

大型同步电动机 检修与运行

赵家奎 张文灿 编著

武汉工业大学出版社

大型同步电动机 检修与运行

赵家奎 张文灿 编著

武汉工业大学出版社

鄂新登字 13 号

内 容 提 要

本书是为目前排灌站使用的高压大型同步电动机（容量 1000KW~6000KW）检修与运行而编著的。书中详细地叙述了大型同步电动机一般检修与检修中的一些例行试验，同时也详细地叙述了大型同步电动机特殊检修的工作程序、各工序的工艺要求和操作方法以及运行中操作和监视。

本书适用于从事大型同步电动机的检修与运行工作的工程技术人员、管理人员、及技术工人作为参考书或培训教材。

大型同步电动机的检修与运行

赵家奎 张文灿 编著

责任编辑 李惠临

武汉工业大学出版社出版

中国水利电力企协城市供用电研究会激光照排

武汉汉阳大山印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 15.9 字数: 400 千字

印数: 0001—1000 册

ISBN7-5629-0763-4/TM·13

定价: 14.50 元 ¥ 11.80

前 言

目前,在厂矿企业单位中为了提高功率因数,节约用电,尽量采用同步电动机。对于起动次数少、功率大、长时期运行条件下采用同步电动机更为合宜。在大型的排灌站中较普遍地应用大功率同步电动机拖动水泵运转;其容量从 500 千瓦至 6000 千瓦。对于从事运行、维护、检修及管理的工作人员,不仅仅要求掌握一般的运行规程、操作技能和维护的专业知识,还要更进一步对同步电动机原理、结构有充分的了解,以便对运行中出现的问题或故障能灵活正确地处理,进一步学会对大功率同步电动机的大修和小修,从制定检修计划,材料计划到现场检修工艺、措施,具体实施及其故障诊断和试验的技能。读者在学习本书的基础上理所当然应当掌握这些本领,这也是作者奉献本书的目的。

湖北省水利厅组织了对泵站中大型同步电动机检修和运行培训班,作者在多次讲座、现场实施,尤其对现场运行、检修遇到的问题应采取实用的对策和措施等,在此基础上加以整理记述于本书中。故本书与一般的教材不同,它是理论密切结合实践,特别突出实践中工艺技能,故可作为一本实用教材提供给读者。

本书的第四、五、六、七、八章由赵家奎同志编写第一、二、三章由张文灿同志负责编写。参加第二、三章编写的还有何慧慈、陶一鸣同志,全书由赵家奎统稿。由朱家万同志审查。湖北省水利厅及湖北工学院对本书提供了许多宝贵意见,在此表示谢意。

本书由中国电力企业家协会供电分会、中国水利电力企业管理协会城市供用电研究会、湖北省电机工程学会、武汉电机工程学会和湖北省水利厅共同审议。

由于本书的作者水平有限,书成之后作者颇有余感不足,书中错误和缺点在所难免,望读者提出批评与指正。

作者

1993 年 7 月 18 日

目 录

第一章 同步电动机的原理和结构	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 同步电机的基本工作原理	(3)
第三节 隐极同步电机的基本结构	(5)
第四节 凸级同步电机的基本结构	(9)
第五节 同步电机的磁路和导体中的感应电路	(14)
第六节 线圈电势与绕组电势	(16)
第七节 高次谐波电势及其削弱方法	(19)
第八节 定子绕组	(22)
第九节 分数槽绕组	(29)
第十节 绕组用的导电材料和绝缘材料	(32)
第十一节 高压定子绕组的绝缘及制造	(36)
第十二节 绕组的绝缘处理	(40)
第十三节 同步电机的电枢反应	(48)
第十四节 同步电机的电抗和电压平衡方程式	(54)
第二章 大型同步电动机的运行	(58)
第一节 概述	(58)
第二节 同步电机运行的可逆性	(59)
第三节 同步电动机的电枢反应	(60)
第四节 同步电动机的电压平衡方程式和相量图	(62)
第五节 同步电动机的功角特性和矩角特性	(65)
第六节 同步电动机的运行特性	(70)
第七节 同步电动机的励磁调节及 V 形曲线	(73)
第八节 同步电动机的起动	(76)
第九节 同步调相机	(82)
第三章 硅整流励磁装置和可控硅励磁装置	(87)
第一节 同步电机的励磁方式	(87)
第二节 硅整流励磁装置	(89)
第三节 可控硅和可控硅触发电路简介	(95)
第四节 整流变压器和同步变压器	(96)
第五节 三相半桥控整流装置的主回路和续流二极管	(103)
第六节 三相半桥控整流装置的控制回路	(112)
第七节 三相全桥桥式整流电路及其保护	(120)
第八节 三相全桥桥式装置的脉冲环节以及移相和附加环节	(125)

	第九节 三相全控桥式整流装置的投励环节及灭磁环节	(138)
	第十节 可控硅励磁装置经常性维护及常见故障处理	(144)
第四章	大型同步电动机制造工艺简介	(155)
	第一节 国产大型同步电动机简介	(155)
	第二节 大型同步电动机转子的制造工艺	(156)
	第三节 大型同步电动机定子的制造工艺	(161)
第五章	大型同步电动机常见故障及其处理	(166)
	第一节 同步电动机温度过高	(166)
	第二节 同步电动机定子绕组损坏	(167)
	第三节 同步电动机转子接地	(168)
	第四节 同步电动机的逆磁现象和运行中的失磁	(169)
	第五节 电刷及集电环异常磨损	(170)
	第六节 同步电动机的起动故障及仪表指示失常	(171)
第六章	大型同步电动机的一般检修	(173)
	第一节 大型同步电动机的拆开与装复	(173)
	第二节 大型同步电动机的检修	(176)
	第三节 大型同步电动机气隙和轴向间隙的调整	(179)
	第四节 轴承的修理	(180)
	第五节 大型同步电动机的干燥	(181)
第七章	大型同步电动机的特殊检修	(184)
	第一节 定子检修	(184)
	第二节 转子检修	(201)
	第三节 大型同步电动机的恢复性大修	(218)
第八章	大型同步电动机运行和检修中的试验	(235)
	第一节 大型同步电动机检修时绝缘的预防性试验	(235)
	第二节 大型同步电动机定转子绕组直流电阻的测量和定子的 铁损试验	(241)
	第三节 大型同步电动机运行中的试验	(247)
	第四节 大型同步电动机性能参数测试	(250)
	第五节 励磁机的试验	(255)
附录	大型同步电动机各种绝缘材料与导线及部分零配件的材料计划和各种检修材料计 划。	

