786	26.186	27.786	29.786	31.786	33.637	35.637
22.40		17.704	22.186	23.530	24.874		27.786		31.146		35.626		39.957
25.00			24.786		27.784	29.286	31.036	32.786	34.786	37.286	39.786	42.137	44.637
28.00	±0.12	22.184	27.786	29.466	31.146		34.786		38.986		44.586		50.037
31.50			31.286		35.066	36.956	39.161	41.366	43.886	47.036	50.186	53.187	56.337
35.50		28.184	35.286	37.416	39.546		44.161		49.486		56.586		63.537
40.00			39.786		44.586	46.986	49.786	52.586	55.786	59.786	63.786	67.637	71.637
45.00		35.784	44.786	47.486	50.186		56.036		67.786		71.786		80.637
50.00			49.786		55.786	58.786	62.286	65.786	69.786	74.786	79.786	84.637	89.637
56.00	±0.25	44.584	55.786	59.146	62.506		69.786		78.186		89.386		100.437
63.00			62.786		70.346	74.126	78.536	82.946	87.986	94.286	100.586	106.737	113.037
71.00			70.786								113.386		
80.00			79.786								127.786		
90.00			89.786								143.786		
100.00			99.786								159.786		

注　a：窄边尺寸，mm；b：宽边尺寸，mm；S：标称截面，mm^2。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

标称尺寸及计算截面积 (mm²)

1.90	2.00	2.12	2.24	2.36	2.50	2.65	2.80	3.00	3.15	3.35	3.55
±0.05											
30.037											
	35.637		39.957								
37.637	39.637	42.037	44.437	46.651							
	44.437		49.813								
41.137	49.637	52.637	55.637	58.451	61.951	65.701	69.451				
	55.637		62.357		69.451		77.851				
59.487	63.637	66.417	70.197	73.791	78.201	82.926	87.651	93.951	98.676	104.976	111.276
	70.637		79.157		88.201		98.851		111.276		125.476
75.637	79.637	84.437	89.237	93.851	99.451	105.451	111.451	119.451	125.451	133.451	141.451
	89.637		100.437		111.951		125.451		141.201		159.201
94.637	99.637	105.637	111.637	117.451	124.451	131.951	139.451	149.451	156.951	166.951	176.951
	111.637				139.451		156.251		175.831		198.251
119.337	125.637	133.197		148.131	156.951	166.401	175.851	188.451	197.901	201.501	223.101
	141.637				176.951						
	159.637				199.451						
	179.637				224.451						
	199.637				249.451						

www.789pdf.com 789书库网

表 7-1-11

铜母线（TMY、TMR）的标称尺寸及计算截面积

(mm)

S \ a / b	2.24	2.50	2.80	3.15	3.55	4.00	4.50	5.00	5.60	6.30	7.10	8.00	9.00	10.00	11.20	12.50	14.00	16.00	18.00	20.00	22.4	25.00	28.00	31.50
16.00												128.0	144.0	160.0	179.2	200.0	224.0	256.0						
18.00	40.3	45.0	50.4	56.7	63.90	72.0	81.0	90.0	100.0	113.4	127.8	144.0	162.0	180.0	201.6	225.0	252.0	288.0						
20.00		50.0	56.0	63.0	71.0	80.0	90.0	100.0	112.0	126.0	142.0	160.0	180.0	200.0	224.0	250.0	280.0	320.0	360.0	400.0				
22.40		56.0	62.7	70.6	79.5	89.6	100.8	112.0	125.4	141.1	159.0			224.0	250.9	280.0	313.6	358.4	403.2	448.0				
25.00			70.0	78.8	88.8	100.0	112.5	125.0	140.0	157.5	177.5	200.0	225.0	250.0	280.0	312.5	350.0	400.0	450.0	500.0	560.0	625.0		
28.00					99.4	112.0	126.0	140.0	156.8	176.4	198.8	224.0	252.0	280.0	313.6	350.0	392.0	448.0	504.0	560.0	627.2	700.0		
31.50						126.0	141.8	157.5	176.4	198.6	223.7	252.0	283.5	315.0	352.8	393.8	441.0	504.0	567.0	630.0	705.6	787.5	882.0	992.3
35.50						142.0	159.8	177.5	198.8	223.7	252.1	284.0	319.5	355.0	397.6	443.8	497.0	568.0	639.0	710.0	795.2	887.5	994.0	1118.3
40.00						160.0	180.0	200.0	224.0	252.0	284.0	320.0	360.0	400.0	448.0	500.0	560.0	640.0	720.0	800.0	896.0	1000.0	1120.0	1260.0
45.00						180.0	202.5	225.0	252.0	283.5	319.5	360.0	405.0	450.0	504.0	562.5	630.0	720.0	810.0	900.0				
50.00						200.0	225.0	250.0	280.0	315.0	355.0	400.0	450.0	500.0	560.0	625.0	700.0	800.0	900.0	1000.0				
56.00						224.0	252.0	280.0	313.6	352.8	397.6	448.0	504.0	560.0	627.2	700.0	784.0	896.0	1008.0	1120.0				
63.00						252.0	283.5	315.0	352.8	396.9	447.6	504.0	567.0	630.0	705.6	787.5	882.0	1008.0	1134.0	1260.0				
71.00						284.0	319.5	355.0	397.6	447.3	504.1	568.0	639.0	710.0	795.2	887.5	994.0	1136.0						
80.00						320.0	360.0	400.0	448.0	504.0	568.0	640.0	720.0	800.0	896.2	1000.0	1120.0	1280.0						
90.00						360.0	405.0	450.0	504.0	567.0	639.0	720.0	810.0	900.0	1008.0	1125.0	1260.0	1440.0						
100.00						400.0	450.0	500.0	560.0	630.0	710.0	800.0	900.0	1000.0	1120.0	1250.0	1400.0	1600.0						
112.00										705.0	795.2	896.0	1008.0	1120.0	1254.4	1400.0								
125.00										787.5	887.5	1000.0	1125.0	1150.0	1400.0	1562.5								

注 1. 表中计算截面积 $S=ab$ (mm²)。

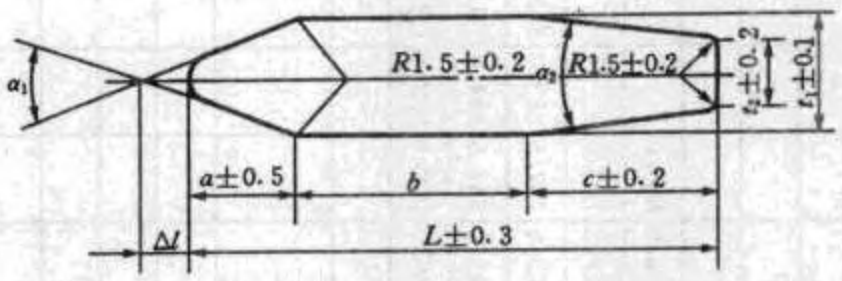
2. 当考虑圆角时，其截面可按下式计算为

(1) 作线圆时，$S=ab-1.3$ (mm²)。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 7-1-12　　七边形铜排（TPQR）



标称截面积 (mm²)	计算截面积 (mm²)	规格及结构尺寸 $t_1(t_2)/L(a+b+c)$(mm)	线密度 (kg/m)	参考数据		
				Δl (mm)	α_1	α_2
355	355	8 (6) /50 (8+22+20)	3.16	2.83	4°32′34″	5°43′30″
370	367	6.7 (5.4) /60 (8+28+24)	3.26	4.14	30°51′8″	3°6′10″
400	401	8 (6.7) /55 (8+25+22)	3.56	2.83	40°32′34″	3°23′4″
430	429	8 (7.1) /58 (8+27+23)	3.81	2.83	40°32′34″	2°14′30″
430 (1)	430	8 (7.2) /58 (8+27+23)	3.82	2.83	40°32′34″	1°59′34″
440	440	8 (6.7) /60 (8+28+24)	3.91	2.83	40°32′34″	3°6′10″
455	454	6.5 (5.5) /75 (8+37+30)	4.04	4.43	29°18′16″	1°54′34″
470	471	8 (6.7) /64 (8+31+25)	4.19	2.83	40°32′34″	2°58′44″
505	505	10 (9) /55 (8+25+22)	4.49	1.80	54°3′42″	2°35′14″
560	561	8 (6.5) /76 (8+38+30)	4.99	2.83	40°32′34″	2°51′52″
600	593	12.5 (11.3) /52 (8+24+20)	5.27	1.16	68°36′45″	3°26′12″
645	643	9.4 (8) /74 (8+36+30)	5.72	2.04	50°10′10″	2°40′24″
695	694	10 (8.2) /76 (8+35+33)	6.17	1.80	54°3′42″	2°56′46″
705	703	10 (8.5) /76 (8+38+30)	6.25	1.80	54°3′42″	2°51′52″
705 (1)	704	9.5 (8) /80 (8+40+32)	6.26	1.99	50°51′36″	2°41′6″
875	875	16 (13.9) /60 (8+28+24)	7.78	0.72	85°4′10″	5°0′36″

表 7-1-13　　常用漆包线的品种、规格、特性及主要用途

类别	名称	型号	规格① (mm)	耐热等级	优点	局限性	主要用途
缩醛漆包线	缩醛漆包圆铜线	QQ-1② QQ-2	0.02～2.50	E	1. 热冲击性能优 2. 耐刮性优 3. 耐水解性良	漆膜受卷绕应力容易产生裂纹（浸漆前须在 120℃左右加热1小时以上，以消除应力）	适用于普通及高速中小型电机、微电机的绕组和油浸式变压器的线圈，电器、仪表的线圈
	缩醛漆包圆铝线	QQL-1 QQL-2	0.06～2.50				
	缩醛漆包扁铜线	QQB	a 边 0.8～5.6 b 边 2.0～18.0				
	缩醛漆包扁铝线	QQLB	a 边 0.8～5.6 b 边 2.0～18.0				

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

续表

类别	名称	型号	规格[1] (mm)	耐热等级	优点	局限性	主要用途
聚酯漆包线	聚酯漆包圆铜线	QZ-1[3] QZ-2	0.02～2.50	B	1. 在干燥和潮湿条件下耐电压击穿性能优 2. 软化击穿性能优	1. 耐水解性差(用于密封的电机、电器时须注意) 2. 热冲击性能尚可	广泛应用于中小型电机的绕组、干式变压器的线圈和电器、仪表的线圈
	聚酯漆包圆铝线	QZL-1 QZL-2	0.06～2.50				
	聚酯漆包扁铜线	QZB	a边 0.8～5.6 b边 2.0～18.0				
	聚酯漆包扁铝线	QZLB	a边 0.8～5.6 b边 2.0～18.0				
聚酯亚胺漆包线	聚酯亚胺漆包圆铜线	QZY-1[4] QZY-2	0.06～2.50	F	1. 在干燥和潮湿条件下耐电压击穿性能优 2. 热冲击性能良 3. 软化击穿性能良	在含水密封系统中易水解(用于密封的电机、电器时须注意)	适用于高温电机和制冷设备电机的绕组，干式变压器和电器、仪表的线圈
	聚酯亚胺漆包扁铜线	QZYB	a边 0.8～5.6 b边 2.0～18.0				
聚酰胺酰亚胺漆包线	聚酰胺酰亚胺漆包圆铜线	QXY-1[5] QXY-2	0.06～2.50	H	1. 耐热性优，热冲击性能及软化击穿性能优 2. 耐刮性优 3. 在干燥和潮湿条件下耐电压击穿性能优 4. 耐化学药品腐蚀性能优		适用于高温重负荷电机、牵引电机、制冷设备电机、密封式电机的绕组，干式变压器和密封式电器、仪表的线圈
	聚酰胺酰亚胺漆包扁铜线	QXYB	a边 0.8～5.6 b边 2.0～18.0				
聚酰亚胺漆包线	聚酰亚胺漆包圆铜线	QY-1[6] QY-2	0.02～2.50	H	1. 耐热性优，热冲击性能及软化击穿性能优，能承受短期过载负荷 2. 耐低温性优 3. 耐溶剂及化学药品腐蚀性能优	1. 耐刮性尚可 2. 耐碱性差 3. 在含水密封系统中容易水解 4. 漆膜受卷绕应力容易产生裂纹(浸渍前须在150℃左右加热1小时以上，以消除应力)	适用于耐高温电机，干式变压器
	聚酰亚胺漆包扁铜线	QYB	a边 0.8～5.6 b边 2.0～18.0				

① 圆线规格以线心的直径表示，扁线以线心窄边（a）及宽边（b）的长度表示。
② "QQ"表示缩醛漆；"1"表示漆膜薄，"2"表示漆膜厚。
③ "QZ"表示聚酯漆。
④ "QZY"表示聚酯亚胺漆。
⑤ "QXY"表示聚酰胺酰亚胺漆。
⑥ "QY"表示聚酰亚胺漆。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 7-1-14 常用绕包线的品种、规格、特性及主要用途

类别	名称	型号	规格①(mm)	耐热等级	优点	局限性	主要用途
纸包线	纸包圆铜线	Z②	1.0～5.6	A③	浸在变压器油中使用时耐电压击穿性优	绝缘纸容易破裂	用作油浸变压器的线圈
	纸包圆铝线	ZL	1.0～5.6				
	纸包扁铜线	ZB	a 边 0.9～5.6 b 边 2.0～18.0				
	纸包扁铝线	ZLB	a 边 0.9～5.6 b 边 2.0～18.0				
薄膜绕包线	玻璃丝包聚酯薄膜绕包扁铜线	—	a 边 1.12～5.6 b 边 2.0～15.0	E	1. 耐电压击穿性好 2. 绝缘层的机械强度高	绝缘层较厚	用于大型高压电机、特种电机的绕组
	聚酰亚胺薄膜绕包圆铜线	Y④	2.5～6.0	H	1. 耐热性和耐低温性优 2. 在高温时耐电压击穿性好 3. 绝缘层比玻璃丝包线薄	在含水密封系统中易水解	用于高温运行的轧钢电机、牵引电机、深井油泵电机及其他特种电机的绕组和干式变压器线圈
	聚酰亚胺薄膜绕包扁铜线	YB	a 边 2.0～5.6 b 边 2.0～16.0				
玻璃丝包线及玻璃丝包漆包线	双玻璃丝包圆铜线	SBEC⑤	0.25～6.0	B	1. 过负荷性优 2. 耐电晕性优	1. 弯曲性较差 2. 耐潮性较差 3. 绝缘层较厚	用于发电机、中大型电动机、牵引电机的绕组和干式变压器的线圈
	双玻璃丝包圆铝线	SBELC	0.25～6.0				
	双玻璃丝包扁铜线	SBECB	a 边 0.9～5.6 b 边 2.0～18.0				
	双玻璃丝包扁铝线	SBELCB	a 边 0.9～5.6 b 边 2.0～18.0				
	单玻璃丝包聚酯漆包扁铜线	QZSBCB	a 边 0.9～5.6 b 边 2.0～18.0	B	1. 过负荷性优 2. 耐电晕性优 3. 耐潮性好	1. 弯曲性较差 2. 绝缘层较厚	用于发电机、大中型电动机、特种电机的绕组和干式变压器的线圈
	单玻璃丝包聚酯漆包扁铝线	QZSBLCB	a 边 0.9～5.6 b 边 2.0～18.0				
	双玻璃丝包聚酯漆包扁铜线	QZSBECB	a 边 0.9～5.6 b 边 2.0～18.0	B			
	双玻璃丝包聚酯漆包扁铝线	QZSBELCB	a 边 0.9～5.6 b 边 2.0～18.0				
	单玻璃丝包聚酯漆包圆铜线	QZSBC	0.53～2.50				
	单玻璃丝包缩醛漆包圆铜线	QQSBC	0.53～2.50	E	1. 过负荷性优 2. 耐电晕性优 3. 耐潮性优	弯曲性较差	适用于高速中小型电机的绕组和油浸变压器的线圈
	双玻璃丝包聚酯亚胺漆包扁铜线	QZYSB-EFB⑥	a 边 0.9～5.6 b 边 2.0～18.0	F	1. 过负荷性优 2. 耐电晕性优 3. 耐潮性优	弯曲性较差	适用于高温电机和制冷设备电机的绕组，干式变压器和电器、仪表的线圈
	单玻璃丝包聚酯亚胺漆包扁铜线	QZYSBFB	a 边 0.9～5.6 b 边 2.0～18.0				

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

续表

类别	名称	型号	规格①(mm)	耐热等级	优点	局限性	主要用途
玻璃丝包线及玻璃丝包漆包线	硅有机漆双玻璃丝包圆铜线	SBEG⑦	0.25~6.0	H	1.过负荷性优 2.耐电晕性优 3.用硅有机漆浸清改进了耐水耐潮性	1.弯曲性较差 2.硅有机浸渍漆的粘合能力较差,绝缘层的机械强度较差	适用于发电机、高温重负荷电机、牵引电机、制冷设备电机、密封式电机及其他特种电及机的绕组和于式变压器的线圈
	硅有机漆双玻璃丝包扁铜线	SBEGB	a边0.9~5.6 b边2.0~18.0				
	双玻璃丝包聚酰亚胺漆包扁铜线	QYSBEGB	a边0.9~5.6 b边2.0~18.0	H	1.过负荷性优 2.耐电晕性优 3.耐潮性优	弯曲性较差	
	单玻璃丝包聚酰亚胺漆包扁铜线	QYSBGB	a边0.9~5.6 b边2.0~18.0				

①圆线规格以线心的直径表示,扁线以线心窄边(a)及宽边(b)的长度表示。
②"Z"表示纸包线。
③系指在浊中或浸渍漆处理后的耐热等级。
④'Y"表示聚酯亚胺薄膜绕包。
⑤"SB"表示玻璃丝包线,"E"表示双层的,"C"表示醇酸胶粘漆浸渍的。
⑥"P"表示耐制冷性的。
⑦"G"表示硅有机胶粘漆浸渍。

2.电磁线及其选用

电磁线是一种具有绝缘层的导电金属电线,用以绕制电机、电器或其他电工产品的线圈或绕组,故又称绕组线。其作用是通过电流时产生磁场,或切割磁力线产生电流。常用电磁线的导电线芯有圆线和扁线两种,目前大多数采用铜线,少数采用铝线。

按照绝缘层的特点和用途,电磁线可分为漆包线、绕包线、无机绝缘电磁线和特种电磁线四类。其中常用的为漆包线和绕包线。漆包线和绕包线的品种、规格、特性及主要用途,具体见表7-1-13和表7-1-14。

漆包线的绝缘层是漆膜,在导电线芯上涂覆绝缘漆后烘干而成。其特点是:漆膜均匀、光滑,绝缘层较薄,广泛用于永磁发电机及小型电机。由于涂覆的绝缘漆品种不同,因此漆包线有很多类别,常用的有缩醛漆包线、聚酯漆包线、聚酯亚胺漆包线、聚酰胺酰亚胺漆包线和聚酰亚胺漆包线等五类,见表7-1-13。

统包线是用玻璃丝、绝缘纸或合成树脂薄等紧密绕包在导电线芯上,形成绝缘层。也有在漆包线上再绕包绝缘层的。除薄膜绝缘层外,其他的绝缘层均须经胶粘绝缘漆浸渍处理,以提高其电性能、机械性能和防潮性能,所以它们实际上是组合绝缘。绕包线的特点是:绝缘层比漆包线厚,电性能较高,能较好地承受过电压及过载负荷,一般应用于大中型电机。根据绕包线的绝缘结构,可分为纸包线、薄膜绕包线、玻璃丝包线及玻璃丝包漆包线三类。薄膜绕包线中,由于采用的薄膜品种不同,又可分为聚酯薄膜统包线和聚酰亚胺薄膜绕包线两种。玻璃丝包线中,又有单玻璃丝包线及双玻璃丝包线之分。另外,由于浸渍处理时采用的胶粘绝缘漆品种不同,玻璃丝包线又分为许多品种,常用的有醇酸胶粘浸的和硅有机胶粘漆浸渍的两种。玻璃丝包漆包线的品种是根据漆包线的品种划分的,见表7-1-14。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 7-1-15 电机常用电磁线

类别	耐热等级	产品名称	型号	规格	特点		主要用途	标准号
					优点	局限性		
漆包线	B级(130℃)	聚酯漆包圆铜线	QZ-1 QZ-2	0.02~2.50	1. 在干燥和潮湿条件下，耐电压击穿性能优 2. 软化击穿性能优	1. 耐水解性差(用于密闭的电机、电器时须注意) 2. 热冲击性尚可 3. 与聚氯乙烯、氯丁橡胶等含氯高分子化合物不相容	通用的中小电机绕组	GB6109. 2.-85 企业标准 JB1174-74 JB1174-74
		聚酯漆包圆铝线	QZL-1 QZL-2	0.06~2.50				
		彩色聚酯漆包圆铜线	QZS-1 QZL-2	0.06~2.50				
		聚酯漆包扁铜线	QZB	a边0.8~5.6 b边2.0~18.0				
		聚酯漆包扁铝线	QZLB	a边0.8~5.6 b边2.0~18.0				
	F级(155℃)	聚酯亚胺漆包圆铜线	QZY-1 QZY-2	0.06~2.50	1. 在干燥和潮湿条件下，耐电压击穿性能优 2. 热冲击性能良 3. 软化击穿性能良	1. 在含水密封系统中易水解(用于密封电机、电器时须注意) 2. 与聚氯乙烯、氯丁橡胶等含氯高分子化合物不相容	高温电机和制冷装置中电机的绕组	企业标准
		聚酯亚胺漆包扁铜线	QZYB	a边0.8~5.6 b边2.0~18.0				
	C级(200℃)	聚酰胺酰亚胺漆包圆铜线	QXY-1 QXY-2	0.06~250	1. 耐热性优，热冲击及软化击穿性能优 2. 耐刮性优 3. 在干燥和潮湿条件下耐击穿电压优 4. 耐化学药品腐蚀性能优 5. 适用于密闭式的电机绕组	与聚氯乙烯、氯丁橡胶等含氯的高分子化合物不相容	高温重负荷电机、牵引电机、制冷设备电机的绕组	企业标准
		聚酰胺酰亚胺漆包扁铜线	QXYB	a边0.8~5.6 b边2.0~18.0				
	C级(200℃)	聚酰亚胺漆包圆铜线	QY-1 QY-2	0.02~2.5	1. 漆膜的耐热性是目前漆包线品种中最好的 2. 软化击穿及热冲击性优，能承受短期过载负荷 3. 耐低温性优 4. 耐辐射性优 5. 耐溶剂及化学药品腐蚀性优	1. 耐刮性尚可 2. 耐碱性差 3. 在含水密封系统中，容易水解 4. 漆膜受卷绕应力容易产生裂纹(浸渍前，须在150℃左右加热1h以上，以消除应力)	耐高温电机	JB2080-77 企业标准
		聚酰亚胺漆包扁铜线	QYB	a边0.8~5.6 b边2.0~18.0				
	A级(105℃)	耐制冷剂漆包线	QF	0.6~2.50	在密闭装置中，能耐潮、耐制冷剂	漆膜受卷绕应力，易产生裂纹(浸渍前须在120℃左右加热1h以上消除应力)	空调设备和制冷设备电机的绕组	企业标准

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

续表

类别	耐热等级	产品名称	型号	规格	特点		主要用途	标准号
					优点	局限性		
薄膜绕包线	C级 220℃	聚酰亚胺薄膜绕包圆铜线	Y	2.5～6.0	1. 耐热性和耐低温性优 2. 耐辐射性优 3. 在高温下电压击穿性能好 4. 和玻璃丝包线相比槽满率较高	在含水密封系统中易水解	高温运行的轧钢电机、牵引电机、深井泵电机，耐辐射等特种电机绕组	企业标准
		聚酰亚胺薄膜绕包扁铜线	YB	a边 2.0～5.6 b边 2.0～16.0				
特种电磁线	65℃	聚氯乙烯绝缘潜水电机绕组线	QV	线芯截面 0.5～19.0mm²	耐水性能较好	槽满率低，绕制线圈时易损伤绝缘层	潜水电机绕组	企业标准
	70℃	聚乙烯绝缘尼龙护套湿式潜水电机绕组线	QYN SYN	线芯截面 0.5～19.0mm²	1. 耐水性良好 2. 护套机械强度高	槽满率低	潜水电机绕组	JB4014—85
玻璃丝包线及玻璃丝包漆包线	B级 (130℃)	双玻璃丝包圆铜线	SBEC	0.25～6.0	1. 过负载性优 2. 耐电晕性优 3. 玻璃丝包漆包线的耐潮性好	1. 弯曲性较差 2. 耐潮性较差	发电机、大中型电动机、牵引电机	GB1342—77
		双玻璃丝包圆铝线	SBELC	0.25～6.0				
		双玻璃丝包扁铜线	SBECB	a边 0.9～5.6 b边 2.0～18.0				
		双玻璃丝包扁铝线	SBELCB	a边 0.9～5.6 b边 2.0～18.0				
		单玻璃丝包聚酯漆包扁铜线	QZSBCB	a边 0.9～5.6 b边 2.0～18.0				
		单玻璃丝包聚酯漆包扁铝线	QZSB-LCB	a边 0.9～5.6 b边 2.0～18.0				
		双玻璃丝包聚酯漆包扁铜线	QZSB-ECB	a边 0.9～5.6 b边 2.0～18.0				
		双玻璃丝包聚酯漆包扁铝线	QZSBE-LCB	a边 0.9～5.6 b边 2.0～18.0				
		单玻璃丝包聚酯漆包圆铜线	QZSBC	0.53～2.50				
	F级 (120℃)	单玻璃丝包缩醛漆包圆铜线	QQSBC		1. 过负载性优 2. 耐电晕性优 3. 耐潮性优	弯曲性较差		GB1342—77
	F级 (155℃)	双玻璃丝包聚酯亚胺漆包扁铜线	QZYS-BEFB	a边 0.9～5.6 b边 2.0～18.0	1. 过负载性优 2. 耐电晕性优 3. 耐潮性优	弯曲性较差		企业标准
		单玻璃丝包聚酯亚胺漆包扁铜线	QZYS-BFB	a边 0.9～5.6 b边 2.0～18.0				

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

续表

类别	耐热等级	产品名称	型号	规格	特点		主要用途	标准号
					优点	局限性		
玻璃丝包线及玻璃丝包漆包线	H级（180℃）	硅有机漆双玻璃丝包圆铜线	SBEG	0.25～6.0	1. 过负载性优 2. 耐电晕性优 3. 用硅有机漆浸渍改进了耐水耐潮性能	1. 弯曲性较差 2. 硅有机浸渍漆粘合能力较差，绝缘层的机械强度较差		企业标准
		硅有机漆双玻璃丝包扁铜线	SBEGB	a边 0.9～5.6 b边 2.0～18.0				
	H级（180℃）	双玻璃丝包聚酰亚胺漆包扁铜线	QYSB-EGB	a边 0.9～5.6 b边 2.0～18.0	1. 过负载性优 2. 耐电晕性优 3. 耐潮性优	弯曲性较差		企业标准
		单玻璃丝包聚酰亚胺漆包扁铜线	QYS-BGB	a边 0.9～5.6 b边 2.0～18.0				

表 7-1-16　聚酯漆包圆铜线（QZ-2）、聚酰亚胺漆包圆铜线（QY-2）

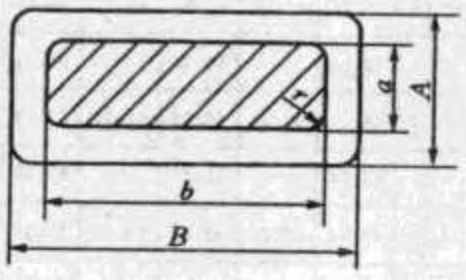
铜线直径（mm）	直径公差（mm）	漆膜最小厚度（mm）	漆包线最大外径（mm）	线密度（kg/km）	漆包线直流电阻（Ω/m）≤	击穿电压（V）	使用温度（℃）
0.060	±0.003	0.009	0.090	0.029	6.851	600	QZ-2 为 130 QY-2 为 220
0.080		0.010	0.110	0.050	3.754		
0.100	±0.005	0.013	0.130	0.076	2.466	900	
0.120			0.150	0.1083	1.683		
0.150		0.016	0.190	0.167	1.059	1200	
0.170			0.210	0.213	0.8175		
0.200		0.020	0.240	0.292	0.5853		
0.250		0.025	0.300	0.454	0.3708	1500	
0.280	±0.010		0.330	0.566	0.3053		
0.310			0.360	0.693	0.2473		
0.350		0.030	0.410	0.884	0.1925	1800	
0.400			0.460	1.175	0.1463		
0.470			0.530	1.600	0.1052		
0.530		0.040	0.600	2.040	0.08231	2400	
0.600			0.670	2.589	0.06394		
0.630			0.700	2.822	0.05790		
0.750	±0.015	0.050	0.840	4.114	0.04120	3000	
0.850			0.940	5.235	0.03192		
1.000		0.060	1.110	7.240	0.02294	3600	
1.060	±0.020		1.170	8.505	0.02058		
1.180			1.290	9.890	0.01654		
1.250			1.360	11.20	0.01471		
1.400			1.510	14.00	0.01169		
1.500			1.610	16.10	0.01016		
1.700		0.070	1.820	20.46	0.007933	4200	
1.800			1.920	22.91	0.007064		
1.900			2.020	25.50	0.006331		
2.000			2.120	28.21	0.005706		
2.120	±0.030		2.240	31.52	0.005095		
2.240			2.360	36.13	0.004557		
2.360			2.480	41.35	0.004100		
2.500			2.620	44.63	0.003648		

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 7-1-17　　双玻璃丝包及双玻璃丝包漆包铜扁线

a R_{20} R_{40} \ b R_{20} R_{40}		r	2.00	2.12	2.24	2.36	2.50	2.65	2.80	3.00	3.15	3.35	3.55	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00	5.30	5.60	6.00
0.90		1/2a	1.626	1.734	1.842	1.950	2.076	2.211	2.346	2.526	2.661	2.841	3.021	3.201	3.426	3.651	3.876	4.101	4.326	4.576	4.866	5.226
	0.95		1.706	—	1.934	—	2.181	—	2.466	—	2.799	—	3.179	—	3.606	—	4.081	—	4.556	—	5.126	—
1.00			1.785	1.905	2.025	2.145	2.285	2.435	2.585	2.785	2.935	3.135	3.335	3.535	3.785	4.035	4.285	4.535	4.785	5.085	5.385	5.785
	1.06	0.50	1.905	—	2.160	—	2.435	—	2.753	—	3.124	—	3.548	—	4.025	—	4.555	—	5.085	—	5.721	—
1.12			2.025	2.160	2.294	2.429	2.585	2.753	2.921	3.145	3.313	3.537	3.761	3.985	4.265	4.545	4.825	5.105	5.385	5.721	6.057	6.505
	1.18		2.145	—	2.429	—	2.736	—	3.089	—	3.502	—	3.974	—	4.505	—	5.095	—	5.685	—	6.393	—
1.25			2.285	2.435	2.585	2.735	2.910	3.098	3.285	3.535	3.723	3.973	4.223	4.473	4.785	5.098	5.410	5.723	6.035	6.410	6.785	7.285
	1.32		2.425	—	2.742	—	3.085	—	3.481	—	3.943	—	4.471	—	5.065	—	5.725	—	6.385	—	7.177	—
1.40			2.585	2.753	2.921	3.089	3.285	3.495	3.705	3.985	4.195	4.475	4.755	5.035	5.385	5.735	6.085	6.435	6.785	7.205	7.625	8.185
	1.50				3.145	—	3.535	—	3.985	—	4.510	—	5.110	—	5.785	—	6.535	—	7.285	—	8.185	—
1.60					3.369	3.561	3.785	4.025	4.265	4.585	4.825	5.145	5.465	5.785	6.185	6.585	6.985	7.385	7.785	8.265	8.745	9.385
	1.70						3.587	—	4.397	—	4.992	—	5.672	—	6.437	—	7.287	—	8.137	—	9.157	—
1.80							4.137	4.407	4.667	5.038	5.307	5.667	6.027	6.387	6.837	7.287	7.737	8.188	8.637	9.177	9.717	10.44
	1.90								4.957	—	5.622	—	6.382	—	7.237	—	8.187	—	9.137	—	10.28	—
2.00		0.65							5.237	5.638	5.937	6.337	6.737	7.137	7.637	8.137	8.637	9.137	9.637	10.24	10.84	11.64
	2.12										6.315	—	7.163	—	8.117	—	9.177	—	10.24	—	11.51	—
2.24											6.693	7.141	7.589	8.037	8.597	9.157	9.717	10.28	10.84	11.51	12.18	13.08
	2.36												7.829	—	8.891	—	10.07	—	11.25	—	12.67	—
2.50													8.326	8.826	9.451	10.08	10.70	11.33	11.95	12.70	13.45	14.45
	2.65														10.05	—	11.38	—	12.70	—	14.29	—
2.80															10.65	11.35	12.05	12.75	13.45	14.29	15.13	16.25
	3.00	0.80															12.95	—	14.45	—	16.25	—
3.15																	13.63	14.41	15.20	16.15	17.09	18.35
	3.35																		16.20	—	18.21	—
3.55																			17.20	18.27	19.33	20.75
	3.75																				20.14	—
4.00																					21.54	23.14
	4.25																					
4.50																						
	4.75	1.00																				
5.00																						
	5.30																					
5.60																						



注　1. a、b：优先采用，$R_{20}R_{40}$或$R_{40}R_{20}$尽量不采用。
2. 计算截面已考虑了圆角。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(SBECB、QZSBECB、QYSBEGB、QZYSBEFB) (mm)

6.30		7.10		8.00		9.00		10.00		11.2		12.5		14.0		16.0		18.0
	6.70		7.50		8.50		9.50		10.6		11.8		13.2		15.0		17.0	
5.496	5.856	6.216																
5.791	—	6.551																
6.085	6.485	6.885	7.285	7.785														
6.463	—	7.311	—	8.265														
6.841	7.289	7.737	8.185	8.745	9.305	9.865												
7.219	—	8.163	—	9.225	—	10.41												
7.660	8.160	8.660	9.160	9.785	10.41	11.04	11.66	12.29										
8.101	—	9.157	—	10.35	—	11.67	—	12.99										
8.605	9.165	9.725	10.29	10.99	11.69	12.39	13.09	13.79	14.63	15.47								
9.235	—	10.44	—	11.79	—	13.29	—	14.79	—	16.59								
9.865	10.51	11.15	11.79	12.59	13.39	14.19	14.99	15.79	16.75	17.71	18.67	19.79						
10.35	—	11.71	—	13.24	—	14.94	—	16.64	—	18.63	—	20.89						
10.98	11.70	12.42	13.14	14.04	14.94	15.84	16.74	17.64	18.72	19.80	20.88	22.14	23.40	24.84				
11.61	—	13.13	—	14.84	—	16.74	—	18.64	—	20.92	—	23.39	—	26.24				
12.24	13.04	13.84	14.64	15.64	16.64	17.64	18.64	19.64	20.84	22.04	23.24	24.64	26.04	27.64	29.64	31.64		
12.99	—	14.69	—	16.60	—	18.72	—	20.84	—	23.38	—	26.14	—	29.32	—	33.56		
13.75	14.65	15.54	16.44	17.56	18.63	19.80	20.92	22.04	23.38	24.73	26.07	27.64	29.21	31.00	33.24	35.48	37.72	39.96
14.32	—	16.21	—	18.33	—	20.69	—	23.05	—	25.88	—	28.95	—	32.49	—	37.21	—	41.93
15.20	16.20	17.20	18.20	19.45	20.70	21.95	23.20	24.45	25.95	27.45	28.95	30.70	32.45	34.45	36.95	39.45	41.95	44.45
16.15	—	18.27	—	20.65	—	23.30	—	25.95	—	29.13	—	32.58	—	36.55	—	41.85	—	47.15
17.09	18.21	19.33	20.45	21.95	23.25	24.65	26.05	27.45	29.13	30.81	32.49	34.45	36.41	38.65	41.45	44.25	47.05	49.85
18.35	—	20.75	—	23.45	—	26.45	—	29.45	—	33.05	—	36.95	—	41.45	—	47.45	—	53.45
19.30	20.56	21.82	23.08	24.65	26.23	27.80	29.38	30.95	32.84	34.73	36.62	38.83	41.03	43.55	46.70	49.85	53.00	56.15
20.56	—	23.24	—	26.25	—	29.60	—	32.95	—	36.97	—	41.33	—	46.35	—	53.50	—	59.75
21.82	23.24	24.66	26.08	27.85	29.63	31.40	33.18	34.95	37.08	39.21	41.34	43.83	46.31	49.15	52.70	56.25	59.80	63.35
22.77	—	25.77	—	29.14	—	32.89	—	36.64	—	41.14	—	46.02	—	51.64	—	59.14	—	66.64
24.34	25.94	27.54	29.14	31.14	33.14	35.14	37.14	39.14	41.54	43.94	46.34	49.14	51.94	55.14	59.14	63.14	67.14	71.14
25.92	—	29.32	—	33.14	—	37.39	—	41.64	—	46.74	—	52.27	—	58.64	—	67.14	—	75.64
27.49	29.29	31.09	32.89	35.14	37.39	39.64	41.89	44.14	46.84	49.54	52.24	55.39	58.54	62.14	66.64	71.14	75.64	80.14
		32.87	—	37.14	—	41.89	—	46.64	—	52.34	—	58.52	—	65.64	—	75.14	—	84.64
		34.64	36.64	39.14	41.64	44.14	46.64	49.14	52.14	55.14	58.14	61.64	65.14	69.14	74.14	79.14	84.14	89.14
				41.54	—	46.84	—	52.14	—	58.50	—	65.39	—	73.34	—	83.94	—	94.54
				43.94	46.74	49.54	52.34	55.14	58.50	61.86	65.22	69.14	73.06	77.54	83.14	88.74	94.34	99.94

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 7-1-18　双玻璃丝包圆铜线（SBEC）

导线直径（mm）	直径公差（mm）	导线截面积（mm²）	玻璃丝包圆线最小绝缘厚度（mm）	玻璃丝包圆线外径（mm）≤	线密度（kg/km）	击穿电压（V）≥	使用温度（C）
0.630	±0.010	0.3117	0.17	0.39	3.187	550	150
0.670		0.3526		0.93	3.567		
0.850	±0.015	0.5675	0.18	1.12	5.662		
1.00		0.7854	0.19	1.29	7.681		
1.06	±0.02	0.8825		1.35	8.590		
1.25		1.227		1.54	11.76		
1.40		1.539		1.69	14.73		
1.70		2.270	0.21	2.01	21.41		
1.80		2.545		2.11	24.00		
2.00		3.142		2.31	29.74		
2.12		3.530	0.24	2.47	33.26		
2.24		3.941		2.59	37.05		
2.50	±0.03	4.909		2.86	45.52		
2.65		5.516		3.01	51.04		
2.80		6.158		3.16	56.88		
3.00		7.069	0.25	3.36	64.98		
3.35		8.814		3.71	80.83		
3.55	±0.04	9.898		3.92	90.76		
3.75		11.04		4.12	101.07		
4.00		12.57		4.37	114.60		
4.50	±0.05	15.90	0.26	4.88	144.79		
4.75		17.72		5.13	160.94		
5.30		22.06		5.68	200.45		

在选用电磁线时，应从电气、物理和化学性能、工艺性和经济性等方面综合考虑。漆包线的漆膜薄，广泛应用于小型电机及永磁发电机绕组。双玻璃丝包和薄膜统包线的电气性能较好，适宜作中大型电机的绕组。此外，还要根据电机的绝缘等级进行选用。但在电机修理时，最好采用与原来同型号的电磁线，不要轻易更改。但有时可能分辨不清原型号而需要重新选定电磁线时，须考虑与有关绝缘材料的相容性问题。当组合绝缘材料的化学组成及耐温等级和电磁线相同时，其相容性一般较好。绝缘浸渍漆对电磁线的相容

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

性影响最大，例如一般绝缘浸渍漆（除硅有机浸渍漆外）都对聚酰亚胺绝缘漆膜的优良性能有一定影响。所有绝缘材料如槽绝缘、层压板、绑扎带、套管、胶粘剂以及制造过程中使用的剩余焊剂、润滑油脂等，都对电磁线有相容问题，选用时，须加以考虑。例如聚氯乙烯和氯丁橡胶在高温处理或长期老化时会产生氯化氢，损伤聚酯、聚酯亚胺、聚酰胺酰亚胺漆膜。又如，扎带、绝缘纸、层压板、绝缘油等在长期使用中能产生水分，在一般温度的密封系统中，会使聚酯、聚酯亚胺、聚酰亚胺绝缘层水解，使用时尤需注意。

发电机常用电磁线的品种和规格，见表 7－1－15～表 7－1－19。

3.橡皮、塑料电线电缆

电机常用的橡皮、塑料绝缘的引接线品种和规格，见表 7－1－19～表 7－1－23。

4.焊料

水轮发电机绕组接头焊接均采用钎焊法。钎焊法的优点是焊料熔化温度比母材低，焊接过程中母材并不熔化损坏，仅使焊料密实填充于母材接头各空隙间，并保证接头焊接处，具有足够的机械强度、导电性和耐热性。常用焊料的性能及用途，见表 7－1－24。

5.炭刷

用于整流子和滑环处的炭刷，也是一种导电材料，它是转动部件与固定部件导体联接必不可少的元件。各种电刷技术特性及工作条件，见表 7－1－25。

二、磁性材料及非磁性材料

磁性材料的种类很多，电机工业中常用的磁性材料，通常按矫顽力 H_c 的大小分成两大类：一类是软磁材料，也称导磁材料，它的矫顽力 H_c 一般在 kA/m 以下；另一类是硬磁材料，也称永磁材料，它的矫顽力 H_c 在几十千安每米以上甚至几百千安每米。

对导磁材料的要求是：矫顽力要低，导磁率要高，铁损要低，磁感应强度要高。

常用的导磁材料有：硅钢、电工纯铁、普通碳素钢及低合金钢等。

水轮发电机定子铁芯通常用 0.5mm 厚的优质硅钢片叠装而成，其性能，见表 7－1－26。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 7-1-19 单芯电线在空气中敷设长期连续负荷允许载流量

标称截面 (mm²)	长期连续负荷允许载流量 (A)		相应电线表面温度 (℃)	标称截面 (mm²)	长期连续负荷允许载流量 (A)		相应电线表面温度 (℃)
	铜芯	铝芯			铜芯	铝芯	
0.75	18	—	60	50	230	175	61
1.0	21	—	60	70	285	220	61
1.5	27	19	60	95	345	265	61
2.5	35	27	61	120	400	310	61
4	45	35	61	150	470	360	61
6	65	45	61	185	540	420	61
10	85	65	61	240	660	510	61
16	110	85	61	300	770	600	61
25	145	110	61	400	940	730	61
35	180	138	61	500	1100	850	61

表7-1-20 JFEM 型 500V

标称截面 (mm²)	线芯结构根数/单线直径 (mm)	电线参考数据			标称截面 (mm²)	线芯结构根数/单线直径 (mm)	电线参考数据		
		外径 (mm)	重量 (kg/km)	导体电阻 20℃时不大于 (Ω/km)			外径 (mm)	重量 (kg/km)	导体电阻 20℃时不大于 (Ω/km)
0.75	42/0.15	4.0	24	25.7	16	49/0.64	10.7	247	1.18
1.0	32/0.20	4.1	28	18.9	25	98/0.58	13.0	378	0.716
1.5	48/0.20	4.4	35	12.6	35	133/0.58	14.0	479	0.528
2.5	19/0.41	5.7	57	7.59	50	133/0.68	16.3	652	0.384
4	19/0.52	6.2	76	4.54	70	189/0.68	18.5	883	0.270
6	19/0.64	6.8	111	3.00	95	259/0.68	20.5	1171	0.197
10	49/0.52	9.6	184	1.78	120	259/0.76	23.0	1462	0.158

表 7-1-21 JFEM 型 1140V

标称截面 (mm²)	线芯结构根数/单线直径 (mm)	电线参考数据			标称截面 (mm²)	线芯结构根数/单线直径 (mm)	电线参考数据		
		外径 (mm)	重量 (kg/km)	导体电阻 20℃时不大于 (Ω/km)			外径 (mm)	重量 (kg/km)	导体电阻 20℃时不大于 (Ω/km)
0.75	42/0.15	4.8	33	25.7	16	49/0.64	11.5	269	1.18
1.0	32/0.20	5.0	37	18.9	25	98/0.58	13.8	404	0.716
1.5	48/0.20	5.2	44	12.6	35	133/0.58	14.8	507	0.528
2.5	19/0.41	6.5	68	7.59	50	133/0.68	17.1	684	0.384
4	19/0.52	7.0	89	4.54	70	189/0.68	19.3	920	0.270
6	19/0.64	7.6	126	3.00	95	259/0.68	21.3	1211	0.197
10	49/0.52	10.3	203	1.78	120	259/0.76	23.4	1485	0.158

