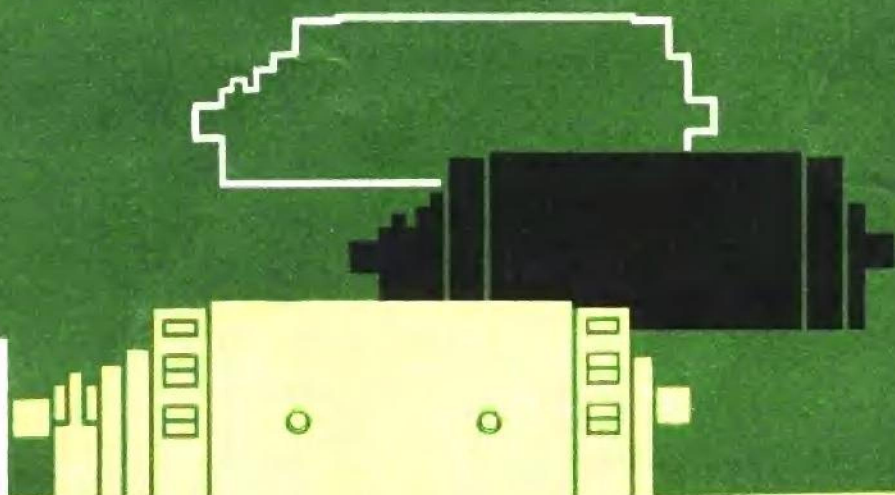


电机理论与运行 下册

汤蕴璆 史乃 沈文豹 编



水利电力出版社

电机理论与运行

下 册

汤蕴璆 史乃 沈文豹 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 13.75印张 361千字
1984年5月第一版 1984年5月北京第一次印刷

印数 0001—9780册 平装定价 1.70 元

书号 15143·5302

内 容 提 要

《电机理论与运行》共计七篇六十二章，分上、下两册出版。上册包括变压器、交流电机理论的共同问题和异步电机等共三十五章，下册包括同步电机和直流电机等共二十七章。

本书系下册，共三篇，内容分为两部分。前两篇是基本部分，阐述几种主要型式电机的基本理论、分析方法和运行性能。第七篇是专题部分，主要阐述同步发电机的暂态、空载电势波形和蛙形绕组、可控硅供电的直流电动机等问题。专题部分内容系根据生产实践的需要，参考国内、外有关著作和文献选编的。

本书供电力、电机和其它有关专业的科技人员使用，也可供研究生和大学生学习参考用。

目 录

第五篇 同 步 电 机

第三十六章 同步电机的类型和基本结构	1
36-1 同步电机的基本类型	1
36-2 隐极和凸极同步电机的基本结构	3
第三十七章 同步发电机的基本原理	9
37-1 同步发电机的空载运行	9
37-2 对称负载时的电枢反应	11
37-3 隐极同步发电机的电势方程式、相量图和等效电路	18
37-4 双反应理论	23
37-5 凸极同步发电机的电势方程式和相量图	26
37-6 同步发电机的功率和转矩方程式	31
37-7 小结	32
第三十八章 同步发电机的特性	34
38-1 空载特性和短路特性	34
38-2 零功率因数负载特性	41
38-3 外特性和调整特性	45
38-4 用电势-磁势图决定额定励磁电流和电压变化率	47
38-5 同步发电机的损耗和效率	49
38-6 稳态功角特性	52
38-7 小结	56
第三十九章 同步发电机的并联运行	57
39-1 同步发电机投入并联的条件和方法	57
39-2 与无穷大电网并联时同步发电机有功功率的调节, 静态稳定	61
39-3 无功功率的调节	64
第四十章 同步电动机和同步补偿机	66
40-1 同步电动机的基本方程式和相量图	66

40-2	同步电动机的运行特性	70
40-3	同步补偿机	73
40-4	同步电动机的起动	75
40-5	小结	78
第四十一章 同步发电机的不对称运行		80
41-1	不对称运行时同步发电机的阻抗和等效电路	81
41-2	同步发电机的单相短路	86
41-3	线间短路	89
41-4	小结	90
第四十二章 同步发电机的三相突然短路		91
42-1	分析同步电机暂态的简化方法	92
42-2	无阻尼绕组的同步发电机三相突然短路时的物理过程	94
42-3	暂态电抗和暂态时间常数	100
42-4	阻尼绕组对突然短路过程的影响	105
42-5	小结	109
第四十三章 同步发电机的励磁系统		110
43-1	对励磁系统的要求	110
43-2	同轴直流电机励磁系统	112
43-3	它励式整流器励磁系统	119
43-4	自励式整流器励磁系统	122
43-5	发电机的灭磁	127
第四十四章 其它用途的同步电机		130
44-1	磁阻同步电动机	130
44-2	磁滞同步电动机	133
44-3	感应子式中频同步发电机	136
第四十五章 国产同步电机简介		141
45-1	国产同步发电机	141
45-2	国产同步电动机和补偿机	148