第一章 同步电机的原理和结构

§ 1-1 概 述

交流电机中最重要的是同步电机和异步电机。同步电机的重要特征是它的转速 n (r/min) 频率 f (Hz) 和磁极对数 P 之间有严格的关系, 即

$$n = \frac{60f}{P} \quad (1-1)$$

当极数一定时, 同步电机的转速 n 和电网频率 f 之间有固定的关系。我国的电网频率为 50Hz, 因此同步电机的转速是一固定值, 与负载的大小无关。而异步电机, 它的转速和频率之间就没有这种固定关系, 而是随着负载的大小而变化。

同步电机可以用作发电机, 在现代电力工业中, 无论是火力发电、水力发电、原子能发电或柴油机发电, 几乎全部都是采用同步发电机。同步电机还用作电动机, 同步电动机广泛应用于不要求调速和功率较大的机械设备, 如轧钢机、压缩机、鼓风机、水泵、球磨机等等。其功率多在 250KW 以上, 转速为 100~1500r/min, 额定电压为 6KV 或 10KV, 额定功率因数为 0.9 (超前)。同步电动机的设计数据及性能举例见表 1-1。

表中符号的意义为 U_N -额定电压, I_N -额定电流, D_{ji} -定子铁心内径, l_i -定子铁心长度, δ -气隙长度, A_i -电负荷, B_δ -气隙磁密, J -电流密度, T_{st}^* -全压起动时的起动转矩、标么值, T_p^* -全压起动时的牵入转矩、标么值, I_{st}^* -电动机的起动电流、标么值, η -效率。

带动水泵用的电动机, 多为立式同步电动机。如某厂生产的同步电动机的名牌数据为 1600KW, 6000V, 183A, 极数 40, 功率因数 0.9 (超前), 相数 3, 即为表 1-1 中的 25 号电动机。由所给数据可算出该电机的转速 (由 1-1 式) 为 150r/min。

另外, 同步电机还可作为调相机使用, 调相机专门用来调节电网的无功功率, 改善电网的功率因数, 以提高电网的运行经济性及电压稳定性。调相机过励磁时, 相当于电容元件, 吸收超前无功功率, 电网供给它的是超前于电网电压为 90° 的电流; 反之, 调相机欠励磁时, 相当于电感元件, 吸收滞后的无功功率, 电网供给它的是滞后于电网电压为 90° 的电流。

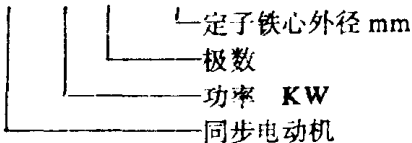
从原理上讲, 任何一台同步电机既可作为发电机, 也可作为电动机、调相机, 这就是电机运行的可逆性。当电磁转矩为制动性时, 同步电机运行于发电机状态; 当电磁转矩为驱动性时, 同步电机就运行于电动机状态。从结构上看, 三种同步电机的结构基本相同, 技术要求大多相似, 但也有些小的区别, 如对同步电动机在设计时就要考虑它的起动方式、起动转矩、起动电流及牵入转矩等; 对同步调相机由于不带机械负载, 它的轴颈可设计得细一些。通常, 调相机多设计成 4 极、6 极或 8 极。同步电动机根据不同转速的要求设计成 4 极、6 极、8 极、10 极、12 极、24 极、34 极、36 极、40 极等各种规格。而汽轮