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 7-1-22 JFEM 型 6000V

标称截面 (mm²)	线芯结构 根数/单线直径 (mm)	电线参考数据			标称截面 (mm²)	线芯结构 根数/单线直径 (mm)	电线参考数据		
		外径 (mm)	重量 (kg/km)	导体电阻 20℃时不大于 (Ω/km)			外径 (mm)	重量 (kg/km)	导体电阻 20℃时不大于 (Ω/km)
6	19/0.64	14.7	288	3.00	50	133/0.68	21.7	897	0.384
10	49/0.52	15.8	372	1.78	70	189/0.68	24.9	1215	0.270
16	49/0.64	16.9	454	1.18	95	259/0.68	26.5	1514	0.197
25	98/0.58	19.2	616	0.716	120	259/0.76	28.2	1781	0.158
35	133/0.58	20.2	731	0.528					

表 7-1-23 电阻温度计用电线

导电线芯 (mm)	型号	项目	单位	数据	备注
二芯 三芯	RSFP	一根导电线芯的截面积	mm²	0.75	
		一根导电线芯的根数		19	
		电线外形尺寸 不大于	mm	3.8×6 (二芯)	
		直流电阻 20℃时	Ω/km	24.6	
		线芯间绝缘电阻 不小于	MΩ/m	100	
		电线长期使用温度	℃	205	
		试验电压（交流 50Hz，5min）	V	500	

注 二芯电阻温度计用电线，单根导电线芯截面积为 0.75mm²，表示为：2×0.75 电阻温度计用电线 RSFP。

表 7-1-24 焊料的一般性能

	代号	比重 γ	熔点 (℃)	电阻率 ρ (Ω·m)	抗拉强度 σ_b (MPa)	抗剪强度 τ_{cs} (MPa)	伸长率 δ	布氏硬度 (HB)	焊缝抗拉强度 σ_b (MPa)	
									铜接头	黄铜接头
锡铅焊料	锡焊料 H1SnPb10	7.6	220		4.3					
	锡焊料 H1SnPb39	8.4	183	0.145	4.7	—	18.3	12～14	9.7～10.9	—
	锡焊料 H1SnPb50	8.9	210	0.156	3.8	3.54	32	15.6	—	—
	锡焊料 H1SnPb58—2	9.3	235	0.170	3.8	3.67	63	11.8	7.8	8.0
	锡焊料 H1SnPb68—2	9.7	256	0.182	3.3	2.90	58	10.3	9.1	8.8
	锡焊料 H1SnPb80—2	10.2	277	0.220	2.8					
银铜焊料	银焊料 H1AgCu30—25	9.1	810	0.097	15.5～22					
	银焊料 H1AgCu80—5	8.3	720	0.220						
铜锌焊料	铜焊料 H1CuZn64	7.7	825	—	脆		—	—	—	—
	铜焊料 H1CuZn52	8.2	865	—	21		3	130	—	—
	铜焊料 H1CuZn46	8.3	880	—	35		20	128	—	—

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

常用电刷的主要技术特性及运行条件

型 号	一对电刷接触电压降（V）	摩擦系数不大于	额定电流密度（A/cm²）	最大圆周速度（m/s）	使用时允许的单位压力（kPa）
S—3	1.9	0.25	11	25	20～25
S—6	2.6	0.28	12	70	22～24
D104	2.5	0.20	12	40	15～20
D172	2.9	0.25	12	70	15～20
D207	2.0	0.25	10	40	20～39
D213	3.0	0.25	10	40	20～39
D214	2.5	0.25	10	40	20～39
D215	2.9	0.25	10	40	20～39
D252	2.6	0.23	15	45	20～25
D308	2.4	0.25	10	40	20～39
D309	2.9	0.25	10	40	20～39
D374	3.8	0.25	12	50	20～39
J102	0.5	0.20	20	20	18～23
J164	0.2	0.20	20	20	18～23
J201	1.5	0.25	15	25	15～20
J204	1.1	0.20	15	20	20～25
J205	2.0	0.25	15	35	15～20
J203	1.9	0.25	12	20	15～20

表 7-1-26 **50Hz 反复磁化及在强磁场下各硅钢片的电磁性能**

新牌号	老牌号	厚度（mm）	在不同磁场强度中的磁感应（$\times10^{-4}$T）≥					单位铁损（W/kg）≤		电阻系数 ρ（Ω·m）
			B_{10}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{200}	$B_{10}/50$	$B_{15}/150$	
	D_{11}	1.0	—	15300	16300	17600	20000	5.8	13.4	0.25×10^{-6}
	D_{12}	1.0	—	15000	16200	17500	19800	5.5	12.5	0.25×10^{-6}
	D_{11}	0.5	—	15300	16400	17600	20000	3.3	7.7	0.25×10^{-6}
	D_{12}	0.5	—	15000	16200	17500	19800	3.2	7.5	0.25×10^{-6}
	D_{13}	0.5	—	15000	16200	17500	19800	2.8	6.5	0.25×10^{-6}

普通碳钢及其低合金钢的磁感应不如硅钢及纯铁，铁损很大。但它的机械强度远比硅钢及纯铁高。因此它被用来制造水轮发电机的转子磁轭，磁极铁芯。

工作在强磁系统中的某些结构部件，如定子端箍、定子铁芯压指等，为减少涡流损耗，需采用不导磁的非磁性材料。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表7-1-26 50Hz 反复磁化及在强磁场下各硅钢片的电磁性能

新牌号	老牌号	厚度(mm)	在不同磁场强度中的磁感应($\times10^{-4}$T)≥					单位铁损 (W/kg) ≤		电阻系数 ρ (Ω·m)
			B_{10}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{200}	$B_{10}/50$	$B_{15}/150$	
	D_{11}	1.0	—	15300	16300	17600	20000	5.8	13.4	0.25×10^{-6}
	D_{12}	1.0	—	15000	16200	17500	19800	5.5	12.5	0.25×10^{-6}
	D_{11}	0.5	—	15300	16400	17600	20000	3.3	7.7	0.25×10^{-6}
	D_{12}	0.5	—	15000	16200	17500	19800	3.2	7.5	0.25×10^{-6}
	D_{13}	0.5	—	15000	16200	17500	19800	2.8	6.5	0.25×10^{-6}
	D_{21}	0.5	—	14800	15900	17300	19500	2.5	6.1	0.40×10^{-6}
	D_{22}	0.5	—	14800	15900	17300	19500	2.2	5.3	0.40×10^{-6}
DR510—50	D_{23}	0.5	—	14800	15900	17300	19500	2.0	4.6	0.40×10^{-6}
DR440—50	D_{31}	0.5	—	14600	15700	17200	19400	2.0	4.4	0.50×10^{-6}
DR405—50	D_{32}	0.5	—	14600	15700	17100	19200	1.8	3.9	0.50×10^{-6}
	D_{31}	0.35	—	14600	15700	17100	19200	1.6	3.6	0.50×10^{-6}
	D_{32}	0.35	—	14600	15700	17100	19200	1.4	3.2	0.50×10^{-6}
DR360—50	D_{41}	0.50	13000	14500	15600	16800	18800	1.6	3.6	0.60×10^{-6}
DR315—50	D_{42}	0.50	12900	14400	15500	16700	18700	1.4	3.2	0.60×10^{-6}
DR290—50	D_{43}	0.50	12800	14300	15400	16600	18700	1.25	2.9	0.60×10^{-6}
DR265—50	D_{44}	0.50	12800	14300	15400	16600	18700	1.15	2.7	0.60×10^{-6}
	D_{41}	0.35	13000	14500	15600	16800	18800	1.35	3.2	0.60×10^{-6}
	D_{42}	0.35	12900	14400	15500	16700	18700	1.2	2.8	0.60×10^{-6}
	D_{43}	0.35	12800	14300	15400	16600	18700	1.05	2.5	0.60×10^{-6}
	D_{44}	0.35	12800	14300	15400	16600	18700	0.9	2.2	0.60×10^{-6}

(三)绝缘材料

绝缘材料的主要作用是隔离带电的或不同电位的导体,使电流能按指定的方向流动。但在某些场合下,绝缘材料往往还起机械支撑、保护导体及防晕、灭弧等作用。

绝缘材料在使用过程中,由于各种因素的长期作用,会发生物理变化和化学变化,使其电气性能及机械性能变坏,这种变化称为老化。影响绝缘材料老化的因素很多,但主要是热的因素,使用时温度过高会加速绝缘材料的老化过程。因此对各种绝缘材料都规定它们在使用过程中的极限温度,以延缓绝缘材料的老化过程,保证电工产品的使用寿命。绝缘材料的耐热等级及极限温度,见表7-1-27。

表7-1-27 绝缘材料的耐热等级和极限使用温度

耐热等级	Y	A	E	B	F	H	C
极限使用温度 t(℃)	90	105	120	130	155	180	>180

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(四)结构材料

除上述导电材料,磁性材料及绝缘材料以外,电机其他所用材料,统称为结构材料。结构材料的品种规格很多,用途也很广泛。

三、发电机检修工具的准备

水轮发电机检修所需工具与机组大小型式和施工方法直接有关。一般可分为普通工具和专用工具两类,前一类是市场上能买到的工具,如平尺、塞尺、卡尺、千分尺、百分表和水平仪、水准仪等各种量具,以便准确地度量各零部件的外形尺寸和相对位置。另外由于水轮发电机各大部件的结构尺寸要求和检修测量过程中的特殊需要,除一般通用工具外,尚需根据具体情况自制一些特殊的专用工具,其中一部分是在机组安装时由制造厂随机组设备供给,但大部分是在机组安装时在工地自制。由于有些工具在安装时损坏,有的丢失,还有的工具随安装队伍撤走而带走,因此在检修前,应对工具进行仔细的清点。

(一)测量专用工具

用于调整中心、水平、高程、圆度等用。如大型外径千分尺、大型内径千分尺、求心器、水平梁、连通管水平器、气隙塞规、定子中心测四架等。

(二)转子组装专用工具

具体有冲片除锈机、转子冲片堆积机、空气锤、冲片压紧工具、特种铣刀、磁轭外圆磨平机、转子测圆架、夹磁极用的大卡兰、拔键器等。

(三)紧固螺栓专用工具

具体有棘轮扳手、活扳手、风动扳手、力矩扳手、撞击专用扳手、大型螺母拧紧器等。

(四)其他专用工具

如推力轴承瓦研磨机、机械盘车工具、吊转子专用吊具、各种螺旋千斤顶、制动器试验架以及其他专用工具等。

以上检修水轮发电机专用工具并不是每台都必须用的,这里只是作一次汇总说明。其具体结构和使用方法将在以后各有关章节中分别介绍。随着水轮发电机检修技术的发展和机械化程度的不断提高,检修专用工具也会不断地被改进,还将会出现其他种类的专用工具。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第二章 水轮发电机定子的检修

第一节 定子铁心的检修

一、定子铁心松动处理及拉紧螺杆应力检查

定子检修时，首先应检查定位筋是否松动和定位筋与托板、托板与机座环结合处有无脱焊现象。由于定位筋的尺寸和位置是保证定子铁心圆度的首要条件，所以发现定位筋松动或位移要立即恢复原位补焊固定。其次检查压指是否松动或位移，如果松动或位移应恢复原位将其搭焊在齿压板上。同时还得检查铁心段间的“工”字形通风槽钢是否松动及定子拉紧螺杆应力值是否达到满足铁心紧度的规定要求。如果发现铁心松动或进行更换压指等项目时，必须对铁心进行压紧处理，因为铁心松动会产生较大的电磁振动和噪音，同时将磨损定子绕组的绝缘，危害性是极大的。压紧铁心的方法较多：①由手工在扳手上套上长杆紧固螺母；②用重锤撞击扳手紧固螺母；③用风动扳手紧固螺母；④用油压装置紧固拉紧螺杆等。为了掌握压紧程度，可用紧度刀片检查，或者在拉紧螺栓上贴应变片并用引线引至应变仪上进行测量。可事先通过 $\sigma = 120MPa$ 时，求得应变量 ε 值，因为应力与应变成正比关系，即

$$\sigma = E\varepsilon$$

式中 σ——应力(MPa)；

E——材料弹性模量，$E = 2.1 \times 10^5 MPa$；

ε——应变量。

通过测得应变量 ε 值的大小可求得应力 σ 的大小，从而就可以知道铁心的压紧程度。当拧紧螺母时，一边检查 ε 值，一边注意使用扳手的长度和用力的大小。当 ε 合格时，记下扳手长度和用力大小，以后每个螺母均以这个力矩拧紧便可。最好使用指针式扭力扳手，便于使每个拉紧螺杆受力一致，铁心压紧均匀。由于齿压板上布置的铜环引线影响了紧固螺母工作的进行，因此使用何种方法紧固螺母应根据具体情况选择。定子铁心采用0.98MPa的压力装压已足以防止铁心松动。但是考虑到压装时还有摩擦力需克服、运行

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

时的绝缘老化收缩使片间压力减小等情况，在实际装压时，将压力提高到 1.176～1.47MPa。随着铁心的高度增长，有的最终压力提高到 1.96MPa。但也不希望压力过高，因为压力过高会使绝缘和冲片受到损伤。

如果条件允许应采用液压装置紧固拉紧螺杆。该装置把高压液压泵和许多液压千斤顶用管路连通起来组成一个整体，利用每一个液压千斤顶去拉一个压紧螺杆，见图 7－2－1。

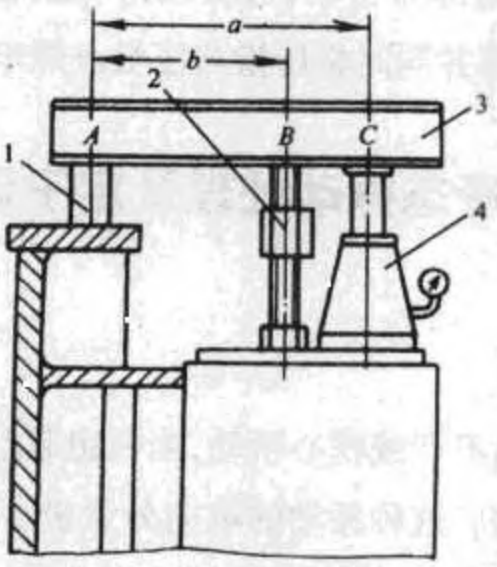


图 7－2－1　用油压装置紧固拉紧螺杆

1—垫块；2—双头螺柱；3—工字梁；4—油压千斤顶

工字梁一端支在垫块上，垫块放在机座环上，工字梁的中部通过双头联结螺母拧在拉紧螺杆上，工字梁的另一端放在千斤顶柱上。液压泵起动后，柱塞 C 上升，以 A 为支点，B 点也上升，拉长拉紧螺杆，也压紧了定子铁心叠片。假设拉紧螺杆应力按 118MPa 计算，则拉伸力 P 为：

$$P = \frac{\pi}{4} d^2 [\sigma] \times 10^{-6}$$

式中　P——拉力(N)；

d——螺纹内径(mm)；

$[\sigma]$——许用拉应力(118×10^6Pa)。

由于杠杆传动，换算到千斤顶柱塞上的力 P′为：

$$P' = \frac{b}{a} P$$

换算到油泵压力表读数为：

$$P'' = \frac{P'}{\pi/4 \cdot D^2} = \frac{b}{a} \cdot \frac{d^2[\sigma]}{D^2}$$

式中　D——千斤顶活塞直径(mm)。

液压泵起动后，在压力表达到上式计算值时，表明螺杆拉应力已达到许用值 118MPa。

例 1　某水轮发电机定子拉紧螺杆 d = 42mm，千斤顶活塞直径 D = 10cm，垫块至拉紧

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

螺杆距离 b 与垫块至千斤顶柱头距离 α 的比为 $\frac{b}{\alpha}=0.5$，设满足该定子铁心紧度要求的拉紧螺杆应力为 118MPa，求油压千斤顶压力表为何值时表明拉紧螺杆拉应力符合要求。

解　将数据代入公式得

$$P''=0.5\times\frac{42^2\times118\times10^6}{100^2}P_a=10.41\times10^6Pa$$

紧固拉紧螺杆后，如个别铁心端部有松动，可在压指和铁心之间打进一定厚度的楔形铁垫，楔紧后将其点焊于压指端部并同时将压指与压板点焊牢。

二、冷态振动处理及定子调圆

(一)冷态振动处理

有些机组因定子铁心合缝不严或铁心松动，当机组起动、投入励磁到空载运行在交变磁场的作用下而引起产生振动。这种振动的轴向分量极小，而沿着径向和切向的分量却较大。其振幅随温度的变化而变化，如某机组在室温 30℃时起动(冷态)的切向振幅双向值为 0.11mm，人站在发电机上或发电机附近地板上有发麻的感觉。随着带负荷引起绕组温度上升，铁心温度上升至 60℃时双向振幅骤降至 0.01mm。这种现象与合缝间隙的变化规律一致，因此称为冷态振动。为消除冷态振动，须在铁心合缝处加垫来消除间隙和增加刚度(如走子铁心在工地叠装，则不用加垫)。处理方法如下所述。

(1)加垫前，测出定子铁心合缝及机座合缝的间隙。

(2)以前一般采用两面涂有匀薄耐油绝缘漆的青壳纸作垫，现在大多数采用浸胶涤纶毛毡作垫。考虑其压缩量，垫的厚度可比间隙大 0.3～0.4mm。

(3)先拔出定子基础销钉，再松开定子对缝的组合螺栓，后松开定子基础螺栓。

(4)加垫时为防止铁心圆度变化，应先用铁楔打开直径方向的两个合缝加入垫，再紧上组合螺母，并打入基础销钉；再在另一直径方向重复上述动作，最后紧固基础螺栓，并再一次紧固合缝螺母。

(5)测量定子合缝间隙，除局部外，以 0.05mm 厚塞尺塞不进为合格。如有可能，挂钢琴线检查定子圆度是否超差，如有则应重新处理。

(二)定子调圆

安装时对定子铁心的圆度虽有严格的要求，但是电厂经多年运行后，由于运行中的电磁力、机械力、振动等原因，可能使定子产生变化。因此，检修时应对定子圆度进行重新测量。对定子圆度要求和安装时相同；定子测圆和调整的方法步骤与安装时相同。实际上，

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

有不少电厂的发电机圆度均不理想，但运转起来，电流的波形、磁拉力、振动等方面情况尚好，故不一定要处理定子圆度。但当定子圆度很差，对安全运行造成影响时，则必须进行处理。处理的办法是重新叠装定子扇形冲片，这也是扩大性大修的重点项目。当定子绕组、定子冲片全拆出后（整平、登记、分组编号，妥善保存），再用钢琴线法或测圆架测出定位筋的圆度。如直径出入较大，应拆下定位筋和托板重新找正并焊牢。如需处理的尺寸不大，可直接挫削、刮削定位筋，从而保证圆度。在此基础上重新叠片装压，使其符合铁心圆度等公差要求。

三、定子铁心的局部修理

水轮发电机定子铁心发生严重故障时，如定子铁心来压紧，运行时硅钢片松动使电磁声很大，甚至磨坏定子绕组绝缘等，则应将定子铁心全部拆散来重新涂漆和叠装。但对一些不太严重的故障，可以采用局部修理来解决。常见的这一类故障及其修理方法如下。

（一）铁心的个别齿沿轴向朝外胀开

其原因可能是铁心叠装时由于没有将端部的齿整平或在转子吊出时碰到定子铁心而将个别齿撬起。修理时只要用金属棒（最好用钢棒）将个别朝外胀开的齿敲平即可。

（二）铁心局部烧坏

绕组发生短路或接地故障时产生的火花有时会把铁心局部烧坏。如果烧坏的面积不大，则可以不拆散铁心。先用铁刀、砂轮等工具将铁心局部烧坏的地方修平，再用小刀（或锯条）将硅钢片逐片剔开，并把片间的铁屑清理干净，最后在铁心表面涂一层自干绝缘清漆即可。

第二节　定子的局部检修

一、定子绕组的局部检修

（一）绕组接地故障的检修

电机投入运行后，噪声大，有一种深沉的啸叫声。这通常是由于电气故障造成磁场不平衡所引起的，有可能是电机绕组接地。

1.绕组接地的检查

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

检查绕组接地的方法主要有：

(1)电流烧穿法

遇到统组接地点在槽里或虽在槽口但绕组和铁芯粘得很紧难以撬动时，采用大电流烧穿法容易察出位置。就是在铁芯与绕组之间加一较低电压来产生电流。为了防止烧损铁芯及邻近绕组的绝缘，要用调压器来调节其电压，借此限制电流。小型电机不超过额定电流的两倍，时间不超过0.5min；容量稍大的电机，只需额定电流的20%～50%。接上电源后，接地点很快发热，绝缘物冒烟，此时应立即中断电源，在冒烟点上作好记号。也可以逐渐加大电流到接地点刚开始冒烟时就立即断电。

(2)用兆欧表测量

在进行测量之前，先核查兆欧表的额定电压与统组的工作电压是否相对应，然后检查兆欧表的偏转情况，先使“L”与“E”开路，使手摇发电机达到额定转速，指针应指“∞”，再将“L”与“E”短接，指针应指到“0”。一切准备工作就绪后，将兆欧表的“L”接线柱与绕组相接，“E”接线柱与机座相接。摇动手摇发电机由慢到快，速度要均匀保持在120r/min左右，直到指针稳定，1min以后读数。如果读数小，表示该相绕组严重受潮应进行烘干处理；如果读数为“0”，即为接地相，应立即停止摇动，以免兆欧表过热烧坏。在摇动时，摇表接线柱间具有较高的电压，不能用手接触，以防触电。严禁带电测量。测量完后，要及时用放电棒将绕组对地放电，以防发生触电事故。

(3)用校验灯检查

如果既不具备电流烧穿的条件，又没有兆欧表，用校验灯检查也比较方便，见图7－2－2由几只干电池和一只小的灯泡及两根试验引线串联而成，也可用220V的电源和一只10W的小灯泡串联而成。检验时，把一根引线连在机座上，另一根引线与从电机内引出的线头相连，如果灯泡发亮，表示绕组上至少有一点接地。

用上述方法检查时，要分别对各相进行检验。在三相统组里，必须把星形或三角形连接的连接线拆开。接地的一相找出以后，把这一相的线圈组以两等分拆开来分别检验，再将有接地的1/2的线圈组分成两等分来分别检验。照此方法，找出接地的线圈组，然后把这一线圈组内的各线圈拆开来分别检验，直到找出接地的线圈为止。

2.绕组接地故障的修理

当接地的线圈找出来以后，根据接地位置和绝缘损坏情况采用以下几种修理方法。

(1)永久性的修理

对于主绝缘损坏严重的线圈，应该重新换新绝缘或更换线圈。如果绕组主绝缘损坏不严重，也可进行局部修理。对不同的发电机，局部修理的方法也不相同，主要有以下两种方法。

①低压发电机绕组接地的局部修理。修理定子绕组接地故障时，应仔细观察绕组损

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

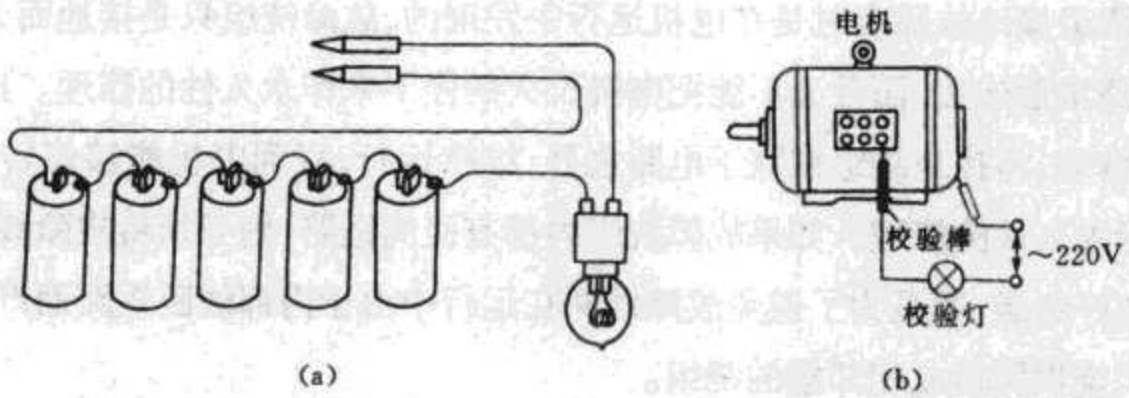


图 7-2-2 检查绕组接地

(a)用电池和灯泡串联,来检验绕组接地;(b)用校验灯检查绕组接地

坏情况。故障点在槽口等明显处,显而易见的可以在故障点处塞入云母板或绝缘纸板来修理;如果绕组的上层边绝缘损坏,可以退出槽楔来修补槽衬,还可以抬出上层线匝进行处理;如果故障点在槽底,只有更换槽衬才能解决,那么就必须抬出一个节距的绕组(此时工作应特别仔细和小心,不要碰伤匝间绝缘);如果匝间绝缘损坏了,则需用绝缘带重新包好。为了避免损伤绝缘,可以将绕组加热(只适用于热弹性绝缘)软化绝缘,再用理线板小心撬开槽衬。处理完毕后,要清扫干净,再刷上绝缘漆并烘干处理(如果是气干漆不需烘干)。

②高压发电机绕组接地的局部修理。半开口槽电机的局部修理可以按上述低压发电机的修理方法进行。开口槽发电机绕组的局部修理按下述过程进行:

A.割开绕组端部绑绳,取出垫块,退出故障线圈所在槽的槽楔。如果故障点在下层边,则须抬出一个节距内所有统组的上层边,才能取出故障线圈。为了避免损伤绝缘,对于热弹性绝缘线圈,可以用直流电通入要抬出的上层边绕组进行加热(注意电流的大小要适当,加热的速度不能太快)。待绝缘软化后,小心地将上层边取出,应注意不要使绕组端部变形太大,不要让绝缘损伤或折断。

B.修理故障线圈,先将旧绝缘扒去,把搭接处的绝缘削成斜坡,然后用云母带进行紧实地半叠绕包,所包层数按绝缘规范进行(与原绝缘一致,在搭接处要格外包紧)。云母带包好后,在其外层半叠包一层无碱玻璃丝带,再刷上绝缘漆。有防晕措施的绕组要刷半导体漆。

C.清扫定子槽,将修复的线圈下入槽内,并对该线圈进行耐压试验。

D.嵌入取出的全部上层边并打入槽楔,焊好端部接头及连线后,测量绕组的直流电阻,三相统组的直流电阻值互差不应超过 2%。

E.包好接头及连线绝缘,配好端部垫块,并绑好端部绑绳,对全部绕组进行耐压试验。耐压合格后,对修理过的绕组及搬动过的绕组表面进行刷漆或喷漆。

(2)临时性的修理

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

发电机绕组接地故障有时是在电机运行中发现的，故障统组只是接地而无匝间短路，绕组又是单路星形连接，而且又不能把电机长久的停下来作永久性的修理。这时，也可以作临时性的修理，将接地绕组截除于电路之外，维持运行，直到电机能够停转而不影响工作时，再进行永久性的修理。如果故障绕组内部有匝间短路，则必须将故障线圈在端部割断，并分匝包好绝缘，这是为了避免故障线圈在运行中由于内部线匝短路而产生环流被烧损，继而扩大烧损同槽或相邻槽的绕组。

当绕组为多路星形连接时，则同相的各支路都要相应地切除一个线圈，否则就会引起严重的磁路不平衡，而产生环流。

当绕组为三角形连接时，则应在每相中与其故障绕组的对应处都切除一个线圈，否则三相统组就会不对称，会在三角形内产生环流而影响电机的运行。

(二)绕组短路故障的检修

1.绕组短路故障的检查

电机绕组短路故障通常有线圈匝间短路、线圈与线圈间短路、极相组间短路、相间短路。常用的检查方法有下面几种：

(1)用短路侦察器检查匝间短路

绕组内匝与匝之间的短路多是导线绝缘损坏的结果。这是常因导线交叉在槽内受压力过大所致。有时把绕组嵌入槽里，用力过大也会损坏绝缘。若让一只短路的线圈留在绕组里，由于短路的线圈电阻很小而产生很大的环流会使绕组很快发热、冒烟，短时期内就会烧毁。如果不立刻进行修理，将会造成该处绕组接地，甚至使其他的绕组也烧毁。因此，为确保电机安全运行，必须迅速地排除故障，而短路侦察器是检查绕组短路的一种最实用的方法。它是利用变压器原理来检查绕组匝间短路，见图 7－2－3。短路侦察器具有一个不闭合的铁芯磁路，上面绕有励磁绕组(相当于变压器一次侧绕组)。将已接通交流电源的短路侦察器放在定子铁芯槽口。沿着定子铁芯内圆逐槽移动。当它经过短路绕组时，这短路绕组成为变压器的二次侧绕组。如果短路侦察器绕组中串联一只电流表，见图 7－2－2(a)，此时电流表便会指示出较大的电流。若不用电流表，也可用一片厚度为 0.5mm 钢片或旧锯条安放在离短路侦察器中心一个绕组节距的地方，沿着定子铁芯内国移动短路侦察器，让薄片始终和短路侦察器保持着一个绕组节距的距离，直至将全部绕组检查完，见图 7－2－2(b)。如被测绕组短路，则钢片就会产生振动，发生响亮的噪音。钢片发生振动的两个槽，就是短路绕组的两边。如果钢片振动的槽不止两个，必须把它们全部记下来。

应该指出，对于多路绕组的发电机，必须把各支路拆开，才能用短路侦察器测试；否则绕组支路上有环流，无法分清哪个槽的绕组有短路线圈。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

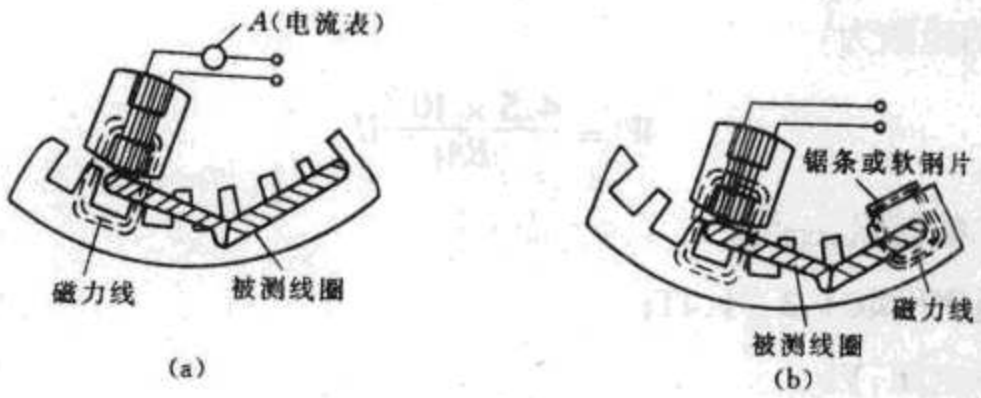


图 7-2-3 短路侦察器检查匝间短路
(a)用电流表检查;(b)用钢片检查

有时一个线圈或者整个绕组在连接处或在端部发生短路。检查这种故障的方法和检查一个线圈内匝间短路的方法一样。如果在一个统组里的线圈全部短路,在连续的几个槽上钢片都会发生振动。

短路侦察器的制作及简单计算。短路侦察器的铁芯一般常用的有Ⅱ形和H形两种,是一个有励磁绕组的开口铁芯。铁芯由0.35mm或0.5mm厚硅钢片叠成。有条件的可以按要求尺寸加工冲制,这时最好做成H形铁芯。如无条件自制铁芯,也可采用废旧的日光灯镇流器铁芯或小型电源变压器铁芯改制。其具体制作方法简述如下:用硅钢片按计算要求尺寸冲制而成,见图7-2-4。将硅钢片叠成需要的尺寸后压紧,同时用厚1mm钢板做四块护线板。将此四块护线板与压紧的硅钢片同时用铆钉铆在一起(保护线圈之用)。在铁芯中间用绝缘纸板做好线框,将导线绕在绝缘纸框内。在一块护线板上钻两个出线用小孔,线圈的两个头从中引出,最后做浸渍干燥处理。

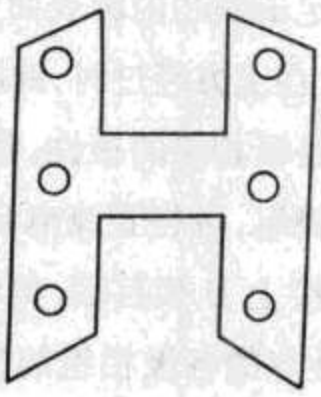


图 7-2-4 铁芯形状

短路侦察器的计算主要是根据已选定的铁芯尺寸与截面积,决定励磁绕组的匝数以及导线的截面积。

简单的计算方法如下:

①铁芯截面积为

$$A = 1.25\sqrt{P}(cm^2)$$

式中 P——短路侦察器的容量,VA,如电机为50~500kW,P取100~1000VA。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

②励磁线圈的匝数为

$$W = \frac{4.5 \times 10^{-9}}{BA}U$$

式中 A——铁芯截面积，cm^2；

B——磁通密度取 1.3～1.4T；

U——电源电压，V。

③励磁线圈的电流为

$$I = \frac{P}{U}(A)$$

④励磁线圈导线直径为

$$d = 0.9\sqrt{I}(mm)$$

根据导线规格找出相近的导线，选定

$$\frac{导线外径(mm)}{带绝缘导线外径(mm)} = \frac{d}{d'}$$

⑤根据绝缘情况，导线外径及总匝数，布置导线排列，决定窗口尺寸的大小。注意窗口宽度大约等于所测电机槽宽，如已有铁芯则要校核窗口面积，如果原定窗口面积装不下励磁绕组，则可适当加大铁芯截面积(增大铁芯厚度即可)，再重新计算。

(2)用磁针检查极相组间的短路

采用磁针试验时，可先将转子吊出，绕组内通入直流电，使之达到交流额定值的 1/3，然后用一条可以自由转动的磁针在定子铁芯内圆表面上慢慢的移动，每相绕组的各个极相组因直流电而产生南北极性，磁针在上方经过时，针的方向就会交替地改变方位。用粉笔在定于铁芯上做出正负符号标出各极相组的极性，整个绕组检查员毕后就可判定出短路的极相组。对于三相星形连接的绕组，可将直流电自引线端通入从中性点流出。各相要分别试验。首先把直流电的正端接上 U 相首端，负电端接上中性点，然后将磁针沿铁芯内圆移动，标出自 U 相首端至中性点的各极相组的极性来。再把直流电的正端改接 V 相的首端，负电端保持不动，移动磁针标出自 V 相首端至中性点的各极相组的极性。最后把直流电的正端改接 W 相的首端，标出自 W 相首端至中性点的各极相组的极性。试验结束后，每一极相组上便都留有记号，若极相组之间没有短路，则所标箭头定是南北交替。如果发电机统组系三角形连接，可拆开一头来接通直流电源，使直流电在串联的三个相里流通，如各极相组没有短路，试验结果的各箭头也应是南北相间的。

(3)电阻检查法

采用电桥或万用表测量各相绕组的直流电阻，阻值较小者，即可能是短路绕组。测量的方法是：

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

①如被测电机有6个出线头，即首先用万用电表的电阻档(R×1档)，找出每相统组的两个线端，然后用直流电桥分别测量各相绕组的直流电阻值，并将它们加以比较，其中电阻值最小的一相，便是可能存在短路故障的一相。

②如果被测电机有三个出线端，即星形连接，星点留在电机内部。可用电桥分别测出U—V、V—W、W—U间的直流电阻，见图7-2-5如果测得U—V和W—U间的直流电阻比V——W间直流电阻小，则表明第1相内部存在短路故障。如果三次测得的直流电阻都相等，则表明不存在短路故障。

③如果电机绕组是三角形连接的，有三个出线端(内部接成三角形)。则用电桥先分别测量U—V、V—W、W—U间的直流电阻值，见图7-2-6。然后加以比较，如果直流电阻值都一样，则说明存在短路故障的可能性很小。如果直流电阻不一样，则直流电阻最小

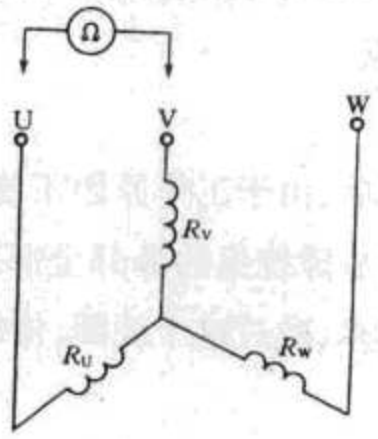


图7-2-5　星形连接时直流电阻的测量

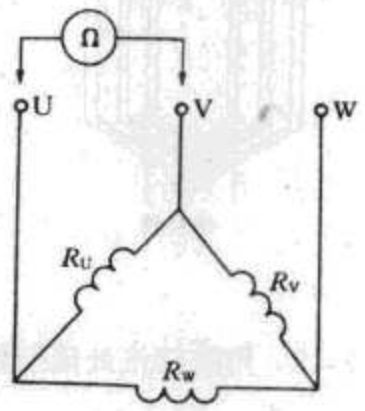


图7-2-6　三角形连接时直流电阻的测量

的一相绕组很可能存在短路故障。

(4)外部观察和探温检查

这种检查方法就是将电机空载运行几分钟，如有焦嗅味或冒烟现象，则立即停机，迅速拆开电机，吊出转子，察看冒烟部位，并用手探测绕组各部温度，如果有一个或一组线圈比其他的热，即表示该线圈存在短路故障。

(5)检查绝缘电阻

用兆欧表检查任何二相绕组间的绝缘电阻，若绝缘电阻低，则表明该二相短路。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(6)测量电压降

把有故障一相绕组的各极相组连接线的绝缘剥开，在这相绕组的出线端通入低压交流电，电压一般为50～100V。然后测量各极相组的电压降，如读数相差较大，且最小的即为短路故障的极相组。同理测出读数最小的线圈即为短路线圈，见图7-2-7。

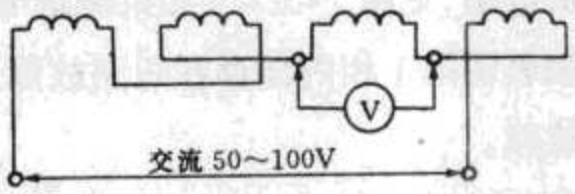


图7-2-7 用电压降法检查绕组短路故障

2.绕组短路故障的修理

用上述方法检查出短路点后，就要对其故障绕组进行修理，其方法大体上与接地线圈的修理相同，所不同的有如下几点：

(1)临时性修理

电机在运行中出现短路故障后，由于工作原因不能把电机长久的停下来作永久性的修理时，可以作临时性的修理，将故障统组的鼻部全部剪断并逐股包好绝缘，然后用导线把这个线圈的原两个线头连接起来，跳过这个线圈，使故障绕组截除于电路之外来维持运行。见图7-2-8。

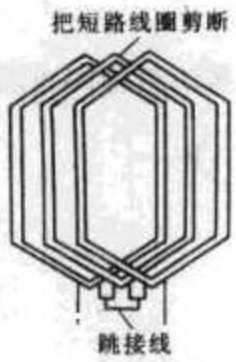


图7-2-8 用跳接法处理短路线圈

(2)永久性修理

由于发生短路时，往往使绕组烧损；烧损严重的绕组必须更换。烧损不严重的可进行局部修理，其方法如下：

①抬出故障线圈。如为上层边，只需抬出一边，在电机上进行修理；如为下层边，则需抬出一个节距的全部上层边，再取出故障线圈修理。

②扒去损坏绝缘，将搭接处的绝缘削成斜坡。

③割去导线的烧损部分，修光短路处线圈匝的铜导线，将两头挫成斜坡(其坡面长度等于铜线厚度的2倍)，各线匝间的接头点必须互相错开。配好同样尺寸的补接新铜线，用银基焊料将其焊上。焊接时，先将挫好的铜线对接口对齐。将银焊片夹在对接口中间，

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

涂上硼砂焊剂，再在铜线的两面加上碳精电极，并利用它将焊接点夹紧。然后，合上电源加热，如果电源调节恰当，经 5～10s 银焊片即熔化。为了保证焊接质量，必须待银焊液“打滚”后才可拉开电源，待银焊处变白色后再松开电极。也可采用气焊。

④修理焊接点，要将接头处挫平、挫光，接头处的尺寸不要大于导线尺寸。

⑤按原有匝间绝缘厚度及原级绝缘材料（也可用高一级好材料）包好匝间绝缘。也可以加垫条，此时垫条应比导线稍宽。

⑥用玻璃丝带或绢带将匝间扎紧，然后刷漆、烘干。烘干时可用灯泡加热烘烤。

⑦接接地故障时电机绕组局部修理工艺包好主绝缘及进行嵌线等工作。

（三）绕组断路故障的检修

导线折断或者接头处的连接不好会造成断路故障。要找到定子绕组断路故障点，总是先确定断路故障发生在哪一相。检查相绕组断路的方法比较多，也比较简单，同时都可在电机不解体的情况下进行。下面先叙述对三种不同引出线端检查各相绕组是否断路的常用方法。

1. 星形连接的中心线不拆开，但引出机外

星形连接三相绕组的中心线引出机座外时，检查绕组断路的方法，见图 7－2－9。用万用表测量欧姆挡，一测量端固定在中心线上，另一端分别搭在 U、V、W 各相线端上。图中 V 相断线，所以 VN 间不通。也可以用前面所讲的干电池和灯泡串联装置来检查，见图 7－2－10。

图 7－2－9　用万用表检测中心线向外引出的星形绕组断路故障

图 7－2－10　用灯泡检测中心线向外伸出的星形绕组断路故障

2. 星形连接的中心点在机内不外引

星形连接三相绕组的中心点在机内不外引，检查相绕组断路的方法，见图 7－2－11。图中 V 相断路，用万用表测量 UV 两端时断路，测 UW 两端通路，再测 VW 两端又断路，这就表明 V 相断路。同样，也可以用灯泡进行检查，见图 7－2－12。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

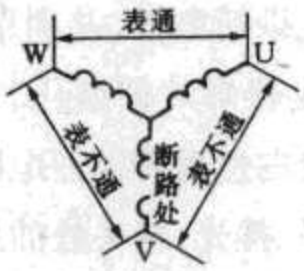


图 7-2-11 万用表检查绕组断路

3.三角形连接仅有外引出的三个线端

三相绕组接成三角形连接,仅向外引出三个线端,检查相绕组断路的方法有两种:一是不拆开线头用电桥测量相间电阻,见图 7-2-13 若绕组是一路串联,设原每相统组的电阻为 r,测量电阻为 R,若绕组无断路故障,则 $R=\frac{2}{3}r$;如果被测相断路(如 UV 相),则 R = 2r;若另两相中仍有一相断路(如 UW 相),则测得 UV 间、UW 间为无穷大,VW 间为 R = r。二是拆开其中任何一个接线头,见图 7-2-14。把 W1V2 接点拆开来检查断路相时,先用万用表测量 W1 和 V2 两个端子,如果通路就表明该电机三相绕组无断路现象。如果发现断路,再分别测量 V2 与 V1U2 点、V1U2 与 U1W2 点、U1W2 与 W1 点,这样就可以查定哪一相有断路故障。也可以用校验灯检查。

图 7-2-12 校验灯检查绕组断器

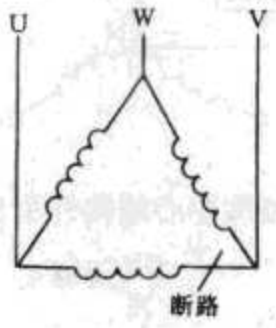


图 7-2-13 用电阻法检测三角形绕组断路故障

故障相查出后,可用通路检查法进一步确定断路故障点。在万用表欧姆挡的端子上接出两根引线,为了不损伤绕组的绝缘,要在一根引线的头上焊一枚插针。把万用表的一根引线与故障相绕组线端相连,带插针的引线从故障相绕组一端向与历用表引线相连的另一端分别刺入各极相组的连线上,直至表针指为零(即通路时为止),则通路前面的极相组为断路点。仿此法检查各个绕组,直至把断路点找出。