第六篇 直 流 电 机

第四十六章 直流电机的类型和基本结构	150
---------------------------------	-----

46-1	直流电机的作用原理	150
46-2	直流电机的基本结构	152
46-3	直流电机按励磁方式的分类	156
第四十七章 直流电枢绕组		157
47-1	直流电枢绕组的构成原则和基本特点	157
47-2	单叠绕组	160
47-3	复叠绕组	162
47-4	单波绕组	163
47-5	复波绕组	165
47-6	直流电枢绕组的对称条件	167
47-7	均压线	167
47-8	各种绕组的应用范围	170
第四十八章 直流电机的基本原理		170
48-1	直流电机的磁势和磁场	171
48-2	电枢绕组的感应电势和电磁转矩	179
48-3	直流电机的基本方程	182
48-4	直流电机的可逆性	187
第四十九章 直流发电机的特性		188
49-1	它励发电机的特性	188
49-2	并励发电机的自励条件和特性	193
49-3	复励发电机的特性	197
第五十章 直流电动机		199
50-1	直流电动机的工作特性	200
50-2	直流电动机的机械特性和电动机组稳定运行的条件	204
50-3	直流电动机的起动	208
50-4	直流电动机的调速	213
50-5	直流电动机的制动	217
50-6	各种直流电动机的应用范围	219
第五十一章 直流电机的换向		220
51-1	换向的电磁原理	221
51-2	电抗电势的计算	226
51-3	电刷和换向器之间滑动接触的概念	227

51-4	火花及其产生的原因	231
51-5	换向极和改善换向的其它方法	233
51-6	无火花区和换向的试验调整	235
51-7	电位差火花、环火及其防止方法	237
第五十二章 其它用途的直流电机		239
52-1	直流测速发电机	240
52-2	直流伺服电动机	242
52-3	直流力矩电动机	244
52-4	交磁电机放大机	245
52-5	单极直流电机	248
52-6	磁流体发电机	250
第五十三章 国产直流电机简介		251

第七篇 同步电机、直流电机部分专题

第五十四章 同步发电机的空载电势波形		259
54-1	同步发电机电压谐波的危害和波形的质量指标	259
54-2	定子槽开口影响的简略分析	261
54-3	定子绕组谐波电势的定量计算	267
54-4	斜槽的作用	275
54-5	阻尼绕组的影响	278
第五十五章 同步电机的噪声		280
55-1	凸极同步电机中的径向力波	281
55-2	凸极同步电机定子的径向振动	284
55-3	电磁噪声的计算	286
第五十六章 暂态运行时同步电机的基本方程		291
56-1	理想同步电机的基本方程	291
56-2	dq0变换和派克方程	303
56-3	同步电机的标么值	313
56-4	恒速运行时同步电机的电压方程	318
56-5	消去转子电流时同步电机的电压方程	320
56-6	同步电机的电抗函数	324
第五十七章 同步发电机三相突然短路的数学分析		332

57-1	无阻尼绕组的同步发电机的三相突然短路	333
57-2	装有阻尼绕组的同步发电机的三相突然短路	337
第五十八章 同步电机的异步稳态运行		341
58-1	励磁绕组短接时同步电动机的异步稳态运行	342
58-2	转子励磁对同步电动机异步运行的影响	349
58-3	同步电机的负序阻抗	355
第五十九章 同步电机的振荡		358
59-1	功率角作正弦小振荡时同步电机的运行	358
59-2	同步电机的强迫振荡	364
59-3	同步电机的自发振荡	366
第六十章 同步电机参数的测定		368
60-1	稳态参数的测定	368
60-2	暂态参数的测定	380
第六十一章 蛙形绕组		387
61-1	蛙形绕组的构成条件	388
61-2	单蛙绕组	390
61-3	双蛙和三蛙绕组	393
61-4	拉杜尔式蛙绕组	395
第六十二章 可控硅供电的直流电动机		399
62-1	单相和三相整流电路	399
62-2	可控硅供电的直流电动机的运行	410
62-3	可控硅供电的直流电动机的特点	420
参考书目		428