发电机多半为 2 极或 4 极，水轮发电机的磁极数在 4~60 极之间。其他在冷却方式、选用材料、几何尺寸等方面都有一些不同点。

表 1-1 同步电动机的设计数据及性能举例

序号	型 号	U_N KV	I_N A	D_{il} mm	l_l mm	δ mm	A_l A/cm	B_g G	j_1 A/mm ²	j_2 A/mm ²	I_{a1}	T_{a1}	T_{pt}	T_{max}	$\eta\%$
1	T1250-4/1180	6	140	750	490	12	429	5950	3.91	2.77	5.76	1.9	1.27	2.17	95.7
2	T2000-4/1430	6	226	950	440	14	510	5460	4.27	2.64	4.37	1.33	0.94	1.89	95.6
3	T3200-4/1430	6	356	950	740	14	502	5550	4.05	2.55	5.58	1.93	1.17	1.89	96.3
4	T4000-4/1730	10	267	1140	590	18	500	5710	4.05	2.89	5.2	1.4	1.23	1.97	96
5	T5000-4/1730	10	333	1140	790	18	468	5880	3.78	2.78	6.46	1.86	1.5	2.06	96.2
6	T6300-4/1730	10	419	1140	990	18	491	5750	3.9	2.75	6.46	1.95	1.51	1.94	96.5
7	T1000-6/1430	6	129	982	340	10.5	422	7520	4.49	3.55	6.7	1.86	1.37	2.8	94.3
8	T2500-6/1730	10	192	1216	590	17	452	6550	4.03	4.4	5.8	1.17	1.36	2.7	94.8
9	T600-8/1180	6	90	850	440	6.5	453	6600	5.12	4.08	5.5	1.12	1.13	2.2	94.5
10	T2500-8/1730	6	316	1340	560	12.5	540	6300	4.54	4.5	5.56	1.53	1.2	2.34	95.2
11	T6300-10/1180	6	72	890	440	5	417	6750	5.15	4.67	6.15	2.08	1.01	2.24	93.8
12	T1000-10/1430	6	114	1100	440	7	415	6680	3.82	3.56	6.62	1.4	1.35	2.32	95
13	T400-12/1180	6	46.1	890	360	3.5	385	6840	5.06	4.7	5.83	1.28	1.14	2.34	93.5
14	T10000-12/2600	10	752	2100	1200	22.5	547	6400	4.1	2.98	6.63	2.6	1.44	3.2	96.4
15	TK250-14/1180	6	29	900	260	3	336	7150	5.5	3.6	4.63	1.63	0.8	2.8	91.2
16	TK1000-16/1730	6	115	1400	410	5	396	7350	4.45	4.4	5.62	1.36	1.05	2.5	94.2
17	TK630-24/2150	6	73	1854	210	4	397	7800	4.4	4.67	5.26	1.13	0.97	2.58	92.3
18	TMK400-32/2150	6	47.6	1880	320	3.5	232	7200	5.07	3.16	6.6	2.62	1.17	3.6	90.7
19	TMK500-36/2600	6	59	2320	240	3.5	280	7250	5.17	3.76	6.86	2.53	1.2	3.1	91.1
20	TMK630-36/2600	6	74	2320	290	3.5	306	7100	5.3	3.7	6.5	2	1.05	2.8	92
21	TMK800-36/2600	6	93.5	2320	340	3.5	333	7240	5.73	4.02	6.52	1.92	1.14	2.63	92.2
22	TMK1000-36/2600	6	116.5	2320	390	3.5	352	7200	5.36	3.95	6.4	1.97	1.04	2.78	93
23	TMK1250-40/3250	6	145	2990	340	4	334	7160	5.11	4.3	6.5	2.38	1.02	2.76	92.5
24	TL800-24/2150	6	92	1854	310	4.5	409	7650	4.18	2.3	4.83	0.53	1.31	1.87	93.2
25	TL1600-40/3250	6	183	2870	360	4.5	424	8250	5.62	2.4	4.44	0.52	1.37	1.87	93.4
26	TL3000-40/3250	6	340	2940	580	4.5	497	8260	4.83	2	4.5	0.6	1.15	1.71	95.3
27	TL6000-56/5350	6	668.2	5000	600	5	460	7600	2.92	2.63	5.3	0.6	1.39	1.5	94
28	TL5000-60/5500	6	563	5150	450	5	501	7400	3.67	2.56	4.34	0.46	1.2	2.32	94

注: 型号说明 T 1250-4/1180



TK-压缩机用同步电动机; TMK-矿山球磨机用同步电动机; TL-立式同步电动机。

近年来，利用可控硅变频装置，使同步电动机能够通过变频作调速运行。此外，同步电动机由于它的同步特性，因此，不仅应用于动力装置系统，在控制领域中也获得广泛的应用。

由于同步发电机、同步电动机和同步调相机具有相同的原理，基本相同的结构，而只是运行方式的不同，因此，为对同步电机有一个全面而系统的了解，本章将主要讨论同步发电机的基本原理、基本结构和运行方式，在此基础上，从运行可逆性角度，自然可顺理

成章的导出同步电动机的运行特性和具备的特点。

§ 1-2 同步电机的工作原理

同步发电机是根据电磁感应定律，亦即导体和磁通之间有相对运动或者称为导体切割磁通的原理而发电的。所以，同步发电机基本上是由产生磁通的磁极和切割磁通的导体两个主要部分组成。一般情况下，磁极由原动机带动旋转，称为转子，导体是固定的，称为定子或电枢。在定子和转子之间有气隙，如图 1-1 所示。定子上装有 AX、BY、CZ 三相绕组（也称电枢绕组），它们在空间相差 120° 的电角度，每相的匝数结构完全相同。转子是一对磁极，上面装有转子绕组，由直流电励磁，使磁通从 N 极发出，经过气隙、定子铁心、气隙，进入 S 极而构成闭合回路，如图中虚线所示。当转子由原动机拖动逆时针转动时，磁通与导体之间有相对运动，相当于磁极不动，导体以相反运动方向切割磁通，则根据右手发电机定则，AX 绕组中的感应电势为零；B 导体的感应电势方向向内，Y 导体的向外；C 导体的感应电势方向向外，Z 导体的向内。如规定 A、B、C 三导体中向外的感应电势为正，则三相电势的正弦波形曲线如图 1-2 所示。从图看出，随着转子的转动，首先使 A 相绕组中感应电势为最大值，当转子再转过 120° 和 240° 时，依次使 B 相绕组和 C 相绕组中感应电势最大。因此，A 相感应电势将超前 B 相感应电势

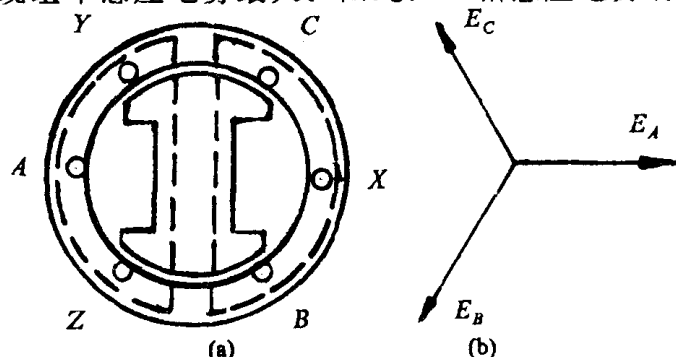


图 1-1 同步发电机的工作原理和电势相量图

120° ，B 相电势又超前 C 相电势 120° ，三相电势大小相等，相位互差 120° ，这就是三相同步电机的简单工作原理。如果磁极产生的磁场沿圆周作出正弦分布，则绕组中的感应电势也按正弦规律变化。我们知道，正弦量可用相量表示，三相电势的相量图如图 1-1 (b) 所示。