由于大中容量的发电机绕组大多数是多根导线并绕和多支路并联,如是断掉若干根

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

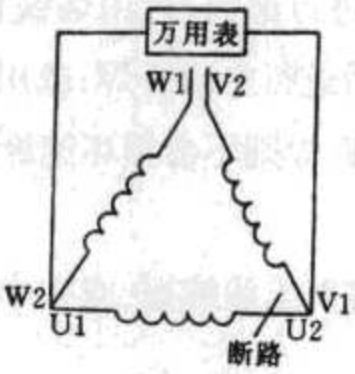


图 7-2-14 用万用表检测三角形绕组断路故障

或断开一路时，检查就比较复杂了。通常采用"以下两种方法检查。

(1)三相电流平衡法。星形连接的发电机三相绕组并联后，通入低电压大电流(一般可用单相交流弧焊机)。如果三相电流值相差大于5%时，电流小的一相为断路相，见图7-2-15。然后将断路相的并联支路拆开来逐路检查，测量表明电阻很大的即为断路相里的断路支路。处于三角形连接的发电机，则先将定子绕组的一个接点拆开，再逐相通入低电压大电流的交流电以测量其电流，其中电流小的一相即为断路相，见图7-2-16。然后将断路相的并联支路拆开来逐路检查，找出断路的支路。

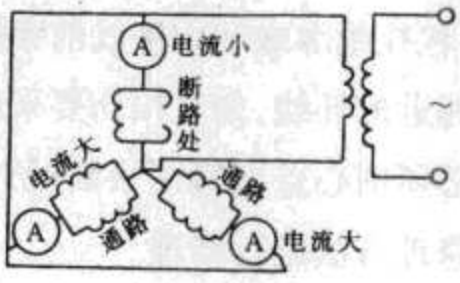


图 7-2-15 用电流平衡法检查多支路并联星形连接绕组断路图

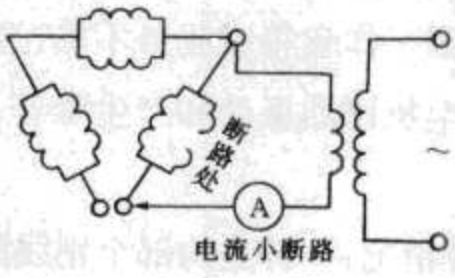


图 7-2-16 用电流平衡法检查多支路并联三角形连接绕组断路图

(2)电阻法。用双臂电桥测量三相绕组的电阻，如三相绕组的电阻值相差大于5%时，电阻较大的一相即为断路相。

绕组断路，多因焊接不良或机械损伤所造成，也有因接地、短路烧断导线造成断路的。因此，绕组断路的位置多发生在绕组端部，线圈接头及绕组与引出线的连接处。

绕组断路的修理方法如下：

1.绕组焊接不良的修理

绕组焊接不良，可拆去脱焊处包扎的绝缘物，脱开接头，仔细清理，去除接头上的油污

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

或其他焊渣。如原是锡焊的，则先进行搪锡，再用烙铁重新焊接。如原是银铜焊，则在接头之间夹放 BN——15 银焊片，然后进行电阻钎焊；或用“料 303”作焊料，进行气焊。但气焊容易损坏相邻的绕组绝缘，电阻钎焊则不会损坏绝缘。

2.引出线断路的修理方法

引出线断路，可重新换线，或将引出线缩短，或在中间加接一段引线，重新焊接接头。

3.槽内线圈断线的修理方法

如果是槽内线圈断线，则打出槽楔，翻出断路线圈，然后进行焊接，并包好绝缘，再嵌回原线槽。也可以采用更换线圈的方法更换新线圈。

4.绕组端部断路的修理方法

绕组端部断路，可将断的导线重新连接、焊好。包好绝缘。具体方法如下：

(1)绕组端部有一根断线时，可采用吹风机对断线处加热，线圈软化后把断头端挑起来，刮掉断头端的绝缘层。用 0.5mm 左右厚的紫铜皮，弯在导线上制成与导线直径(规格)相应的套管，套管的长度约为导线直径的 8 倍。然后将两个线端插入套管内，并顶接在套管的中间位置，进行焊接。如果线短不能顶接，要再剪一段导线去掉绝缘层顶在两接头端的中间并在套管内，焊接后包扎绝缘或利用接线前穿好的绝缘套管移在接线位置上，作为接线后的绝缘。还要检查邻近的导线，如有损伤要采用接线或包扎绝缘处理。

(2)绕组端部有多根断线，必须细心查出哪两根断线对应相接，否则接线后将自行短路。然后再采用上述单根断线修理方法进行修理。

(四)绕组嵌反与接错时的检修

在嵌线或接线过程中，有时因工作疏忽或业务不熟，造成绕组嵌反或接错，使电机的磁动势和电抗发生不平衡，引起电机剧烈振动和产生噪音，同时使绕组过热，甚至会使电机烧毁。

绕组嵌反与接错归结为两种情况：一种是内部个别线圈或极相组嵌反或接错；另一种是绕组外部接线错误。

1.内部个别线圈或极相组嵌反或接错的检查方法

(1)线圈反接

对于线圈的嵌反或反接，可用一磁针和低压直流电源(一般用蓄电池)来检查。把直流电源加在一相绕组上。调节电压，使送入绕组内的电流约为额定电流的$\frac{1}{4}$ ~ $\frac{1}{6}$。如果是星形连接的三相绕组，电源应加在一相绕组的始端和中性点之间；如果是三角形连接的三相统组，必须把各相绕组的接头拆开，分别检查各相绕组。

在定子内圆放一枚自由转动的磁针，慢慢地在定子铁芯内圆移动，如果绕组的接法是

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

正确的，磁针从一极相组移向下一极相组时，将依次掉换一次方向。如果有一只线圈接反，反接的线圈将生成与其余线圈相反的磁场，这一极相组内部分磁性将被抵销，磁针对于这一极相组就不会肯定地指出方向。假定一极相组里只有两只线圈，如有一只线圈嵌反或接反，那么这极相组的磁性将完全被抵销，磁针不会转动，也就没有指示。

(2)线圈组反接

当一线圈组全部反接时，这一组内电流的方向都是反的。检查这种故障的方法与检查线圈反接的方法是一样的。用直流电通入绕组，当磁针经过各线圈组时，各线圈组应交替地指向 N、S、N、S 等极性。如果有一组反接，便有三个连续的线圈组指示相同的极性，改正反接线圈或反接线圈组的方法就是先校核一下绕组的连接处，找出错误的地方，把它重新改接过来。

(3)分组错误

由于工作的粗心，有时会发生计数错误，如有一台三相四极四十八槽的发电机，每一极相组的线圈数应是 $48 \div (3 \times 4) = 4$ 枚，倘有一组误接成 3 枚或 5 枚，就会发生分组错误。有并联支路的电机还会出现每一支路串联的极相组不等的错误，检查这类错误最好的办法是仔细地查数。

2.三相绕组的头尾接反的检查

(1)磁针检查法

在一个三相绕组里，有时因一相的始端线头取错或者在按“△”或“Y”连接时，把其中一相对于另外两相的关系弄错，于是这一相便整个的接反。如果绕组是三角形连接把三角形的任意两相的接点拆开后，在串联的三相绕组里通入直流电，再在定子铁芯内圆放一磁针，沿着定子铁芯内圆慢慢地移动磁针，检查每一线圈组的极性。

若绕组接线正确，磁针沿着定子铁芯内圆移动一周，磁针反向的次数应为绕组极数的三倍。

在检查星形连接的绕组时，把三个始端线头接在一起再通入直流电，同样用磁针检查，如果接法正确，结果应和三角形连接的结果一样。也就是说，磁针环绕一周时，指针反向的次数应为绕组极数的三倍。

(2)灯泡检查法

首先应分清哪两个线头属于同一相绕组，见图 7－2－17，用两节干电池(也可用 36V 低压交流电)和一只灯泡串联，一端和电机绕组的任意一个出线端相连接，另一端分别与其他出线端相连接。如灯亮，表示这两个出线端属于同一相。用同样的方法分清其他两相的出线端。然后，将任意两相绕组和灯泡三者串联，将第三相的一个出线端接在电池的负极上，用另一个出线端去接触电池的正极，如灯亮，表示与灯泡相连的两个出线端，一个是第一相的线头，另一个是第二相的线尾，见图 7－2－18。如灯不亮，则表示与灯泡相连

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

的两个出线端分别是两相的线头(或都是线尾),见图 7-2-19。接着将已经分清头尾的

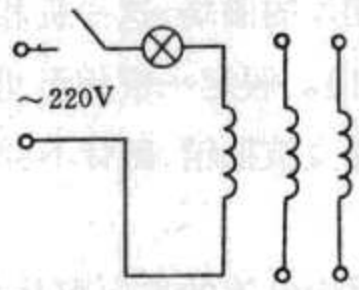


图 7-2-17 同相线端的鉴别

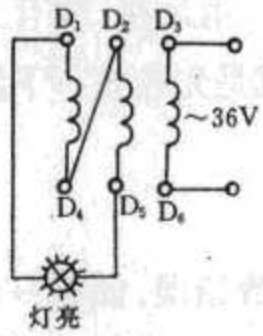


图 7-2-18 用单相电源检查三相统组头尾(接对)

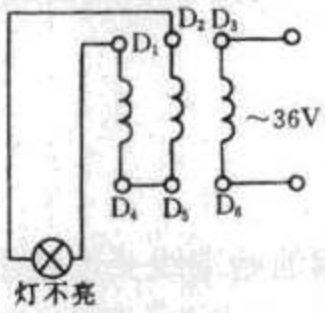


图 7-2-19 用单相电源检查三相绕组头尾(接错)

一相与第三相串联,再用同样的方法判断第三相的头尾。上述方法称为绕组串联法,它是利用电磁感应原理来判断。当第三相绕组突然接通电源时,绕组内部会产生感应电势,同时在另外两相绕组中也会产生感应电势。当这两相绕组头尾相连时,接到灯泡上的电压是这两相绕组中感应的电势之和,所以灯才会亮。反之,这两相绕组头头相连(或尾尾相连),则接到灯泡上的电压是这两相统组中感应电势之差,正好抵销,所以灯才不亮,应该对调后重试。由于感应电势是在电源接通的一瞬间产生的,因此观察时要特别注意。如果电机绕组的阻抗较大或灯泡与电池电压配合不当,以致灯泡的亮度不够而不易观察时,可用 4000Ω 左右的耳机或扬声器的响声来代替灯光。

(3)万用表检查法

见图 7-3-20,用万用表(毫安挡)进行测试,此时转动电机转子如果万用表指针不动,则说明绕组头尾连接是正确的;如万用表指针转动了,说明绕组头尾连接是错误的。见图 7-2-21 这时需分别轮流对调三相绕组的头尾再试,只要某次万用表指针而动,这时并联在一起的就分别是每相绕组的头和尾。这一方法是利用转子中剩磁在定子三相绕组内感应出电动势,才能使万用表指示出电流读数。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

见图 7－2－22，当接通开关瞬间万用表（毫安挡）指针摆向大于零的一边，则电池正极所接线头与万用表负端所接线头同为头（或尾）；如指针反向摆动，则电池正极所接线头与万用表正端所接线头同为头（或尾）。同样，再将电池分别接到另外两相的两个线头试验，就可确定出各相的头与尾。

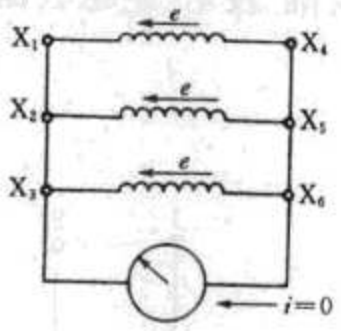


图 7－2－20　用万用表检查绕组的头尾指针不动绕组头尾连接正确

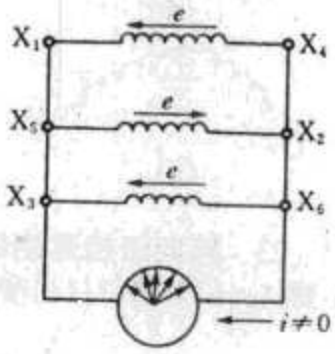


图 7－2－21　用万用表检查绕组的头尾指针摆动绕组头尾连接不对

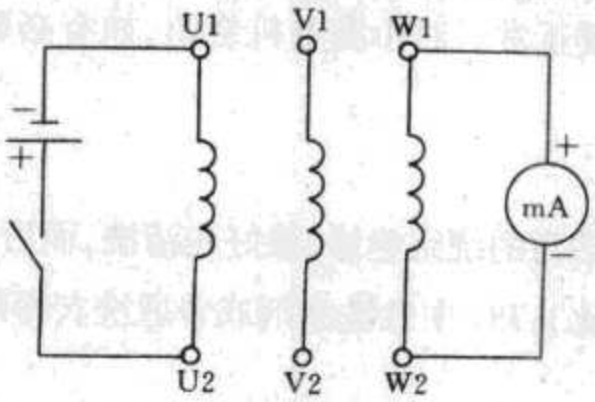


图 7－2－22　用万用表检查确定绕组头尾方法

（4）转向法

对小型电机不用万用表也可判定三相绕组的头尾。就是每相绕组任意取一个端头接在一起，并将这点接地（最好接到电源的零线上）。再用电源两根 380V 相线分别顺序接在电池的同个出线端上，见图 7－2－23 先看电机的旋转方向，见图 7－2－23(a)，然后改接，见图 7－2－23(b)，最后再改接，见图 7－2－23(c)。如果三次接上去，电机转向是一样的，则说明三相头尾接线正确；如果三次接上去电机有两次反转，则说明参与过这两次反转的那相绕组的头尾端接反了，如第二次 V、W 相，第三次 W、U 相都是反转，W 相有两次参与，说明 W 相头尾接反，将 W 相两个端头对调即可。注意：此方法一定要顺序改接，即按 U、V；U、W；W、U 顺序改接。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(五)绕组绝缘不良的维修

绕组绝缘不良,一般是指绕组绝缘电阻在0.5MΩ以下。

1.绕组绝缘不良的原围

绕相绝缘不良的原因,一般是受潮、浸水、绝缘表面和缝隙中有碳粉、油污、积尘以及受化学气体腐蚀等。

2.绕组绝缘不良的处理方法

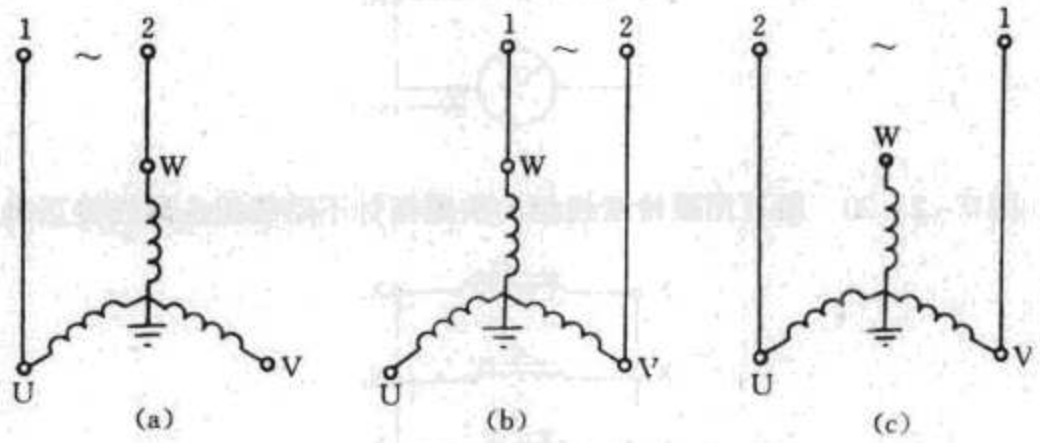


图7-2-23 转向法检查绕组头尾
(a)步骤1;(b)步骤2;(c)步骤3

(1)清扫电机

对绝缘受潮的电机,首先应清扫,并用压缩空气吹去碳粉和积尘,然后经烘干驱除绝缘中的潮气,使绝缘电阻恢复正常。对小型电机绕组,如有必要可进行浸漆或浇漆,然后烘干。

(2)清洗电机

对于被油泥、尘垢严重玷污的绕组绝缘,最好先清洗,而后再经烘干浸漆处理。

①清洗液配方(按质量比):781中性洗涤剂或普通洗衣粉约2%,自来水约98%,用蒸气加热至80~100℃;

②用压缩空气吹净绝缘表面灰尘,然后用清洗液进行冲洗。要求把绝缘隙中的尘垢和油泥彻底清洗干净,一直露出绝缘本色为止。再用热水冲洗,去掉残余的洗涤剂,再将绕组烘干,直到绝缘电阻稳定为止,待冷到60~80℃,浸1032漆一次,再进行烘干。

(六)定子线圈松动下沉的检修

1.定子线圈松动的修理

(1)定子线圈松动的原因

线圈槽部的紧固依靠槽楔,但是由于线圈、槽楔及槽内垫条等长期处在高温运行中,逐渐收缩,造成线圈松动。有些发电机因组装工艺和质量存在缺陷,经过长时间的运行,由于振动,缺陷越来越扩大,导致线圈松动。线圈松动会在振动下使主绝缘磨损,从而会

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

使线圈损坏引起短路或接地等故障。

(2)线圈松动的修理方法

发电机定子槽楔松动，先将槽楔打出，然后根据槽楔松动情况，在槽楔下增加垫条，将槽楔打紧。对20世纪70年代以前出厂的机组如槽楔材料为木材或酚醛层压纸板，则应更新，尽可能改用酚醛层压布板或环氧酚醛层压玻璃布板。对线负载较大的机组或大容量机组，在修理线圈松动时，最好改为楔形槽楔，见图7-2-24，它是由两块楔形构成，可以打得很紧，使线圈在槽内紧固得更好。

(3)线圈松动的防止措施

为防止线圈松动，目前主要采取以下措施：①采用绝缘体弹性波纹板垫条，借波纹板垫条的反弹力抵销线圈、槽楔的收缩；②采用浸有环氧树脂胶的适形垫条将线圈、槽楔等与定子铁芯粘结在一起；③采用弹性硅橡胶垫条，依靠垫条的弹性防止线圈的松动。

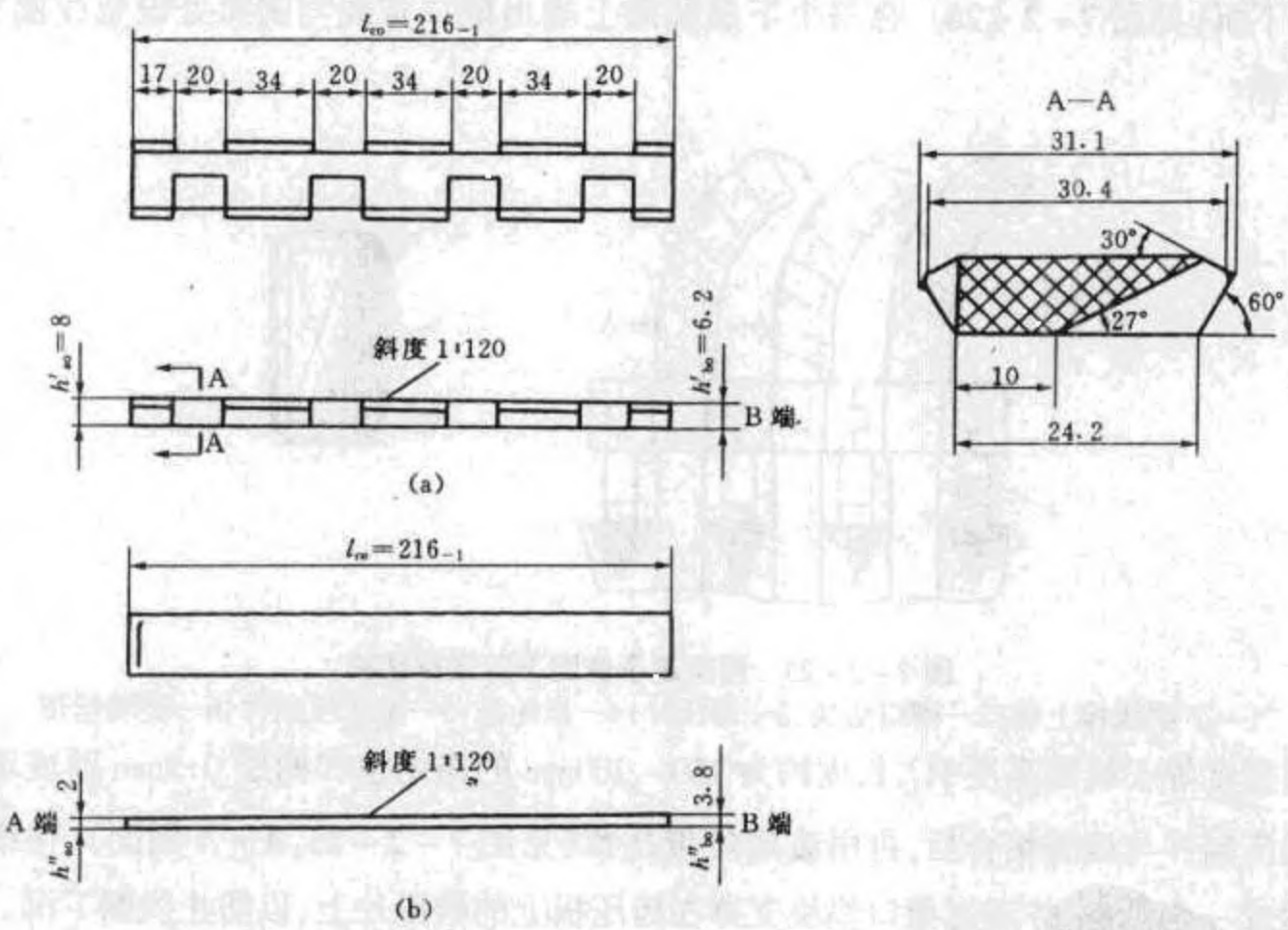


图7-2-24　斜槽楔
(a)上楔；(b)下楔

(4)线圈松动修理时注意事项

①打进槽楔前，槽内应用干燥的压缩空气吹净，不可在槽内留有垫条碎屑等杂物。

②打出与打进槽楔时，应特别注意防止损坏线圈。

③修理槽楔时，先用比槽宽稍窄的层压板垫头顶住槽楔，然后再用木锤将槽楔打进或打出。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

④在槽楔下加垫条时，一定注意使线圈各处压紧程度一致，这样才能保证槽楔打进后线圈紧固。

2.定子线圈下沉的修理

对于立式水轮发电机，如果线圈槽部和端部固定不牢，运行时在电磁振动的反复作用和线圈自重所产生的轴向力的影响下，会逐渐下沉。

防止线圈下沉的主要措施，一是线圈在槽内的紧固，二是线圈端部固定好。线圈端部固定结构包括端箍(端箍及支架)、槽口垫块、斜边垫块、端部绑扎等。对定子绕组端部垫块松动的修理，可先将垫块扎带切断，然后取下垫块检查。如果发现原块已老化严重或损坏，则应配制新的垫块(最好用环氧酚醛层压玻璃布板或酚醛层压布板)来更换。如果原垫块还能继续使用，则可先用适当厚度的垫片涂上绝缘漆后，与原垫块一起垫入，然后用无碱玻璃丝带扎好即可。线圈端部的固定，每一道工序的好坏直接影响到线圈的绝缘和线圈的下沉，见图 7－2－25。在每个下层线圈上端出槽口直线与圆弧处设置线圈支撑。线圈支撑

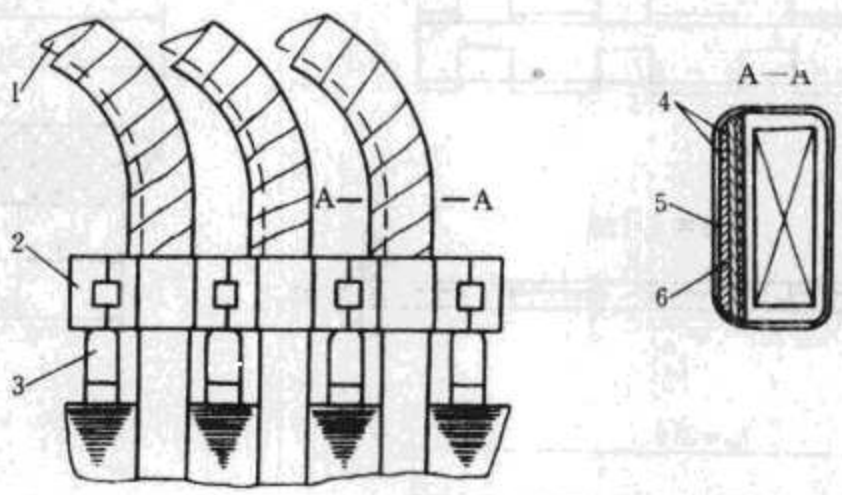


图 7－2－25 预防定子线圈下沉支撑结构

1—下层线棒上端；2—槽口垫块；3—齿压片；4—涤纶毡；5—绝缘压制件；6—玻璃丝带

用宽度等于线圈高度 H_d，长度约为 150～200mm 的涤纶毡和两层 0.5mm 厚玻璃布板或绝缘压制件与线圈粘合后，再用玻璃丝带扎紧(见图 7－2－25，A—A 剖面)，在线圈圆弧处构成一个凸台，并通过槽口垫块支撑在齿压板上的齿压片上，以防止线圈下沉。

二、定子铁芯的局部检修

(一)定子铁芯松动及拉紧螺杆应力检查

定子检修时，首先应检查定位筋是否松动，定位筋与托板，托板与机座环板结合处有无开焊现象。由于定位筋的尺寸和位置是保证定子铁芯圆度的首要条件，所以发现定位筋松动或位移，应立即恢复原位补焊固定。其次检查铁芯段间的“工”字形通风槽钢和铁

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

芯是否松动。定子铁芯拉紧螺杆应力值是否达到满足铁芯紧度的规定要求。如果发现铁芯松动或进行更换压指等项目时，必须对铁芯进行压紧处理，因为铁芯松动会产生较大的电磁振动和噪音，同时将磨损定子绕组的绝缘，危害性是极大的。压紧铁芯的方法较多，常用有：①由手工在扳手上套上长杆紧固螺母；②用重锤撞击扳手紧固螺母；③用风动扳手紧固螺母；④用油压装置紧固拉紧螺杆等。为了掌握压紧程度，常用的方法有：①采用力矩扳手；②用紧度刀片检查；③在拉紧螺栓上贴应变片并用引线引至应变仪上进行测量。采用应变仪进行测量时，事先通过 $\sigma = 120\text{MPa}$，求得应变量 ε 值，因为应力与应变成正比关系，即

$$\sigma = E\varepsilon$$

式中　σ——应力，MPa；

E——材料弹性模量，$E = 2.1 \times 10^5\text{MPa}$；

ε——应变量。

通过测得应变量 ε 值的大小可求得应力 σ 的大小，从而就可以知道铁芯的压紧程度。当拧紧螺母时，一边检查 ε 值，一边注意使用扳手的长度和用力的大小，当 ε 合格时，记下扳手长度和用力大小，以后每个螺母均以这个力矩拧紧便可。最好使用指针式扭力扳手，便于使每个拉紧螺杆受力一致，铁芯压紧均匀。由于齿压板上布置的铜环引线影响了紧固螺母工作的进行，因此使用何种方法紧固螺母应根据具体情况选择。定子铁芯采用 0.98MPa 的压力装压已足以防止铁芯松动。但是考虑到压装时还有摩擦力需克服、运行时的绝缘老化收缩使片间压力减小等情况，在实际装压时，将压力提高到 1.176～1.47MPa。随着铁芯的高度增长。有的最终压力提高到 1.96MPa。但也不希望压力过高，因为压力过高会使绝缘和冲片受到损伤。

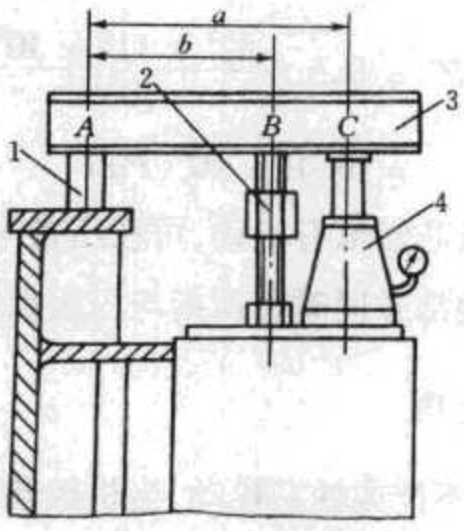


图 7－2－26　用油压装置紧固拉紧螺杆

1—垫块；2—双头螺柱；3—工字梁；4—油压千斤顶

如果条件允许应采用液压装置紧固拉紧螺杆。该装置把高压液压泵和许多液压千斤顶用管路连通起来组成一个整体，利用每一个液压千斤顶去拉一个压紧螺杆，见图 7－2

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

-26。

工字梁一端支在垫块上，垫块放在机座环上，工字梁的中部通过双头连接螺母拧在拉紧螺杆上，工字梁的另一端放在千斤顶柱上。液压泵起动后，柱塞 C 上升，以 A 为支点，B 点也上升，拉长拉紧螺杆，也压紧了定子铁芯叠片。假设拉紧螺杆应力按 118MPa 计算，则拉伸力 P 为

$$P = \frac{\pi}{4} d^2 [\sigma] \times 10^{-6}$$

式中 P——拉力，N；

d——螺纹内径，mm；

$[\sigma]$——许用拉应力，118×10^6 Pa。

由于杠杆传动，换算到千斤顶柱塞上的力 P′为

$$P' = \frac{a}{b} p$$

换算到油泵压力表读数为

$$P'' = \frac{P'}{\pi/4 \cdot D^2} = \frac{b}{a} \cdot \frac{d^2}{D^2} [\sigma]$$

式中 D——千斤顶活塞直径，mm。

液压泵起动后，在压力表达到上式计算值时，表明螺杆拉应力已达到许用值 118MPa。

例 某水轮发电机定子拉紧螺杆 d = 42mm，千斤顶活塞直径 D = 10cm，垫块至拉紧螺杆距离 b 与垫块至千斤顶柱头距离 a 的比为 $\frac{a}{b} = 0.5$，设满足该定子铁芯紧度要求的拉紧螺杆应力为 118MPa，求油压千斤顶压力表为何值时表明拉紧螺杆应力符合要求。

解 将数据代入公式得

$$P'' = 0.5 \times \frac{42^2 \times 118 \times 10^6}{100^2}$$

$$= 10.41 \times 10^6 (Pa)$$

紧固拉紧螺杆后，如个别铁芯端部有松动，可在压指与铁芯之间打进一定厚度的楔形铁垫，楔紧后将其点焊于压指端部并同时将压指与压板点焊牢。

(二)定子冷态振动的处理

有些机组团定子铁芯合缝不严或铁芯松动，当机组起动、投入励磁到空载运行在交变磁场的作用下而引起振动。这种振动的轴向分量极小，而沿着径向和切向的分量却较大。其振幅随温度的变化而变化，如某机组在室温 30℃时起动(冷态)的切向振幅双向值为 0.11mm，人站在发电机上或发电机附近地板上有发麻的感觉。随着带负荷引起绕组、铁芯温度上升，铁芯温度上升至 60℃时双向振幅骤降至 0.01mm。这种现象与合缝间隙的变

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

化规律一致，因此称为冷态振动。为消除冷态振动，须在铁芯合缝处加垫来消除间隙和增加刚度(如定子铁芯在工地叠装，则不用加垫)。处理方法如下：

(1)加垫前，测出定子铁芯合缝及机座合缝的间隙。

(2)以前一般采用两面涂有匀薄耐油绝缘漆的青壳纸作垫，现在大多数采用浸胶涤纶毛毡作垫。考虑其压缩量，垫的厚度可比间隙大0.3~0.4mm。

(3)先拔出定子基础销钉，再松开定子对缝的组合螺栓，后松开定子基础螺栓。

(4)加垫时为防止铁芯圆度变化，应先用铁楔打开直径方向的两个合缝加入垫，再紧上组合螺母，并打入基础销钉；再在另一直径方向重复上述动作，最后紧固基础螺栓，并再一次紧固合缝螺母。

(5)测量定子合缝间隙，除局部外，以0.05mm厚塞尺塞不进为合格。如有可能，挂钢琴线检查定子圆度是否超差，如有则应进行处理。

(三)定子调圆

对定子铁芯的圆度，安装时虽有严格的要求，但是机组经多年运行后，由于运行中的电磁力、机械力、振动等原因，使定子可能产生变形。因此，检修时应对定子圆度进行重新测量。实际上，目前不少电厂的发电机圆度均不理想，但运转起来，电流的波形、磁拉力、振动等方面情况尚好，故不一定要处理定子圆度。但当定子不圆度很大，对安全运行造成影响时，则必须进行处理。处理的办法是：①当定子不圆度很大，但是可以通过调整的方法，使定子国度达到规定要求；②当定子不圆度很大，而且不能通过调整的方法使定子圆度达到规定要求，因此必须重新叠装定子扇形冲片。现将整体定子的调圆方法介绍如下：

1.转子不吊出定子时的定子调圆

如果吊出转于有困难，同时转子与转轮连在一起并按水轮机转轮室找正中心。则定子的圆度和中心均要根据转子来调整。

调整方法是测定定、转子间的空气间隙，使各空气间隙实测值与实测平均间隙之差不大于实测平均间隙的±10%，即

$$\frac{\delta_i - \bar{\delta}}{\bar{\delta}} \leqslant \pm 10\%$$

式中 δ_i——实测单个空气间隙最大(或最小)值，mm；

$\bar{\delta}$——实测平均空气间隙，mm。

测空气间隙的部位，应该选在定子铁芯内圆与转子磁极外圆上、下端的中部，见图7-2-27。

测量工具可用特制的斜形塞块，见图7-2-28。塞块的斜率和长度应满足测量范围的要求。测量时先在塞块斜面匀薄地涂一层白铅油或红丹(木塞块可涂粉笔灰)，将斜面

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

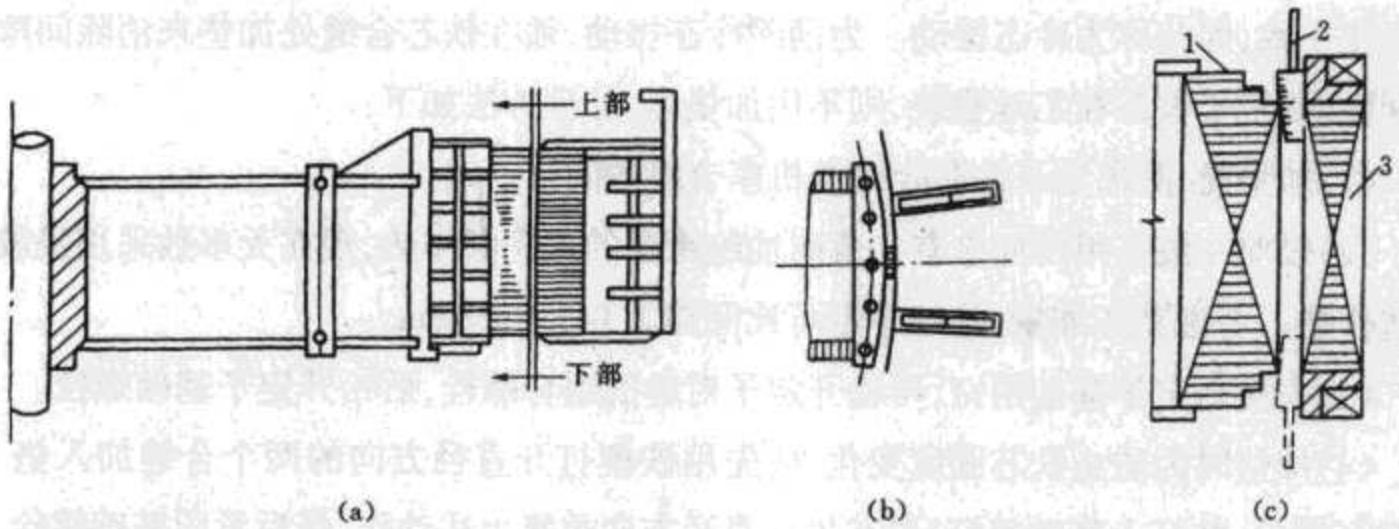


图 7-2-27 空气间隙测量部位
(a)测量部位方向 1;(b)测量部位方向 2;(c)测量部位方向 3
1—定子铁芯;2—测量工具;3—转子磁极

对着定子铁芯表面插入磁极和定子铁芯之间(由于磁极端部有较为平整的磁极压板极靴,故塞块平面应贴靠磁极,斜面卡在铁芯端部棱齿上),当插不动时,拔出塞块。如塞块斜面一侧有刻度,从卡迹处就可看出间隙大小;如无刻度则要用游标卡尺或外径千分尺量取痕迹处的厚度(即空气间隙值)。可用同样的方法和同样的插力逐次测得上下部全部间隙值。如磁极数较多时,可每隔一个磁极或几个磁极测一点间隙。有条件时,可用气隙塞规测量。见图 7-2-29。当空气间隙超出要求时应进行调整。

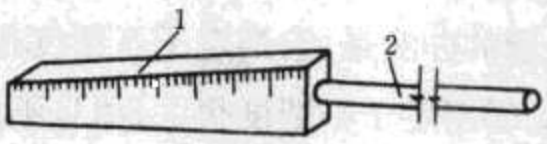


图 7-2-28 斜形塞块
1—塞块斜面;2—手柄

调整定子圆度应和中心偏差,定子铁芯的局部倾斜、高程、水平的调整同时结合考虑。倾斜调整可结合高程进行,圆度和中心偏差调整的方法是:松开定子机座与基础板的把合螺栓,将销钉拔出,利用千斤顶强迫机座受力变形或移动。千斤顶撑在定子机座和风洞墙壁之间。为了使墙壁能承受较大的压力,在其受力的部位放置面积较大的垫板或预埋基础板,见图 7-2-30,或抗弯强度较大的型钢,见图 7-2-31 调整时,根据定子椭圆度及中心偏差调整值和方位,迫使定子局部向中心移动。在需要重点调整的地方,可适当多放些千斤顶并多顶一些。为避免可能产生其他方向的中心位移(位移可用千分表监视),它的两翼和对称方向,也需放置适当千斤顶迎住(稍松一些)。在用千斤顶调整时,应考虑到定子结构的强度和刚度,以免造成定子局部变形和焊缝裂开及损伤定子线圈绝缘。

定子圆度和中心的调整,应尽量作到精确。定子空气间隙调整合格后,应将基础螺母拧紧,并检查定子环板与基础板接触情况,最后检查销孔情况,如需修整,应进行处理并重新配制销钉打入点焊。为防止热变形应力,定子连接螺栓宜用止动垫片折角的方法锁锭。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

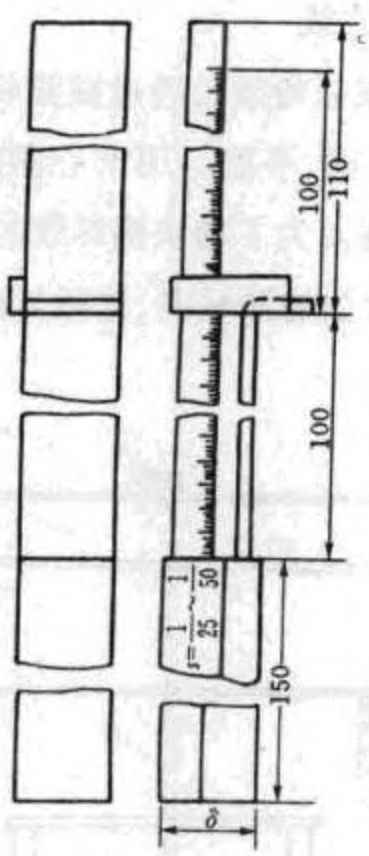


图 7－2－29　气隙塞规

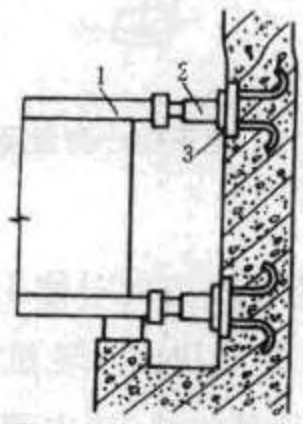


图 7－2－30　在墙壁受力部位预埋基础板
1—定子机座;2—千斤顶;3—预埋基础板

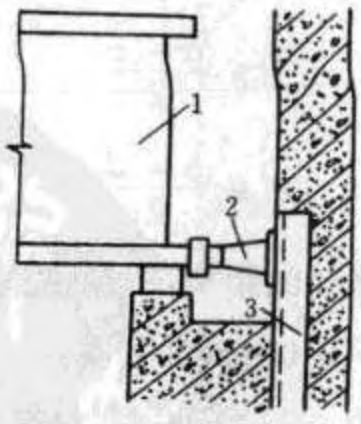


图 7－2－31　在墙壁受力部位预埋型钢
1—定子机座;2—千斤顶;3—型钢

2.转子吊出定子时的定子调圆

大修时,发电机转子与水轮机转轮已吊出,定子铁芯圆度与中心偏差调整可在机坑内与水平、垂直等一起测量调整。具体调整方法如下:

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(1)以座环中心为基准悬挂中心线

见图 7-2-32,制作一横梁(或三角架),通过横梁将求心器支承在定子的上空,求心器结构,见图 7-2-33。横梁应牢固、平稳。用求心器调整悬挂的中心钢琴锤线。钢琴线下挂一应能使钢琴线平直的重锤。为了加快钢琴线的游定,可将重锤四周加轮叶,见图 7-2-34。并将重锤浸在盛有粘性油的油桶内,重锤与油桶内壁应留有足够的间隙,以免钢琴线中心调整时与油桶壁相碰。

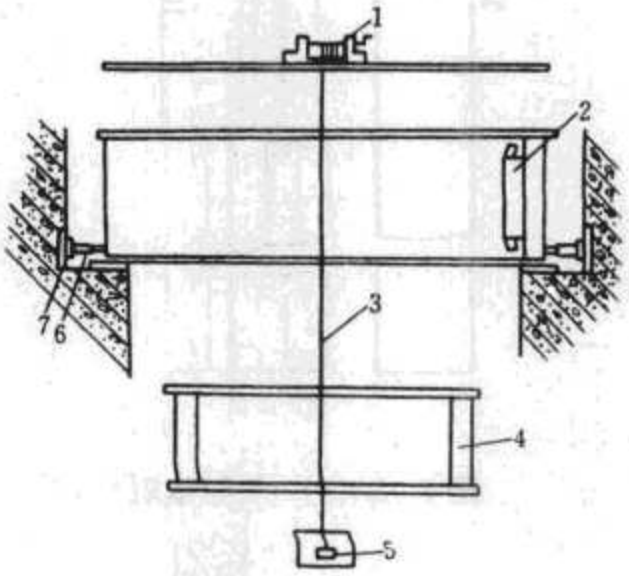


图 7-2-32 定子中心测量及其调整

1—求心器;2—定子铁芯;3—钢琴线;4—座环;
5—重锤;6—千斤顶;7—预埋基础板

先用钢卷尺量出水轮机座环内壁 X、Y 方向对称 4 点至钢琴线的距离,再调整求心器使对称两点半径误差在 1mm 以内,以初步找出水轮机座环中心,然后在带有千分尺测头的测杆上接上测中心的线路,用钢琴线耳机法(或电流表法)测出 4 个测点到钢琴线的距离 a、b、c、d,见图 7-2-35。如果悬吊的钢琴线不在中心上,则根据下列公式求出求心器移动的距离,即

$$A = \frac{a - c}{2}$$

$$B = \frac{b - d}{2}$$

A、B 便是求心器向 X、Y 方向移动的距离。待重锤稳定后,重新测量 a、b、c、d4 个数值,直至 a—c 和 b—d 两值之差小于 0.05mm 为合格。

中心线确定以后,定子圆度和中心调整即以线为准。在以后的调整过程中,求心器和钢琴线不得再有丝毫移动,否则就需重新检查校正中心线。

(2)确定定子铁芯圆度测点

定子整体在每个测量断面上(一般为上、中,下三个断面)所测取的点不应少于 8 个。分瓣定子因合缝或端部易发生变形,因此要求在这些部位上标定测点。另外在定子铁芯

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

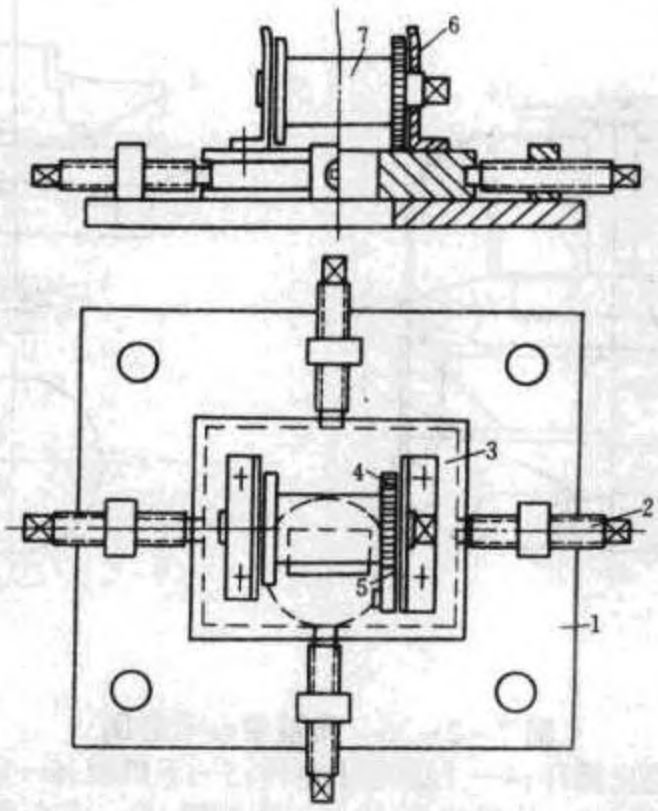


图 7－2－33　求心器

1—底板;2—中心调节螺钉;3—中心滑板;4—棘轮;5—棘轮爪;6—支承;7—钢琴线卷筒

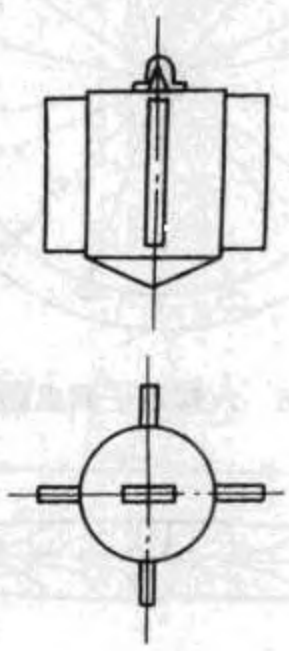


图 7－2－34　重　锤

内径上下两个测量断面上,每瓣要标定 3～5 个测点,见图 7－2－36。

(3)测量定子的圆度

用钢琴线耳机法按各测点依次测量中心线至定子铁芯内壁的距离。测量工具都采用大型内径千分尺杆,见图 7－2－37。由于测杆很长,所以它应用刚性好且轻便的材料制成,以利于手持操作。工地通常用杉木、竹竿或铝合金管制成。在测杆的活动端需装上一个普通千分尺头,以便调节及读出相对数值。条件允许的话,采用测圆中心柱进行测圆,测量起来方便可靠。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