第五篇 同 步 电 机

第三十六章 同步电机的类型 和基本结构

本章主要说明同步电机的作用原理、类型和基本结构。

36-1 同步电机的基本类型

一、同步电机的特点

电机的转子转速 n 与电网频率 f 之间具有下列固定不变的关系，即

$$f = \frac{pn}{60} \text{ 或 } n = n_s = \frac{60f_1}{p} \quad (36-1)$$

这种电机就叫作同步电机；转速 n_s 称为同步转速。

通常，三相同步电机的定子是电枢，定子绕组一般与三相交流电网相连接，转子则为直流励磁的主磁极。正常三相对称运行时，电枢磁势为一正向同步旋转的旋转磁势；由于励磁电流为一恒定电流，故只在转子以同步转速旋转时，定、转子磁势之间才能保持相对静止并得到恒定的电磁转矩。

只在单一的转速——同步转速下才能得到恒定转矩，在稳态、电网频率 $f = \text{常值}$ 的条件下，同步电机的平均转速恒为同步转速而与负载的大小无关，这是同步电机和异步电机的基本差别之一。

二、同步电机的基本类型

同步电机可按运行方式、频率和结构型式进行分类。

按运行方式和能量转换方向，同步电机可分为发电机、电动机和补偿机三类。发电机把机械能转换为电能；电动机把电能转

换为机械能；补偿机专门用来调节（发出或吸收）电网的无功功率、改善电网的功率因数，在补偿机内基本没有有功功率的转换。从原理上讲，任何一台同步电机既可作为发电机，亦可作为电动机、补偿机，这就是电机运行的可逆性。现代大型电站中的交流发电机绝大多数是同步发电机，在工矿企业和电力系统中，同步电动机和补偿机用得亦不少。

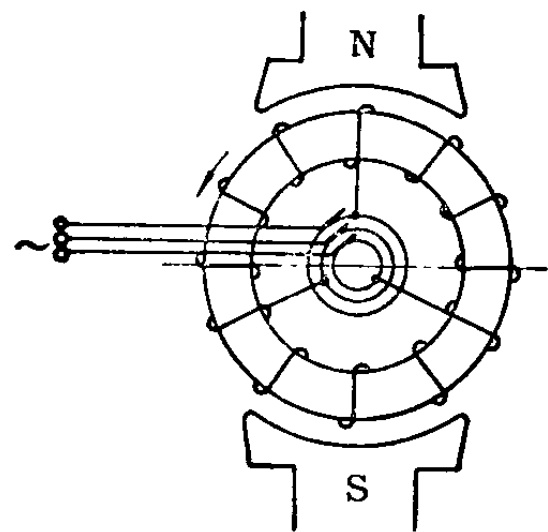


图 36-1 旋转电枢式
同步电机

按照结构，同步电机可分为旋转电枢式和旋转磁极式两种，如图36-1和36-2所示。前者在小容量同步电机中得到某些应用，后者广泛用于高压、中大容量的同步电机，并成为同步电机的基本结构型式。在旋转磁极式结构里，电枢是定子，磁极装在转子上；由于励磁部份的电压和容量常比电枢的小很多，所以电刷和集电环的负荷和工作条件就大为减轻和改善。