当转子仅有一对磁级时（图 1-1），转子转动一周，绕组中的感应电势恰好完成一个循环（图 1-2）；若转子有两对磁极（图 1-3），则转

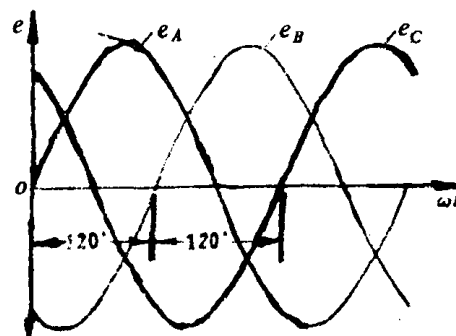


图 1-2 定子绕组三相电势波形

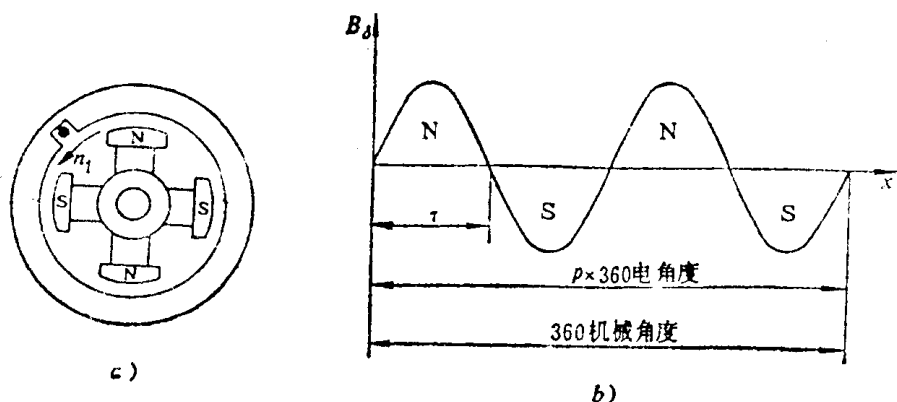


图 1-3 4 极同步发电机

子旋转一周，感应电势变化了两个循环。依此类推，若转子有 P 对磁极，则转子转动一周，感应电势变化了 P 个循环。设转子转速为 $n \text{ r/min}$ ，则每秒钟电势的循环数，即定子绕组中电势的频率为

$$f = \frac{pn}{60} \quad (1-2)$$

显然，上式即 (1-1) 式。我国的电网频率为 $f = 50 \text{ HZ}$ ，因此，电机的磁极对数 P 和转速 n 成反比，例如汽轮发电机多半为 2 极 ($P = 1$)，转速为 3000 r/min ，因为提高转速可提高运行效率，减少电机尺寸和造价；而对水轮发电机，由于转速低，故极数多，如 $P = 30$ ，则 $n = 100 \text{ r/min}$ 。磁极对数 P 与转速 n 之间的关系如表 1-2 所示。在多级电机中，机械角度和电角度一定要区分清楚。如上所述，一对磁极对应一个正弦波，相当于 360° 的电角度。如果磁极对数是 P ，则转子转过一周，从几何上看，相当于 360° 的机械角，故电角度和机械角度之间有

$$\text{电角度} = P \times \text{机械角度} \quad (1-3)$$

这就是 (1-2) 式。

表 1-2

P	1	2	3	4	5	6	8	10
$n(\text{r/min})$	3000	1500	1000	750	600	500	375	300

如果同步机作为电动机运行，必须在定子上加三相交流电源，电机内产生一旋转磁场。这时转子绕组中加上直流励磁，则转子将在定子旋转磁场的带动下，沿定子磁场方向以相同的转速旋转，转子的转速仍由 (1-1) 式确定。这说明，同步电机无论是作为发电机还是作为电动机运行，其转速和频率之间永保持恒定关系。

上面已谈过，同步发电机不论是磁极转动还是电枢绕组转动，都可以产生感应电势，但实际上都采用旋动磁极式，电枢是固定的。这是因为近代同步电机电枢绕组的电压很高，输出电流也很大，如果电枢转动，则电流必须通过滑环和电刷引出，都非常困难。但采用旋转磁极式，通过滑环和电刷的电流仅是产生磁场的励磁电流，这个电流和电压都要小得多，所以大容量的同步电机都做成旋转磁极形式，只有小容量的同步电机，由于工程上的某些特殊要求才做成旋转电枢式。

在旋动磁极式的同步电机中，磁极的形状又可分为隐极式和凸极式两种。如图 1-4

所示。

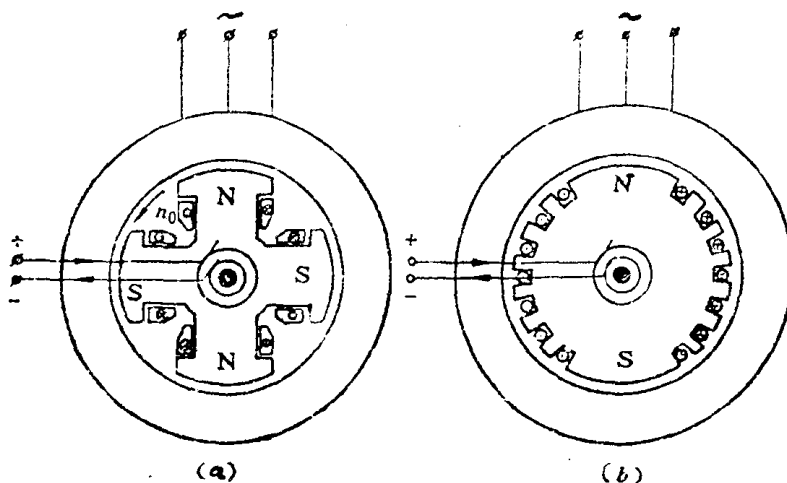


图 1-4 旋转磁极式同步电机结构示意图

(a)凸极式

(b)隐极式

隐极机的气隙是均匀的，凸极机的气隙不均匀，至于采用那一种型式的转子和电机的转速有关。对于应用汽轮机作原动机的汽轮发电机，转速较高，转子宜做成隐极式；对于应用水轮机作原动机的水轮发电机和大型水泵等用的同步电动机，由于转速较低，要求有较多的极数，转子多做成凸极式。