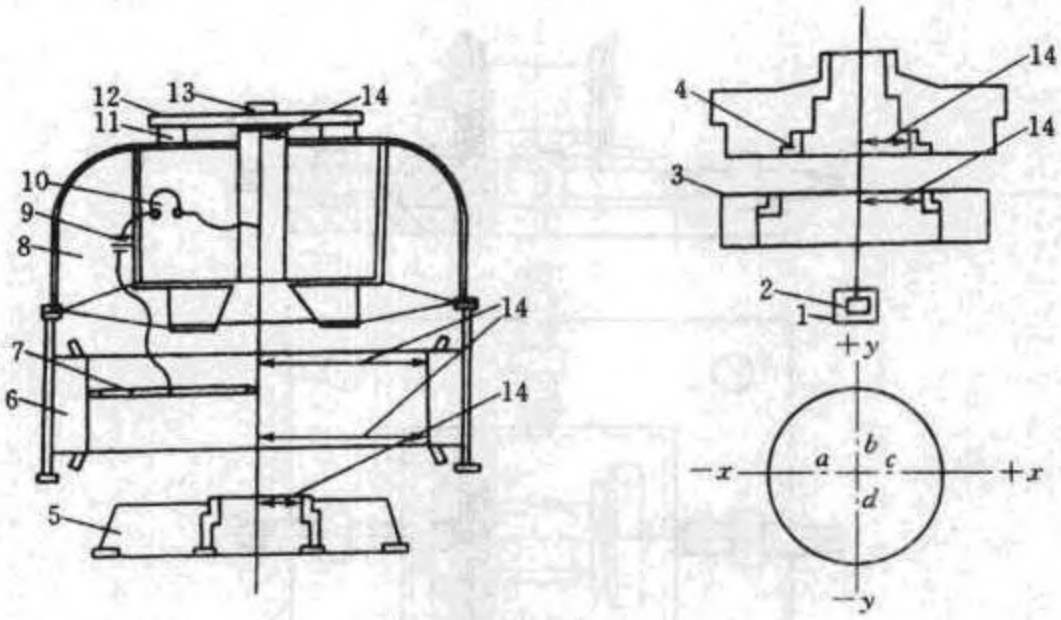


图 7-2-35 调整中心示意图

1—油桶;2—重锤;3—下固定止漏环;4—上固定止漏环;5—下机架;6—定子;7—千分尺;8—上机架;9—电池;10—耳机;11—绝缘垫块;12—工字钢梁;13—求心器;14—中心测点

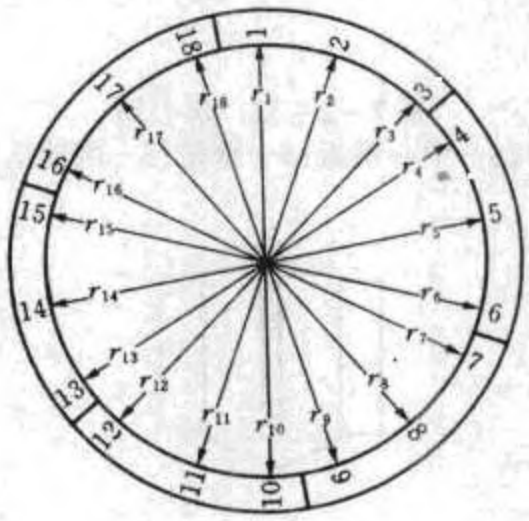


图 7-2-36 六瓣定子测点圆周分布图

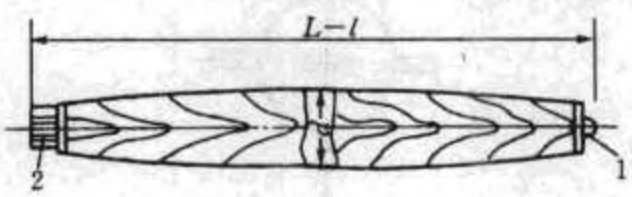


图 7-2-37 大型内径千分尺杆

1—固定触头;2—千分尺活动接头

采用测杆测量时应由两人配合进行,一个将测杆尾端对准测点压紧,在测量中不得松开,另一人头戴耳机,手握千分尺头测量,并记下读数。待全部测点都测量完并记录下来后,最好换一个人再复测一遍,以便互相校对。

通过定子圆度测量,可以得到定子的椭圆度、中心偏差及铁芯的不垂直度。

(4)调整定子椭圆度中心偏差和倾斜值

定子内圆各相对半径的最大值与最小值同所测各点平均值之差不得超过设计空气间隙的±5%,否则就需调整。定子椭圆度调整值可按下式计算为

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$\sigma = \frac{D - D'}{2}$$

式中　σ——定子椭圆度调整值，mm；

D－D′——定子两垂直方向直径差，mm。

见图7－2－36，在1—10与4—13两方向的椭圆调整值为：

$$\sigma = \frac{D_{1-10} - D_{4-13}}{2}$$

式中　D_{1-10}——定子点1至点10的直径，$D_{1-10} = r_1 + r_{10}$；

D_{4-13}——定子点4至点13的直径，$D_{4-13} = r_4 + r_{13}$。

若σ为正，即D_{1-10}大于D_{4-13}；σ为负，即D_{1-10}；。小于D_{4-13}。

定子中心偏差调整值，则用下式计算为

$$e = \frac{r - r'}{2}$$

式中　e——定子中心偏差调整值，mm；

r－r′——定子同一直径方向半径差，mm。

见图7－2－36，1、10方向中心偏差调整值即为

$$e = \frac{r_1 - r_{10}}{2}$$

若求得的e值是正，则e为定子应从1点向10点方向调整的距离；若e是负值，则e为定子应从10点向1点方向调整的距离。

定子倾斜值按下式计算为

$$\varepsilon = r_{上} - r_{下}$$

式中　ε——定子铁芯表面的倾斜值，mm；

$r_{上} - r_{下}$——同一垂直方位上的上、下两半径之差，mm。

调整定子圆度和中心偏差，以及铁芯的局部倾斜，一般要同高程、水平的调整同时结合考虑，倾斜调整可结合高程进行。

（四）定子铁芯故障的检修

1.定子铁芯松动故障的检修

(1)铁芯松动的原因

电机运行时铁芯受热膨胀，受到附加压力，使漆膜压薄，加之漆膜老化收缩，使片间紧密度降低，产生松动。当铁芯之间收缩0.3%时，铁芯片间压力则会降低到原始值的一半。铁芯松动会产生振动，使绝缘漆膜进一步变薄，松动进一步加剧。此外，铁芯两端齿压板变形，压指和通风槽钢变形、开焊、脱落、折断等也会引起铁芯松动。当压指或通风槽

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

钢脱出时，会损伤线圈绝缘，进入气隙在转子磁极的带动下会损伤铁芯，影响电机正常运行。

铁芯松动位置多发生在两端的铁芯段和通风沟两侧。铁芯中段和整体铁芯松动机会较少。

检查铁芯松动的方法，通常用手锤轻轻敲击铁芯两端齿部和齿压板。如果松动。会发出哑声，并有由冲片缝隙向外喷锈或灰尘。

(2)定子铁芯松动的修理

①铁芯两端松动的修理。铁芯两端松动可用钢板做成楔条插入压指与铁芯之间，打牢后再用电焊焊牢，见图 7－2－38。

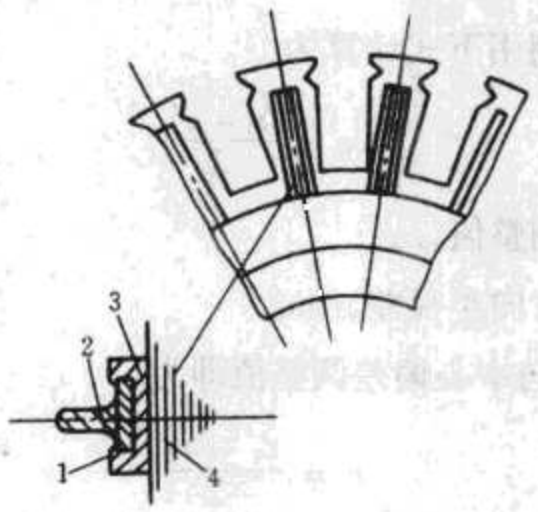


图 7－2－38 用槽形铁条楔紧铁芯

1—点焊；2—齿压板；3—槽形铁、楔条；4—铁芯

②铁芯局部齿轻微松动的修理。修理铁芯局部轻微松动时，先用汽油将铁芯松动部分锈迹和油污清理于净，再用干净布擦拭，用尖刀片撬开冲片，插入云母片并塞牢。刷涂配好的环氧树脂胶粘结固化牢。有的采用浸漆(或刷涂漆)的办法也能消除松动。

③铁芯中间部位松动的修理。铁芯中间部位松动，应根据铁芯松动程度和不同电机结构，采用不同的修理方法。

对于螺栓拉紧的铁芯结构，只要将拉紧螺栓的螺母均匀地团紧，即可压紧铁芯。

2.铁芯齿部弹开故障的检修

(1)铁芯齿部弹开的原因

压指的刚度与强度差，在铁芯的热膨胀的压力下产生弯曲，使铁芯齿部弹开，用喷灯烧除旧线圈绝缘时，使齿端部过热变形而形成冲片向外翘曲，以及片间绝缘漆膜被烧焦而形成齿部弹开。铁芯齿部弹开，会产生噪声，铁片振动会刮破绝缘；折断的齿部铁片会损伤线圈端部绝缘。

(2)铁芯齿部弹开的修理

①增添加强筋，还可增加辅助压圈。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

②采用环氧树脂胶粘结冲片。

粘结冲片时，先用汽油将铁芯的冲片油污和锈迹擦洗干净，然后把配制好的环氧胶浸入铁芯冲片缝内(为了填入内部，可事先将铁芯加热至50~60℃)。再用夹具将铁芯冲片压紧到正常位置(在允许值之内)，在压力下，室温固化8~12h，固化后，卸下夹具。

3.铁芯表面擦伤或片间短路的修理

(1)铁芯表面擦伤或片间短路的原因

轴承损坏、转轴弯曲、装配质量不好或异物落入等，均会造成定、转子铁芯相擦，使铁芯表面擦伤。如果没及时发现，硅钢片将磨出毛刺，向两边伸延，形成片间短路。

(2)铁芯表面擦伤或片间短路的修理

修理之前应做铁芯损耗试验，检查擦伤表面发热程度。为了查出发热部位，励磁线圈匝数磁密应按1.4T计算。通电45min后，用点温计测试擦伤表面温度，要求铁芯局部温升不大于25℃，最高与最低温差不大于15℃，否则要考虑修理，修理方法如下：

①钳工修理。用刮刀或挫刀把擦伤的硅钢片毛刺去掉，并清理干净，涂刷一层薄薄的绝缘漆。如齿部已松动，就在硅钢片间插入0.03~0.05mm厚的云母片，这样既可以增强铁芯齿部的机械强度，又可以杜绝短路回路上的涡流。

②硝酸腐蚀法。采用硝酸腐蚀对修理铁芯短路故障较好，方法简便，不必取出绕组，对硅钢片绝缘无影响，其工艺过程如下：

A.配好34%浓度的硝酸溶液，待用。硝酸浓度不要大于34%，否则将影响腐蚀效果。无硝酸采用硫酸亦可。

B.将铁芯段间的通风沟用湿石棉布或玻璃丝布塞好，防止酸液浸入绕组绝缘内部和腐蚀通风槽钢。

C.将施工附近的绕组和槽楔表面以及铁芯间缝隙用油灰堵严，除要处理的铁芯表面露出外，其余部分用石棉布全部挡好。

D.用手砂轮打磨短路处的钢片，切勿连续打磨。打磨后的铁芯表面能看清片间纹路方可。

E.用压缩空气将打磨的铁芯部位吹干净。

F.用毛刷沾配好的硝酸溶液涂刷在铁芯短路部位，待铁芯处生成深褐色物，再用毛刷沾清水将生成物刷掉。反复进行腐蚀，直至短路毛刺全部腐蚀掉，呈现出清晰的片间纹路为止。

G.用毛刷沾清水将腐蚀部位刷洗干净，再用压缩空气吹干。用酒精浸湿的试纸贴于腐蚀过的铁芯表面，试纸不变红，表明已无酸性。

H.根据电机的绝缘等级，将#1611(B级以下)或#9163(F级)绝缘漆刷涂并烘干。

除此以外，为了彻底清除故障，要针对形成定、转子相擦故障的原因采取措施。例如，

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

因转轴弯曲而引起，应矫直转轴；由于轴承磨损严重或损坏引起，应修理或更换轴承；如果是转子漆瘤等物飞出引起，应将转子内部清理干净，并用压缩空气吹干净。

4.铁芯齿、槽局部烧损的修理

(1)铁芯局部烧损的原因

线圈匝间短路或对地绝缘击穿产生电弧，引起铁芯齿、槽的局部烧损。铁芯硅钢片短路发热也会引起铁芯齿、槽的烧损。

(2)铁芯局部烧损的修理

①将烧损区域内的线圈起出来。

②用小窄錾、扁錾或风铲清除硅钢片上的粘结块。烧断的齿用錾子齐根錾削掉，对于较大的铁芯，在处理烧结块时，可根据铁芯烧损长度和深度，用铣床或刨床将烧结块清除掉。

③用直径较小的风动砂轮打磨伤疤和凸凹不平的表面。再用专用刀片将齿部冲片一片片地撬开，并用刮刀刮掉毛刺。对于槽内冲片烧伤的清除，因撬开冲片刮掉毛刺较困难，则采用上述硝酸腐蚀法清除毛刺。

④在修理部位涂刷硅钢片绝缘漆。

⑤嵌线前须做铁芯损耗试验，确定无局部发热时才能嵌线。

为了防止绕组绝缘在烧损的熔境或缺齿部位膨胀损伤，必须镶假齿，假齿的材料要选用不导磁、耐温、导热性好，并且便于加工的材料。建议采用黄铜板中间夹上涂有环氧树脂的无碱玻璃布压制的假齿，制成与缺口处形状相同的假齿打入缺口处。为了防止假齿在运行中被振松，可将假齿端的冲片齿朝假齿方向弯90°角作为保护卡。也可用绝缘胶粘结在缺口部位。

5.铁芯齿部弯曲和错片的修理

(1)齿部弯曲和错片的原因

发电机发生故障时，使定转子严重相擦，引起铁芯齿部变形，严重时会将铁芯齿部撞倒，引起齿部径向错片和轴向弯曲变形。拆旧线圈用力过猛，也会使铁芯齿部翘曲变形。松动的铁芯，在电磁力的作用下，使冲片凸出或凹进，会产生错片现象，造成槽内不平，在拆除槽绝缘时，可以看出绝缘上有明显的线条刻痕。

(2)齿部弯曲和错片的修理

铁芯齿部的一般弯曲和错片，通常用黄铜板或胶木板顶在弯曲或凸出的齿上，用手锤轻轻敲击铜板进行校正，最后用槽样棒检查槽形尺寸，要求槽样棒能顺利通过所有的槽。槽样棒采用钢板制成，其宽度比槽宽小0.2mm，校正过的冲片应刷上与原冲片相同牌号的漆。

当铁芯齿部严重的弯曲和错片时，需拆开局部或全部铁芯段的冲片，逐片校正，然后

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

重新叠压。

第三节 水轮发电机的温升过高及其处理措施

发电机在运行时发现定、转子绕组或定子铁心的温度有异常现象，可着手从以下几方面进行检查。

1.首先检查电机的负载情况是否正常，如三相电压和电流数值是否有额定值以内、三相负载是否平衡及励磁电流是否超出正常数值等。电压太高会使铁耗增加，不但会使铁心温升增中，也会影响到定子绕组的温升。如果电流过大，绕组铜耗就会增加，直接造成绕组的过热。同理，如果励磁电流增大，也会影响转子绕组的温升。

对三相同步发电机还规定了不平衡负载的程度。负载不平衡产生反向旋转磁场，在转子上引起较大的附加损耗，引起转子温升增加。

如果发现负载不正常，可设法调整负载。如果励磁电流过大，应设法降低。如调整后仍然无效，应考虑转子绕组匝间短路的可能性。

2.如果电机的运行情况都在正常范围内，而定转子绕组及定子铁心的温升已超出正常的数值，就有可能是电机的通风系统有问题。因为电机温升与通风情况有很大关系。风量不足，会导致电机温升的增加，因此，应检查风道是否被堵塞，尤其是管道通风。如果发现径向通风沟被粉尘飞絮等物堆积，应用铁丝捅通风沟并用干净压缩空气吹干净。密闭循环通风冷却的电机风道阻塞的可能性较小，如果是出风温度过高，则说明冷却器有故障或冷却器容量不足，应对冷却器进行检查。在检查风路情况时，要注意进出风口是否相邻或是否存在回流现象。

如果经过以上检查和处理后，定转子温升仍然偏高，可考虑绝缘是否足够，应对电机进行补充绝缘处理。

对于中型电机的定子绕组一般装有检温装置，如在进出风口装有水银温度计或电阻温度计，因此比较容易发觉过热现象。而小型电机一般没有测温装置，全凭运行人员用手进行检查，如感灼手就要进一步用仪表测温。

第四节 定子铁芯的重新叠装

一、定子绕组、冲片的拆除

发电机运行多年，定子冲片漆膜严重老化脱落，造成铁损加剧，定位筋变形引起定子

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

铁芯内圆严重不圆;由于事故使转子与定子相擦,造成定子铁芯严重受损;转子上的把合螺母松动飞出,将定子铁芯严重打坏。

由于上述种种原因,对机组安全运行造成影响,则必须拆除定子绕组、冲片,重新叠装定子铁芯,重新嵌装走子绕组或全部更换新绕组。有时为了增容改造,需要更换定子铁芯和定子绕组。现将发电机定于绕组和定子冲片的拆除步骤简述如下。

(一)了解发电机的使用和损坏情况

在发电机定于绕组、铁芯拆除前要将发电机运行维护情况了解清楚,因为发电机定子绕组、铁芯的损坏,除了使用维护不当等原因外,还可能有:发电机设计或工艺上的问题;曾经进行过修理但修理质量不高,或者是机械方面的问题等间接原因。修理人员在全面地了解了使用情况后,应找出导致损坏的原因,并进行针对性的修理,还可对原来的缺陷加以改进,以提高修理质量,改进发电机的性能。

(二)测量记录原始数据

原始数据是第一手资料,要认真测量和记录。其中包括铭牌数据、铁芯数据、绕组数据以及运行和拆除检查内容。原始数据的填写工作,要在拆除绕组、铁芯之前便开始记录,一直到绕组、铁芯全部拆完才能结束。

要高度重视测量和记录原始数据的工作,并要经过专人检查,复核无误时,才可作为正式原始记录数据使用。因为,当发电机绕组、铁芯拆除以后,原始数据是修理工作的惟一依据,如果记录错误,必将引起修理的错误。应记录的数据有:

1.铭牌数据

铭牌数据有型号、额定功率(kW)、额定电压(V)、额定电流(A)、转速(r/min)、频率(Hz)、接法、效率、功率因数、励磁电压(V)、励磁电流(A)、耐热等级、产品编号、制造日期、制造厂等。

2.定子绕组数据

定子绕组数据有;绕组型式、线圈节距、导线型号、导线规格、并绕根数、并联路数、每个线圈的匝数、线圈伸出铁芯长度(接线端的和非接线端的)、线圈槽部横截面尺寸、线圈端部横截尺寸、线圈绝缘厚度、槽绝缘材料、槽绝缘厚度、槽楔材料、槽楔尺寸、绕组接线图等。

3.定子铁芯数据

定子铁芯数据有:定子铁芯外径、定子铁芯内径、定转子之间气隙值、定子铁芯长度、通风沟数、通风沟宽、定子槽数、槽形尺寸等。

4.发电机故障前运行情况

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

发电机故障前运行情况有:故障时的现象、定子绕组损坏的状况、定子铁芯损坏的状况、在绕组、铁芯拆除过程中,要仔细查明绕组、铁芯故障原因,并提出改进措施。

测量线圈的匝数和线径时,至少要测量一个极相组的线圈,尤其对于较复杂的绕组,必须多测量几个完整的线圈数据。

(三)定子绕组的拆除

水轮发电机定子绕组,根据发电机的容量大小,采用不同的结构。中小型水轮发电机定子绕组一般采用双层叠绕组,端部连接较为简单,大型水轮发电机定子绕组一般采用双层波绕组,端部连接较为复杂。因此,拆除的方法就有所不同。同时,还应根据统组的回用或重绕而采用不同的拆除方法。具体方法参照第六章和第七章。

(四)定子铁芯的拆除

定子绕组拆除后,用千分尺仔细测量铁芯的内径并做好记录。在测量铁芯长度时,要注意铁芯两端的扇张现象,为了测量准确,建议在槽底处测量铁芯长度,并沿圆周对称多测几点,取平均值。测量槽形尺寸时,要用质地较好的画图纸贴在较完整平坦的槽形面上,用手按出或用铅笔画出槽形轮廓。或者用游标卡尺直接进行测量。为了估算槽满率,需要计算槽形面积,可以利用公式计算,也可以采用方格纸在槽形上按出槽形痕迹,然后数一下槽形内小方格数,将小方格的面积相加便是槽形面积。

所需铁芯数据已经测量完毕,用扁铲铲开铁芯的压紧螺杆与螺母的焊点及螺母与齿压板之间的焊点,用风动扳手或套筒扳手将螺母松开,拿走齿压板。根据铁芯冲片的好坏程度,回用、废除或全部更换情况。对于回用的冲片,拆除时应小心从定位筋上拆下,不要让冲片卷角卷边,拆下后应分类摆放,每种阶梯片、每种齿数片应分开单独放在一起,如果需要重新刷漆的冲片应先将冲片清理干净,然后根据绝缘等级选用同原型号的硅钢片漆涂刷冲片两面到规定漆膜厚度(一般为0.02mm)。对于废除或全部更换的冲片,拆除时无需顾及,只要将冲片从定位筋上拆除下来即可,堆放也不必分类放置整齐。拆下的拉紧螺杆,如果回用,应将螺纹部分涂上防锈油,并用纸包上,保护好螺纹部分。还应将螺杆整齐地放置在货架上,以待回用。

二、定子定位筋的拆装

(一)定位筋的拆除

定位筋是由方钢加工而成,呈鸽尾形,亦称鸽尾筋。它通过托板焊于机座环上,定位筋与托板、托板与环板都为焊接连接。定子铁芯的扇形冲片和通风槽片都通过定位筋固

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

定在机座环上，一般每张扇形冲片上布置两根定位筋。定位筋的装焊好坏直接影响定子铁芯的圆度、中心偏差、倾斜度。所以要求定位筋装焊后：筋要垂直；筋的变形要小；筋间的弦距相等；筋与中心之间的距离（半径）也要相等。因此，定子铁芯冲片拆除完后，要用定子中心测圆架测量定位筋与中心之间的距离，用千分尺检查定位筋间的弦距，用吊钢丝的办法检查定位筋的垂直度，用平尺检查定位筋的直度。对于不符合要求的定位筋应用碳弧气泡将托板与机座环板上的焊缝吹掉，取下定位筋。如果定位筋要回用，拆除时应不要损伤定位筋，拆下后应放置适当保护好

定子中心测圆架结构，见图 7－2－39。安装时，根据定子机座下环圆周上固定下齿压板（或压紧定子铁芯的拉紧螺杆）螺孔，找正测圆架中心柱的中心。测圆架基础应可靠地固定在埋入混凝土的底座中，要求中心柱的中心与机座中心偏差不大于 1mm。由于中心柱是测量全部叠装铁芯内径的轴心，故垂直度偏差要求不大于 0.02mm/m。校正中心柱的垂直度可在柱顶十字线方向挂 4 根钢琴线，用钢琴线耳机法测量；或采用在测圆架旋转臂上固定一方型水平器（0.02mm/m 精度）旋转一周进行测量。中心架转臂重复测量机座圆周上任意点的误差应不大于 0.03mm，旋转一周千分表指针的上下跳动不大于 0.5mm。在以后使用中心测圆架过程中，必须经常复测中心柱的垂直度，以保证所测数据的准确。

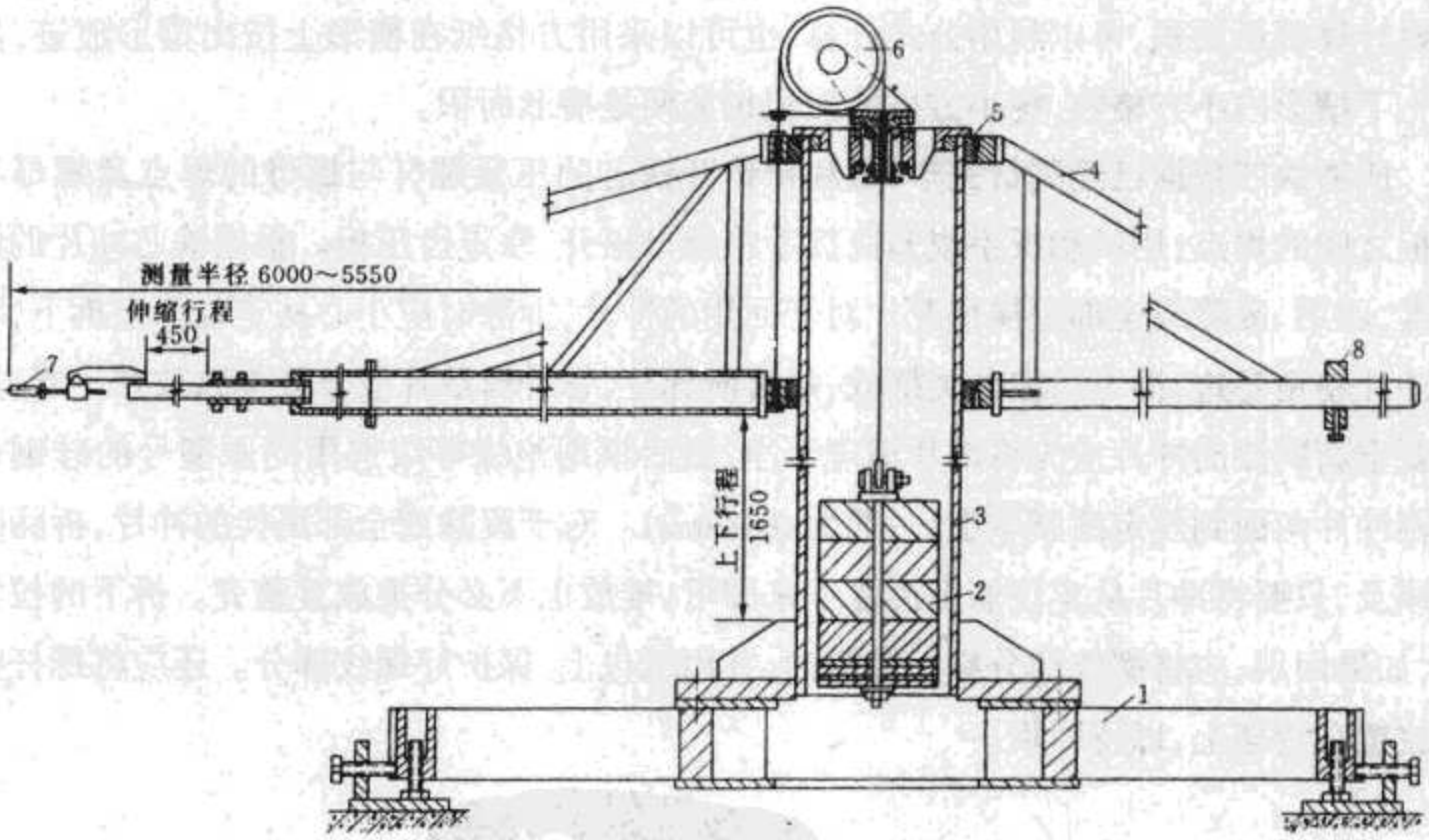


图 7－2－39 定子中心测圆架
1—底盘；2—平衡块；3—中心柱；4—测量架；5—导轴瓦；
6—导向轮；7—测头；8—平衡键

（二）定位筋预装

1.定位筋预装前的准备工作

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(1)复查机座加工面上的水平,如果不符合要求应进行调整。

(2)清除定子机座各环上表面及下表面的焊疤,先用扁錾铲除掉,然后用风动砂轮打磨平。

(3)复查定子中心测圆架的中心柱中心,其与机座中心偏差应小于1mm,而且垂直度应小于0.02mm/m。

(4)用挫刀修除定位筋鸽尾部分的毛刺。用校直机校直定位筋,在全长范围内,使其垂直的两个面不平直应不大于0.16mm。对于变形严重无法校直或其他严重缺陷者,应更换新定位筋。

(5)修除定位筋托板毛刺、飞边。

(6)利用中心柱测量架检查机座下环上的每个拉紧螺孔位置(可加工若干销钉螺栓拧在螺孔内,以便测量),使其直径偏差不大于±1.5mm。

2.临时安装下齿压板

齿压板由压板和齿压片(压指)构成,分块式小齿压板的齿压片是焊在压板上的,见图7-2-40。为了预装时能支托定位筋,需先临时挂装下齿压板,清除下齿压板油污,用挂装螺栓将下齿压板挂在下环下面。并用螺栓和顶丝将所有下齿压板调水平,见图7-2-41。使所有下齿压板的压指顶面高程符合图纸要求,其水平偏差不大于±1mm,并用中心柱找正径向分布位置。

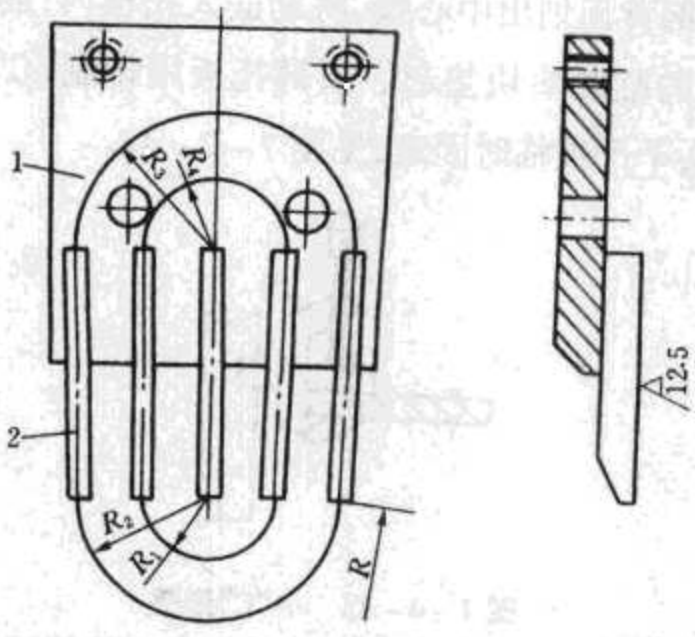


图7-2-40　齿压板
1—压板;2—齿压片(压指)

3.预装定位筋

预装定位筋目的是为了托板与定位筋能在正确的位置搭焊,使正式安装时托板与环板之间不因水平位置和各环高度尺寸不一而出现过大的间隙。预装工艺如下:

(1)确定第一根筋的位置。以下环上的螺孔为准,在两螺孔间划出中心线,偏差不超

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

过 1mm(对应装筋位置一般装有供 C 形夹装卡的撑管),见图 7-2-42。

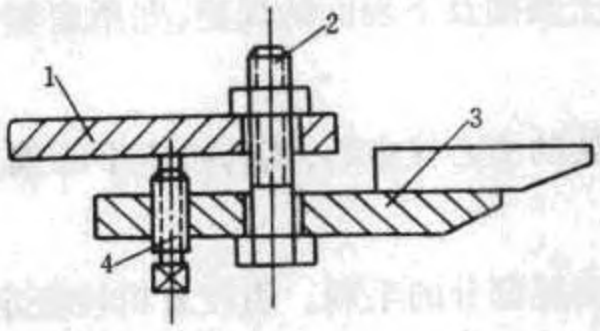


图 7-2-41 下齿压板与下环的连接

1—下环;2—挂装螺栓;3—下齿压板;4—顶丝

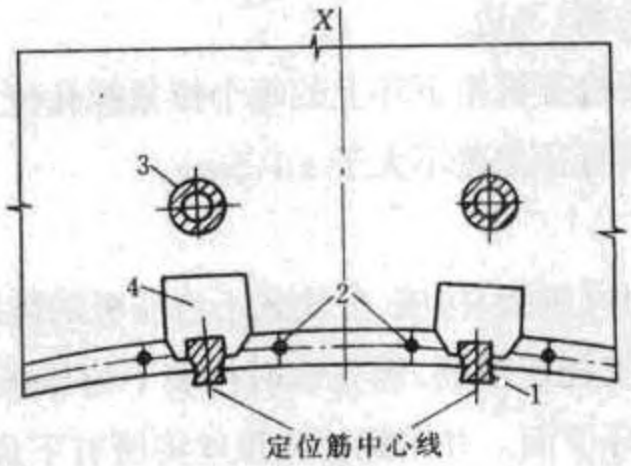


图 7-2-42 定位筋布置图

1—定位筋;2—拉紧螺杆孔;3—撑管;4—托板

(2)在所有定位筋下部背面划出中心线,将筋嵌入托板内,筋下端面与齿压板之间应预留间隙,并用相应厚度的临时垫块垫起。顶部托板用特制"C"形夹夹紧,见图 7-2-43。其余各层托板用平头千斤顶临时固定,见图 7-2-44。

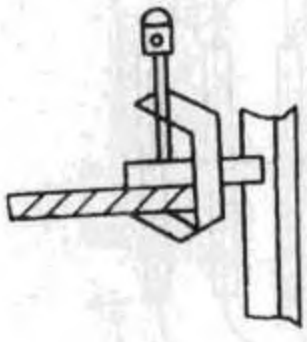


图 7-4-43 小"C"形夹

(3)调整定位筋。以预先划好的中心线为准,调整定位筋的径向、周向、垂直度(在 0.05mm/m 内)及内径尺寸,使之符合要求,且必须使托板与环板靠紧无间隙。然后用 ϕ4 焊条搭焊定位筋与托板配合面的两侧,焊点长约 10mm。搭焊后复查定位筋的垂直度。

(4)在定位筋与机座环板相应的位置上都打上标记 1、2、3、4…。

(5)松开"C"形夹和千斤顶,将定位筋(带托板)从机座环上取下。

4.托饭与定位筋的满焊及焊接后校直

(1)对于更新的定位筋,按图 7-2-45 放置,将预装过的定位筋和托板进行满焊,满

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

焊时应尽量减少定位筋和托板的变形，必须保证角焊缝的质量。

(2)定位筋与托板满焊后，因焊接热变形导致定位筋发生弯曲，必须校直。目前采用专用手动压力机对定位筋之鸽尾部正、侧面进行校直，两个方向的不直度应小于规定值。

(三)定位筋正式安装

1.回装并搭焊第一根(1号)定位筋

第一根定位筋在安装其他定位筋时起着“基准”的作用，因此安装误差愈小愈好。

(1)将与托板满焊并校正过的第一根(1号)定位筋放回原预装位置，可将筋用大“C”形夹夹在机座撑管上，并在托板下的筋与机座环间放上成对楔子板，见图7-2-46。或用调整工具临时固定，见图7-2-47。

(2)用方形水平仪(或用吊钢琴丝耳机法)测量调整1号筋径向及周向垂直度，偏差不大于0.05mm/m。

(3)用内径千分尺测量调整1号筋内圆半径。上、下各测一点，其相互半径偏差小于±0.1mm。

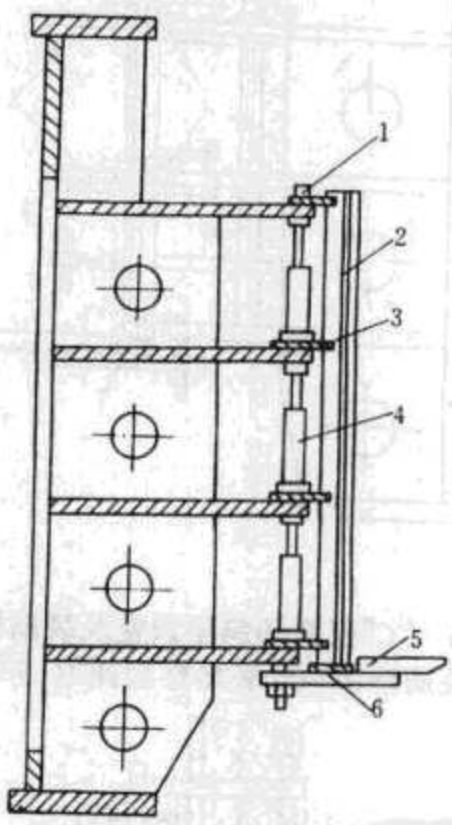


图7-2-44　定位筋临时固定布置图

1—“C”形夹；2—定位筋；3—托板；4—平头千斤顶；5—下齿压板；6—临时垫铁

(4)在测圆架中心柱的横臂上装上千分表，调整定位筋的向心，见图7-2-48。两千分表读数 R_a 与 R_b 之差不大于±0.1mm。

(5)将1号筋托板左右两侧搭焊在机座环上。要求托板与各环紧贴，无间隙(如有间隙可加铁皮垫处理)。搭焊时须随时检查垂直度和半径，应符合要求。先搭焊环板中间的

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

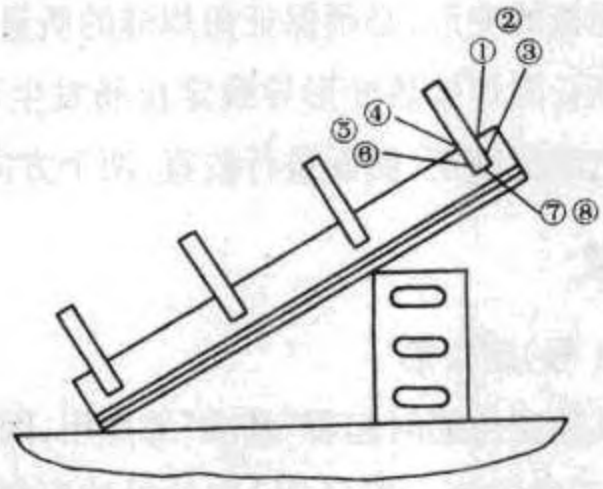


图 7-2-45 托板与定位筋满焊 ①~⑧——焊接顺序

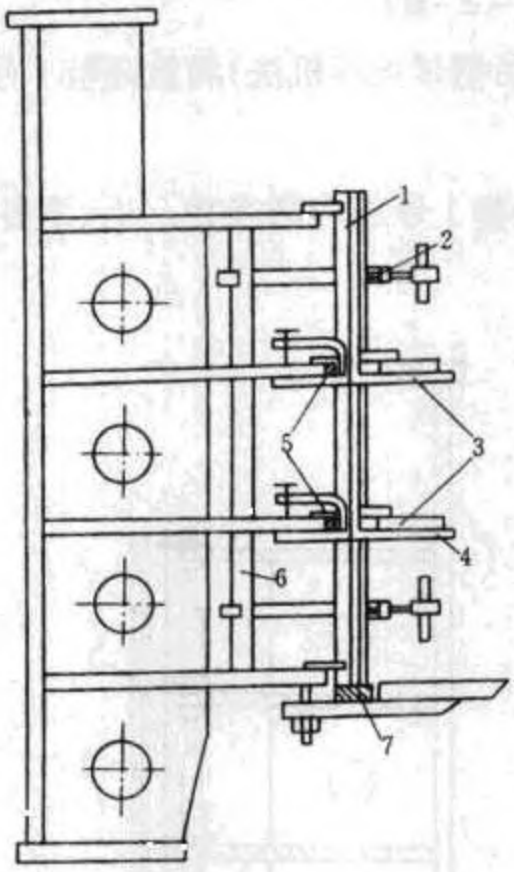


图 7-2-46 "C"形夹和斜垫调整及装筋样板的固定

1—定位筋;2—大"C"形夹;3—装筋样板;4—装筋样板托架;5—楔子板;6—撑管;7—临时垫铁

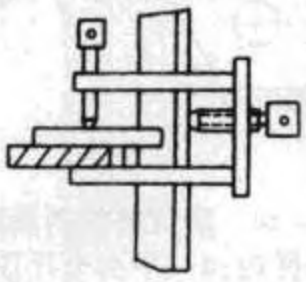


图 7-2-47 调整工具

两块托板,然后再调整,搭焊其余托板。搭焊用 ϕ_4 焊条,Δ4 焊缝,长约 15mm。搭焊完后应再次检查 1 号筋的位置,如果垂直度和半径尺寸不合要求应重新调整。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

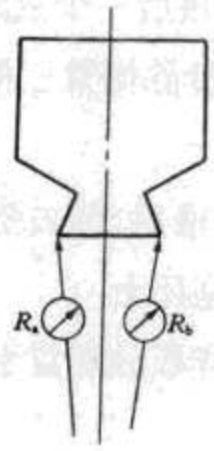


图 7-2-48　定位筋的向心检查

2.安装并搭焊其余定位筋

在装完 1 号定位筋后，接着可间隔而有规律地装一部分定位筋。为了使定位筋安装在圆周上等分准确，一般采用“大等分弦矩”的方法，即先装圆周大等分点上的定位筋，在大等分范围内，再逐步分割，使累积误差减至最小。大等分数值的选择，应使整圆能被等分，且等分后的大弦矩以 3～5m 为宜，弦矩太大安装测量困难，太小则累积误差过大。大等分点的定位筋号码可以是以下数列中的一个：(13n—12)、(12n—11)、(9n—8)或(6n—5)等(n = 1、2、3、…)。例如选用(9n—8)的大等分点，即为跨过 9 个定位筋间隔；大等分点的定位筋号分别为：