集电环的负荷和工作条件就大为减轻和改善。

在旋转磁极式中，按照磁极的形状，又可分为凸极式和隐极式两类，如图36-2（a）、（b）所示。隐极式的气隙是均匀

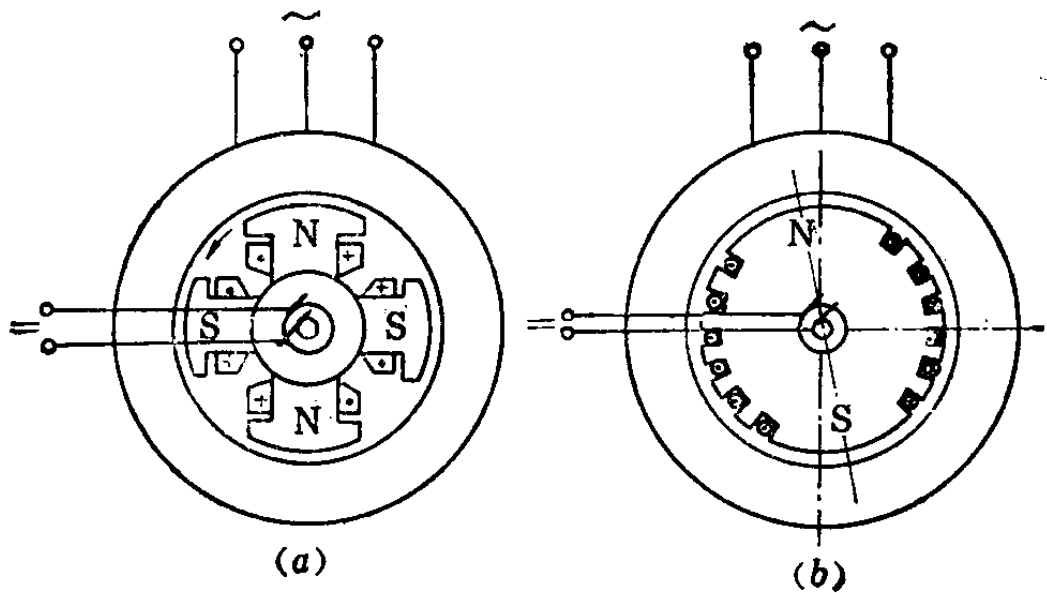


图 36-2 旋转磁极式同步电机
(a)凸极式；(b)隐极式

的，转子做成圆柱形；凸极式的气隙是不均匀的，极弧下气隙较小，极间部份较大。

在 $f = 50$ 赫时，同步电机的最高转速为 3000 转/分。对同步转速为 3000 转/分的电机，从转子的机械强度和更好地固定转子绕组来看，采用把励磁绕组分布于转子表面各个槽内的隐极式结构较为可靠、合理。当转速低于 1000 转/分（即 $2p \geq 6$ ）时，转子的圆周速度和离心力较小，此时可用结构和制造上比较简单的凸极式结构。

同步发电机常用汽轮机或水轮机作为原动机来拖动，前者叫做汽轮发电机，后者叫做水轮发电机。由于汽轮机是高速原动机，所以汽轮发电机一般都是隐极式；水轮机是低速原动机，所以水轮发电机通常都是凸极式。同步电动机、由内燃机拖动的同步发电机和补偿机，一般亦做成凸极式。

36-2 隐极和凸极同步电机的基本结构

一、隐极同步电机的结构

以汽轮发电机为例来说明隐极同步电机的基本结构。

现代的汽轮发电机均为二极（即 $n_s = 3000$ 转/分），因为提高转速可以提高汽轮机的运行效率，减小机组的尺寸和造价。由于转速高，所以汽轮发电机的转子直径较小，长度则较长；现代

汽轮发电机的定子内径和转子长度之比 $\frac{D}{l} \approx 0.17 \sim 0.5$ 。

图36-3表示一台汽轮发电机的剖面图。

汽轮发电机的定子由定子铁芯、定子绕组、机座、端盖、挡风装置等部件组成。定子铁芯一般用 0.5 毫米厚的硅钢片叠成，每叠为 3~6 厘米不等。叠与叠之间留出 10 毫米宽的通风槽，然后用特殊的非磁性压板把整叠铁芯压紧，固定在机座上。