发电机在运行时，由于绕组中电流的铜损耗和铁心中的铁损耗而产生热量，因此电机的冷却也非常重要。早期电机功率较小，基本上采用空气冷却，以后又发展的氢冷却，效果比空气好。更进一步的冷却方式是将冷却物质与导体相接触，这称为内冷式。用水作为冷却物质为电机技术的发展开辟了一条新途径，发电机的定子和转子如果都采用水内冷方式，可大幅度地提高出力，一台发电机由空气冷改为双水内冷，其容量可提高二至四倍，甚至更多。

§ 1-3 隐极同步电机的基本结构

我国的汽轮发电机均为 2 极，转速为 3000r/min ，转速高可提高汽轮机的运行效率，减少机组尺寸和造价；转速高可使发电机的直径较小，而长度则较长，其定子内径和转子长度之比为 $D/L=0.17\sim 0.5$ 。汽轮发电机与汽轮机、励磁机配套成汽轮发电机组，安装在火力发电厂中，图 1-5 示出它的结构图。

汽轮发电机的结构，主要分为转子和定子两大部分。

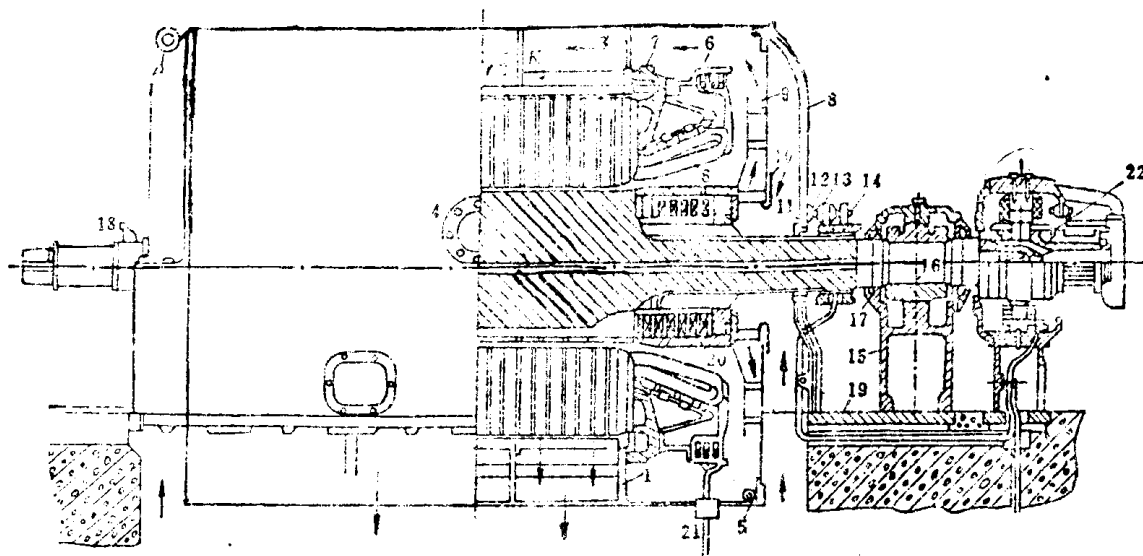


图 1-5 汽轮发电机结构图

1-定子机座 2-定子铁心 3-外壳 4-吊起定子设备 5-防火导水管 6-定子绕组 7-定子压紧环 8-外护板 9-里护板 10-通风壁 11-导风屏 12-电刷架 13、14-电刷 15-轴承座 16-轴承衬 17-油封口 18-汽轮机的油封口 19-基础板 20-转子 21-端线 22-励磁机

一、定子

汽轮发电机（或隐极同步电动机）的定子，由机座、定子铁心、定子绕组以及端盖、挡风装置等部件组成。对于水内冷电机，还包括进水的特殊结构。

1. 机座

机座是支撑和固定铁心和绕组等部件的，它还要求有足够的通风位置。机座一般都用钢板焊接而成，要求它有足够的强度和刚度，以承受加工、运输及运行过程中的各种作用力。机座和铁心外圆之间还留有空间，加上隔板形成风道。外壳、端盖和护板构成空间，加上风道、冷却风室以及风扇等构成密闭的冷却系统。

2. 定子铁心（电枢铁心）

同步电机的定子铁心呈圆环形，在它的内圆上开有放置线圈的槽。定子铁心由硅钢片叠成。电机容量较大时，定子铁心一般采用 0.35mm 厚的无取向冷轧硅钢片；当容量在 12.5 万 KW 以下时，则采用成本较低的 0.5mm 厚的热轧硅钢片。硅钢片的两面有绝缘层。为了便于铁心散热，在铁心沿轴向长度上，每隔 30~60mm 就留有 8~10mm 的风道。整个定子铁心用拉紧螺杆和特殊的非磁性端压板压紧后，固定在机座上，如图 1-6 所示。

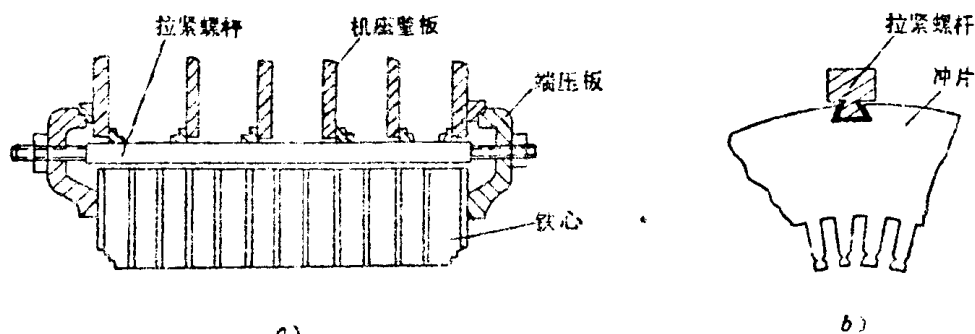


图 1-6 定子铁心结构

(a) 无磁性压板

(b) 定子铁心剖面

3. 定子绕组 (电枢绕组)