第 1 号大等分点为 1 号定位筋；

第 2 号大等分点为(9×2—8) = 10 号筋；

第 3 号大等分点为(9×3—8) = 19 号筋；

…

现以此为例，说明安装并搭焊其余定位筋的施工程序：

(1)将大等分点上定位筋搭焊在机座环上

具体为：

①将大等分点 1、10、19、…、1 + (n—1)9 号上的定位筋，用装 1 号筋的方法固定于机座上。

②用测圆架横臂上的千分表，以 1 号筋为基础，调整其余各大等分点上各筋的半径并检查向心，用方型水平仪测量垂直度，均应符合 1 号筋安装的工艺要求。

③在每个定位筋上、下两端(分布在机座正数与倒数的第二层环板上)装上弦距测量块(弦距样板)，要求各筋上、下弦距测量块分别等高，用内径千分尺测量并调整各筋之间的上下弦距，各相邻两筋的弦距偏差不超过 ±0.3mm。

④按搭焊 1 号筋托板的工艺要求，将大等分点上各定位筋托板左右两侧各搭焊一点于机座相应的环板上。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

⑤复查各筋的半径和弦距。如果最后一个弦距偏差过大，则应铲除最后几根定位筋，根据弦距超差值，每差 1mm 则可向前拆除倒数三根筋，重新找正搭焊，把差值平均分配到这些间距中去，直到弦距合格为止。

⑥大等分定位筋搭焊完并检查合格后，拆去弦距测量块。

(2)将大等分中的各筋搭焊在机座环上

①以 1 号筋为基准，用两副装筋样板分别置于机座正数与倒数的第二层环板上，以控制、调整各筋之间弦距。

②用托架上螺钉调节装筋样板水平，使其偏差不大于 0.08mm/m；然后依次装入第 4、7 号定位筋。

③利用“C”型夹和楔子板等调整工具，反复调整 4、7 号筋(仅在上、下装筋样板处)，调整合格后将该处托板搭焊于相应的机座环板上。为避免累积误差，每搭焊一根筋时需将上、下装筋样板倒换一次。

④夹 1～4 号定位筋，以定位筋装筋样板为依据，按上述同样工序和要求，将第 2、3 号定位筋托板搭焊于相应机座环板上(即机座正数和倒数的第二层环板上)。再用同样方法进行第 5、6 号及 8、9 号各定位筋托板搭焊。弦距用弦距游标尺(可在其一端装上一千分表)进行测量，见图 7－2－49。

其余各大等分内定位筋托板搭焊亦照此进行。

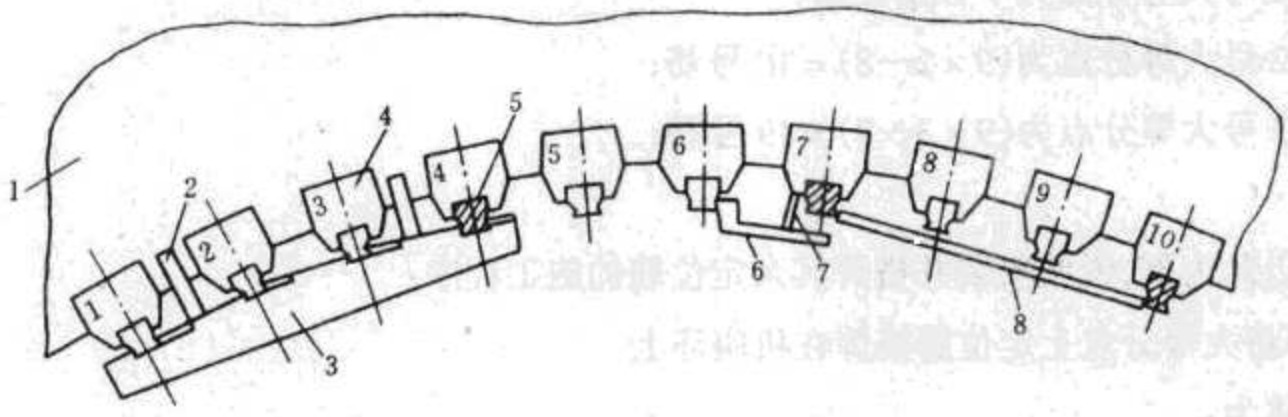


图 7－2－49 弦距测量示意图

1—机座环板；2—装筋样板托架；3—装筋样板；4—托板；5—定位筋；
6—弦距游标尺；7—千分表；8—内径千分尺

当所有定位筋在机座正数和倒数的第二层环板部位全部搭焊后，用“C”型夹调整半径，用双头千斤顶顶在两筋之间调弦距。合格后，将其余未曾搭焊的各定位筋托板搭焊于相应的机座环上。为避免或减少返工，每搭焊一批托板后，对定位筋的弦距、半径，向心和垂直度全面检查一次，发现有不符要求的应及时处理。

(3)检查各筋半径尺寸和弦距

全部定位筋搭焊完后再检查各定位筋的半径尺寸和弦距。每根定位筋的半径可检查

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

7点(部位在环和环之间),定位筋内圆半径偏差应在 $\pm^{0.2}_{0}$ mm 以内。弦距可检查3点,使偏差在±0.3mm以内。

3.托饭与环板的满焊

全部定位筋搭焊完,并经检杏合格后,就可进行托板满焊。

托板与机座环板的满焊是一层环板接一层环板进行的。各环满焊顺序,见图7-2-50。先焊中间环板上的各托板,后焊上、下环的托板。一般由2~4名电焊工位于对称位置,从合缝处开始沿圆周(例如顺时针方向)进行。先焊所有托板的一侧(例如左侧),再焊所有托板的另一侧(右侧)的第一道缝按图7-2-50所示顺序焊完各层环板的第一道焊缝,经检查、调整半径、弦距后,再照此焊第二道、第三道、第四道焊缝。所有侧面焊缝满焊完毕,再按图7-2-50顺序,沿前述方向焊完背面各道焊缝,直至全部满焊完成,最后检查所有焊缝的堆积高度及焊接质量是否符合要求。

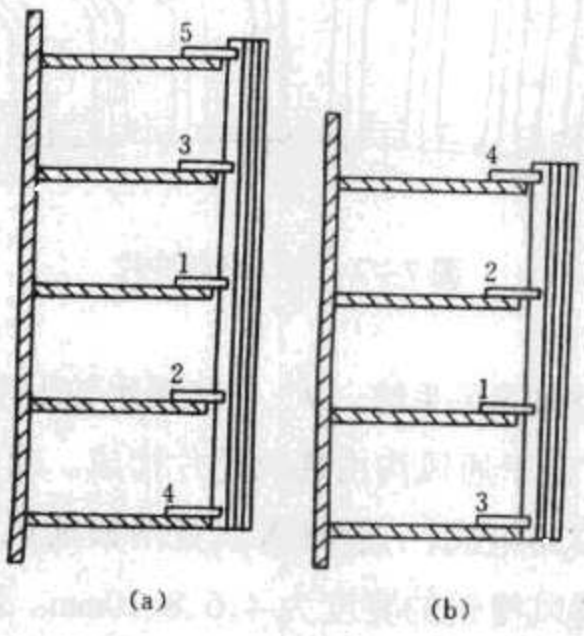


图7-2-50 托板与机座满焊顺序
(a)五层环板的满焊顺序;(b)四层环板的满焊顺序;

4.修整

定位筋在托板与环板满焊之前须经反复测量调整,定位筋半径、弦距、垂直度符合要求,但是由于焊接时热变形,在托板与环板满焊之后,还应对定位筋的半径、弦距、垂直度进行测量检查。定位筋半径、弦距、垂直度会有少量超过允许值。如果筋位半径尺寸偏小,可将筋的内圆用砂轮磨去一部分;若筋位半径尺寸偏大,可以在筋的鸽尾斜面上磨去一部分,使筋向中心移动一些。弦距、垂直度如不符合要求,则视具体情况进行处理。

三、定子铁芯冲片的叠压

定子铁芯是发电机的一个重要部件,确保铁芯装压质量,对于防止故障发生,保证发

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

电机安全运行，延长发电机使用寿命，具有重要意义。

(一)扇形冲片和通风槽片

1.扇形冲片

水轮发电机定于铁芯冲片，其形状，见图7-2-51。大、中容量水轮发电机定子铁芯由数万片或数十万片的扇形冲片叠装而成。水轮发电机定于铁芯冲片一般采用开口槽，扇形片外圆一端冲有R3半圆形标记孔，用于辨别扇形片的正反面。为了减小铁芯的涡流损耗，扇形片两面均匀刷有绝缘漆，两面漆膜总厚度为0.02~0.025mm。

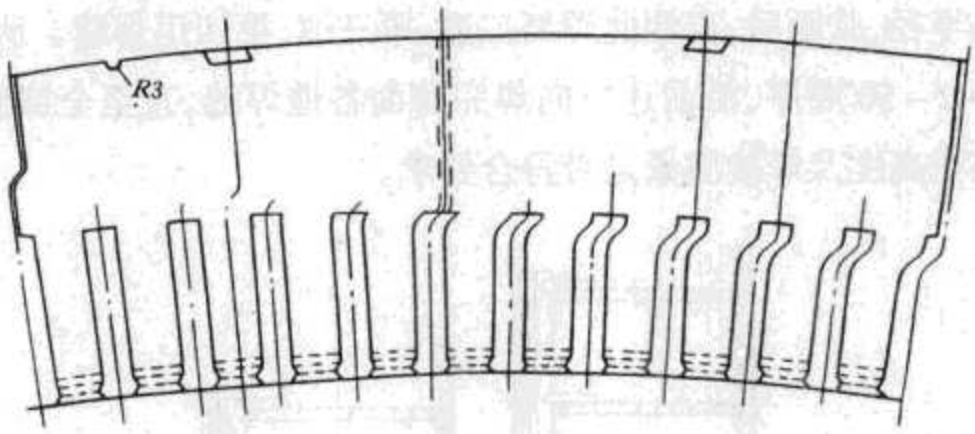


图7-2-51 扇形冲片

2.通风槽片

水轮发电机一般采用径向通风系统。大、中容量水轮发电机，每段铁芯叠片高度约为30~45mm，有一层通风沟。定子通风沟由通风槽片构成。通风槽片由扇形片以及点焊于扇形片上的通风槽钢及村口环组成，一般每齿放置两根通风槽钢，见图7-2-52。通风槽钢的高度为6、8、10mm，通风槽钢的宽度为4、6、8、10mm。通风槽钢为工字形。为了减小风阻，靠近齿端通风槽钢弯成内径为R14的圆弧。在通风槽片表面喷有铁红醇酸底漆和浅灰色硝基内用磁漆各一层。

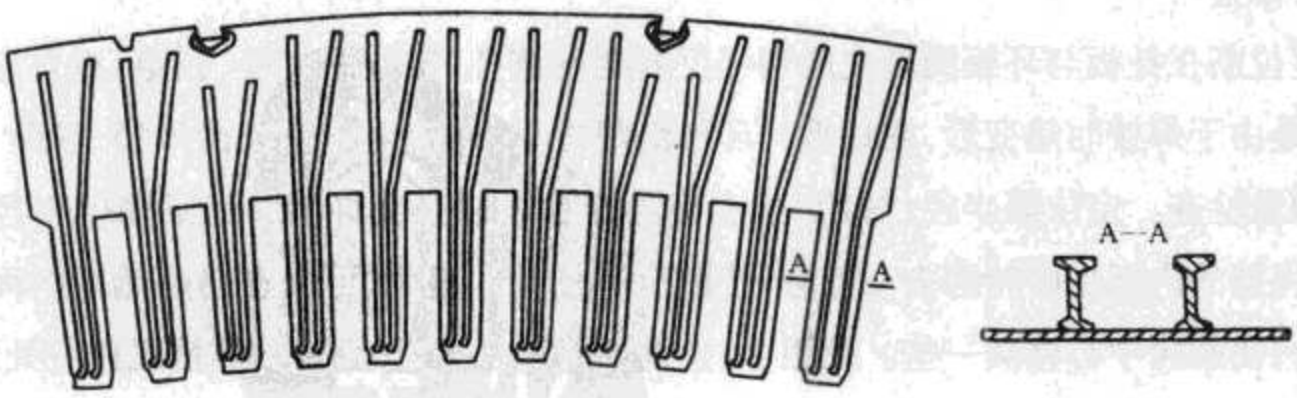


图7-2-52 用于大、中容量发电机通风槽片

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(二)铁芯装压要求

1.铁芯装压的紧密度要求

为了防止由于电磁、机械振动及温度变化综合作用引起铁芯松动,并使铁芯保持一个规则的形状而不至发生严重的扇张现象,在铁芯装压过程中,除要求达到一定的尺寸外,还要保证铁芯有一定的装压紧度。大、中容量水轮发电机定子铁芯采用定压、定尺寸装配法,即铁芯在980kPa的压力下,按照一定的尺寸标准装压,把铁芯重量限制在计算值的范围内。

装压压力与重量之间的稳定关系采用规定的叠压系数来保证。叠压系数K是标志铁芯装压紧量的一个小于1的系数,它等于铁芯的计算平均高度与实际平均高度的比值,即

$$K = \frac{h_1}{h_2}$$

式中 h_1——铁芯计算平均高度,mm;

h_2——铁芯实际平均高度,mm。

叠压系数与下列因素有关:

(1)冲片厚度,冲片厚度的均匀程度,表面状态,毛刺情况,绝缘种类等。

(2)装压时扇形片鸽尾槽与定位筋鸽尾的配合情况,压力大小及其均匀程度,预压次数等。

此外,要使叠压系数稳定,除要保证冲片质量外,还要严格地控制影响装压质量的其他因素。对于两面各刷两层漆(漆膜总厚度为0.02~0.025mm)的0.5mm厚的扇形片叠装的定子铁芯,叠压系数应在0.93~0.95范围内。

2.铁芯装压的准确度

铁芯装压准确度包括槽形尺寸、铁芯波浪度和铁芯高度公差、铁芯内径公差,均需符合规定要求。

(1)槽形尺寸

由于硅钢片呈波浪形,叠片错牙以及装压时产生波状翘曲等,不可避免地使得装压后的铁芯槽形尺寸小于冲片的槽形尺寸,称为叠片误差,这已在扇形片设计时预先考虑到(扇形片的槽高、槽宽均已加大0.3mm)。在装压过程中用槽样棒、整形棒及通槽棒来保证槽形尺寸。

(2)铁芯的波浪度与铁芯高度偏差

铁芯波浪度及铁芯高度偏差随铁芯高度增加而稍有变化,一般要求铁芯圆周方向波浪度不大于±10mm,铁芯平均高度与设计偏差在±5mm以内。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(3)铁芯内径

铁芯内径不圆和尺寸超差会产生单边磁拉力,引起铁芯振动。所以在搭焊和满焊定位筋及叠片时,需采取工艺措施来保证铁芯内径公差符合设计图纸的要求。

(三)定子冲片的叠压

1.叠压前的准备

(1)清除上、下齿压板的油污,修锉压指上的毛刺,对焊有压指的压板,在有压指的一面涂刷绝缘灰瓷漆,并晾干24h。对于压指点焊于冲片上的齿压片,同样两面涂刷绝缘灰瓷漆。

(2)清洗永久拉紧螺杆,检查螺杆与螺母丝扣应无损伤,螺母套上螺杆应松紧适当。螺杆的光杆部分应刷绝缘灰瓷漆。

(3)清除定位筋上的焊疤、焊渣和油污,修挫定位筋鸽尾部分的毛刺。

(4)清理机座各环,用压缩空气吹净并铲除焊疤,清除油污等。机座内各表面,各环、托块等,均涂刷机座原涂刷漆牌号的漆。

2.正式调整安装下齿压板

对于定子下齿压板采用小齿压板结构的机组。用定子冲片做样板,精确地检查调整并固定下齿压板,使压指与定子冲片齿中心线偏差不大于2mm;压指的端部应缩进冲片齿端2mm,压指高程相互间偏差不大于±1mm;压指内圆应略高于外圆0.5mm。对于大齿压板,一般采用大齿压板与机座环板连为一体结构,在机座环板上加工出大齿压板,压指点焊于定子冲片上。只要将齿压片放于大齿压板上,不要进行水平调整,只须调整内径。

3.扇形冲片叠堆

用人工或机械按原始记录或图纸叠堆一段定子扇形片(其中应包括一层通风槽片),用整形棒将此段加以整形,另外在每张扇形片范围内打入两根槽形棒和两根槽楔样棒定位。经检查无问题后,可继续叠堆至一个压紧段。叠堆时需注意以下几点:

(1)相邻两层扇形片接缝要错开,小片直角边朝台缝,标记孔方向应一致。

(2)有折边、卷角、断齿、裂纹、锈蚀的冲片不应叠入。油污的冲片应清理干净后叠入。

(3)叠片应靠紧定位筋内圆,每叠完一段冲片后用整形棒整理槽形。整形时,宜用铜锤,不允许用铁锤敲打扇形片。随着叠片高度的增加,需将槽形棒逐渐上升,取槽样棒时,不得硬拉狠敲,防止损坏槽底。对于"浮动式铁芯"结构,冲片鸽尾与定位筋间需加与原记录(或设计)间隙相应厚的钢衬垫,衬垫贴靠在定位筋上,平放在其宽度的中间,在衬垫的顶部用胶带与定位筋粘牢,边堆积边升高衬垫,始终让衬垫保留一段长度在外面。

(4)按图纸(或原记录)叠装通风槽片,各段铁芯的通风槽片上的通风槽钢在高度方向应上下对齐。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

(5)随时注意测量铁芯内径,如有偏差即应适当调整。

(6)根据对冲片叠压系数的要求,计算出每段叠片层数和高度范围。每堆完一段应使用测量工具检查段高,在压紧状态下每段铁芯高度误差不超过设计(或原记录)值的±0.5mm。

每段铁芯叠堆层数可按经验确定,初估时可参考下式计算,即

$$n = K\frac{h-0.6}{\sigma}$$

式中 n——每段铁芯的叠片层数;

K——叠压系数,一般取 K=0.95;

σ——包括漆膜的冲片厚,mm;

h——一段铁芯的设计(或原记录)高度,mm。

4.分段装压

定子铁芯装压必须保证铁芯有一定的装压紧度。水轮发电机运行时,在电磁振动等作用下不允许因铁芯松动而可能产生严重的扇张现象,因为严重扇张的铁芯会产生噪音,损坏线圈绝缘,使通风沟变窄;也会造成局部磁通密度过高以致铁损增加引起铁芯局部过热。因此,大容量水轮发电机要采用多次分段加压的装压方法。

定子铁芯采用980kPa的压力装压,已足以防止铁芯松动。但是考虑到压装时还有摩擦力需克服,运行时的绝缘老化收缩,使得片间压力减少等情况。在实际装压时,将压力提高到1176~1470kPa。随着铁芯高度增加,有的最终压力提高到1960kPa。但也不希望压力过高,因为压力过高会使绝缘和冲片损伤。需要分段加压的次数,应根据工具的压紧能力和压紧系数、波浪度的要求具体确定,一般铁芯高度在1000~1600mm间预压两次;铁芯高度大于1600mm,小于(或等于)2200mm需预压三次。铁芯越高,摩擦力越大。因此,初次预压时,压力可适当减小,因为此时摩擦力未达到最大值,以后随预压次数增加而逐渐加大直到全压力。

预压方法可根据压装工具的具体情况而定。见图7-2-53,将上齿压板翻身(压指向上),压在铁芯上作为垫板,每块齿压板上放一台千斤顶作为预压装置。图7-2-54所示,将下垫板放在叠好的铁芯段上,在上环板上安装预压板,用拉紧螺杆加撑管的压紧方法。经预压后,叠压系数、高度偏差、圆周方向波浪度均应达到前述的铁芯装压准确度要求。

每次分段装压应注意下列几点:

(1)压紧前应在铁芯全长范围内整形,在千斤顶下的第一层不得放通风槽片,槽形棒不得露出铁芯之上。

(2)压紧时,应逐次均匀地下压,应避免一次下压过多而出现较大的波浪度。沿圆周

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

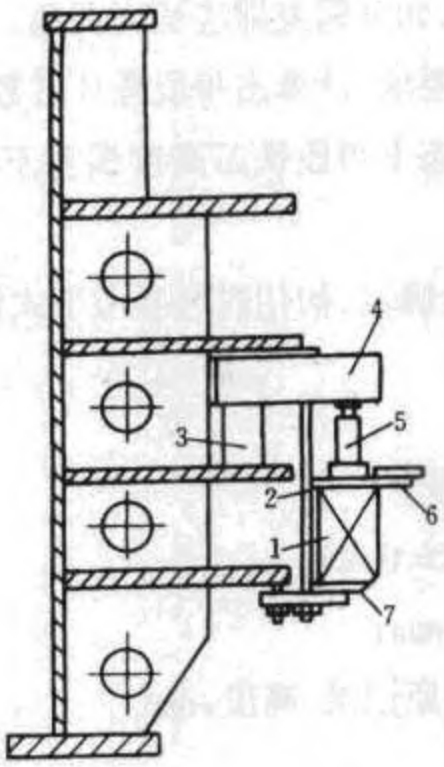


图 7-2-53 拉紧螺杆加千斤顶预压

1—铁芯;2—临时拉紧螺杆;3—垫块;4—工字梁 5—油压千斤顶;6—上齿压板;7—下齿压板

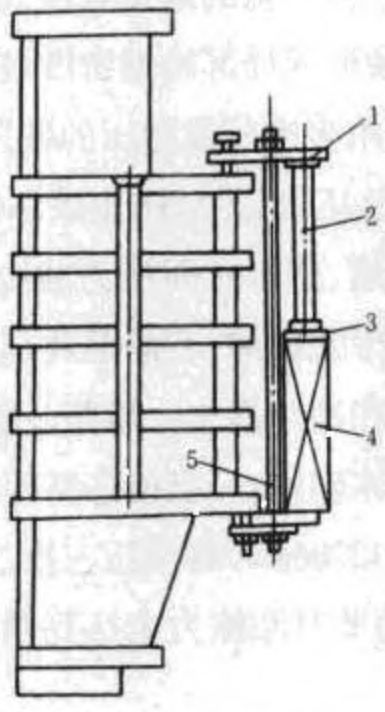


图 7-2-54 拉紧螺杆加撑管预压

1—预压用上压板;2—撑管;3—预压用下垫板;4—铁芯;5—临时拉紧螺杆

的压紧方向,每次压紧方向应相互交错,如第一遍为顺时针方向压紧,则第二遍应为逆时针方向压紧。

(3)压紧力通常以测量拉紧螺杆的伸长值进行控制,所测螺杆在圆周上应不少于 6 根,一般情况下,铁芯单位面积上压力最大不能超过 1470kPa,或按图纸要求。

冲片压紧过程中可用紧度刀片检查,见图 7-2-55,将小刀插入冲片之间,当弹簧力为 100~120N 时,刀片伸入铁芯的深度不得超过 3mm。

每段预压完毕,应特别注意铁芯圆度。合格后拆除预压工具,继续叠堆定子冲片,然

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

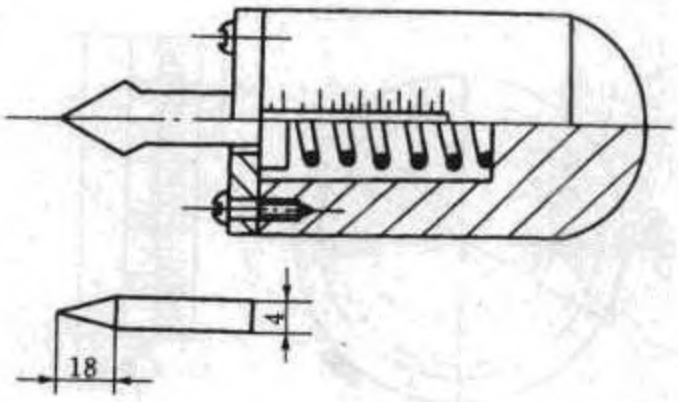


图 7-2-55　检查刀片

后再进行第二段的压紧。

5.最后压紧铁芯

定子扇形冲片全部叠堆完后，进行最后压紧，见图 7-2-57。由于高度的变化，需更换不同长度的垫块和临时拉紧螺杆。千斤顶承受的压力必须比前几次大，以保证整个铁芯的高度和波浪度。当达到要求后，可逐个拆除千斤顶，按图纸(或原记录)安放上齿压板并用顶丝调整其水平，先仍用临时拉紧螺杆压紧，达到要求后，逐个拆除临时螺杆，换上永久拉紧螺杆，并初步紧固，待上齿压板全部换上后，再轮流循环紧固几圈。在压紧状态下，检查并调整上齿压板，使其各压指与冲片齿的中心一致，齿压板应保持水平，各拉紧螺杆的伸长值达到设计要求。最后紧固拉紧螺杆，使铁芯高度、波浪度、压紧系数全部达到要求后，点焊压紧螺母。待铁损试验合格后，割除和磨平拉紧螺杆的多余部分，点焊所有螺母。最后清理喷漆。

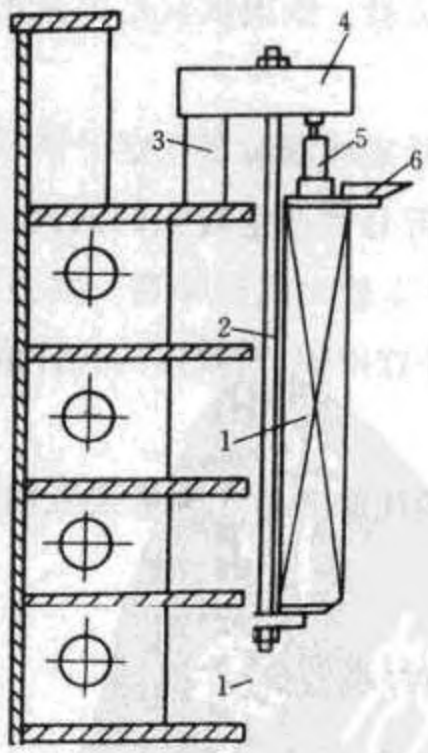


图 7-2-56　定子冲片最后压紧

1—铁芯；2—临时拉紧螺杆；3—垫块；4—工字梁；5—油压千斤顶；6—上齿压板

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

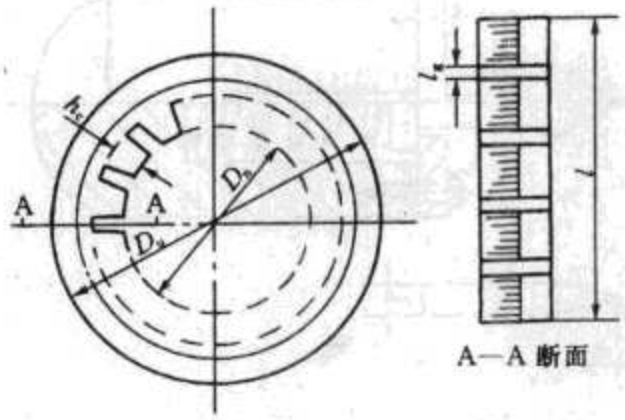


图 7-2-57 定子铁芯有关计算尺寸图

四、定子铁损试验

(一)铁损试验的目的

铁损是发电机能量损失之一,其原因是由于发电机运行时铁芯内部产生涡流。涡流经过铁芯,会使铁芯内部产生热能。这种热能是消耗能量的,故称为铁损。铁损不仅影响发电机效率,而且可能因铁芯内部短路,产生局部过热,由于过热,加速铁芯绝缘和定子线圈绝缘的老化,严重时可造成铁芯烧损和线圈击穿的事故。为避免这种情况的发生,凡定子铁芯表面有明显的损伤之处(特别是分瓣定子的合缝)或根据检查确有疑虑之处(如铁芯有内伤或松动情况),在交接时或定子绕组发生故障,或运行中发现有局部高温以及在工地叠装的铁芯,都应当做铁损试验。铁损试验是检查定子铁芯绝缘情况比较有效的方法。

定子铁损试验,需用专门的励磁线圈缠绕在定子铁芯上,使铁芯内部造成接近饱和状态的磁场,这样铁芯中绝缘劣化部分将产生较大的涡流,温度很快升高,利用温度表测出各部温度。铁芯中松动部位将产生较大的磁噪音。励磁功率的损耗利用电气仪表测出。铁芯单位重量所损耗的功率由计算得到,与规定的允许值相比较,即可判断定子铁芯有无故障及铁芯的叠装质量。

为便于各发电机测量结果的比较或各次测量结果相比较,通常尽可能采用 1T 的磁通密度和 50Hz 的电源。

(二)铁芯有效面积和励磁线圈的计算

1.定子铁芯有效断面积的计算

定子铁芯有关计算尺寸,见图 7-2-57。

定子铁芯轴向有效长度为

$$l_i = K(l_t - b_v n_v)$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

式中 l_i——定子铁芯轴向有效长度，cm；

K——铁芯叠压系数，用绝缘漆绝缘的铁芯为0.95；用绝缘纸绝缘的铁芯为0.9；

l_t——定子铁芯长度(包括通风沟及冲片间绝缘材料)，cm；

b_v——通风沟高度，cm；

n_v——通风沟层数。

定子铁芯轭部高度为

$$h_j = \frac{D_a - D_i}{2} - h_z$$

式中 h_j——铁芯轭部高度，cm；

D_a——定子铁芯外径，cm；

D_i——定子铁芯内径，cm；

h_z——定子铁芯齿高，cm。

定子铁芯有效断面积为

$$F_i = l_i h_j (cm^2)$$

2.励磁线圈的计算

励磁线圈匝数

$$W = \frac{U}{4.44 \times 50 F_i B} \times 10^4$$

式中 W——励磁线圈匝数，匝；

U——励磁线圈施加电压，V；

B——定子铁芯磁通密度，T。

铁芯消耗的全部安匝数为

$$\Sigma aW = \pi D_p aW$$

式中 ΣaW——铁芯消耗的全部安匝数，AW；

D_p——定子铁芯有效平均直径，cm；

aW——定子铁芯单位长度所需的安匝数。其值可根据铁芯材料的性质决定，对具有铁损 P_{10} = 1.8W/kg 的硅钢片，aW 约为 2～2.7AW/cm；对具有铁损 P_{10} = 3.3W/kg 的电机硅钢片，aW 约为 5～6.5AW/cm。由于现在大型水轮发电机定子铁芯采用高硅合金钢，根据实践经验 aw 约为 1.5～1.8AW/cm，一般可选取 aw 为 1.5～2AW/cm。

如励磁线圈在机身和压板中的漏磁以及导线本身的有效损失(一般不超过2%)忽略不计，则通入励磁线圈的电流为

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$I = \frac{\Sigma aW}{W}$$

式中 I——通入励磁线圈的电流，A。

根据估算的励磁电流及所取的电压(380V 或 220V)，即可大致算出电源侧所需变压器的容量及励磁线圈导线应有的截面。

例 某发电机定子铁芯有关计算尺寸为：$l_t = 200cm$，$n_v = 35$，$b_v = 1cm$，$K = 0.95$，$D_a = 1262cm$，$D_i = 1190cm$，$h_z = 19.25cm$。求定子铁芯有效断面积、励磁线圈匝数和通入励磁线圈的电流。

解将已知数据代入相关公式，即

$$l_i = K(l_t - n_v b_v) = 0.95(200 - 35 \times 1) = 156.75(cm)$$

$$h_j = \frac{D_a - D_i}{2} - h_z = \frac{1262 - 1190}{2} - 19.25 = 16.75(cm)$$

$$F_i = l_i h_j = 156.75 \times 16.75 = 2625.56(cm^2)$$

励磁线圈电源电压一般为 380V，若考虑变压器和线路压降约 10%，U 可取 340V；磁通密度一般考虑取 1T，以上数据连同计算值 F_i 一并代入公式，则励磁线圈匝数：

$$W = \frac{U}{4.44 \times 50 F_i B} \times 10^4$$

$$= \frac{340}{4.44 \times 50 \times 2625.56 \times 1} \times 10^4$$

$$= 5.83 \quad 取 6 匝$$

磁通密度在 1T 时，单位励磁安匝数 aw 可取 2.7，将已知数据和计算值 W 一并代入公式，则通入励磁线圈的电流为

$$I = \frac{\Sigma aW}{W} = \frac{\pi D_p aW}{W}$$

$$= \frac{\pi \times 1226 \times 2.7}{6} = 1733(A)$$

例 有一台 TS900/95—56 型的水轮发电机，容量为 36000kW，铁芯数据：$l_t = 95cm$，$b_v = 1cm$，$n_v = 17$，$h_z = 14.8cm$，$D_a = 900cm$，$D_i = 842cm$，$K = 0.95$。试估算所需电源的容量。

解 (1)铁芯有效长度

$$l_i = K(l_t - n_v b_v) = 0.95 \times (95 - 17 \times 1)$$

$$= 74.1(cm)$$

(2)铁芯轭部高度

$$h_j = \frac{D_a - D_i}{2} - h_z = \frac{900 - 842}{2} - 14.8$$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$=14.2(cm)$$

(3)铁芯有效断面积

$$F_i = l_i h_i = 74.1 \times 14.2 = 1052(cm_2)$$

(4)励磁线圈匝数

试验电源采用380V,试验时磁通密度取B=1T,则励磁线圈的匝数为

$$W = \frac{U}{4.44 \times 50 F_i B} \times 10^4 = \frac{380}{4.44 \times 50 \times 1052 \times 1} \times 10^4$$

$$=16.3(匝)$$

电源线路压降考虑为20%,实际选用13匝。

(5)铁芯平均直径

$$D_p = D_a - h_z = 900 - 14.2 = 885.8(cm)$$

(6)单位长度安匝

取aw=1.6AW/cm,则铁芯所需的总安匝数为

$$\Sigma aW = \pi D_p aW = 3.14 \times 885.8 \times 1.6$$

$$=4450(AW)$$

(7)励磁线圈通过的电流

$$I = \frac{\Sigma aW}{W} = \frac{4450}{13} = 342(A)$$

(8)需用的电源功率

$$P_S = 380 \times 342 \times 10^{-3} = 130(kVA)$$

一般供电变压器均为三相,其低压侧额定电压为400V,故试验时所用变压器的容量不得小于下面计算的数值。

$$P_s = \sqrt{3} U_e I = 1.73 \times 400 \times 342 \times 10^{-3}$$

$$=236.7(kVA)$$

(三)试验接线、操作与测量

1.试验接线

进行铁损试验最简单的接线方式,见图7-2-58,将励磁线圈W_1缠绕在定子铁芯断面上,在与其成90°处另缠绕一测量线圈W_2,并将电气仪表接于回路中,以便测量需要的数据。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

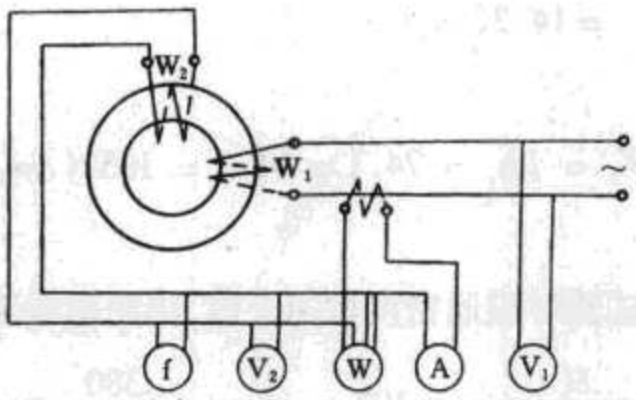


图 7-2-58 定子铁损试验接线图

对于定子铁芯已嵌入线圈的定子铁芯试验，定子绕组应用不小于 50mm² 截面的导线接地。

2.导线的选择

选择导线时，励磁电流值应为导线额定电流值的 50%～70%，禁止使用铅皮或铠装电缆作导线，导线绝缘应良好。测量线圈可用较细导线，其缠绕圈数应根据功率表上电压线圈允许值确定。测量线圈放置在与励磁线圈成 90°方位的目的，是因为该处的磁通密度大致为平均值。利用测量线圈的电压接至功率表所测功率较接励磁线圈电压准确。

3.试验操作与测量

(1)用不小于 50mm² 的导线将发电机定子机座接地。

(2)按选定的导线和接线方式进行接线。接线时励磁导线不应触及定子铁芯(可用绝缘材料隔开)，尽可能缠绕在不包括机座在内的定子有效铁芯上。

(3)可按定子接线图沿圆周编定槽号，再沿纵向从上向下编定齿号。

(4)在定子铁芯上、下端的背部及齿部各放一温度计，记录铁芯的初温和室温。温度计可用热电偶温度计或酒精温度计，不可用水银温度计。温度计的球部与被测点应紧密接触。

(5)详细复查接线，然后合上电源开关，加入励磁电流，开始试验。通电开始应用高斯计实测磁通分布情况，在磁通密集的地方(如合缝处、齿部和背部)加放温度计，并作温度记录。每隔 10min 记录一次电压、电流、周波、功率以及有关棱齿等部位的温度。

(6)通电 10min 后，以手或半导体点温计触摸定子铁芯，检查各部温度。在最热和最冷处必须加放温度计，检查各处发热情况，重点观测过热处的温升。

(7)试验时间为 90min，记录 10 次即可切除电源，结束试验。

(8)在整个试验过程中，应随时检查各部发热情况，如发现有新的过热处，应立即加装温度计。如发现有冒烟或过热严重现象，应立即停止试验，并对冒烟或过热严重处作好标记，查明原因并作处理。

(9)通电后，如发现平均磁通密度 B 不符要求，需要改变励磁线圈的匝数时，新的励磁

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

电流 I_2 按下式估算为

$$I_2 \approx \frac{W_1^2}{W_2^2} I_1$$

式中 W_1、I_1——改变前的励磁线圈的匝数及电流；

W_2、I_2——改变后的励磁线圈的匝数及电流。

4.注意事项

(1)励磁线圈必须绝缘良好，避免因导线绝缘不良时，对地短路的电弧烧坏铁芯。

(2)制定专门安全措施，防止金属工具、杂物等落入发电机中，并严防触电或烫伤事故(如两手不能同时触摸铁芯的上下端等)。

(3)试验时除用手摸温度外，还应仔细地眼观耳听，以发现铁芯松动和通风沟中残存有金属杂物或固定螺栓不够紧等隐患。

(四)试验结果的整理与判断

1.单位铁损的计算

铁芯试验结束后，应根据测量结果计算单位铁损。

(1)试验时的实际磁通密度 B 按下式计算为

$$B = \frac{45U_2}{W_2 F_i}(T)$$

式中 W_2——测量线圈的匝数；

U_2——测量线圈测得的电压，V。

(2)折算到 10000 高斯时的功率损耗为

$$P_{10} = \frac{1}{B^2} P$$

式中 P_{10}——折算到 1T 时的功率损耗，kW；

P——实测的功率损耗，kW；

B——实测磁通密度平均值，T。

(3)定子铁芯的有效重量为

$$G = \pi D_p F_i \gamma \times 10^{-3}$$

式中 G——定子有效铁芯总重，kg；

γ——铁芯的比重，为 7.8kg/cm^3；

F_i——铁芯断面积，cm^2；

D_p——铁芯平均直径，cm。

(4)折算到 1T 时的单位铁损为

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$\Delta P_{10} = \frac{P_{10}}{G} \times 10^3 (W/kg)$$

例 试验测得最大有效功率 P = 163.2kW，磁通密度平均值 B = 0.9907T，定子铁芯有效面积 $F_i = l_i h_j = 156.7 \times 16.75 = 2625cm^2$，定子铁芯平均直径 $D_p = \frac{D_a + D_i}{2} = \frac{1262 + 1190}{2} = 1226cm$，求定子铁芯的单位铁损和有效总重。

解 定子总铁损

$$P_{10} = \frac{1}{B^2} P = \frac{163.2}{(0.9907)^2} = 166.28(kW)$$

定子铁芯有效总重

$$G = \pi D_p F_i \gamma = \pi \times 1226 \times 2625 \times 7.8 \times 10^{-3}$$
$$= 78.82 \times 10^3 (kg)$$

定子铁芯单位铁损

$$\Delta P_{10} = \frac{P_{10}}{G} \times 10^3 = \frac{166.28 \times 10^3}{78.82 \times 10^3} = 2.11(W/kg)$$

2.最高齿温差的换算

$$\Delta t = \frac{1}{B^2}(t_1 - t_2)(℃)$$

式中 t_1——最高齿温，℃；

t_2——最低齿温，℃。

3.最高铁芯温升的换算

$$\Delta\theta_{10} = \frac{1}{B^2}(t_1 - t_0)(℃)$$

式中 t_0——铁芯的初始温度，℃；

t_1——最高齿温，℃。

4.判断标准

在铁芯试验中如发生下列情况之一者，即认为铁芯不合格(折算到 1T)：

(1)在 90min 的试验中，铁芯齿的最高温升($\Delta\theta_{10}$)不得超过 45℃(新机及运行 20 年以下者，一般不超过 25℃)。

(2)在 90min 的试验中，各校齿间的最大温差(Δt_{10})不得超过 30℃(新机及运行 20 年以下者，一般不超过 15℃)。

(3)经过计算得到的单位铁损(ΔP_{10})应该小于所规定的数值，见表 7－2－1。若不知道硅钢片的品种，则以制造厂提供的数据为准。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 7-2-1　部分国产硅钢片的单位损耗及叠压系数

硅钢片品种		新牌号	老牌号	厚度(mm)	1T时的单位损耗(W/kg)		叠压系数(%)
					标准值	允许值	
热轧硅钢片		DR315—50	D42	0.50	1.35	1.76	91
		DR290—50	D43	0.50	1.20	1.56	91
			D42	0.35	1.15	1.50	90
			D43	0.35	1.05	1.37	90
冷轧硅钢片	无取向		W32	0.50	1.60	2.08	95
			W33	0.50	1.40	1.82	95
			W32	0.35	1.25	1.63	94
			W33	0.35	1.05	1.37	94
	单取向		Q3	0.35	0.70	0.91	95
			Q4	0.35	0.60	0.78	95
			Q5	0.35	0.55	0.72	95
			Q6	0.35	0.44	0.57	95

经过试验，如有(1)、(2)两项中的任一项不合格时，均需将定子有效铁芯的发热部分重新绝缘。如第(3)项不合格，则需全部进行处理。

(五)关于大直径电机定子铁芯试验问题

对于定子铁芯直径较小(<5m)的电机，做铁芯试验时漏磁影响不十分严重，用上述方法试验能满足精度要求。但对于大、中型水轮发电机的定子，尤其是低水头、低转速者，一般都具有相当大的直径。例如中水头 15000kW 的机组，直径为 5.5m；低水头 36000kW 的机组，直径为 9m；低水头 60000kW 的机组，直径为 13.5m；中水头 100000kW 的机组，直径为 8.5m；中水头 150000kW 的机组，直径为 12.5m。对这样大直径的定子铁芯进行试验时，如果励磁线圈按集中布置，由于严重的漏磁现象，使得在电机巨大的圆周上的磁通密度的分布极不均匀。我们知道，温升大致与磁密的平方(B^2)成正比。因而将出现温升沿圆周分布极不均匀的现象，给测试和判断都带来了困难。如果将励磁线圈沿圆周均匀分布，在实现上也比较困难。因此，对于直径在 5m 以上的定子铁芯，如励磁线圈采用集中布置方式进行铁芯试验，则必须进行修正。

虽然目前尚无标准的修正方法，但可以按照下面的两个实例所推荐的方法进行修正。

电机甲的数据：容量为 36000kW，定子铁芯外径为 9m，转速为 107r/min，定子铁芯内径为 8.42m，铁芯长度为 0.95m。

电机乙的数据：容量为 150000kW，定子铁芯外径为 12.5m，转速为 100r/min，定子铁芯内径为 11.9m，定子铁芯长度为 2m。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

励磁线圈集中缠绕，接线见图 7－2－58。从该处起，沿圆周以机械角度分成若干等分。励磁线圈接通电源后，在等分的各点，分别测取一匝的感应电势，并根据磁通密度的计算公式算出各点的磁通密度，见表 7－2－2(电机甲)和表 7－2－3(电机乙)。

表 7－2－2　　电机甲的磁通分布

圆周位置(°)	0	30	45	60	90	120	135	150	180
一匝电势(V/匝)	26.5	19.5	16.9	16.7	15.3	14.7	13.9	13.7	13.6
磁通密度 B(10^{-4}T)	11330	8325	7230	7140	6540	6050	5935	5840	5815

表 7－2－3　　电机乙的磁通分布

圆周位置(°)	0	22.5	45	60	90	135	180
磁通密度 B(10^{-4}T)	10700	8740	8140	7520	7160	6820	6730