从机械应力和发热方面来看，汽轮发电机里最吃紧的部件是转子。大容量二极汽轮发电机的转子周速可达 150~160 米/秒。

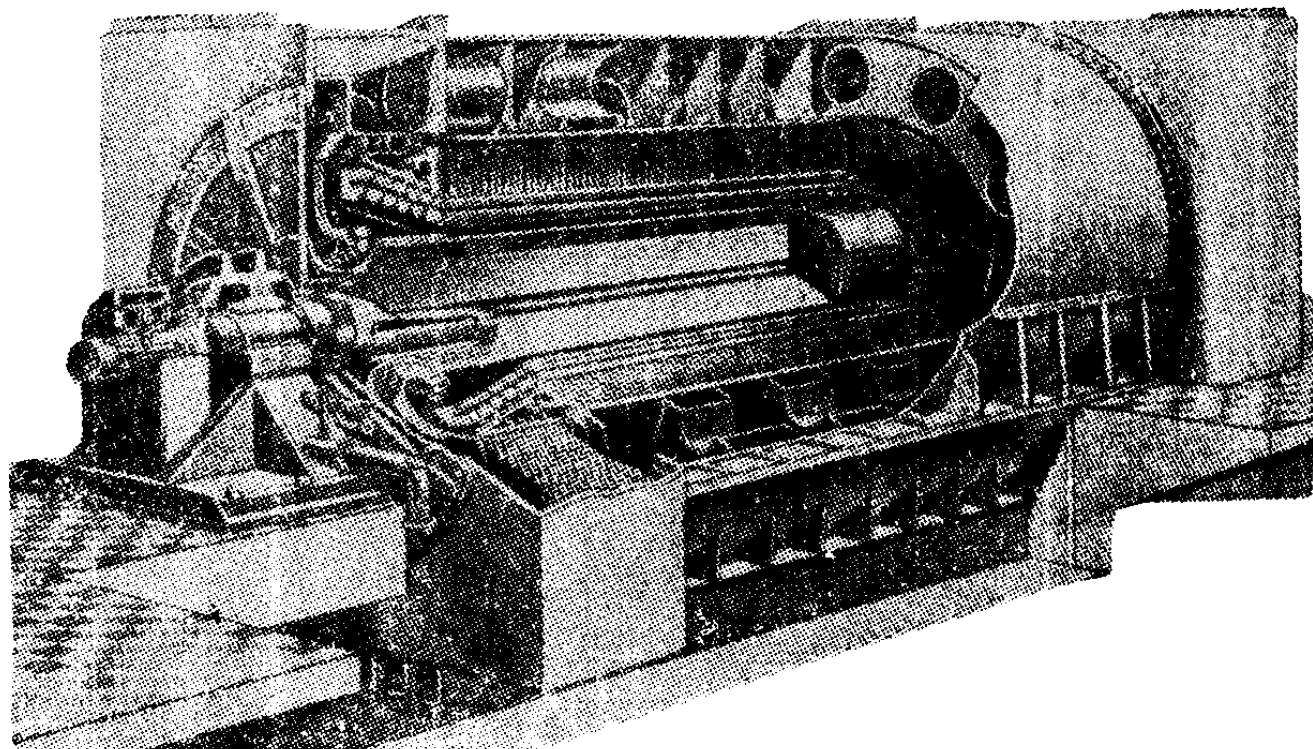


图 36-3 汽轮发电机的剖面图

在这样高的周速下，部件的离心力可在转子的某些部份内产生极大的应力，因此现代汽轮发电机的转子一般都用整块的具有良好导磁性能的高强度合金钢锻成。在转子的两个极距下约 $2/3$ 部份

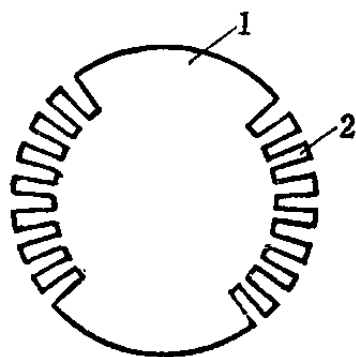


图 36-4 汽轮发电机
转子上的大齿和小齿
1—大齿，2—小齿

都铣有凹槽，励磁绕组就嵌在这些槽里；不开槽的部分则形成一个“大齿”，整个嵌线部份加上大齿就组成发电机的主磁极，如图36-4所示。为把励磁绕组可靠地固定在转子上，槽内楔有金属槽楔，端部套上用高强度材料锻成的非磁性护环。

图36-5表示一台已经嵌完线的汽轮发电机的转子。

由于 D/l 值很小（即机身细长），电机中部的通风比较困难，所以良好的通风、冷却系统对汽轮发电机很重要。通常，汽轮发电机的通风系统要比其它电机复杂。

二、凸极同步电机的结构

凸极同步电机通常分卧式（横式）和立式结构两类。大多数同步电动机、补偿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则采用立式结构。

卧式同步电机的定子结构和异步电机基本相同，定子亦由机座、铁芯和定子绕组等部件组成；转子则由主磁极、磁轭、励磁绕组、集电环和转轴等部件组成。图36-6表示一台凸极同步电动机的转子铁芯；图36-7表示一台已装配好的同步电动机的转子。