定子绕组由嵌在定子槽内的许多线圈按一定规律连接而成。定子线圈的两条边，放在铁心槽内的那一部分为直线部分，它能切割磁通而感应电势，故称为有效圈边；在铁心槽外部连接两直线部分又不切割磁通的导体称为端接部分。大型电机由于有效圈边跨距大，为了嵌线方便，常将一个线圈分成两半，嵌入槽内后，再将端接部分焊接起来，这叫做半组式线圈。

定子绕组一般都做成双层的结构，即将定子槽分成上、下两层，线圈的一边（又叫线棒）放在上层，另一边放在另一槽的下层（参见图 1-7）。一般都采用导电性能良好的铜线绕制成线圈。当铜线截面积较大时，就将许多根互相绝缘的并联股线组成线圈。若定子电流超过 1000 安时，还要把每股线进行换位，以减少涡流损耗。定子绕组的槽内换位方法如图 1-8 所示。铜线一般都采用玻璃丝包扁线，水冷电机由于通水需要，采用空心铜线和实心铜线相结合的方法，参见图 1-7。

绝缘是定子线圈的重要问题，一般电机的损坏，常因为绝缘引起，下面还要专节讨论。

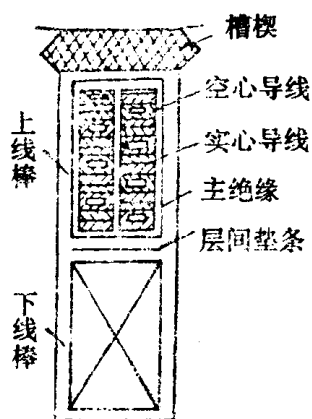


图 1-7 双层绕组

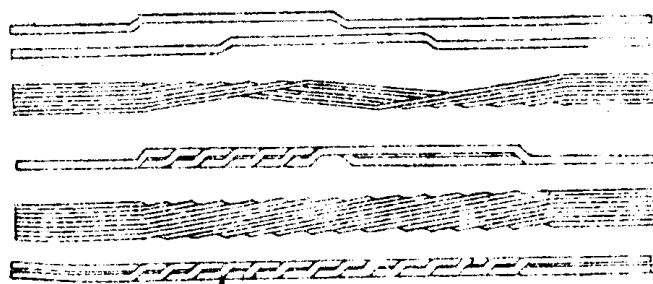


图 1-8 定子绕组的槽内换位方法

二、转子

汽轮发电机的转子由铁心、转子绕组、护环以及滑环、风扇等部件组成。

由于转速很高，转子所受离心力很大，为了很好地固定励磁绕组，转子采用隐极式。由于外径受限，增大电机容量，就只能增加转子长度。转子长度也受到转子刚度和振动等影响的制约，通风也比较困难，所以良好的通风、冷却系统对汽轮发电机尤为重要。

1. 转子铁心

转子铁心要有良好的导磁性能，又要有足够的机械强度，是最关键的部件之一，一般采用整块钢锭锻制而成。转子铁心的外形如图 1-9 所示，外表为圆柱形，没有显露的磁极，因此称为隐极式。在铁心上开有两组对称的槽，槽与槽之间的部分叫做齿。开槽部分约占圆周的 $2/3$ ，另外 $1/3$ 是不开槽的，形成一对大齿。大齿中心就是磁极的中心。在转子上开槽是为了安放励磁绕组。按槽的排列形状，又可分为平行式和辐射式，如图 1-10 所示，后者用得较普遍。有时在大齿区也开一些较小的槽并不安放绕组，只作为通风之用，称为通风槽。而嵌置线圈的槽称为嵌线槽。



图 1-9 汽轮发电机转子

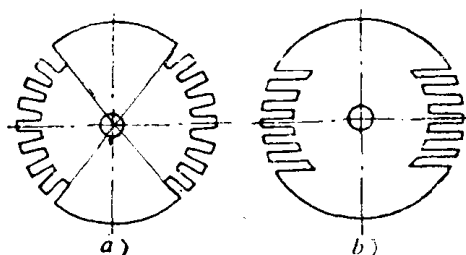


图 1-10 汽轮发电机的转子槽

(a)辐射形排列 (b)平行排列

2. 转子绕组（励磁绕组）

转子绕组为同心式绕组。它由多个从小到大的转子线圈组成，其中每个线圈内又含有许多匝。转子绕组就是将所有线圈串连起来，而将绕组的两头引出，连接到滑环上。至于转子线圈的截面，在空冷电机中为扁铜线。线圈绝缘分为两部分：一部分为对地绝缘或称槽绝缘，它是一只“U”形绝缘盒，放在槽内把线圈和铁心隔开；另一部分是一匝铜线与另一匝铜线隔开的匝间绝缘。由于转速很高，离心力大，转子绕组放入槽内后，要在上面用槽楔固定，槽楔材料的强度要求很高，并且要不导磁，所以一般采用铝铁镍青铜或硬质铝合金制成。至于绕组的端接部分，可以采用护环和中心环固定，如图 1-11 所示。而转子绕组的端接排列如图 1-12 所示。

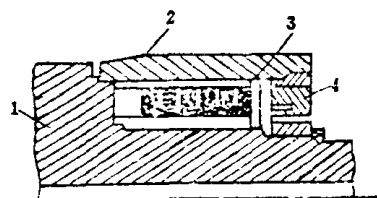


图 1-11 护环

1-转子本体；2-护环；3-绕组端接部分；4-中心环

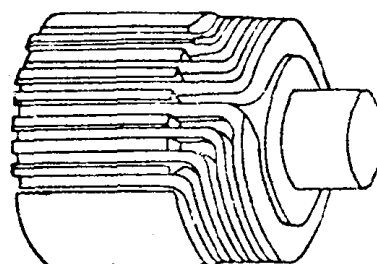


图 1-12 转子绕组的端接排列

3. 护环和中心环

护环是一个厚壁金属圆筒，用来保护转子绕组的端部，使其紧密地压在护环和转轴之间，不会因离心力而甩出。而中心环则用来支持护环，并阻止转子绕组端部沿轴向运动。转子旋动时，端部线圈的离心力全部作用于护环上，因此要求护环具有特别好的机械性能，而且不导磁，以免由于涡流而发热。目前采用 Cr-Mn 系统和 Cr-Ni 系统的反磁性材料钢护环锻件。