把沿圆周分布的各点的磁通密度曲线，见图 7－2－59(电机甲)和图 7－2－60(电机乙)，将曲线积分取其平均值 B_P，B_P 与曲线的交点 N 即为定子圆周上的实际磁通密度刚好等于平均磁通密度 B_P 的位置。电机甲 N 点在 60°处，电机乙在 59°处。

测量线圈 W_2 应绕在 N 处，这时表针指示的损耗 P 即为对应 B_P 时的损耗。然后按式 $P_{10}=\frac{1}{B^2}P$ 求出折算到 B＝1T 下的损耗，各点的温升应根据各点的 B 值，按式 $\Delta\theta_{10}=\frac{1}{B^2}\times(t_1-t_0)$℃求出折算到 B＝1T 下的温升。

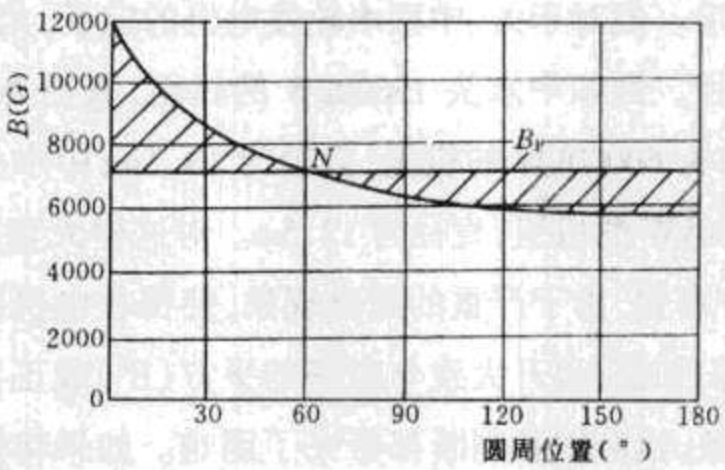


图 7－2－59　36000kW 机组定子铁芯圆周磁通密度的分布曲线

例　以电机甲为例，铁损试验结果如下(励磁线圈 13 匝，测量线圈 9 匝，绕于 60°处)：

空载电源电压为 396.5V；

接通负载之后实测各电量，励磁线圈电压为 349V，励磁电流为 307A，频率为 50Hz；

测量线圈测得的电压 U_2＝155.2V；

功率损耗(未计电压比时)P_c＝14.4kW。

求温升热点。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

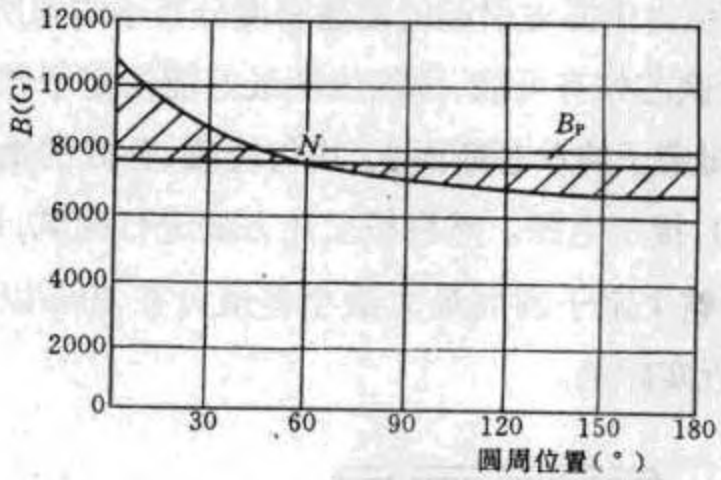


图 7－2－60　150000kW 机组定子铁芯圆周磁通密度的分布曲线

解　磁通密度

$$B = \frac{45U_2}{F_iW_2}$$

$$= \frac{45 \times 155.2}{1052 \times 9} = 0.7376(T)$$

铁芯有效重量

$$G = \pi D_p F_i \gamma \times 10^{-3}$$

$$= 3.14 \times 885.8 \times 1052 \times 7.8 \times 10^{-3}$$

$$= 22823(kg)$$

功率损耗(将电压比考虑进去后)

$$P = P_C \frac{W_1}{W_2} = 14.4 \times \frac{13}{9} = 20.8(kW)$$

$$P_{10} = \frac{1}{B^2}P = \frac{20.8}{(0.73776)^2} = 38.2(kW)$$

单位铁损

$$\Delta P = \frac{P_{10}}{G} \times 10^3 = \frac{38.2 \times 10^3}{22823} = 1.7(W/kg)$$

通电 90min,各点温升实测值及折算值,见表 7－2－4。

表 7－2－4　　各 点 温 升 值

圆周位置(°)	0	30	60	90	120	135	180
实测温升 $\Delta\theta$(℃)	8.5	4.0	3.5	3.5	2.2	2.9	1.5
折算后温升 $\Delta\theta_{10}$(℃)	6.6	5.8	6.9	6.8	6.0	8.24	4.4

由表 7－2－4 可见,实测温升在圆周位置 0°处最高,但折算到 1T,真正的热点不在 0°处,而是在 135°处。可见未经换算的温升实测值往往掩盖了真实温升的热点所在位置,所以必须进行换算修正。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

由上述可见，为了避免由于漏磁引起的磁通密度分布不均匀所带来的误差，对直径大于5m的水轮发电机定子铁芯如有可能，励磁线圈最好能沿定子圆周均匀分几处缠绕，见图7-2-61。在一个六瓣定子的铁芯断面上，均匀缠绕，各处的励磁线圈串联或并联后，引6个励磁线圈($L_1 \sim L_6$)，接于电源。然后按上述方法进行测试，计算即可。这样可使磁通密度分布大大改善，沿整个定子圆周最大最小差值可在10%以内，因而测量的励磁功率和计算的铁损值是接近实际的。

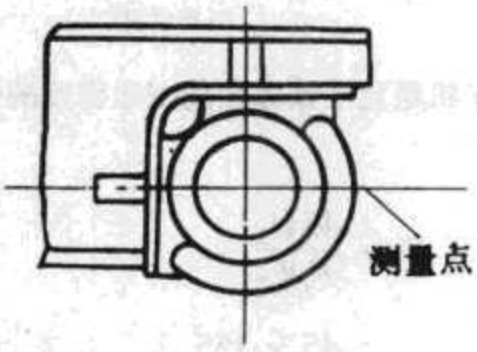


图7-2-61 六瓣定子铁损试验接线图

同理，若采用铁损法对大直径水轮发电机进行加温干燥时，同样应该注意到这种因漏磁而引起的发热不均匀的现象。此时，应将励磁线圈沿圆周均匀分布在三处以上。例如150000kW机组，一个励磁线圈时最大温升值与最小温升值的比值为2.53倍，两个励磁线圈时就降低到1.49倍。

(六)定子铁芯齿面发热的分析

定子铁芯在压装过程中，需反复压紧，鸽尾槽上的漆膜多被定位筋刮伤而使铁芯轭部呈不同程度的短路状态。因此，要求定子铁芯片间的绝缘完好，尤其是定子齿部不应有片间短路。

当定于铁芯某一齿段的整个齿面全部短路时，在运行磁通的作用下，短路的齿面将出现两项电流：第一是定子轭部圆周方向的磁通在此段感应的电势所建立起来的短路环流i_H，见图7-2-62；第二是来自转子极面、垂直进入短路齿面的径向磁通所产生的涡流i_w，见图7-2-63。i_H和i_W在齿面分别产生环流损耗P_H和涡流损耗P_W，而使齿面发热。

根据理论分析计算与实际的测量，证实引起故障齿面发热的主要原因是圆周方向磁通产生的短路环流i_H，而径向磁通引起的齿面涡流i_W其量极微，可以不予考虑。虽然运行中的齿磁密较轭磁密略高，其径向磁通产生的齿面涡流损耗仍可忽略不计。

根据上面的分析，可知道采用本试验所运用的产生圆周方向磁通的方法，能有效地测出在运行中齿面发热的故障齿段，直观而有效。此法也是测量已压装成型的定子铁芯单位公斤损耗和B——H特性的很好的方法。它可以比较准确地判断铁芯的材料质量和特性。但是运用此法寻测故障齿段有局限性，因为只有在齿面和背轭同时存在短路时才会

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

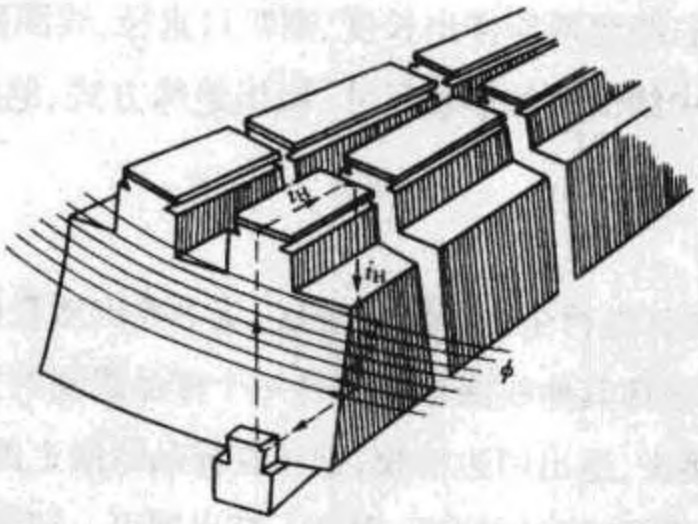


图 7－2－62　短流环流 i_H 的产生

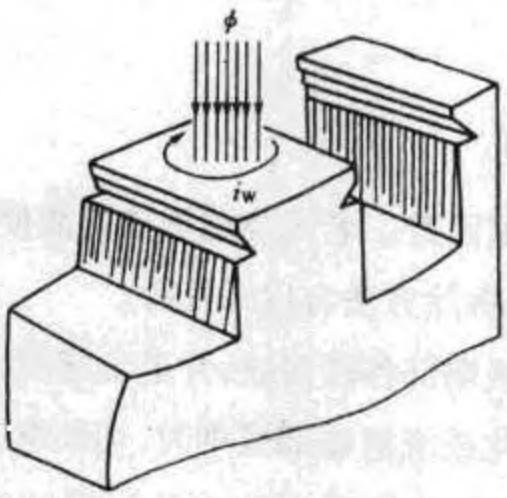


图 7－2－63　齿面涡流 i_W 的产生

产生短路环流 i_H，如果仅有齿面短路而背轭暂时还未严重短路时，i_H 就不会产生，齿面也不会发热。这种情况实际上是存在的。这也就是在有的铁芯试验中，虽然定子线槽中有金属异物，但在试验时该处并未产生高温的原因。

第五节　定子绕组的更换

一、定子绕组的拆除

发电机运行多年后，绝缘已经老化的统组就不能用修补的方法进行修复。要使发电机继续运行，就需要将统组全部更换。在更换绕组过程中，第一步是拆除旧绕组，其工艺过程如下所述。

(一)记录数据

在发电机绕组拆除之前，应记录如下数据：名牌数据、槽数、绕组节距、绕组联结方式、

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

并联路数、画出接线草图、绕组两端伸出长度、喇叭口直径、线圈匝数、每槽导线数、导线并绕根数、导线规格、绕组中线圈匝的形状尺寸、绕组绝缘方式、绝缘材料的规格和材质、槽楔的规格及材质等。

(二)选择样品线圈

在拆除绕组时,应对其进行全面仔细的观察,从中找出质量比较好的一个线圈作为样品线圈。在拆除中宁可损坏其他线圈也要保持一个样品线圈的完整而不变形。对于双层绕组,先剪断样品线圈接头,退出两边槽楔,把压在样品线圈上的其他绕组端部逐根剪断,从另一端逐根抽空。如果是成型硬绕组,用锤子打出即可。清理好槽中的绝缘以后,再把样品线圈慢慢地取出,力求保持其原形不变。

(三)拆除线圈

1.加热拆除线圈

绕组在冷态时较硬,拆除很困难。老式绕组加热后能使绝缘软化,因此采用加热的方法拆除线圈就容易得多。加热拆除方法有以下几种。

(1)电流加热法拆开各绕组端部各联接线,并退出槽楔,在绕组中通入直流电加热(一般用直流电焊机)。当绝缘软化或绕组端部冒烟时,切断电源,迅速拆除绕组。

(2)用烘箱、煤球炉等方法加热拆除用此方法时要注意温度不宜太高,一般控制在130℃以下,以免损伤铁心漆膜。

2.拆除全部绕组

样品线圈拆除后,对于不做样品的线圈就无须顾及到线圈的形状和完整。因此,将槽楔退出后,只要不损伤铁心,用钢丝钳拉、棍棒撬或用榔头敲打,将线圈从槽中全部取出就行。绕组全部拆除后,清理好铁心槽,槽内不应有粘着的绝缘和毛刺及凸出的颗粒。要使每一槽平整、光滑和清洁。在拆除线圈过程中,要随时核对上述记录的有关数据,确保数据正确。

二、线圈制造

水轮发电机定子通常采用圈式线圈或条式线圈。

(一)圈式线圈的制造

圈式线圈一般由多匝组成,每匝由一股或多股并联的双玻璃丝包扁铜线(SBECB)、单玻璃丝包聚酯漆包扁铜线(QZSBCB)或双玻璃丝包聚酯漆包扁铜线(QZSBECB)平绕成梭形、棱形和梯形三种。其工艺过程,见表7-2-4。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 7-2-4　　多匝成型线圈工艺过程

序号	主要工序及说明	主要设备及工装	备注
1	绕线 绕成梭形、棱形或梯形线圈	绕线机，绕线模，对焊机等	
2	包保护带	包带机	
3	搪锡	刮头机，锡锅	
4	张形	张形机	
5	整形	整形模	
6	匝间绝缘胶化处理	烘压模、冷压模	高压线圈
7	检查试验	匝间短路检查设备	高压线圈
8	包引出线绝缘		
9	包对地绝缘 a)连续式绝缘 b)复合式绝缘	包带机 热滚卷机	高压线圈
10	热压成型		高压线圈
11	检查试验 尺寸检查、绝缘试验、介质损耗角正切(tanσ)测量	试验设备	
12	防电晕处理		6kV 以上线圈

多匝成形线圈结构尺寸，见图 7-2-64。其制造中的有关问题，分述如下。

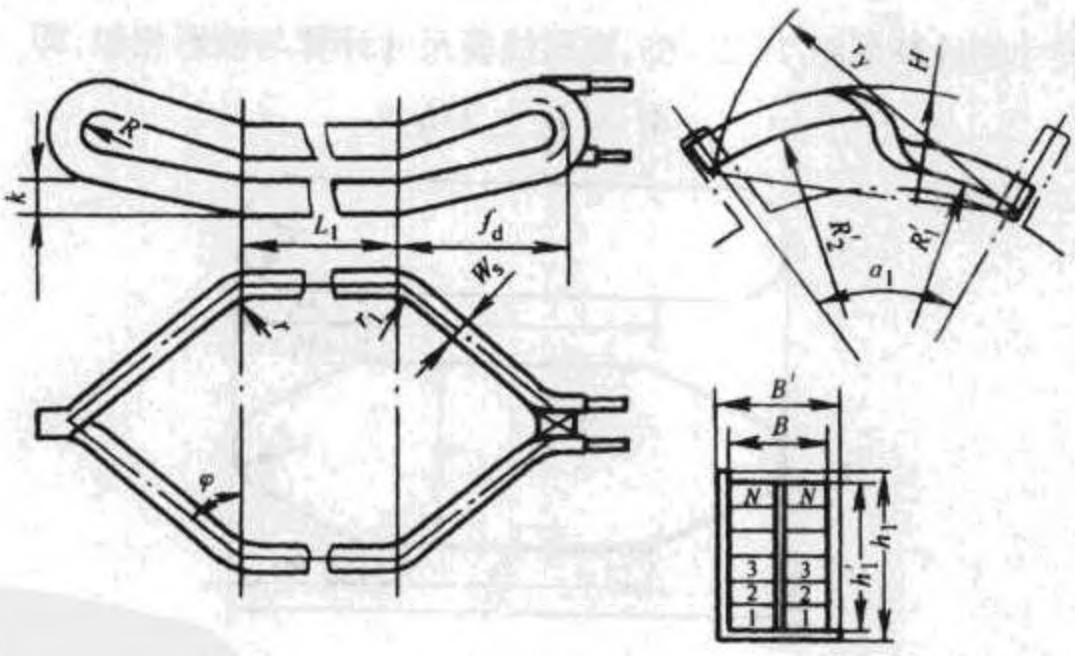


图 7-2-64　多匝成型线圈结构尺寸

1.绕线模的制造

圈式线圈的绕线模是根据线圈结构尺寸用计算法或作图求得的。

(1)梭形线模尺寸的计算根据图 7-2-64 圈式线圈结构，其模端尺寸按下式计算，即

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$M_0 = \sqrt{f_d^2 + \frac{1}{4}\tau_y^2 + (H - R - h_1)^2}$$

$$M_1 = \frac{1}{90}\pi R_1 \sin^{-1}\left(\frac{M_0}{2R_1}\right)$$

式中 f_d——端部伸长；

τ_y——线圈平均宽度；

H——成型绝缘后，线圈放在平面上所测得的高度；

R——鼻部圆弧半径；

h_1——线圈直线部分绝缘后的高度；

R_1——上层边端部圆弧实际半径，它与其投影半径 R_1' 的关系是：$R_1' = R_1/\cos^2\varphi$，φ 为直线边与斜边夹角。

见图 7－2－65a，梭形模心总长为：

$$M = L_1 + 2M_1$$

式中

$$L_1 = l + 2d_1$$

l——铁心长度；

d_1——线圈伸出铁心直线段的长度。

当 R_1 很大，即上层端部近似直线时，可认为 $M_1 \approx M_0$，则上式为

$$M = L_1 + 2M_0$$

(2)棱形线模尺寸的计算见图 7－2－65，棱形线模尺寸计算与梭形相似，即

$$M = L_1 + 2M_2$$

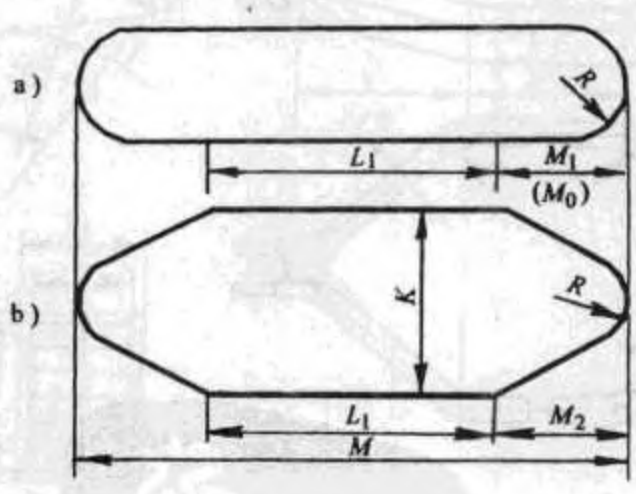


图 7－2－65 梭形与棱形线模尺寸
a)梭形；b)棱形

式中 $M_2 = \sqrt{M_1^2 + \frac{1}{4}K^2}$，$M_1$ 和 M_0 的计算与棱形相同。同样，当 R_1 很大(即端部斜边近似直线)时，也认为 $M_1 \approx M_0$，其中，K 为棱形模宽度，一般取 K = 80mm。

在采用棱形线模且线圈匝间垫绝缘条时，则

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

$$M_0 = \sqrt{(f_d - \delta_i N)^2 + \frac{1}{4}\tau_y^2 + (H - R - h_1 - \delta_i N)^2}$$

式中　δ_i——绝缘条厚度；

N——线圈单排数。

(3)梯形线模尺寸的确定梯形线模尺寸用作图法确定比较简单，见图 7－2－66。由于线圈的两半所跨的弧度相等，且端部弧形的半径 $R_2' > R_1'$，因此 $A_2 > A_1$，且 $s_2 > s_1$。画梯形线模的模心时，模心下边的长度等于线圈内层半个线圈边的展开长，即($L_1 + 2d_1 + 2s_1$)的尺寸之和，从点 B_1、B_1'、B_2、B_2'作垂直于模子底边的直线；以 O、O′为圆心，以线圈(线圈在图中未画出)鼻部圆弧内半径 R 为半径画圆弧；以 C 和 C′为圆心，s_2 为半径画圆弧，与 BB′的垂直线相交于 D、D′，联接 DD′，即构成梯形模心的轮廓。

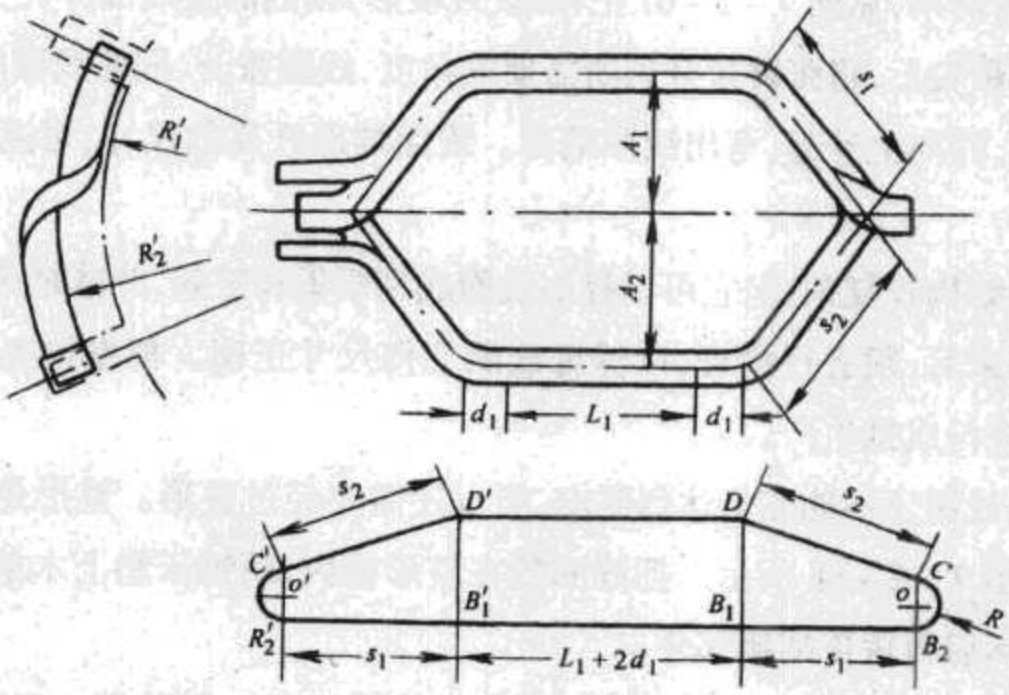


图 7－2－66　梯形线模尺寸的确定

2.绕线

圈式线圈绕制时，导线由导线夹紧装置拉紧，导线头嵌在模心引线槽内，引线长度须符合图样要求，并将头部导线敲平，紧贴于线模侧面。按技术要求垫好匝间绝缘条或包扎好匝间绝缘。单排导线只有匝间绝缘，对于双排导线，还应有排间绝缘。为了提高匝间绝缘的可靠性及槽的有效利用率，可采用高强度绝缘电磁线，匝间就可以不用绝缘垫条或包扎绝缘带。线圈在绕制过程中，应防止线匝之间存在间隙，还得特别注意导线绝缘损伤情况，发现导线绝缘损伤，要随即用同级绝缘修补好。导线中间断头采用对焊机将接头焊牢。并修补平整、包好绝缘。接头最好不要在铁心槽内直线部分，而应放在端部斜边部分。线圈绕到规定匝数后，在模子上用扎绳扎牢，然后将线圈从模子上卸下。

3.搪锡

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

线圈端部接头若采用铜焊(或银铜焊)只需刮头;若采用锡焊,还必须预先将线头搪锡,以便于焊接。刮头时,先把线头整平直,单个生产时可用手工刮,成批生产时,用刮头工具或在钢丝轮刮头机上清除纤维绝缘层,漆包线线头可采用化学药剂除去漆膜。

搪锡的焊剂采用松香酒精溶液(严禁使用酸性焊剂)。先把所需搪锡的部分(比焊接部分加长 5 ~ 15mm)浸在焊剂内,然后放入锡锅,锡液的温度保持在 250 ~ 300℃,浸搪 5 ~ 20s(较粗的导线浸搪时间较长),取出后立即揩去多余焊锡,使导线仅留很薄的一层光亮锡层。如果一次搪不上,可以重复几次,必要时可将未搪上部分用砂纸打磨干净后再搪,直到完全搪上为止。

4.张形和整形

张形和整形是圈式线圈制造的关键工序。张形是在张形机上进行的。张形机类型很多,手动式的结构简单,见图 7 - 2 - 67 把梭形(或棱形)线圈的直线部分夹于夹钳上,线圈端部装于两端的鼻尖上,将张臂拉开到所需要的角度,线圈张开,同时线圈的长度缩短,两端尖便互相靠拢,并向上升起,弯出线圈端部。线圈端部升高的尺寸,可通过调整端夹座的位置来获得。

电动张形机结构较复杂,但它可以提高线圈成型质量和工效,并减轻劳动强度。

首件制造出来后,须进行检查,以保证线圈几何尺寸正确。根据检查情况调整张形机,待合格后再进行成批生产。

经过张形的线圈还不能完全达到要求,所以还需要经过整形。整形是在整形模内进行的,整形模如图 7 - 2 - 68 所示。把线圈放在整形模内,用锤子垫上木条敲打、夹紧,先矫正直线部分,然后再矫正端接部分。

在张形及整形前,须平包一层保护带,以保护线匝绝缘。保护带一般采用白布带,为了节约工业用棉,目前许多工厂已改用聚氯乙烯热收缩带作保护带。这种热收缩带不用包得很紧,经 80 ± 5℃加热 6 ~ 10min 后,即可自己缩紧,用后还可以回收,因此比白布带要好。

还要指出:高压线圈除了第一次整形外,还须进行第二次,甚至第三次整形。这些整形(亦称复形)工序都是必不可少的。必须依靠整形模使线圈的几何形状一致,特别是树脂胶绝缘线圈,必须在胶未完全聚合固化前将线圈的几何形状校正准确。模压后的工序以及工序间的搬运,都要防止线圈变形。热压后,胶已完全聚合固化,若再复形,复形量过大,易使绝缘受损,影响其使用寿命,甚至造成高压击穿。

5.线圈绝缘

线圈绝缘结构取决于绕组工作电压的高低和绝缘材料的耐热等级。绝缘材料的耐热等级和极限使用温度,常用绝缘材料,见附录 A。扁铜线绝缘,见表 7 - 2 - 5。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

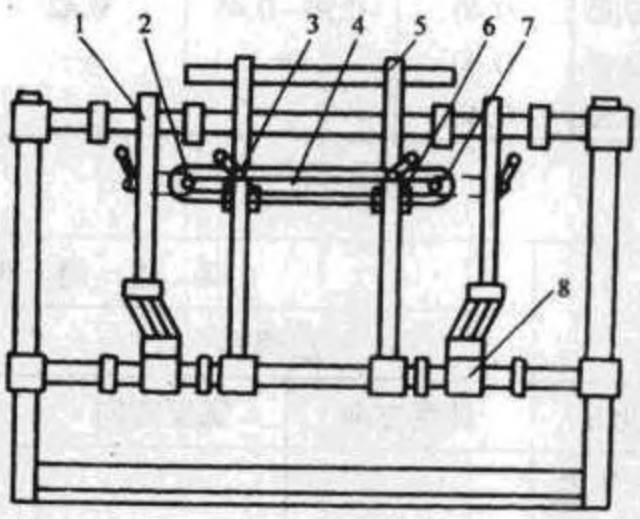


图 7－2－67　手动式张形机示意图

1—端夹支架；2—插销；3—前夹头；4—线圈；5—拉臂；6—后夹头；7—端夹头；8—端夹底座；

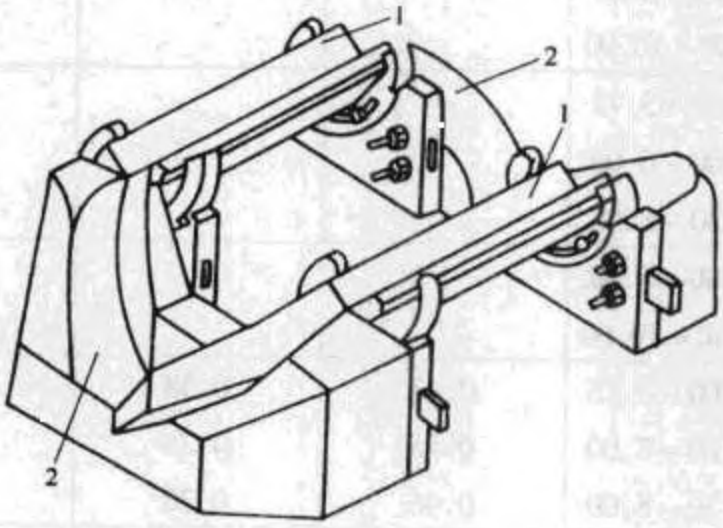


图 7－3－68　整形模

1—直线部分整形模；2—端部整形模

表 7－2－5　　玻璃丝包铜线双边绝缘厚度(mm)

1.双玻璃丝包扁铜线

导线标称尺寸		双边绝缘厚度					
		双玻璃丝包扁铜线 SBECB		单玻璃丝包聚酯漆包扁铜线 QZSBCB		双玻璃丝包聚酯漆包扁铜线 QZSBECB	
高度 a	宽度 b	高度方向	宽度方向	高度方向	宽度方向	高度方向	宽度方向
0.90～1.90	2.00～3.75	0.28～0.35	0.25	0.24～0.37	0.29	0.34～0.47	0.37
	4.00～6.00	0.30～0.37	0.25	0.25～0.39	0.29	0.36～0.50	0.37
	6.30～8.00	0.31～0.39	0.25	0.26～0.40	0.29	0.38～0.52	0.37
	8.50～14.00	0.34～0.43	0.25	0.27～0.42	0.29	0.40～0.55	0.37
2.00～3.75	2.80～6.00	0.30～0.38	0.31	0.25～0.39	0.33	0.36～0.51	0.43
	6.30～10.0	0.33～0.41	0.31	0.27～0.41	0.33	0.40～0.54	0.43
	10.00～14.00	0.35～0.44	0.31	—	—	—	—
	15.00～18.00	0.37～0.46	0.31	—	—	—	—

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

4.00~5.60	5.60~10.00	0.36~0.45	0.40	0.30~0.45	0.42	0.43~0.58	0.52
	10.00~14.00	0.38~0.48	0.40	—	—	—	—
	15.00~18.00	0.42~0.52	0.40	—	—	—	—

2.单玻璃丝包聚酯薄膜线

薄膜厚度	导线标称尺寸		双边绝缘厚度			
			一层薄膜		二层薄膜	
	高度 a	宽度 b	高度方向	宽度方向	高度方向	宽度方向
0.03	0.90~1.90	2.00~3.75			0.48	0.41
		4.00~6.00			0.49	0.41
		6.30~8.00			0.50	0.42
	2.00~3.75	2.80~6.00			0.50	0.45
		6.30~10.00			0.52	0.45
0.04	0.90~1.90	2.00~3.75			0.56	0.49
		4.00~6.00			0.57	0.49
		6.30~8.00			0.58	0.49
	2.00~3.75	2.80~6.00			0.58	0.53
		6.30~10.00			0.60	0.53
0.05	0.90~1.90	2.00~3.75	0.43	0.38		
		4.00~6.00	0.45	0.38		
		6.30~8.00	0.46	0.38		
	2.00~3.75	2.80~6.00	0.46	0.41		
		6.30~10.00	0.48	0.41		

注:一层薄膜适用于匝间工作电压小于60V;二层薄膜适用于匝间工作电压大于或等于60V。

圈式线圈按电压等级可分为高压和低压两种。一般高压线圈是指额定电压为3000V及以上的线圈;低压线圈是指额定电压为500V及以下的线圈。

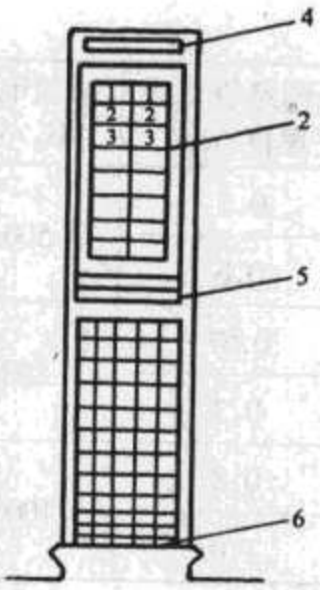
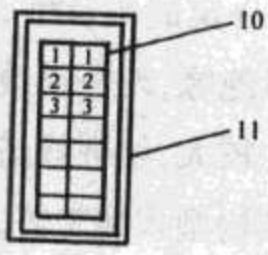
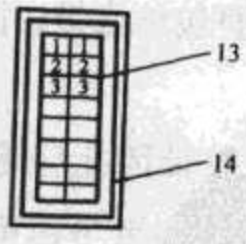
对于电压不大于500V的电机绝缘较简单。用于半开口槽的线圈,一般在嵌线时,槽内就垫对地绝缘。线圈制造时,直线部分不另加绝缘,仅在端部加包绝缘。用于开口槽的低压线圈,对地绝缘可以在槽内垫绝缘,也可以包绕在线圈上,其绝缘规范,见表7-2-6。

对于3000V及以上的高压线圈,都是在线圈制造阶段包好对地绝缘,并进行绝缘处理。其绝缘规范见附录B。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 7-2-6 500V 绝缘规范 (mm)

部位	示意图	项	名称	绝缘方法	双面绝缘厚度 宽度方向 单排	双面绝缘厚度 宽度方向 双排	双面绝缘厚度 高度方向
槽部		1	导线松胀量和漆量		0.10	0.20	0.03x
		2	0.14×25 环氧玻璃粉云母带 5438-1	半叠包 ≥5 层	2.30	2.30	2.30
			线圈槽部绝缘总厚度		2.40	2.50	(2.30+0.03x)×2
		3	线圈公差		±0.20	±0.20	±0.30
		4	0.5 环氧酚醛玻璃布极 3240	垫 1			0.50
		5	2.0 环氧酚醛玻璃布板 3240	垫 1			2.00
		6	0.5 环氧酚醛玻璃布板 3240	垫 1			0.50
		7	装配间隙		0.20	0.20	0.30
		8	槽允许差		0.40	0.40	0.40
			槽部绝缘总厚度		3.20	3.30	8.90+0.06x
端部		9	导线松胀量		0.20	0.30	0.03x
		10	0.14×25 环氧玻璃粉云母带 5438-1	半叠包 4 层	2.00	2.00	2.00
		11	0.1×25 涤纶丝带	半叠包 1 层	0.40	0.40	0.40
			线圈端部绝缘总厚度		2.60	2.70	2.40+0.03x
鼻端部		12	导线松胀量		0.20	0.30	0.05x
		13	0.14×25 环氧硼胺玻璃粉云母带 D04-1	半叠包 3 层	1.50	1.50	1.50
		14	0.1×25 涤纶丝带	半叠包 1 层	0.40	0.40	0.40
		15	搭接区偏大		0.40	0.40	0.40
			线圈鼻端部绝缘总厚度		2.50	2.60	2.30+0.05x

注：x 表示线圈的高度股线根数。

对于高压线圈除了对地绝缘外，还要进行股间绝缘、排间绝缘和匝间绝缘。股间绝缘和排间绝缘与匝间和对地绝缘相比，并不显得十分重要。一般依靠电磁线本身的绝缘层就已经足够了，而不必另加绝缘。线圈匝间绝缘的总面积是相当大的，因而出现弱点的可能性也比较大。另外线圈在制造过程中，经绕线、张形、整形、烘压、运输和嵌线等工序均有可能使匝间绝缘受到损伤，而且交流电机定子绕组的匝间短路一经发生，故障就会立即

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

扩大,直至对地击穿。有的因短路电流过大而烧毁绕组,甚至烧毁铁心。再由于匝间绝缘除了承受额定运行的匝间工作电压以外,还会遇到比它大得多的大气过电压和操作过电压,因此要求匝间绝缘有足够的机械强度和电气强度。匝间绝缘的选择可根据首匝可能出现的最大过电压 U_{max} 来选择。U_{max} 值一般应大于匝间工作电压的二十倍,但要小于 $0.35U_N$(U_N 为电机的额定线电压)。匝间绝缘的典型结构说明,见表 7-2-7。

表 7-2-7 圈式线圈匝间绝缘结构及试验电压

首匝冲击电压 U_{max}/V	匝间绝缘结构型式	匝间绝缘双边厚度/mm	试验电压 U_d/V
500~1000	聚酯漆包双玻璃丝包线	0.5	500
	双玻璃丝包线垫 0.17 5432 云母垫条	0.6	
1001~1500	聚酯漆包双玻璃丝包线垫 0.175 432 云母垫条	0.67	800
	双玻璃丝包线隔匝半叠包一层 5438 粉云母带	0.7	
1501~2000	聚酯漆包双玻璃丝包线隔匝半叠包一层 5438 粉云母带	0.8	1000
	双玻璃丝包线,每匝半叠包一层 5438 粉云母带	1.0	

在包扎对地绝缘以前须对股间及匝间绝缘进行热模压胶化。胶化的目的是:①使导线排列整齐,并模压成整体,提高机械强度;②消除匝间及股间间隙。

高压线圈的对地绝缘要求紧密结实,并富有热弹性,端部还应有一定的柔软性,以减少嵌线时对绝缘的损伤。在过去,高压发电机线圈普遍采用沥青云母绝缘,现在已改用环氧粉云母绝缘。环氧粉云母绝缘性能虽优于沥青云母绝缘,但它刚性较大,给嵌线造成一定困难(特别是极数少的发电机),因而目前各厂采用了不同的绝缘结构型式和工艺方法。现分叙如下。

(1)连续式绝缘 连续式绝缘是线圈直线部分和端部采用连续半叠包绝缘带,并经绝缘处理而成为连续的绝缘整体。

连续式绝缘一般采用黑云母带或多胶环氧粉云母带。对于 B 级胶带因扎后需要进行热压成型将多余的环氧胶压出,使绝缘层团化粘合成为一体,所以包扎时要考虑留有适当的压缩率,保证热压后绝缘层紧密。压缩率过大,会使胶流失过多,线圈的耐压降低和介质损耗增加,并增加胶凝角的清理时间;压缩率过小,绝缘紧密度差,同样会影响线圈绝缘性能。因此,一般中型高压发电机 B 级胶带绝缘线圈模压的压缩率应控制在 20%左右较为适宜。

包带工作过去都用手工,现在一般制造厂都采用包带机包扎,以提高生产效率和包扎质量,并可减轻工人的劳动强度。

(2)混合式绝缘 混合式绝缘是直线部分半叠包 B 级胶带,端部半叠包沥青云母带或

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

玻璃漆布带。

混合式绝缘线圈的直线部分和端部绝缘相接处是薄弱环节。为了避免耐压时接缝处对铁心闪络放电或发电机运行时产生爬电，必须采取锥体相接，或角部加包绝缘等措施。直线部分半叠包B级胶带，开始两层包到斜边$\frac{1}{3}$处，以后几层逐步向斜边成锥体伸长，锥体长度约为80～100mm，以保证搭接处对铁心有足够的距离。采用模压工艺时，端部半叠包黄玻璃漆布带；采用液压工艺时，端部半叠包沥青云母带或黑玻璃漆布带，搭接处必须包平整，不应出现粗胀现象。

一台发电机中绝缘材料的等级应配套使用，不要混用两种不同绝缘等级的材料。如果在维修时因材料配套不全需要代用材料，只能用高等级的材料代用。

绝缘材料厚度的选择对电机的温升，出力、性能及成本均有一定的影响。绝缘材料太薄会使发电机的可靠性降低，而出现匝间短路及对地击穿等故障；绝缘材料太厚则占据不必要的空间，而降低电机的出力。

(3)线圈绝缘处理工艺　线圈包好对地绝缘后，还得进行绝缘处理。其工艺方法有模压、液压及模液压。

模压靠热压模传递热量和压力使线圈绝缘固化成型。线圈先在热模上预热，使胶稍微流动，均匀分布于绝缘层中，此时不加全压，以免将胶挤出，造成线圈内部发空。随着胶粘剂受热聚合，可逐步将压力加到全压，同时校正线圈鼻高和端部尺寸，使线圈达到要求的几何尺寸，并在规定的温度和时间内使绝缘固化成型。然后断开热源，待压模冷却到100℃左右，即可解压卸模。

液压是靠加热的沥青胶在密封罐内传递热量和压力，使绝缘固化成型。线圈包好主绝缘后，用两块“L”形夹板夹紧，使液压后的线圈保持一定的形状和尺寸，且使其表面光滑平整。夹板材料可用1.5mm薄钢板，夹板尺寸为线圈绝缘后设计尺寸。夹板夹紧后还得包密封层。密封层的作用是将沥青胶和线圈绝缘隔绝，同时使其内外形成压力差，将线圈绝缘压成紧密的整体；此外密封层还起脱模作用。密封层由内至外各层的材料和包法如下：

电容纸卷包两层→装“L”形夹板→疏包→层聚酯薄膜→卷包→层聚酯薄膜。

线圈包好密封层后，即可进行液压处理。

模压和液压比较，模压线圈的几何尺寸容易保证，设备简单，但它的缺点是耐压水平较低，所用的工模具较多，生产效率较低。

为了吸取上述两种方法的优点，克服其不足之处，可采用模压、液压相结合的方法。先采用模压，以保证线圈几何尺寸正确，并使绝缘处于半固化状态，以缩短模压时间，然后再液压，以提高绝缘处理质量，因而它兼有全模压和全液压的优点。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

线圈绝缘经过处理后，呈现出半固化状态或全固化状态。半固化是指线圈端部不完全固化，以保持一定的弹性和柔软性，便于线圈嵌放。线圈经过低温真空干燥和模压后，内部空气和挥发物被排除，绝缘紧密，质量也较好，但这样的线圈不能存放过久。全固化是指整个线圈环氧胶聚合固化定型，线圈可以长期存放，因其刚性较大，前后线圈相接处就不能采用吊把方式进行嵌放。

(4)线圈防晕处理高压发电机在通风槽口及端部出槽口处附近的空气容易发生局部电离(辉光放电)，在电离处出现蓝色的荧光，这是电晕现象。电晕不但产生热量，还产生臭氧和氮的氧化物，这些气体会损坏绝缘。当电压达 6000V 时，就可能有电晕现象产生。目前，为了防止产生电晕，各个制造厂根据电压等级及对线圈要求高低采用了不同的防晕结构和措施。一般对主绝缘已固化成型的线圈，先在线圈的直线部分刷低阻半导体漆(电阻率 $\rho_s = 5\times10^3 \sim 5\times10^4\Omega\cdot m$)，然后平包一层无碱玻璃布带或石棉带，包好后再刷一层低阻半导体漆，使玻璃布带或石棉带被漆渗透，在室温下晾干。线圈端部刷中阻半导体漆(表面电阻率 $\rho_s = 5\times10^7 \sim 5\times10^9\Omega\cdot m$)，两种半导体漆须按规定搭接好，然后半叠包一层玻璃布带，再涂刷中阻半导体漆 2 次，待晾干后用特制的电极检查线圈表面电阻，电极对线圈表面的压强约为 $0.1MN/m^2$。用兆欧表测定电阻值，应符合要求。

采用一次成型防晕工艺时，在包完主绝缘后，先在直线部分半叠包一层低阻半导体带，然后在端部半叠包二层中阻半导体带，两种半导体带按规定搭接好。半导体带包好后，外包一层聚四氟乙烯带或聚酯薄膜，然后热压成形。

采用内屏防晕结构时，必须严格保证其位置和尺寸符合规定。

(二)条式线圈的制造

现代中型水轮发电机的定子线圈采用条式线棒的较多。在定子铁心槽中沿高度方向放两个线棒，嵌线后，用钎焊方式将线棒彼此联接起来，组成双层绕组。每个线棒由小截面的单根铜股线组成。线棒中的股线沿宽度方向布置两排，彼此间要进行换位，以降低涡流损耗。

条式换位编织线圈必须首先压出换位弯，然后进行换位编织成型。一般中型水轮发电机的定子线棒的槽部须进行 360°换位，见图 7-2-69。对于容量大的，有的还采用槽部 540°换位。这两种换位结构对于槽部漏磁通所引起的环流电动势均可全部抵消，而 540°换位还可以部分抵消由端部漏磁通所引起的环流电动势。