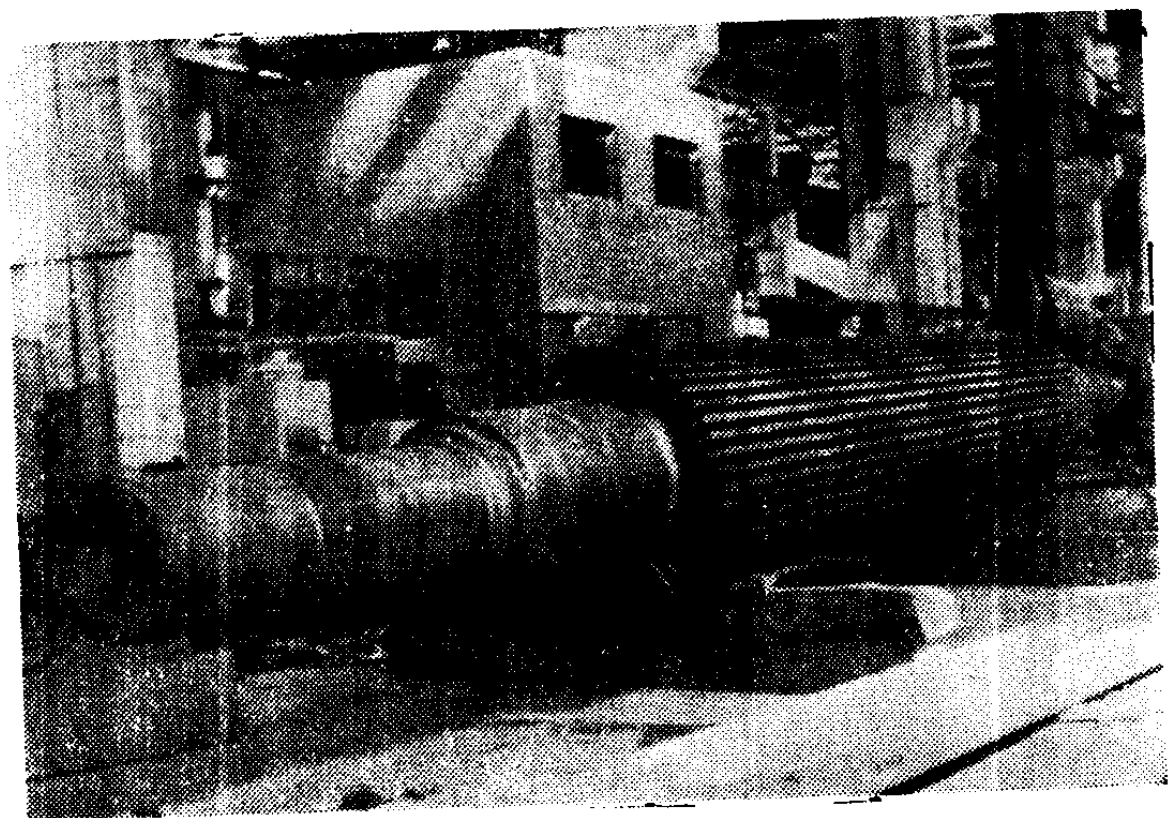


图 36-5 二极汽轮发电机的转子

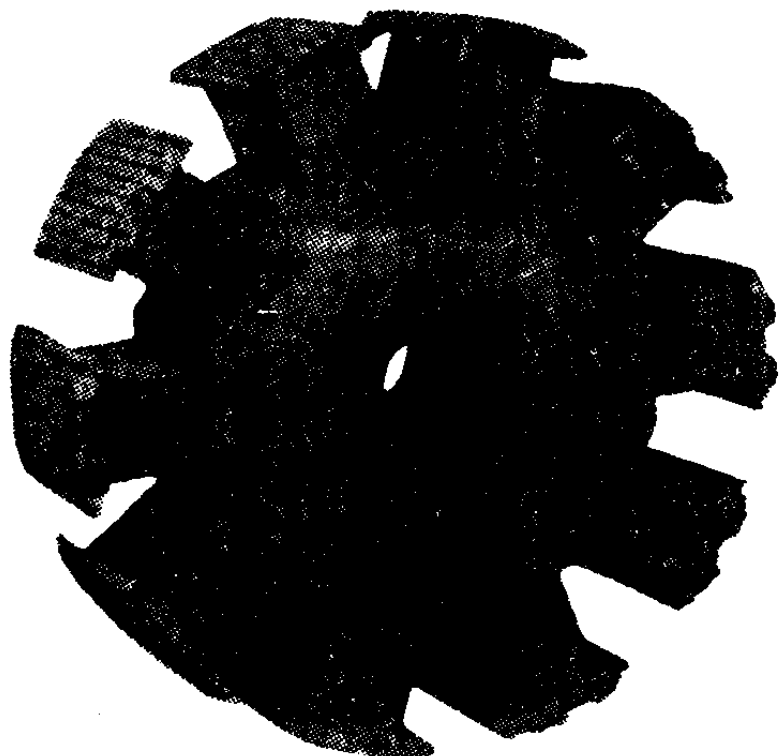


图 36-6 凸极同步电动机的转子铁芯 ($2p = 10$)