4. 其他部件

风扇是供电机内部通风冷却用的，一般装在转子两

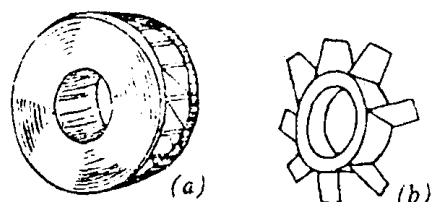


图 1-13 风扇

(a)离心式 (b)轴流式

头。转子转动时，风扇把冷空气吹进线圈和铁心，带走热量。风扇结构有两种型式，即离心式和轴流式。离心式风扇用于径向通风，风压高，风量小，效率较低，一般用于空冷电机；轴流式风扇用于轴向通风，其特点是风压低，风量大，效率较高，但制造上工艺要求高，一般用于大型的水冷电机中。两种风扇如图 1-13 所示。

滑环和炭刷的作用是将通入的直流电引入到转子绕组。滑环套在转子上和转子一起转动，它和转子绕组间有引线连接，而炭刷则是固定的。滑环和炭刷之间滑动接触，滑环的表面上开有螺纹，使磨损而产生的粉末沿螺纹方向排出，还可帮助散热；现在已广泛使用恒压式的炭刷结构，这种结构可以使炭刷在磨损过程中一直使弹簧保持恒定的压力，使维护工作量大为减轻。

§ 1-4 凸极同步电机的基本结构

凸极同步电机通常分为卧式和立式结构两类。绝大多数同步电动机、调相机和用内燃机或冲击式水轮机拖动的发电机都采用卧式结构。低速、大容量的水轮发电机和大型水泵用的同步电动机则采用立式结构。

一、卧式凸极同步电机的结构特点

卧式凸极同步电机和隐极同步电机以及异步电机的定子结构都基本相同。所不同的是转子结构。它由磁极、励磁绕组、磁轭、阻尼绕组、转轴及滑环等几部分构成。在极数较多、直径较大的同步电机中，磁轭与转轴之间还有支架，如图 1-14 所示。

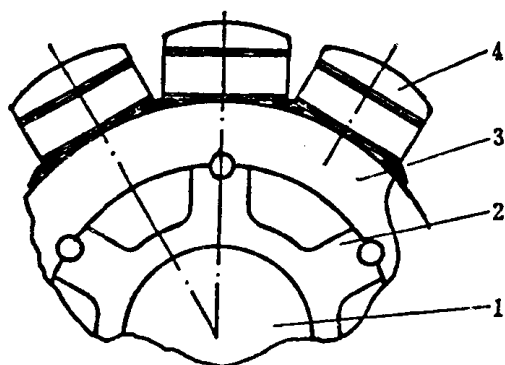


图 1-14 有星形支架的同步电机转子
1-轴 2-星形支架 3-磁轭 4-磁极

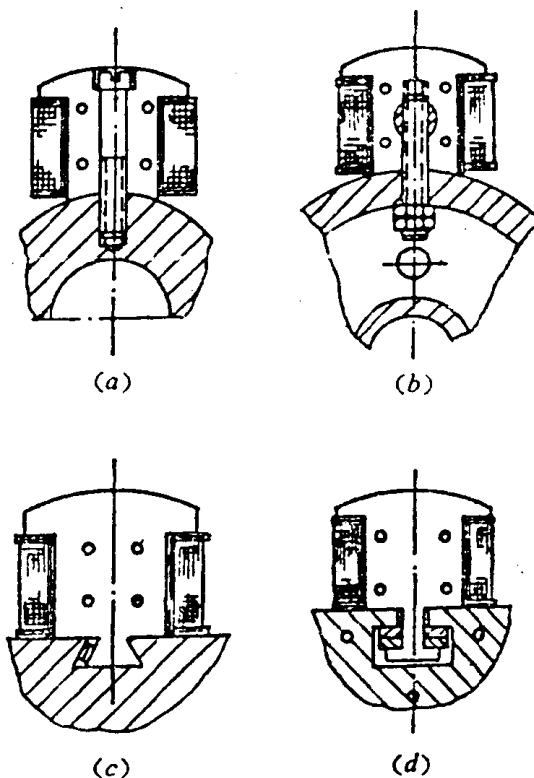


图 1-15 磁极与磁轭的连接方式
(a)(b)螺钉或螺杆连接 (c)鸠尾连接 (d)T 尾形连接

磁极一般由 1-3 毫米厚的钢板冲成冲片后迭压铆成。在速度高的电机中则采用实心磁极。磁极与磁轭之间的连接有螺杆连接，鸠尾连接和 T 尾形等连接方式，如图 1-15 所示。也有的将磁轭与磁极的极身铸在一起，在极身上装上转子线圈后，再装上极靴。极靴通过磁极螺钉紧固在极身上，如图 1-16 所示。

阻尼绕组和鼠笼结构相似，它是由许多插在磁极极靴槽中的钢条或黄铜条在两端用短路环连接起来构成的。

二、立式凸极同步电机的结构特点

下面以立式水轮发电机和大型水泵用电动机为例来介绍其典型结构，因为这两种电机的基本结构是相同的。

大中型同步电动机国产系列已在表 1-1 中列出。按同步电动机机械负载的性质可归结为六种系列产品，即 T、TK、TMK、TZ、TL、TG 等系列。T 表示一般用途的凸极同步电动机，TK 表示压缩机用，TMK 表示矿山球磨机用，TZ 表示轧钢机用，TL 表示立式同步电动机，TZ 系列表 1-1 中未列出。TG 表示高速隐极高速结构，其他五种均为凸极同步电动机系列。