为了便于弯制换位弯，对于实心股线组成的线棒，换位节距不宜小于股线宽度的 5 倍。压换位弯是一排股线一次压出的，先利用定位板把一排所有股线，按图样要求的顺序，根据换位节距排列要求把股线扁放(而不是平放)，一端紧靠定位板，定位板作成阶梯形，见图 7-2-70。两阶梯之差即为换位节距。然后将排好的股线放在换位机的压模

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

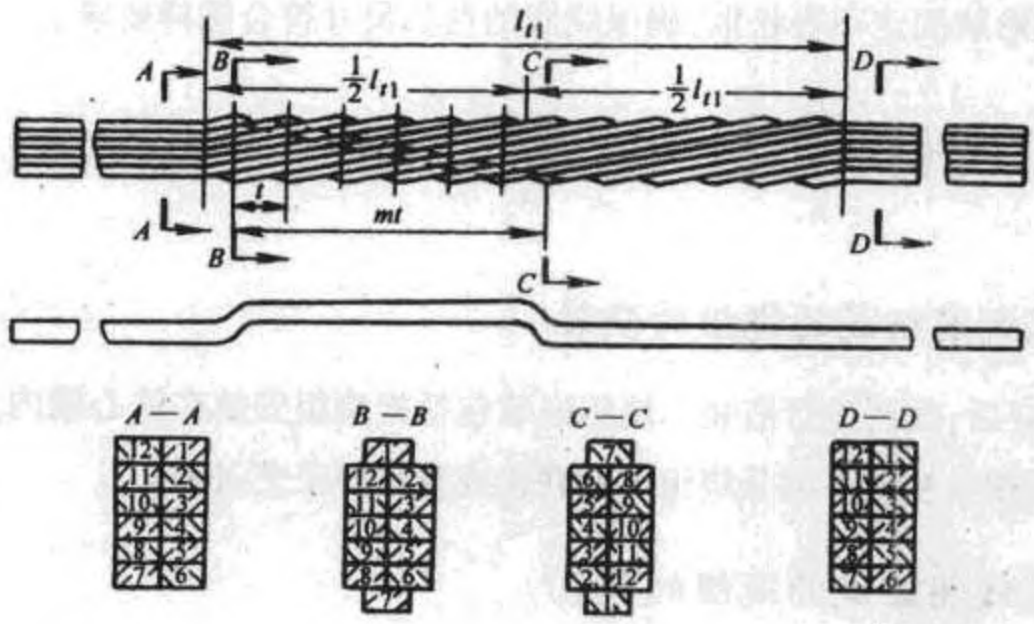


图 7-2-69 定子线棒 360°换位示例(股线数 m=6)

上,一次压出两处的换位弯。

压形时,全排股线要用夹头夹紧,不使股线有相对位移,且要保证两换位弯之间的距离符合图样要求。换位弯压好后,先把一排股线的基准端敲整齐,用夹头夹紧端头,然后进行编织,见图 7-2-71。将编织好的两排股线组合在一起,成为一个完整的条式线棒,按图样要求垫好排间和换位处的绝缘,接着用白布带扎紧,放在专用弯角台上,利用弯角靠模和气动活塞顶杆弯出端部和直线部分的角度。再在专用成型模上弯出端部几何形状。

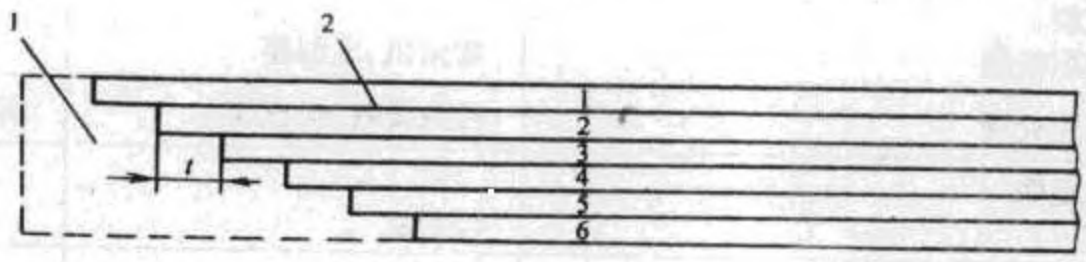


图 7-2-70 压换位弯用的定位板
1—定位板;2—股线

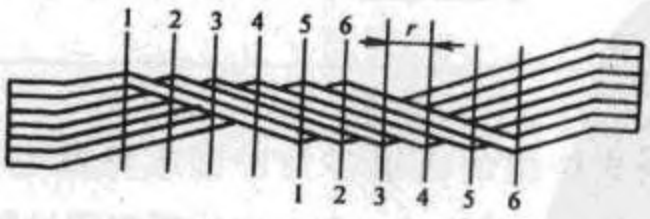


图 7-2-71 一排股线编织示意图

条式线圈绝缘与前述的多匝圈式线圈的绝缘方式基本相同,条式线圈的绝缘规范见附录 C。条式线圈的制造工艺过程,见表 7-2-8。

条式线圈在包对地绝缘之前,要先用填料(环氧漆调瓷粉、胶木粉、石棉粉和云母粉的混合物)将换位处不平的地方填平。然后浸股间漆,并在热压模上通电加热加压使之固

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

化，以便导线的形状固定不再松散，确保线圈的形状尺寸符合图样要求。

三、绕组嵌装

(一)圈式线圈组成的绕组的嵌装

绕组绕制好后，就要进行嵌装。绕组嵌装包括把绕组安放在铁心槽内，整理和绑扎绕组的端部，打槽楔以及把各部分绕组彼此联接成整体等工艺过程。

(二)条式线圈组成的绕组的嵌装

1.绕组嵌装前的准备

为了提高工效，保证绕组的嵌装质量，在嵌装前必须作好如下准备工作。

表 7-2-8　条式线圈一般工艺过程

序　号	主要工序及说明	主要设备及工装	备　注
1	下　料 将带状导线剪断并校直	a)冲剪机 b)自动校直落料机	a)小批生产 b)成批生产
2	搪　锡	刮头机、锡锅	
3	扁弯导条 换位编织线圈压换位弯	换位机及换位模	
4	线圈成型 换位编织线圈	弯角机、成型模	
5	绝缘胶化处理	浸漆设备、烘压模	高压线圈
6	包对地绝缘 连续式	包带机	
7	热压成型 热模压或液压固化成型		
8	检查试验		
9	防电晕处理		6kV 以上线圈

(1)材料准备　采用条式绕组的机组多为中型水轮发电机，其额定电压一般为10500V 或 13800V 高压机组，具有防晕措施。因此嵌线所需的材料为 791 环氧半导体涤纶适形毡(包括 791A 半导体胶、三乙醇胺、聚酯胺树脂、丙酮酒精混合溶剂)、环氧半导体玻璃布板(9332)、环氧半导体漆(130)、环氧粉云母带(5438－B 级)或环氧亚胶粉云母带(D602－1)或环氧桐马玻璃粉云母带(D606－1)(F 级)、无碱玻璃纤维带、环氧灰瓷漆(1361)、灰瓷漆(1321)、银焊片(HIAgCu80－5)、银铜焊条(HIAgCu80－5)、五纬玻璃丝带、涤纶玻璃丝绳、涤纶毛毡、环氧树脂(6101)、活性稀释剂(501)、固化剂(593)、石英粉、丙

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

酮、环氧树脂(618)、环氧气干漆(1504)或841室温固化胶、796绝缘盒填充胶、793室温固化环氧浸清胶、792室温固化环氧胶、801室温固化填充泥，包绝缘盒用的电话纸等。

(2)工具准备　常用的专用工具有：下层线圈压线板、上层线圈压线垫条、压线夹、橡皮锤、木锤、铁锤、剪刀、钢丝钳、绑绳用的穿针等下线工具；风褪、铁槌等打槽楔工具；银铜焊机(或锡焊锅)、电烙铁、气枪等焊接工具，量杯、磅称、电炉、烘箱、盆、搅拌器等浇灌绝缘盒工具。

凡与绕组接触工具，均须圆角，且表面光滑，以免在使用过程中损伤绝缘。

(3)零部件的准备　嵌线的零部件除线圈以外，还有涤纶毛毡条、垫条、槽口垫块、间隔块、槽楔、斜楔、并头块、跨接线、绝缘盒等。

①定子槽楔　为使定子绕组能承受电动力及振动的作用，特别是在突然短路的情况下不致于产生有害的位移和变形，而造成绝缘损伤、匝间短路等故障，确保发电机长期安全运行，绕组应很好地固定。绕组在槽内采用槽楔压紧，将线圈固紧在槽内，可防止因电磁振动力的作用而引起主绝缘磨损及消除电晕腐蚀。因此，槽楔结构型式及压紧的程度，对确保发电机的安全运行及绕组使用寿命具有重要作用。

定子槽楔有平槽楔和斜槽楔两种。

平槽楔用环氧玻璃布板铣制而成或用酚醛玻璃纤维压塑料压制而成。为保证槽楔与铁心槽口有适当的配合紧量以便于打紧槽楔，对于用环氧玻璃布板铣制的平槽楔，应先试制几件推入槽口校验尺寸是否准确，以能顺利推入而松紧适宜为准。再按正确尺寸成批生产。其结构见图7-2-72。

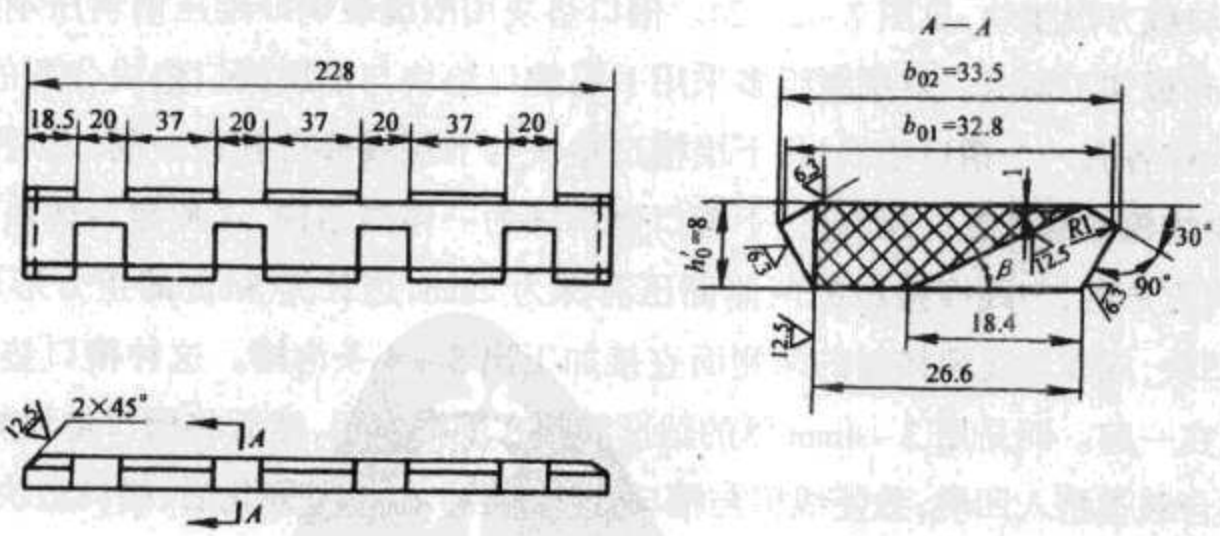


图7-2-72　平槽楔

斜槽楔由上楔和下楔组成，见图7-2-73配合面斜度为1:120。斜槽楔用酚醛玻璃纤维压塑料压制而成。打斜槽楔时，放进上楔，打紧下棋。与平槽楔比较，打紧斜槽楔操作省力，压紧程度也好。

考虑到打槽楔的工艺要求，每根槽楔长度以四个铁心段长为宜，即200～240mm。两

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

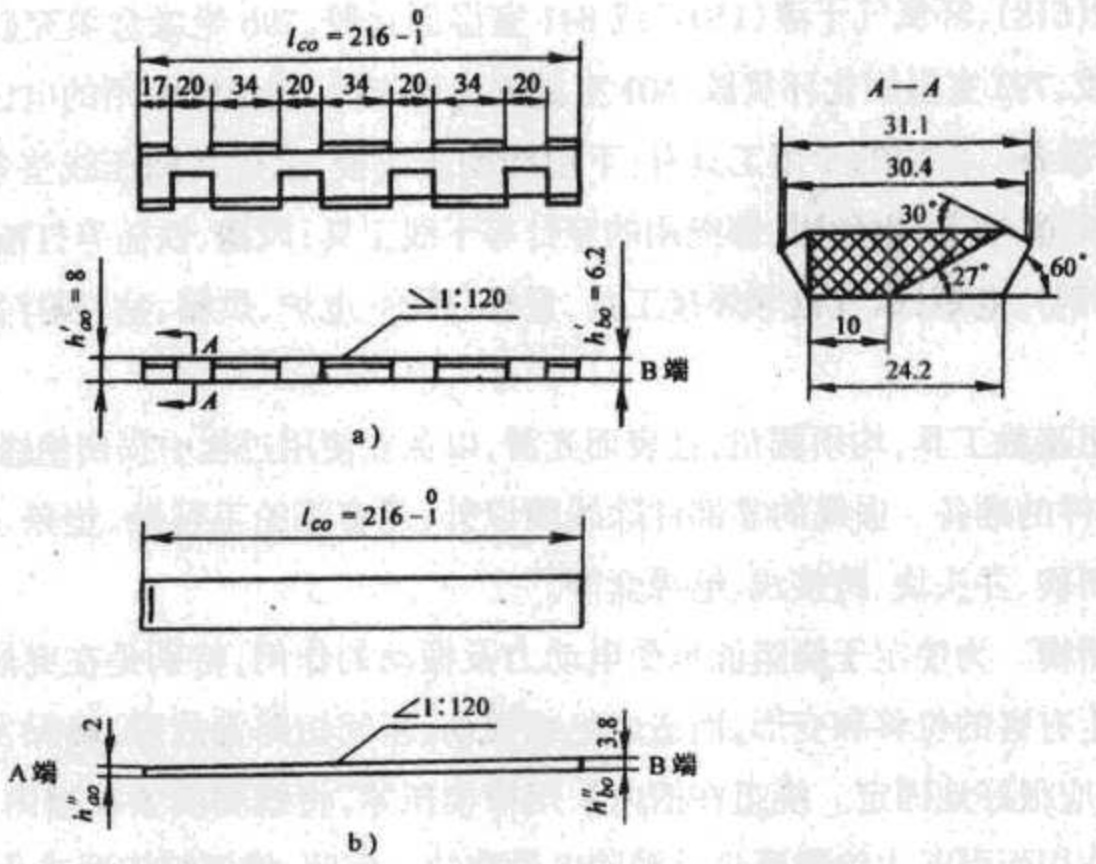


图 7-2-73 斜槽楔

a)上楔;b)下楔

端槽楔一般伸出铁心 30~40mm。厚度一般为 6mm 或 5mm。槽楔加工后,在使用前须经烘干,以除去槽楔中所含水分,然后再浸漆处理,广泛使用的浸漆是三聚氨酸酶酸漆(B级)。

②槽口垫块及间隔块为了防止线棒受电磁振动而磨损绝缘,在线棒出槽口处放置双斜块式垫块或方形垫块,见图 7-2-24。槽口垫块用酚醛玻璃纤维压塑料压制或用环氧酚醛玻璃布板加工而成。双层绕组多采用下层槽口垫块与上层槽口垫块分开的结构,即上、下层线棒各有一个槽口垫块,将下层槽口垫块与下层线棒绑扎在一起,上层槽口垫块与上、下层线棒一起绑扎。还有上、下槽口垫块联为一体的结构,这种槽口垫块有双斜块式的,也有方形的,与线棒接触的两侧面压有深为 2mm,边长为 5mm 的正方形(或为 ϕ10 的圆形)凹块,或在与线棒接触的两侧面直接加工出 3~4 条沟槽。这种槽口垫块不用与线棒绑扎在一起。而是用 2~4mm 厚的适形毡放在线棒之间,然后将槽口垫块打下,适形毡中的粘合肢被挤入凹坑,致使线棒与槽口垫块粘合。粘合胶固化后,槽口垫块与线棒将牢固地联为一体。

间隔块用环氧玻璃布板加工而成,见图 7-2-25 经烘焙后浸 1032 漆,以支撑固紧线棒斜边。斜边间隙设计值一般取为 12mm,间隔块厚度有 1mm、2mm、8mm、10mm 及 12mm 等几种,以便调配使用。也有只采用厚度为 8mm 一种间隔块,而借助间隔块与线棒接触两侧面之间的 2~4mm 厚的适形毡进行调配线棒之间的间隔差的。与槽口垫块一样在与线棒接触的两侧面加工出 3~4 条沟槽,以便间隔块打下,适形毡中的粘合胶挤入沟槽,致

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

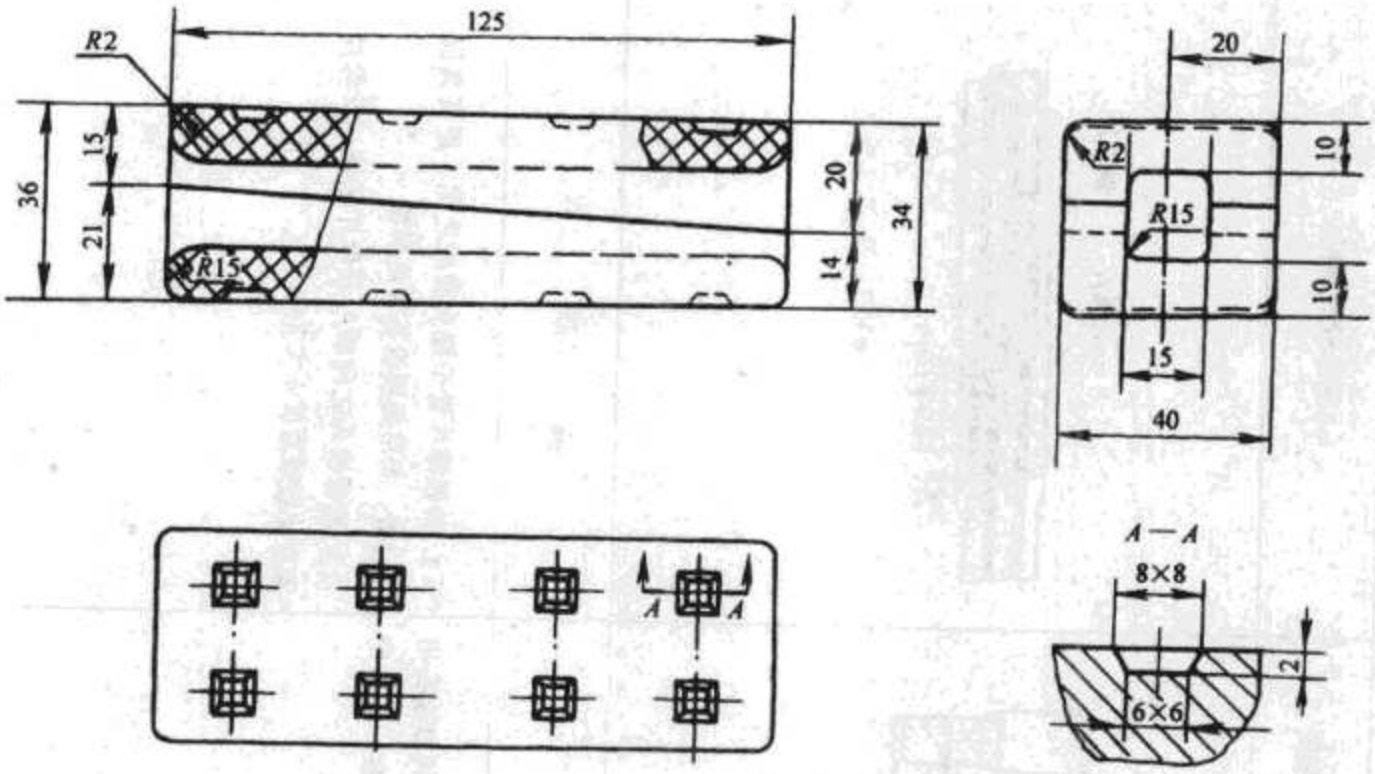


图 7-2-74 槽口垫块

使线棒与间隔块粘合，粘合胶固化后，同样，间隔块与线棒将牢固地连为一体。间隔块宽度约为 30mm，长度略小于线棒高度 3～5mm。

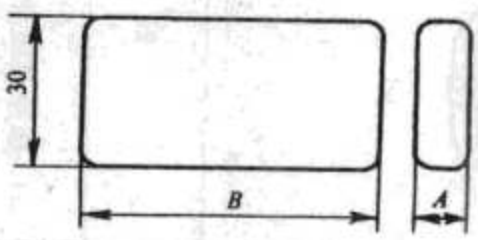


图 7-2-75 间隔块

A = 1、2、8、10、12(mm)　　B = H_d - (3～5)(mm)

③线棒端部联接件线棒端部联接包括同槽位置上、下层线棒端部直并头套联接，相邻槽上、下层线棒端部斜并头套联接，上层与上层及下层与下层线棒间的端部极间连接和线棒端部与铜环引线联接等。

直并头套联接。同槽位上、下层线棒端部直并头套联接结构型式与特点，见表 7-2-9。直并头套结构，见图 7-2-76。并头套的接触电流密度一般取为 0.2～0.3A/mm²。

斜并头套联接。相邻两槽上、下层线棒端部联接采用斜并头套，见图 7-2-77。斜并头套一般采用 5mm 厚铜板弯制而成，斜并头套结构，见图 7-2-78。

极间联接线。联接同一相两极之间线圈的端部联接线叫做极间联接线。小容量叠绕组一般采用本身股线做为极间联接线。波绕组条式线圈的极间联接线一般用铜板铜带或铜母线制造，见图 7-2-79 极间联接线与线棒端部连接结构，见图 7-2-80 极间联接线的电流密度一般取为 2～3A/mm²。绝缘规范，见表 7-2-10。

www.789pdf.com 789书库网

表7-2-9 直并头套连接结构的型式与特点

结构型式	a. 无底直并头套	b. 封底直并头套	c. 铜线对接于并头套内	d. 铜板联接	e. 端头股线搭接
结构示意图	a)	b)	c)	d)	云母片 银焊片 2.8 15 5 e)
焊接方式	楔块打紧后锡焊		银铜焊		高频焊
特点	1. 灌锡量不及 b 结构，焊接接触面积约为60%～70% 2. 打紧并头套楔方便，接触紧密 3. 并头套制造简单	1. 灌锡量较多，焊接接触面积可达80%～90% 2. 用专用夹具楔紧并头套楔 3. 并头套经多次拉制而成，工艺较 a 结构复杂	1. 线棒铜线对接于一个或两个并头套内，分一束或两束，按电流及接触面而定 2. 下线时要保证上、下端头不错位，具有良好的组合间隙，一般为0.2～0.3mm	上、下层线棒端头用一块铜板联接，结构简单	1. 将银焊片置于接头股线之间，用夹具固定位置，采用高频设备加热焊接 2. 股线接头之间插入云母片绝缘，云母片宽度比股线宽度 b 大2mm

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

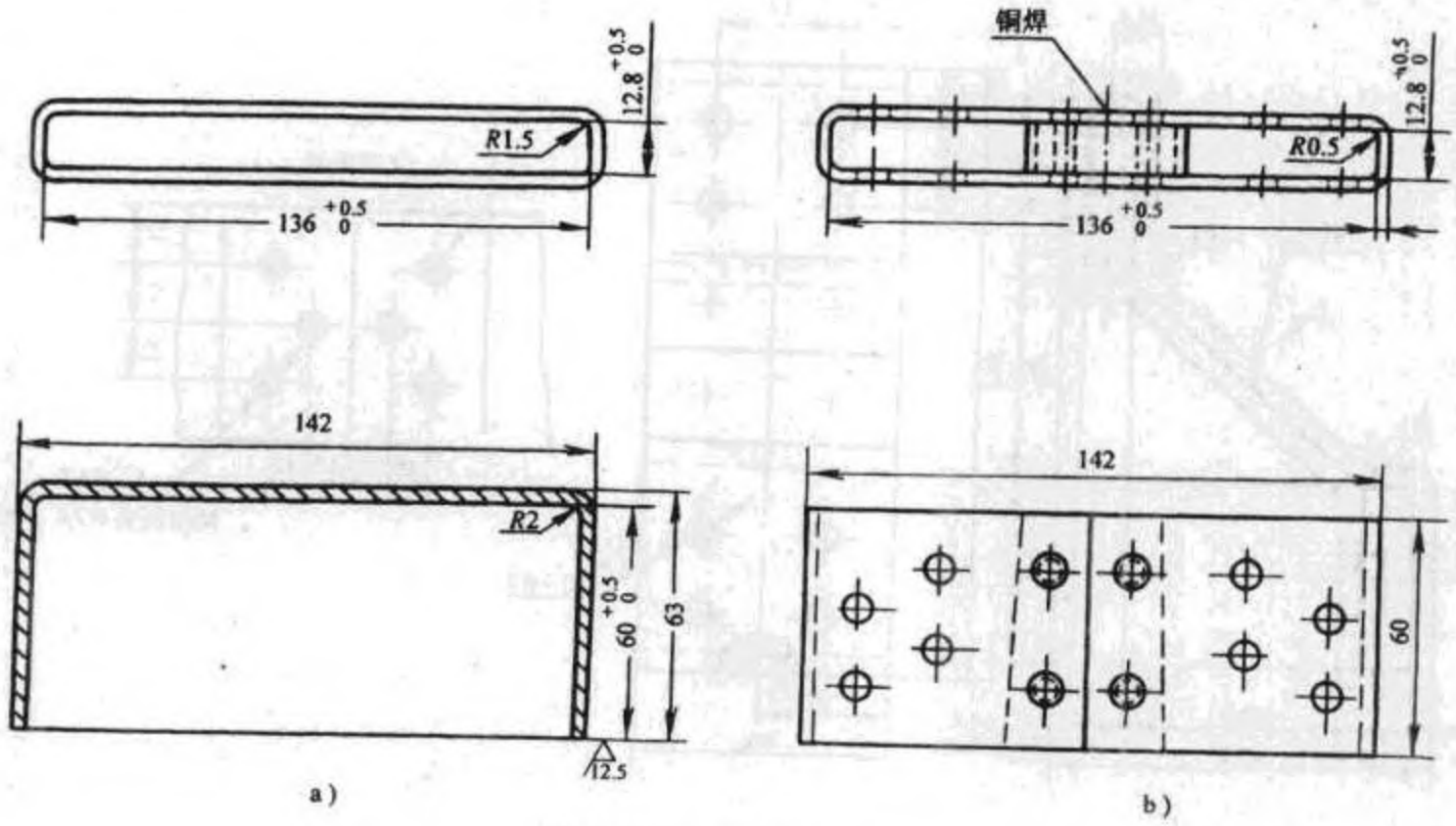


图 7-2-76 直并头套
a)封底直并头套 b)无底直并头套(铜焊对接间隙为 0.2~1mm)

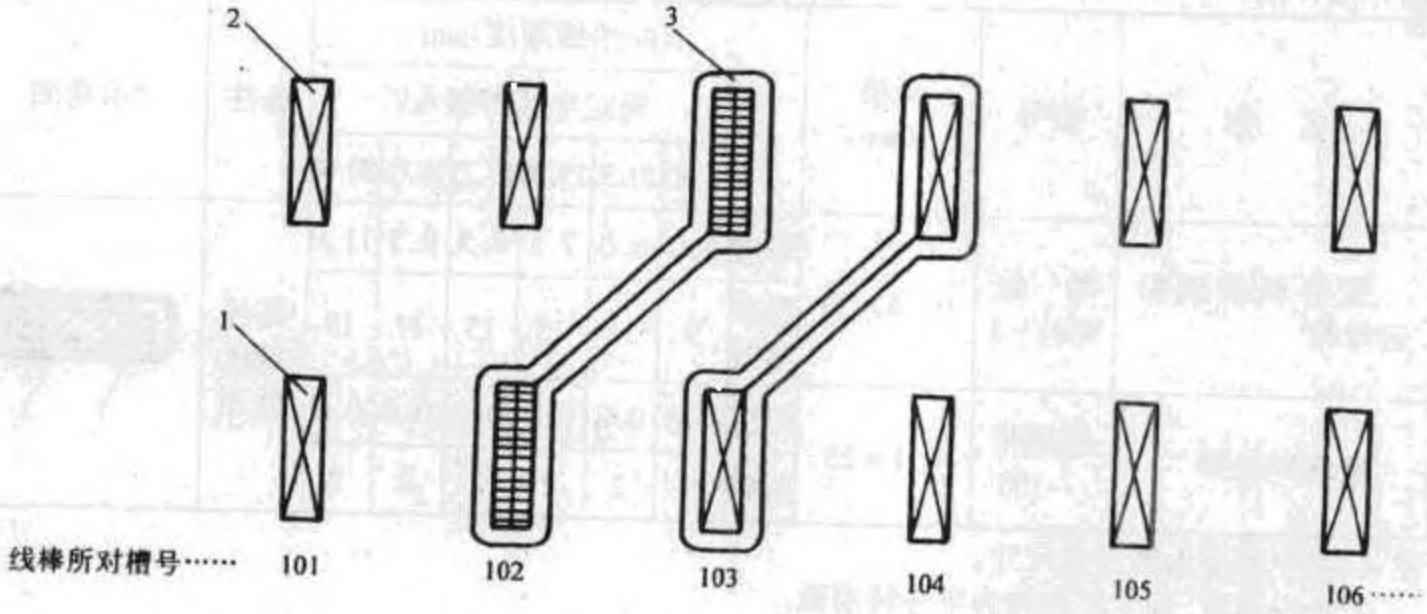


图 7-2-77 绕组端头的斜并头套连接
1—下层线棒;2—上层线棒;3—斜并头套

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

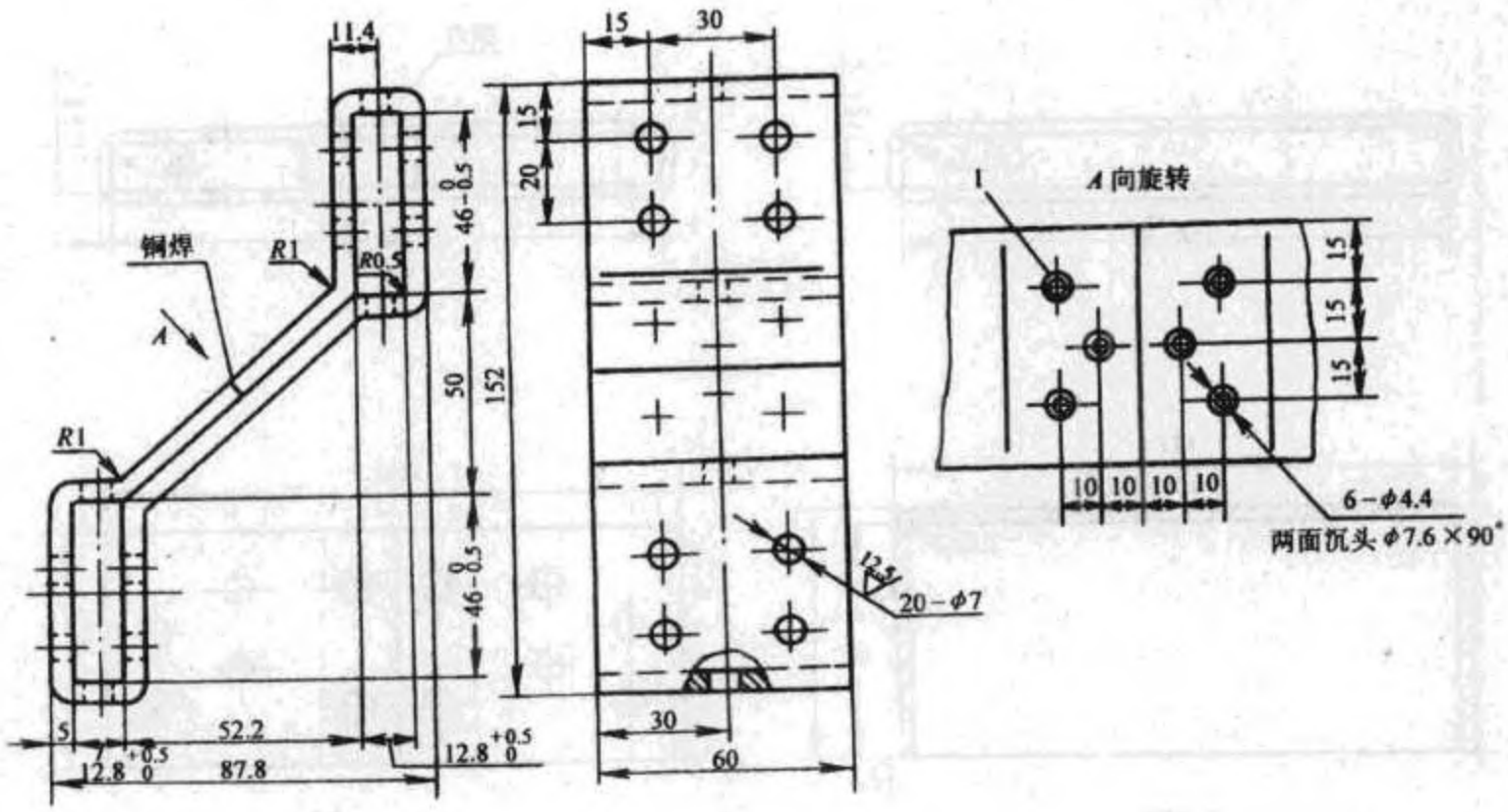


图 7-2-78 斜并头套

1—φ4×14 铜铆钉(铜焊对接间隙为 0.2~1mm)

表 7-2-10 极间联接线绝缘规范

序号	名称	型号	规格/mm	双面绝缘厚度/mm							备注	示意图
					额定电压等级/kV							
					6.30	10.50	13.80	15.75	18.00	20.00		
1	钛环氧玻璃粉云母带	哈绝9541-1	0.15×25	厚度	5.0	6.0	7.5	8.5	9.5	11.0	需经液压处理	1 2
				最少层数	9	11	13	15	17	19		
2	玻璃纤维带	无碱带-100	0.1×25	厚度	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8		
				层数	2	2	2	2	2	2		

注:1.表中厚度为液压后尺寸。

2.表中层数、最少层数均为半叠绕层数。

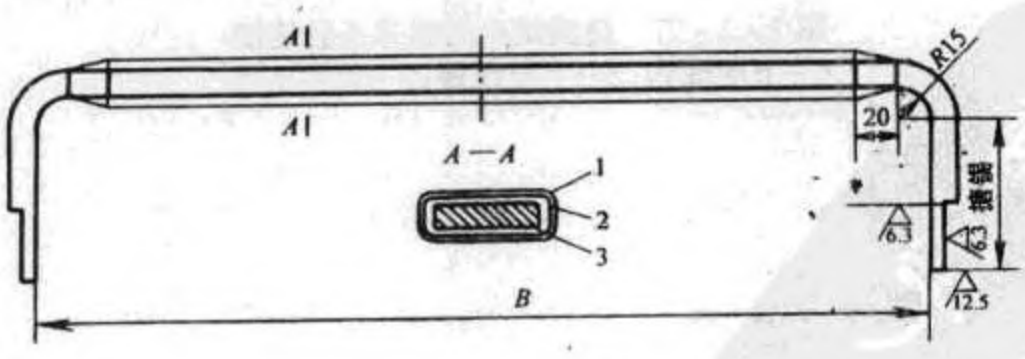


图 7-2-79 极间联接线

1—0.1×25 玻璃纤维带(半叠绕 2 层);2—0.15×25 钛环氧玻璃粉云母带(半叠绕);3—铜母线 TMR

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

铜环引线与线棒端部村联接。如果定子是分瓣结构，铜环与线棒的联接在电站安装时进行，见图 7－2－81 安装时以并头套为样板在铜环端头上配钻孔 4－φ6.4(或 4－φ8.5)，然后用 φ6(或 φ8)铜铆钉铆紧并打紧并头套楔，再用焊锡焊牢。联接线棒端头与铜环的并头套是用直并头套加工而成的，见图 7－2－82。

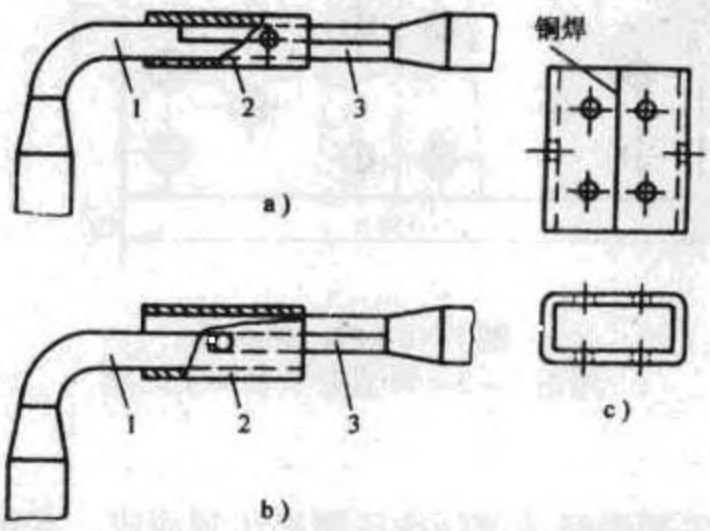


图 7－2－80　极间联接线与定子线棒端头的联接
a)联接结构之一；b)联接结构之二 c)并头套结构(铜焊对接间隙为 0.2～1mm)
1—极间联接线；2—并头套；3—定子线棒

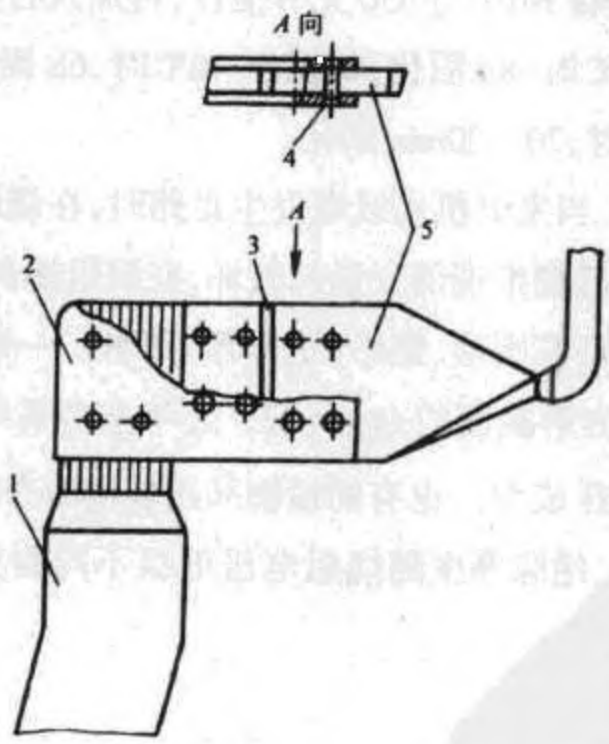


图 7－2－81　线棒与铜环的联接
1—定子线棒；2—并头套；3—并头套楔 4—φ6 铜铆钉；5—铜环端头

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

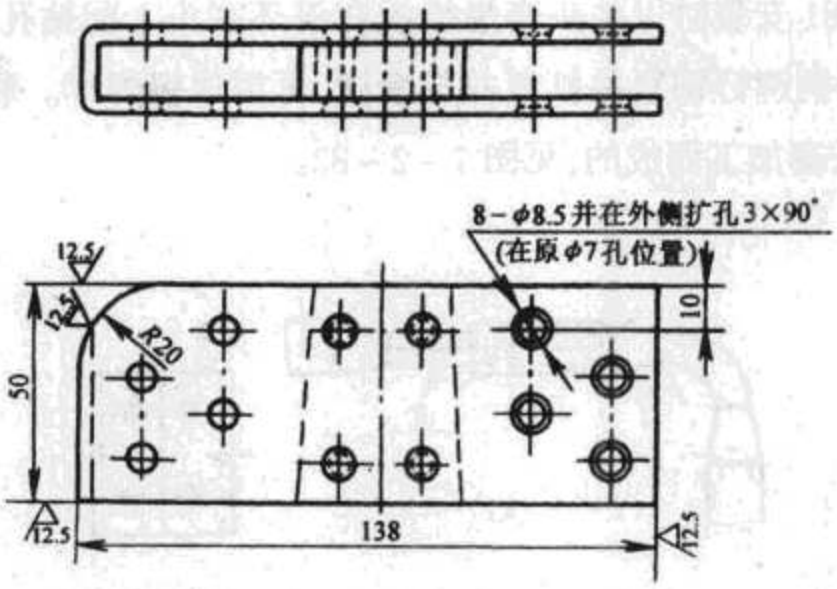


图 7-2-82 并头套
用图 7-2-76 直并头套加工而成

④绝缘盒 绝缘盒采用酚醛玻璃纤维压塑料压制而成。有封底或通底的直绝缘盒和斜绝缘盒四种结构，见图 7-2-83。通底绝缘盒由封底绝缘盒加工而成，适用于立式嵌线时线圈上端绝缘，灌胶方便。绝缘盒的结构尺寸选择，见表 7-2-11。绝缘盒填充胶采用 796 胶或者按如下方法配制：环氧树脂(6101)100 份，聚酰胺树脂(650)100 份，石英粉(200 目)200 份。在室温下先将 6101 与 650 充分搅拌，再加入石英粉，搅拌均匀成半糊状，4～5h 用完。加温至 20～25℃时，8h 固化；加温至 40℃时，6h 固化；加温至 70～100℃时，3h 固化；加温至 120～150℃时，20～30min 固化。

(4)端箍的调整与固定 当发电机出线端发生短路时，在绕组端部将会产生很大的径向力作用。为了防止该力引起绕组端部变形与破坏，在绕组端部要设置端箍，以承受绕组端部的径向作用力。端箍截面有圆形、矩形(正方形)两种。一般中等容量的水轮发电机的端箍采用 25×25(mm^2)正方形截面的 Q_{235-A}钢。近年来多采用无磁性钢 40MnCr72。端箍采用粉云母带连续绝缘液压成型。也有的端箍采用玻璃漆布带连续绝缘，不经液压，而是半叠包一层，再涮一层漆。绝缘厚度随绕组电压等级不同而异。有些厂家还采用环氧玻璃丝压塑料压制的端箍。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