除励磁绕组外，凸极同步电机的转子上还常装有阻尼绕组，如图36-8所示。它与笼型转子异步电动机中的笼型结构相似，整个阻尼绕组由插入极靴阻尼孔内的铜条和端接短路铜环焊接组成。阻尼绕组可以减小同步发电机在并联运行时转子的振荡，对同步电动机，主要作为起动绕组用。

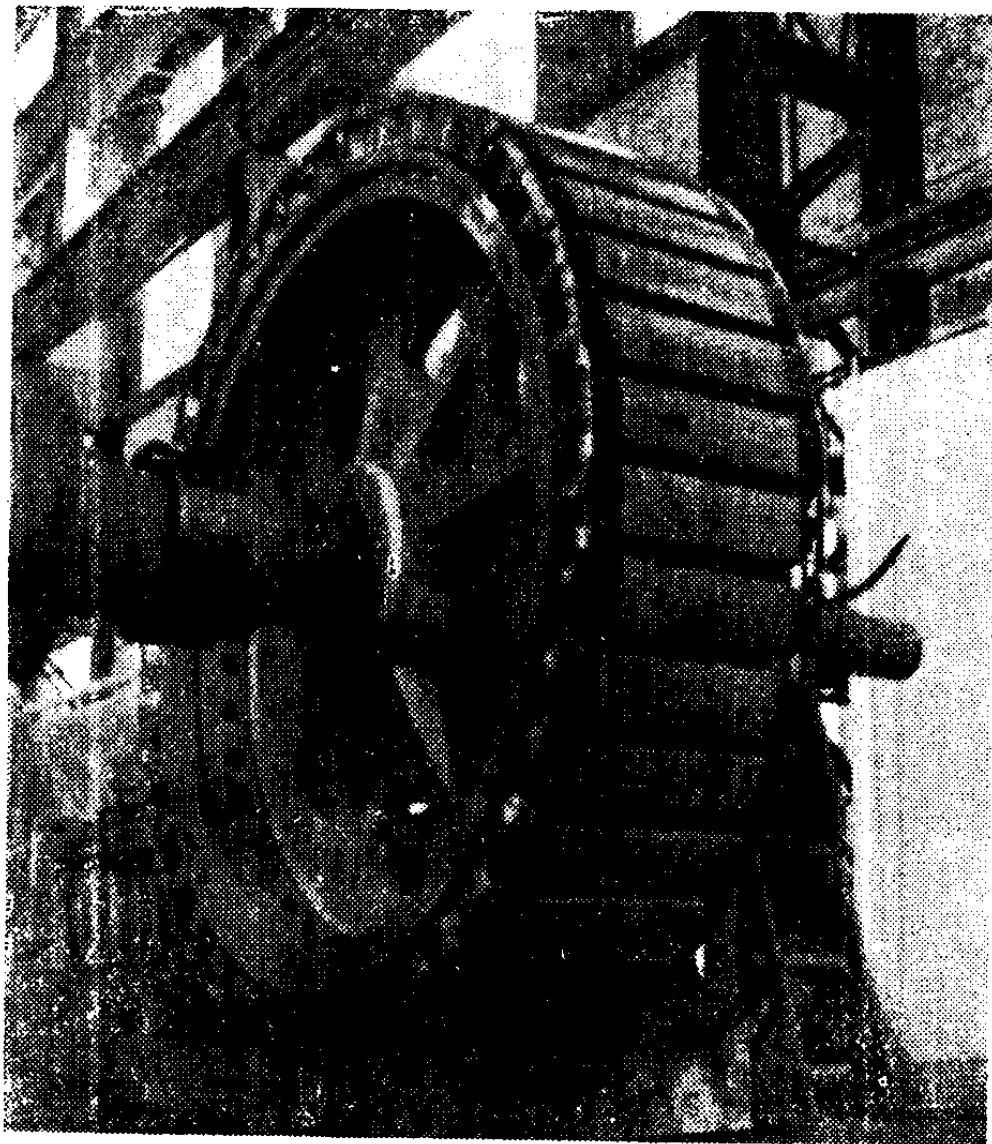


图 36-7 凸极同步电动机的转子

下面简要介绍立式凸极同步发电机-水轮发电机的结构型式。按照推力轴承的放置位置，立式水轮发电机有“悬吊式”和“伞式”两种基本结构型式。悬吊式的推力轴承放在上机架的上部或中部，发电机和水轮机转子的重量以及水推力全部“悬吊”在电机上部，通过推力轴承、上机架传递到机座和地基上，如图36-9（a）所示；伞式结构的推力轴承则放在转子下部的下机架上或在水轮机顶盖上，如图36-9（b）所示。悬吊式结构的优点为：转速较高、 D/l 较小时，运行较稳定。伞式结构的优点为：

负重机架的尺寸较小，钢材较省，发电机和电厂的厂房高度可较低。

图36-10表示一台哈尔滨电机厂制造的 125000 千瓦水轮发电机的分瓣定子，图36-11表示一台哈尔滨电机厂制造的 100000 千瓦水轮发电机外型图。

凸极机的特点是转子直径大、长度短；在低速水轮发电机中， D/l 可达5~7或更大。