与汽轮机相反，水轮机或大型水泵用的电动机的转速较低，因此极数也较多。这类电机直径大而轴向长度短。如表 1-1 中的 25 号电动机，轴向长度 $l_1 = 360\text{mm}$ ，而定子铁心内径 $D_{11} = 2970\text{mm}$ ，两者相差甚大。整个电机成一扁盘形，与细长圆柱形的汽轮发电机正好相反。

立式凸极同步电机的转动部分必须由一个推力轴承支撑着，它不仅要承受电机转子重量，还要承受水轮机转子重量和水流所产生的全部轴向推力，所以推力轴承是电机的一个重要部件。依照推力轴承所处的位置，立式同步机分为悬式和伞式两种基本结构形式，如图 1-17 所示。悬式是指把推力轴承装在转子上边的上机架中，整个转子是处于一种悬吊着的状态转动。在上机架中装有上导轴承 1。至于下导轴承的布置，有两种情况：图 1-17a) 是将下导轴承 4 装在下机架 5 中，再连同水泵或水轮机的导轴承（图中未绘出）而构成由三个导轴承组成的结构系统。图 1-17b) 则取消了下导轴承和下机架，而保留上导轴承 1 和水泵或水轮机的导轴承 6，组成两个导轴承的结构形式。

伞式是把推力轴承安放在电机转子的下部，好象一把伞将转子撑着，推力轴承装在固定于机坑基础上的荷重下机架 5 中。除了装在不荷重的上机架中的上导轴承外，一般在下机架上还装有一个下导轴承，连同水轮机或水泵上的导轴承组成三导轴承的伞式结构，参见图 1-17c)。如果取消下导轴承，则组成二导轴承的半伞式。图 1-17d) 更为简单，它取消了上导轴承，保留下导轴承与推力轴承，组成二导轴承的全伞式。

悬式机组运转时机械稳定性好，但上机架由于直径大，消耗钢材较多。因此悬式机组适于高水头。伞式机组机械稳定性差，但由于推力轴承是装在转子下部，轴向高度小，这

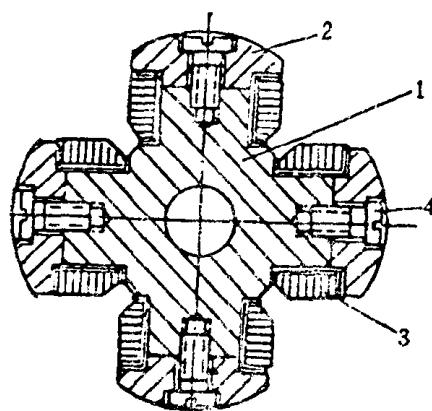


图 1-16 磁轭与极身铸在一起的转子结构

1-带极身的磁轭 2-极靴
3-磁极线圈 4-磁极螺钉

可使厂房高度和造价降低。通常转速较高的电机（150 转/分或以上），采用悬式；转速较低的电机（在 125 转/分以下），采用伞式。

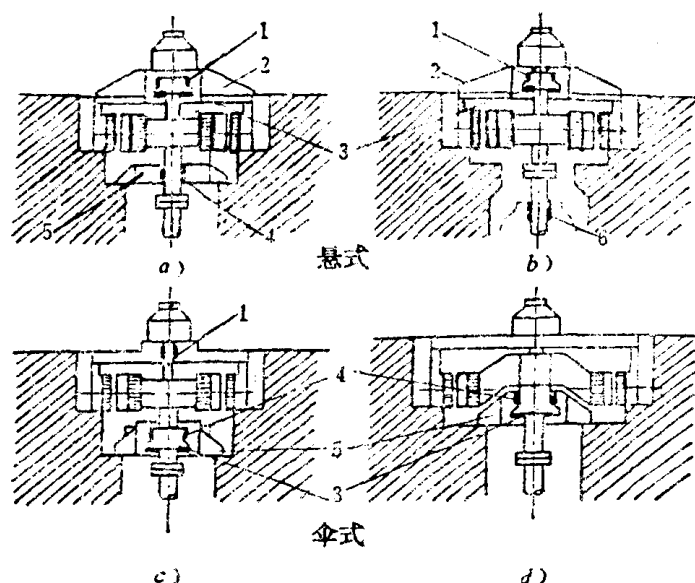


图 1-17 悬式和伞式同步电机示意图

1-上导轴承 2-上机架 3-推力轴承 4-下导轴承 5-下机架 6-轴承盖

以下简要介绍立式凸极同步电机的结构特点。

1. 定子

定子主要由定子铁心、绕组和机座组成。大容量的水轮发电机直径很大（常超过 10 米），为了便于运输，常把定子分成二、四或六块，运到电站后再拼装成一体。机座仍是钢板焊接结构。定子绕组与汽轮机主要有两点不同：（1）由于水轮机极数多，为了改善电压波形，广泛采用分数槽绕组；（2）一般采用单匝波绕组，其上、下层导线用两根线棒分别制造，嵌线后再连接起来。

2. 转子

转子主要由转轴、转子支架、转子磁轭和磁极等部分组成。由于水轮发电机的转子尺寸很大，因此在转轴和转子磁极之间增加了转子支架这样一个结构。转子磁轭主要用来组成磁路，磁极固定在磁轭上，一般用 2~5 毫米厚的钢板冲成扇形片，交错迭成整圆，再用拉紧螺杆固紧，在其外沿冲有倒 T 形缺口以装配磁极。磁极一般采用 1~1.5 毫米厚钢板冲片迭成，两端加磁极压板，用螺杆拉紧。磁极上套装有励磁绕组，励磁线圈多由扁铜线绕成。在极靴上装有阻尼绕组，整个阻尼绕组由插入极靴阻尼孔内的裸铜条和端部铜环焊接而成。阻尼绕组可以减小并联运行时转子的振荡幅值，对同步电动机主要作为起动绕组用。

3. 上、下支架及轴承

对于悬式电机而言，上机架的材料占总材料的相当大一部分，而对伞式电机来说，上机架大为简化，从而节省了结构材料。由 1-18 可明显看出两种型式电机结构上的不同。