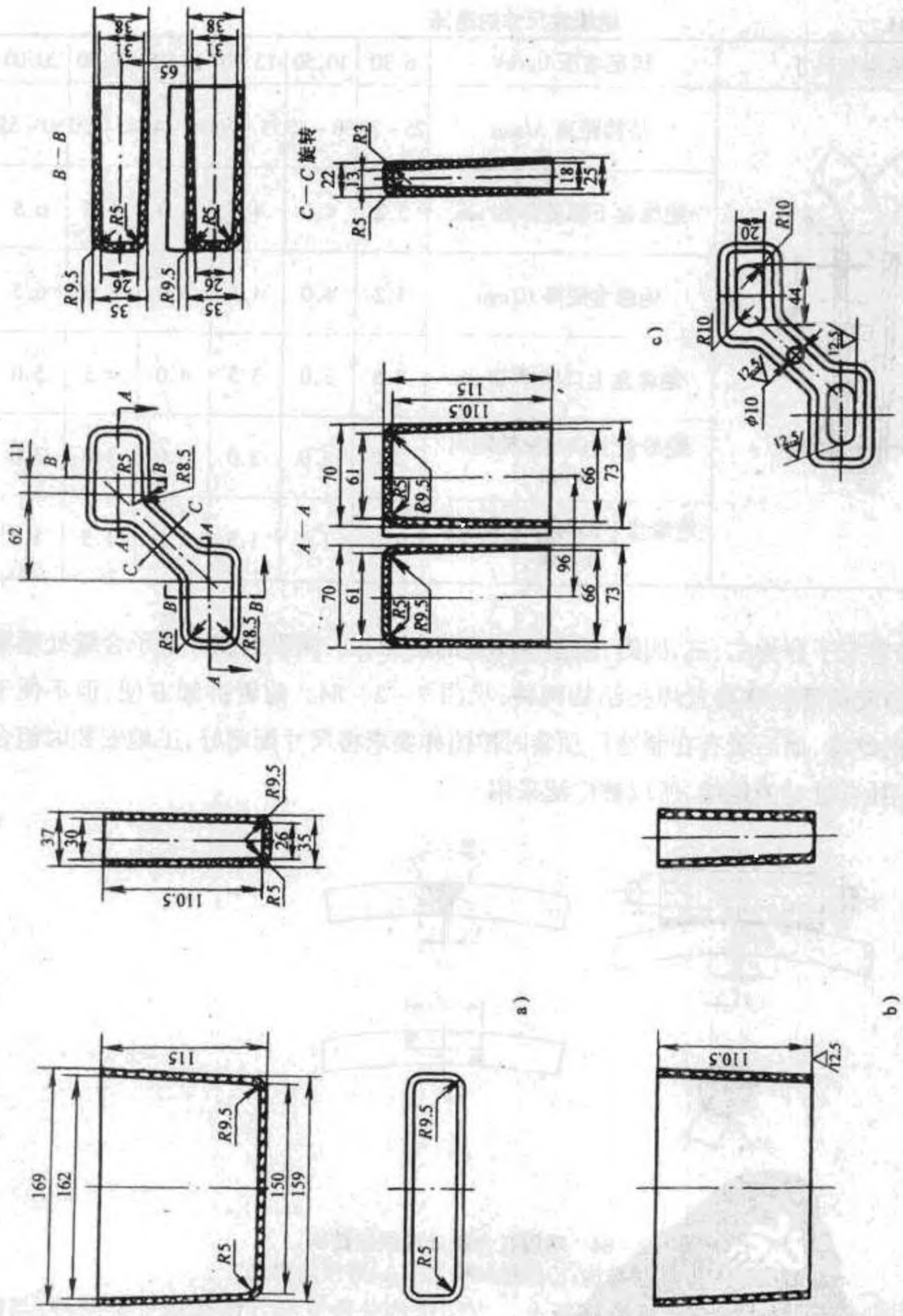


图 7-2-83　绝缘盒

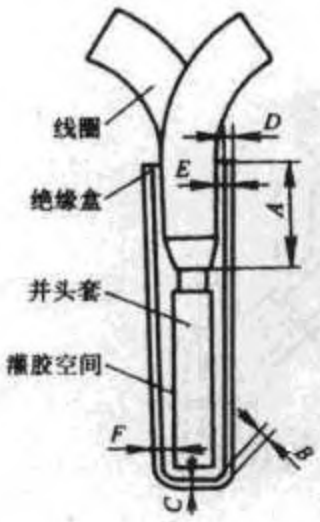
a）封底直绝缘盒　b）通底直绝缘盒（用封底直绝缘盒加工）

c）封底斜绝缘盒　d）通底斜绝缘盒（用封底斜绝缘盒加工）

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

表 7-2-11 绝缘盒尺寸的选择

绝缘盒结构与尺寸	额定电压 U_N/kV	6.30	10.50	13.80	15.75	18.00	20.00
	搭接距离 A/mm	25~30	30~35	35~40	40~45	45~50	50~55
	绝缘盒下部壁厚 B/mm	3.2	4.0	4.5	5.0	6.0	6.5
	绝缘盒底厚 C/mm	3.2	4.0	4.5	5.0	6.0	6.5
	绝缘盒上口壁厚 D/mm	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
	绝缘盒上口与线棒距离 E/mm	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	绝缘盒下部与并头套间隙 F/mm	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5

通常，随着定子分为二、三、四瓣，端箍也相应的由二、三、四段组成。定子合缝处端箍的联接结构有套筒螺栓联接及焊接结构两种，见图 7-2-84。前者拆卸方便，但不便于包扎联接处的绝缘，而后者有在制造厂预装时按图样要求将尺寸配割好，工地安装时组合焊接，便于包扎合缝处的绝缘，所以被广泛采用。

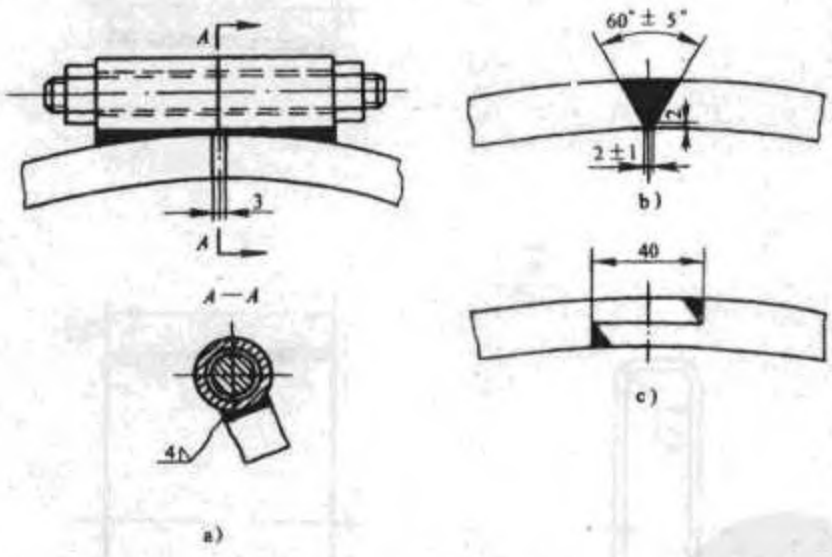


图 7-2-84 端箍在合缝处的联接结构

a)套筒螺栓联接结构；b)焊接结构之一；c)焊接结构之二

端箍环通过支架支撑于上、下齿压板上。支架结构分铁支架及绝缘板支架两种，与铁支架比较，绝缘板支架便于调整，能使多数线圈端部与端箍环的支撑面接触，并节省了包扎绝缘的材料及工时。绕组每端端箍数量根据线棒端部斜边轴向长度选取。端箍支架支撑结构，见图 7-2-85。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

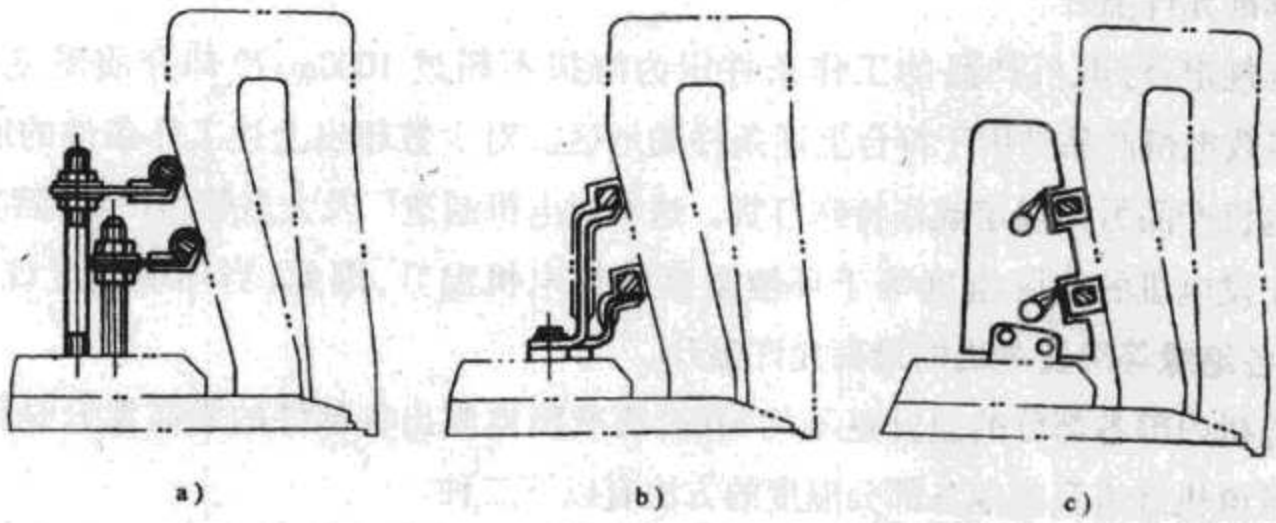


图7-2-85 端箍支架支撑结构

a)铁支架结构之一;b)铁支架结构之二;c)绝缘板支架结构

在嵌线前,要在定子铁心内圆四周槽内均匀地嵌入3~8个临时线圈用以调整及临时固定端箍。临时线圈嵌好后将端箍调到线圈端伸的最高点附近,如果不用线圈而用木板嵌入槽内时,木板与线圈应一样长,其宽比槽略小,其高比槽高低一个槽楔的厚度,使其嵌入槽内,将槽楔打入后能固定在槽里,然后将端箍调到与定子铁心内圆同心,端箍的直径与轴向距离应符合图样。如果每端用两只端箍,第二只应放在线圈斜边的中部。端箍的径向与轴向位置调整好后,用五纬玻璃丝带将它与支撑绑好。如果端箍是螺杆支撑,将固定螺杆的垫铁或螺母搭焊在齿压板上,如果端箍支撑是绝缘板,将与绝缘板把合的角钢搭焊在齿压板上。

(5)测温元件的埋设

①电机的允许温升及其测量方法电机绕组中的绝缘材料在运行过程中,由于各种因素的长期作用,会发生化学和物理变化,而引起电气性能与力学性能的降低。这种变化通称为老化。影响老化速度的因素大致有热、电、光、氧、机械力、辐射线及微生物等。在一般低压发电机中,引起绝缘老化的主要因素是热。在高压发电机中,除了热的因素以外,还有局部放电(如电晕)的影响。

由于绝缘材料的老化现象是不可避免的,因此存在使用寿命长短的问题。根据绝缘材料的耐热性能,通常将绝缘材料分为Y、A、E、B、F、H和C等级别。各级绝缘材料的容许最高工作温度,见表1-12。在正常使用情况下,绝缘材料的使用寿命达20年以上。

由于绝缘材料的使用温度对寿命的影响很大,通常使用的A、E、B及F级绝缘材料,随着使用温度的升高,使用寿命将减短很快。因此,对材料的使用温度的限制是严格的。对已制成的某一绝缘等级的发电机,其许用温度实际上已限定了发电机的功率。

但是,只规定最高使用温度还是不行的,因为发电机可能在不同的环境温度下使用,这就会出现同一规格型号的发电机在不同环境温度下使用,有的温度在允许值之内,有的超过允许值,造成电工产品质量标准的混乱。为此,国家对电机产品统一规定了标准使用

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

环境和标准允许温升。

标准规定:对电机产品的工作条件定为海拔不超过 1000m,冷却介质温度不超过 40℃。多数电机产品是用于符合上述条件的地区。对少数超出上述工作条件的地区,其使用的电机产品另作规定或作特殊订货。这样对电机制造厂及大多数用户均感到方便。

由于发电机的实际温度等于环境温度加发电机温升,因此,当环境温度统一定为 40℃时,各绝缘等级发电机的最高允许温升。

发电机内部各部分的温升是不均匀的,要准确地测出各部件的景高温升是困难的。目前测量电机绕组及其他各部分温度的方法有以下三种。

第一,温度计法　这里所讲的"温度计"包括膨胀式温度计(例如水银、酒精等温度计)、半导体温度计以及非埋置的热电偶或电阻温度计。用此法测量温度时,应将温度计贴附在部件可接触到的表面上,测出接触点表面的温度。这种测量方法虽最为简便,但测得的仅是表面的温度,无法测出内部最热点的温度。因此,此法测得的温度数值比实际最高温度偏低。

第二,电阻法　这种方法是利用绕组的直流电阻值随温度增高而相应增大的关系来确定绕组的温度。例如,当铜线统组在室温 t_1 ℃时的电阻值为 R_1,稳定运行一段时间后测得电阻值为 R_2,根据式$\frac{R_2}{R_1}=\frac{234.5+t_2}{234.5+t_1}$求出

$$\Delta t=\frac{R_2-R_1}{R_1}(234.5+t_1)+t_1-t_0$$

式中　Δt——为温升(℃);

t_0——为冷却介质的温度(℃)。

如果绕组是铝线,则常数 234.5 用 245 代替。

用电阻法测得的温度是整个绕组的平均温度,比温度计法测得的数值接近实际最高点的温度。

第三,埋置检温计法　功率较大的电机在装配时,常在预计温度最高的地方(如槽中上下层线圈边之间)埋置检温计。检温计有热电偶及电阻温度计两种。通过测得热电偶的电势或电阻温度计的电阻的变化来确定被测点的温度,这种方法虽然复杂,但可测得接近发电机内部最热点的温度。

由于不同的测量方法测出的温度数值是有差别的,因此,在规定发电机各部分允许温升的同时,还相应规定其测量方法。各种绝缘等级的水轮发电机各个部分的允许最高温度,见表 7-2-12。

②测温元件的埋设　为了测量定子绕组及铁心的温度,在定子槽内埋置铜电阻线圈(即埋入式检温计),并用 2×0.75 回铜丝屏蔽耐热电缆经通风沟沿拉紧螺杆引至机座壁,

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

接到接线盒上，见图 7－2－86。

铜电阻线圈　铜电阻线圈的外型尺寸，见图 7－2－87。

它的技术要求有以下几点。

第一，铜电阻线圈在 0℃时的电阻值为 53±0.2Ω。

第二，测温范围为 0～130℃，最大误差为 ±1℃。

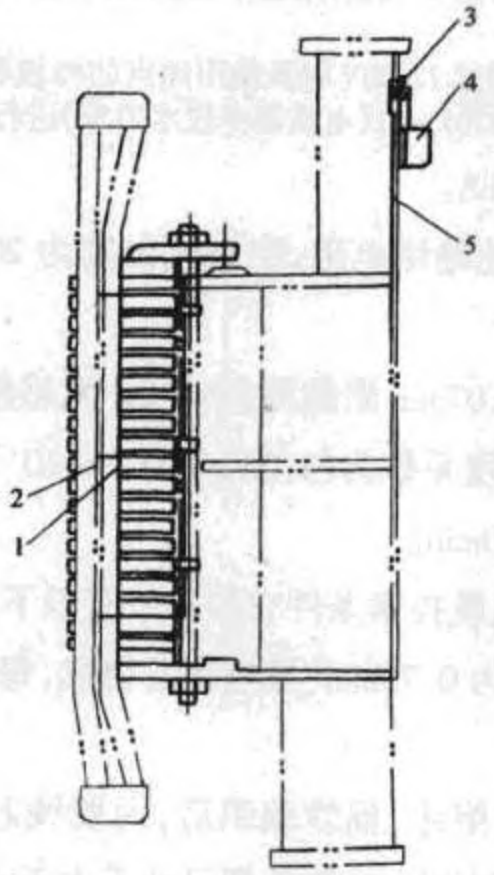


图 7－2－86　定子测温装置布置示意图

1—埋置于槽底的检温计；2—埋置于线圈层间的检温计；
3—套管；4—接线盒；5—2×0.75□铜丝屏蔽耐热电缆

表 7－2－12　　定子、转子绕组和定子铁心的最高温度

项号	水轮发电机部分	测量方法	允许最高温度/℃			
			A 级	E 级	B 级	F 级
1	额定功率为 5000kV·A 及以上或铁心长度为 1m 及以上的水轮发电机定子绕组	电阻法或埋入式检温计法	100	110	120	140
2	额定功率小于或铁心长度短于第 1 项的水轮发电机定子绕组	电阻法或埋入式检温计法	100	115	120	140
3	定子铁心	埋入式检温计法	100	115	120	140
4	水内冷水轮发电机定子、转子绕组和定子铁心的出水温度	温度计法或埋入式检温计法			85	85
5	两层及以上的磁场绕组	电阻法	100	115	120	140
6	表面裸露的单层磁场绕组	电阻法	105	120	130	150

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

项号	水轮发电机部分	测量方法	允许最高温度/℃			
			A级	E级	B级	F级
7	不与绕组接触的其他部件	这部分温度不应达到足以使任何相近的绝缘或其他材料有损坏危险的数值				
8	集电环	温度计法	100	110	120	130

注:1.对于浸沥青胶的B级绝缘定于绕组,用槽中线圈层间埋入式检温计测量,其最高温度不得超过105℃。

2.对定子绕组的额定电压超过11000V以及使用地点的海拔和冷却空气温度与本标准2.1不符时,其允许最高温度按GB755-81《电机基本技术要求》进行修正。

第三,最大工作电流为10mA。

第四,铜电阻线圈外壳对地绝缘电阻,在空气温度为20±5℃,相对湿度为80%以下时,不低于20MΩ。

第五,铜电阻线圈采用φ0.07mm聚酯漆包线QZ无感绕法绕制两层,下层310匝,上层300匝。在0℃时的电阻温度系数为$(4.25\pm0.01)\times10^{-3}$。

第六,时间常数:不超过10min。

2×0.75□铜丝屏蔽耐热电缆技术条件它的条件有以下几点。

第一,电缆由两股截面各为0.75mm² 导电线芯组成,每股线芯由19根φ23mm的铜线绞合。

第二,导电线芯以玻璃丝绝缘,棉纱编织后,两股线芯平行放置,填充棉纱,外表用φ0.18~φ0.24(mm)未镀锡铜丝编织;电缆外型尺寸不大于5mm×8mm,电缆每米长的重量约为0.086kg。

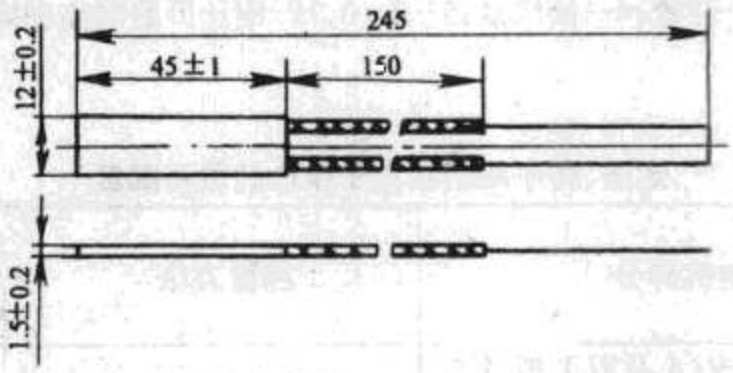


图7-2-87 铜电阻线圈外型尺寸

第三,温度为20℃时,电缆每米长的电阻力0.0233Ω。

第四,在0℃时电缆的电阻温度系数为$(4.25\pm0.01)\times10^{-3}$。

第五,电缆导电线芯间的绝缘电阻不小于100MΩ/m。

测温垫条　测温垫条采用1.5mm厚的半导体环氧玻璃布板加工而成,长度为120mm,宽度为[b_s-(1~1.5)]mm,见图7-2-88。

测温元件的埋设应该做到以下几点。

www.789pdf.com 789书库网

表7-2-13 定子线圈绝缘交流介电强度试验标准

定子线圈和机座型式		圈式线圈								条式线圈			
		整圈定子					分瓣定子			整圈定子		分瓣定子	
额定容量 S_N/kV·A		$S_N<1$	$1\leqslant S_N<3$	$3\leqslant S_N\leqslant 10000$	$S_N\geqslant 10000$		$S_N<10000$	$S_N\geqslant 10000$		$S_N\geqslant 10000$		$S_N\geqslant 10000$	
额定电压 U_N/kV		$U_N<0.5$	$U_N<0.5$	$0.22\leqslant U_N\leqslant 10.5$	$3\leqslant U_N<6$	$U_N\geqslant 6$	$3\leqslant U_N\leqslant 10.5$	$3\leqslant U_N<6$	$U_N\geqslant 6$	$3\leqslant U_N<6$	$U_N\geqslant 6$	$3\leqslant U_N<6$	$U_N\geqslant 6$
试验阶段	在制造厂 1. 绝缘热压成型后			$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+6.5$	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+6.5$	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+6.5$	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+6.5$
	在制造厂 2. 下层线圈下线后									$2.5U_N+2.5$	$2.5U_N+4.5$	$2.5U_N+2.5$	$2.5U_N+4.5$
	在制造厂 3. 打完槽楔后	$2.0U_N+1.0$	$2.0U_N+2.0$	$2.5U_N+2.5$	$2.5U_N+2.5$	$2.5U_N+4.5$	$2.5U_N+2.5$	$2.5U_N+2.5$	$2.5U_N+4.5$	$2.5U_N+1.5$	$2.5U_N+3.0$	$2.5U_N+1.5$	$2.5U_N+3.0$
	在制造厂 4. 并头套联接线绝缘后	$2.0U_N+0.75$	$2.0U_N+1.5$	$2.25U_N+2.0$	$2.25U_N+2.0$	$2.25U_N+4.0$	$2.25U_N+2.0$	$2.25U_N+2.0$	$2.25U_N+4.0$	$2.25U_N+2.0$	$2.25U_N+4.0$	$2.25U_N+2.0$	$2.25U_N+4.0$
	在制造厂 5. 发电机总装后	$2.0U_N+0.5$	$2.0U_N+1.0$	$2.0U_N+1.0$	$2.5U_N$	$2.0U_N+3.0$				$2.5U_N$	$2.0U_N+3.0$		
	在安装工地 6. 合缝线圈下线前						$2.75U_N$	$2.75U_N$	$2.75U_N+2.5$			$2.5U_N+2.5$	$2.5U_N+4.5$
	在安装工地 7. 合缝下层线圈下线后											$2.5U_N+1.5$	$2.5U_N+3.0$
	在安装工地 8. 合缝线圈下完，打完槽楔后						$2.5U_N$	$2.5U_N+0.5$	$2.5U_N+0.5$			$2.25U_N+2.0$	$2.25U_N+4.0$
	在安装工地 9. 合缝并头套绝缘后						$2.0U_N+1.0$	$2.5U_N$	$2.0U_N+3.0$			$2.5U_N$	$2.0U_N+3.0$
	在安装工地 10. 发电机安装后						$0.75\times(2U_N+1.0)$	$0.75\times(2.5U_N)$	$0.75\times(2.0U_N+3.0)$			$0.75\times(2.5U_N)$	$0.75\times(2U_N+3.0)$

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

第一，尽量做到铁心圆周均匀布置。

第二，埋置在上下层线圈之间的检温计，其上下层线圈应是同相。

第三，尽量做到每相埋置的测温元件的数量相同。

对于容量较大的发电机，有的发电机制造厂采用的铜电阻线圈在0℃时的电阻值不是53±0.2Ω，而是采用50±0.2Ω；其厚度不是1.5mm，而是2.5～2.8mm厚；测温垫条不用加工成图7-2-88形状，而是直接在电阻线圈的两端垫3mm厚的半导体垫条。为了消除因电缆长度引起的误差，现已较多的采用3×0.75□铜丝屏蔽耐热电缆。

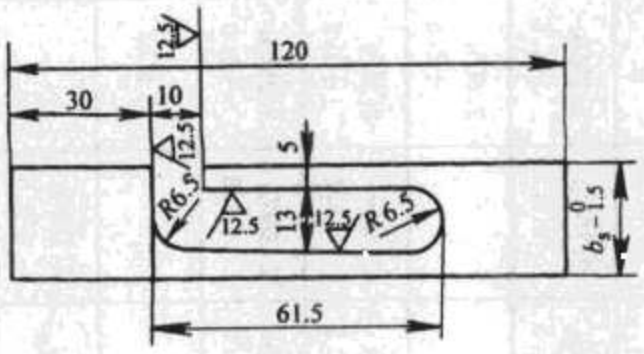


图7-2-88 测温垫条

根据要求将电阻线圈放入槽内适当位置，用电烙铁将电阻线圈接头与引出电缆锡焊好，包上绝缘并刷上低电阻环氧半导体漆(130)。引出电缆线的接头应相互错开，接头焊锡不宜太多，绝缘也不能包得太厚，以免接头抬高线圈影响打槽楔。检查电阻线圈有无短路或断路，嵌线过程中应防止电阻线圈的折断，嵌线完后应对电阻线圈进行复查，若已折断应及时修复或重换电阻线圈。

(6)定子铁心的清理　检查铁心槽口，如有尖角、毛刺应用挫刀修除。检查铁心槽内，如有突出的硅钢片应挫平，铁心表面和槽内如有焊渣、杂物、油脂等污物应清除干净。定子铁心内圆表面如有突出之处，也应加以修理。铁心齿压板等焊接处如凸出不平，对嵌线和线圈绝缘有影响的，都应挫平或铲平，挫后用干燥的压缩空气吹去铁心表面和槽内铁屑、灰尘等杂物。铁心的清理工作不应在嵌线区内进行，以免铁屑等杂物沾在定子线棒绝缘上，影响绝缘质量。

定子铁心检查清理好后，将其吊入嵌线区，遮盖好端箍，在定子铁心槽部喷一层低电阻环氧半导体漆(130)。喷漆干后用白色颜料(或白色油漆)划出定子铁心中心位置线。按图样每隔10槽用红漆标出槽号(即1、10、20、30、……等)，有电阻线圈、联接线及引出线的槽，都应在相应的槽号上用文字标出，将号码文字写在定子齿压板斜面上，所有标线和标记应清晰准确。

(7)定子线棒的检查与清点检查线棒冷态时主绝缘电阻值，若电阻值低于1MΩ/kV(按绕组额定电压计算)则应进行干燥处理。

检查线棒，若表面防晕层或表面半导体漆损伤，需进行修复后再用，若主绝缘损伤则

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

不能使用。

按标准规定对单根线棒进行交流耐压试验。抽查10%的线棒进行起晕电压试验，其起晕电压应等于或大于$1.2U_N$（U_N为额定电压），否则应重新进行防晕处理。

经上述检查合格的线棒，用划线样板划出所有线棒的中心线。根据线棒的形状及长度将上层普通线棒、下层普通线棒、上层极间联接线、下层极间联接线、上层引出线、下层引出线分开平放于垫有橡胶板的搁架上，清点其数量，用干燥的压缩空气吹干净，并用干净的塑料布盖好。

2.嵌线

由专人按有关规定配制791环氧半导体胶、793室温固化环氧胶等绝缘漆胶。玻璃丝绳浸环氧酚醛清漆（B级）或793浸渍胶（F级），玻璃丝带应事先脱腊并浸环氧酚醛清漆后晾至半干；槽内用涤纶毛毡条等应按规定浸环氧半导体胶并晾至半干；槽口垫块、间隔块及端箍用适形毛毡浸渍793室温固化环氧胶并晾至半干备用。对定子线棒引线头采用银铜焊接的，临嵌线前须对线棒引线头焊接部位的表面进行清理，用电动钢丝轮刷净引线头上的余胶，用0#砂布擦去氧化膜，然后用酒精洗净。并头用联接板（或并头块）也应按上法将表面清理干净。

（1）嵌下层线棒用干燥的压缩空气吹干净定子铁心上的灰尘，再次仔细检查铁心槽内是否有异物及凸出之处。按图样要求在槽底放入已晾好的浸有791环氧半导体涤纶适形毡，对于立式嵌线时，上部可用胶带粘在槽口，以免掉下。注意已固化变硬的适形毡不得使用。如果在槽底放置0.5mm或1mm厚的半导体垫条（9332）时，对于槽内长度方向放置两段垫条，其两段垫条不许搭接，准许其间间隙小于10mm。若槽底已安放测温电阻线圈，应根据电阻线圈的厚度，将略比电阻线圈厚的垫条（2mm或3mm厚）放在这个槽底剩余长度上。将下层线棒按标号嵌入槽内，检查端部伸出长度，符合要求后，用橡胶锤由两人均匀敲打线棒上部，使线棒沉入槽内。当线棒的上表面沉到与铁心表面齐平时，将压线板放在其上，用锤子敲打压线板，使线棒沉入槽底。用塞尺检查线棒侧面与铁心间的间隙，若间隙大于0.3mm，且长度超过100mm时，则应用适当厚度的9332环氧半导体玻璃布板垫片塞紧。应注意，在打入垫片时不得损伤线棒，垫片头部应挫修圆滑，不得有尖角，垫的高度应与线棒平齐或略低。

线棒下到槽底后，用压紧工具和压线垫条将下层线棒压紧，见图7-2-89一般情况下压紧力的要求为：操作者用扳手适当扳紧弓形夹即可。弓形夹的数量根据线棒长度而定。应特别注意在压紧时用力不能过大，常温下压紧时间为48h，待适形毡中的胶初步固化后才取消压紧力。由于适形毡在固化过程中会产生收缩，故在压紧时间内需适当增加压紧次数，间隔时间均匀，一般为8h紧一次，但最后一次压紧，需在取消压线工具前8h进

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

行。

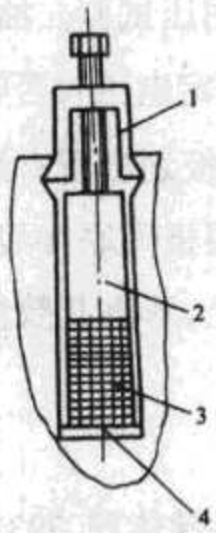


图 7-2-89 压紧下层线棒

1—压线工具;2—下层压线板;3—线棒;4—适形毡

在下线过程中,应经常检查端部尺寸、节距、线棒端部间隙,并注意线棒是否紧靠槽底和端箍。槽与线棒之间间隙是否已加垫等。按图样规定用晾好的浸有环氧酚醛清漆的玻璃丝带将线棒绑紧在端箍上,若线棒底面与端箍间有间隙,可用浸有 793 室温固化环氧胶的适形毡补垫,并用无碱玻璃丝带绑牢。各绑扎处表面涂刷 792 室温固化环氧胶。

下层线棒全部嵌完后,配放槽口垫块及间隔块,配放时将浸有 793 室温固化环氧胶并晾好的适形毡包住垫块,然后塞入配放部位,对高出线棒的适形毡用剪刀及时剪去,最后用浸有 793 室温固化环氧胶并晾好的 0.3mm × 25mm 五纬玻璃丝带进行绑扎。如果塞入的垫块过松可加垫适形毡,直至松紧适当为止。绑扎处表面涂刷 792 室温固化环氧胶。线棒端部的绑扎和间隔块及槽口垫块的放置绑扎,见图 7-2-90。

(2)下层线棒耐压试验下层线棒全部嵌完,适形毡固化时间已有 48h,并完全固化。取出压线工具和压线垫条,将定子铁心上所有杂物清除干净,用干燥的压缩空气吹净定子铁心及线棒上全部灰尘。仔细清理端部,以防 791 半导体胶污染端部。用裸铜丝将线棒端部全部联起来,用 2500V 级兆欧表测绕组绝缘电阻值,其吸收比应等于或大于 1.3(测前绕组应对地充分放电),在冷态下测得的绕组绝缘电阻,按绕组的额定电压计算应不低于 1MΩ/kV。检查槽电位,若槽电位不合格,则需进行处理,直到合格为止。测试槽电位时施加电压值为相电压,槽电位应不大于 10V。

(3)嵌上层线棒　下层线棒全部耐压合格后,盖好线棒引线头,对线棒端部按规范要求进行喷漆。待喷漆干后,用压缩干燥空气吹净下层线棒,并用与下层不同的颜色漆标出电阻线圈,上层引线和连接线的槽号,方法同前。

按图样要求放入层间适形毡、电阻线圈。并将电阻线圈的线接好,包好绝缘,检查电阻线圈是否有短路、断路现象。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

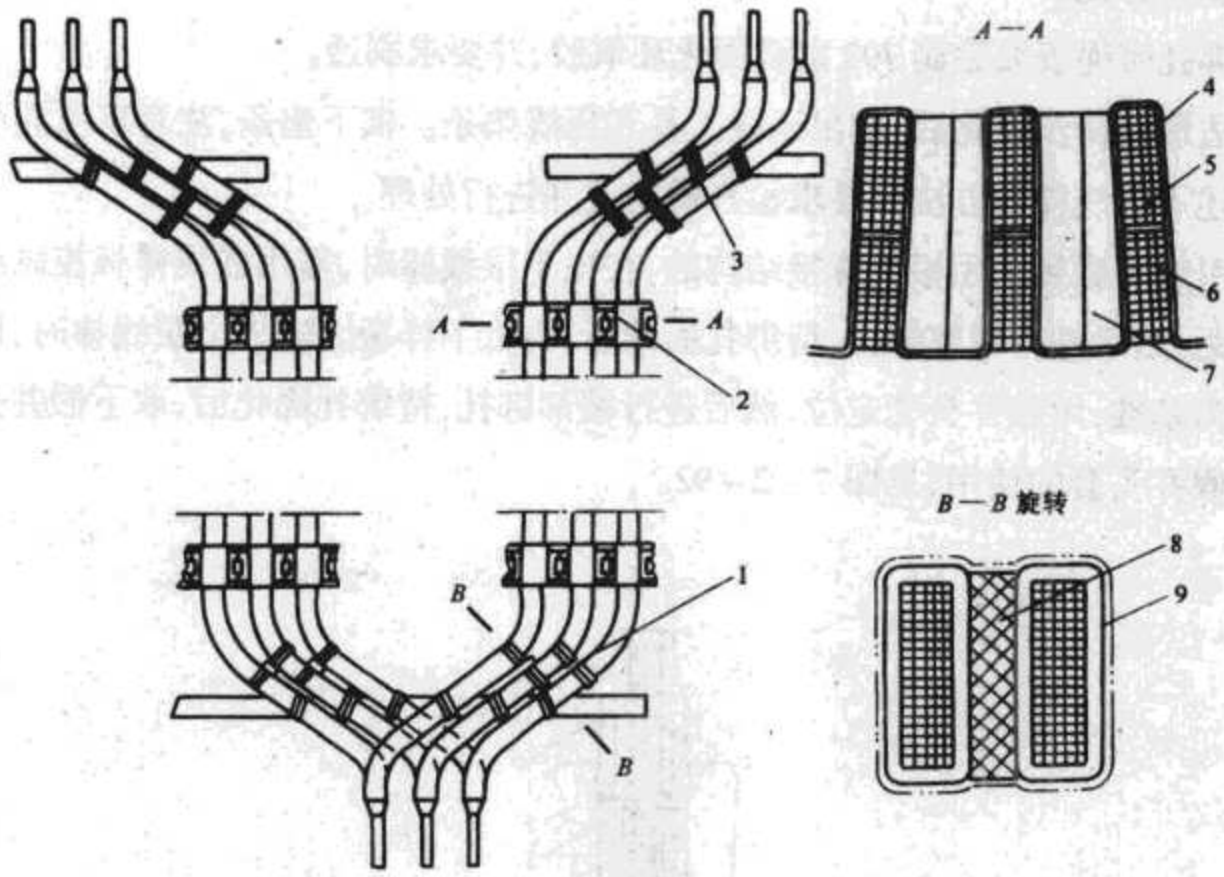


图 7-2-90　条式定子线圈端部绑扎结构示意

1—线棒斜边的绑扎：在相邻的上层线圈或下层线圈斜边间垫以斜边垫块，然后用 0.3min × 25mm 玻璃丝带各自互相绑扎(详见 B—B 剖面图)2—槽口垫块的固定：根据槽口线棒之间的间隙，垫以 4mm 厚或 2mm 厚适形材料，然后打下槽口垫块，使其紧固于线棒之间(详见 A—A 剖面图)3—线圈与端箍绑扎：用 0.3min × 25mm 玻璃丝带将下层线圈和端箍绑扎在一起，然后上、下层线图再与端箍一起绑扎；4—适形材料；5—上层线棒；6—下层线棒；7—槽口垫块；8—斜边垫块；9—玻璃丝带

将涤纶丝套管玻璃丝束浸透 793 室温固化环氧胶并晾至半干后放在下层线棒端部适当位置(与端箍对齐)，每次浸胶长度应视下线进度快慢及环境温度高低而定，切不可过长，以免团化浪费。如果在线棒端部上下层线棒之间垫以绝缘垫条，其垫条要用 1mm 及 2mm 厚 30mm 宽的环氧玻璃布板制成，视上下层线棒端部间隙大小将多根垫条叠在一起，并用玻璃丝带半叠包将绝缘垫条捆绑在一起，然后放在适当位置(与端箍对齐)。

在适当的槽号位置嵌 3～4 根上层线棒，检查端部伸出长度及上下层线棒引线头对齐情况。若无问题，再用橡胶锤将上层线棒沿长度方向均匀打入，并将槽楔打入槽内以检查线棒在槽内的高低。如果线捧在槽内高低适当，槽楔在槽内能顺利打入。按图样要求嵌入其余线棒，若线棒在槽内过高，可适当减少上下层线棒之间的垫条，或者减少槽楔下面的垫条。线棒侧面与铁心间的间隙处理及要求同下层线棒。

用压线工具和压线垫条将上层线棒压住，见图 7-2-91。其压紧力、预压时间、注意事项同下层线棒。

用浸好漆的玻璃纤维带将涤纶丝套管玻璃丝束、端箍及上、下层线棒按图样要求一齐绑扎紧。

上层线棒槽口垫块及端部间隔块仍按前述的下层线棒槽口垫块及端部间隔块配放方

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

法进行配放和绑扎。

所有绑扎带绳表面涂刷792室温固化环氧胶，并要求刷透。

层间适形毡初步固化后，取出压线工具和压线垫条。楔下垫条，注意事项同前。

按前述下层线棒的方法和要求检查槽电位并进行处理。

对于引线头联接采用银铜焊接结构的，在嵌下层线棒时，需用嵌线样板控制线棒引线头间的间距，然后进行端部绑扎，待绑扎固化后，再取下样板。嵌放上层线棒时，以下层线棒引线端为基准，用假并头套定位，然后进行端部绑扎，待绑扎固化后，取下假并头套。嵌线样板和假并头套的使用，见图7-2-92。

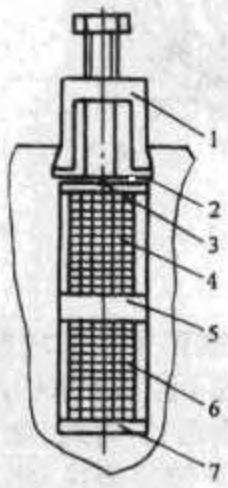


图7-2-91 压住上层线棒

1—压线工具；2—半导体垫条；3—楔下适形毡；4—上层线棒；5—层间垫条；6—下层线棒；7—槽底适形毡

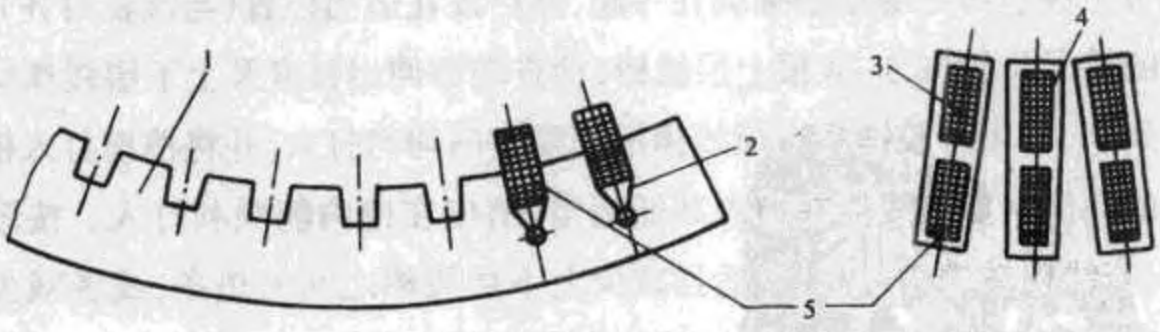


图7-2-92 嵌线样板和假并头套的使用

1—下线样板；2—绑绳；3—上层线棒；4—假并头套；5—下层线棒

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

嵌放楔下适形毡。将晾好的浸有 791 半导体适形毡按要求嵌放在上层线棒面上，并在适形毡面上放一层 0.5mm 厚的环氧半导体玻璃布板 9332 垫条。使用压线工具及压线垫条将适形毡压住，见图 7－2－91。压紧力向前述，预压时间，30～20℃为 60～72h，预压过程中重新扳紧压线工具为每 8h 一次，其余要求同前述。如温度在 20℃以下，相对湿度大于 80%～85%时，则适当增加预压固化时间，待槽底、层间、楔下适形毡全部固化后才取消压紧力。

若楔下不采用适形毡，而采用环氧玻璃布板或低电阻硅橡胶垫条时，则省去了楔下适形毡预压工作。楔下还可采用波纹板垫条。

(4)打槽楔　打槽楔前先试配双层槽楔，检查槽楔上的通风口是否与铁心通风槽对齐，否则需修理槽楔。配好下部斜楔的长度，以打紧后比槽楔略短(一般为 10mm 左右)为宜。

将槽楔从槽口推入至固定位置，然后用打斜楔顶头垫在斜楔大头端，按要求将斜楔打入槽楔与半导体垫条(或绝缘垫条)之间，并用小锤击槽楔检查其紧度，其有空哑声处不得超过每条槽楔长的 1/3，反之，应将槽楔退出，在其空哑声处加垫垫条(环氧玻璃布板 3240)，重新将槽楔打入槽内，再用小锤检查，直至其空哑声不超过槽楔的 1/3，紧度合适为止。退槽楔时要特别小心，严防损伤绕组绝缘。一般是每嵌好若干个线圈及端部绑扎好后，再打槽楔。也可将上层线圈全部嵌好、绑扎好后再集中打槽楔。

(5)进行耐压试验　根据绝缘耐压试验规范及第九章和第十章试验方法进行交直流耐压试验。

(6)端部联接及绝缘

①接头焊接　对于用直并头套连接上、下层线棒接头结构，通常采用锡焊焊接(常用焊锡牌号同前)。工地接头焊接分上、下两端进行。下端接头焊接采用浸锡焊方式，即用焊锡勺盛入温度为 350～400℃的焊锡溶液，将并头套浸入焊牢。上端接头通常用直流电源通过碳精棒形成两电极，对接头进行传导加热，用焊锡充填并头套与导线之间间隙，使焊锡全部浸透接头焊牢。如果采用银铜焊，用银铜焊机的钳口夹住需焊部位，接通电源，待接头发热显红时，让银焊料熔化填满并头块与线棒接头间隙，然后断开电源。锡焊或银铜焊的具体方法与步骤详见第三章。

条式线圈的接头焊接，目前也有采用可控硅中频焊头机焊接。焊接时将设备中的感应圈套入定子接头处，通以中频电流。由于感应加热使焊锡很快熔化达到焊接的目的。此法加热均匀，焊接速度快，焊接质量稳定，对线圈绝缘无损伤。中频焊头机的频率应根据定子接头截面大小选取，一般取 2500Hz 以下。

定子绕组的引线端头与铜环的联接，以及极间联接线的联接，一般也采用并头套的联方式，并用锡焊(或银铜焊)焊牢。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

定子铜环的联接，一般采用对接方式，用银铜焊焊接好。

②质量检查

A.外观检查　接头焊接完后应仔细进行检查，接头间隙应被焊锡（或银焊料）填实，表面光滑。对有空洞或气孔者应进行处理或重焊。

B.压降法　将焊接接头的线圈通以直流电，根据电阻值的不同鉴别出焊头质量的好坏。当各压降值与平均压降值之差不大于平均值的1.2倍时则认为合格。

另外，也有用感应涡流法检查线棒接头焊接质量。

③端部绝缘　定子线棒下端接头焊接合格后，将下端用灌有796绝缘盒填充胶的绝缘盒内表面包好电话纸套在并头上，并固定好位置，以待固化。或者将绝缘盒套上并头固定好位置后再向盒内浇灌796填充胶。由于填充胶固化后会收缩，故应注意补灌填充胶，待全部固化后进行清理，撕去电话纸。

同样，定子线棒上端接头焊接合格后，将底部开有浇灌槽口的绝缘盒套在上端并头上。由于绝缘盒开口朝下，因此，绝缘盒开口采取防漏措施后再浇灌796绝缘盒填充胶。同时也应注意补缩。若采用塑料套防漏，则在并头焊接前就必须将塑料套套在线棒端头上，待并头焊完并套上绝缘盒后再把塑料套翻上来，仔细扎紧塑料套，使线棒与绝缘盒开口间隙密封住，然后浇灌796绝缘盒填充胶。待固化后再进行清理。为防止塑料套起皱影响浇灌质量，填充胶可分两次灌满。

极间联接线、线圈引出线接头及铜环接头焊接好后，仔细进行清理和适当钳修。清理干净后，根据绝缘规范包好绝缘或浇灌填充胶。

四、耐压试验及清理喷漆

发电机定子绕组全部接头联接好并已进行绝缘处理后，将定于铁心和绕组上的所有杂物清除拿走，用酒精或甲苯溶剂擦净槽口和线棒端都绝缘表面及绑绳上的一切污染物质，根据定于绝缘试验规范进行耐压试验。

耐压合格后，仔细全面的清理整个定子，将一切杂物清除掉，并用干燥的压缩空气吹净定子，根据要求在定子铁心及绕组端部喷表面复盖漆。

www.789pdf.com 789书库网

www.789pdf.com 789书库网

[General Information]
书名=最新水利水电机电组安装工程施工工艺与技术标准实用手册　第2卷
作者=刘文清主编
页数=984
出版社=合肥市：安徽文化音像出版社
出版日期=2004.04
SS号=12187484
DX号=000007449473
URL=http://book.szdnet.org.cn/bookDetail.jsp?dxNumber=000007449473&d=773A05808E658D526C42F028DAF46423

www.789pdf.com 789书库网