三、额定值

同步电机的额定值有：

(1) 额定容量 S_N (千伏安) 或额定功率 P_N (千瓦)。指电机输出功率的保证值。发电机通过额定千伏安数可以确定电枢电流，通过千瓦数可以确定配套原动机的容量。电动机的额定容量一般用千瓦数表示，补偿机则用千伏安表示。

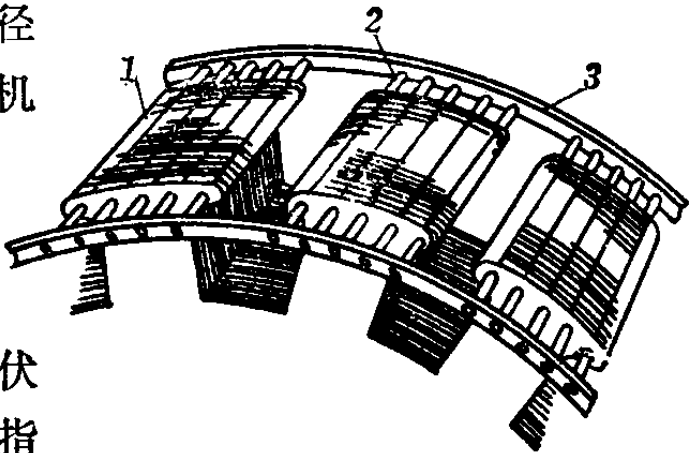


图 36-8 阻尼绕组装配图

1—极靴；2—阻尼铜条；3—端接短路铜环

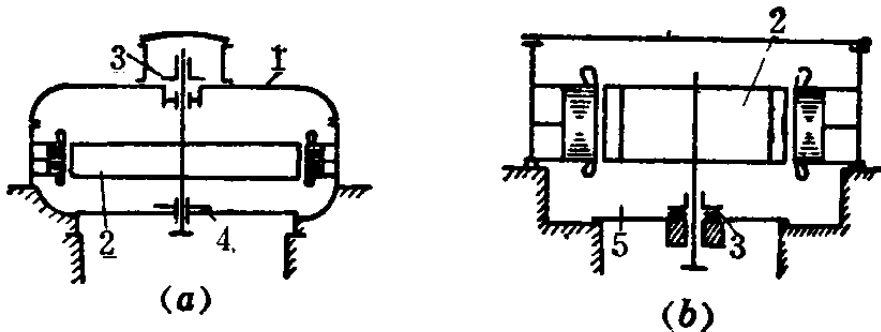


图 36-9 立式水轮发电机的基本结构型式

(a)悬吊式；(b)伞式

1—上机架；2—转子；3—推力轴承；4—下导轴承；5—下机架

(2) 额定电压 U_N (千伏)。若无特殊说明，额定电压均指定子线电压。发电机定子绕组一般接成Y形，电动机则有Y形亦有△形接法。

(3) 额定频率 f_N 。我国标准工频为 $f_N=50$ 赫。

(4) 额定功率因数 $\cos\varphi_N$ 。

(5) 额定转速 n_N (转/分) 。

除上述额定值外，铭牌上还常列出一些其它的运行数据，例如额定负载时的温升 τ_N 、励磁容量 P_{fN} 和励磁电压 U_{fN} 等。

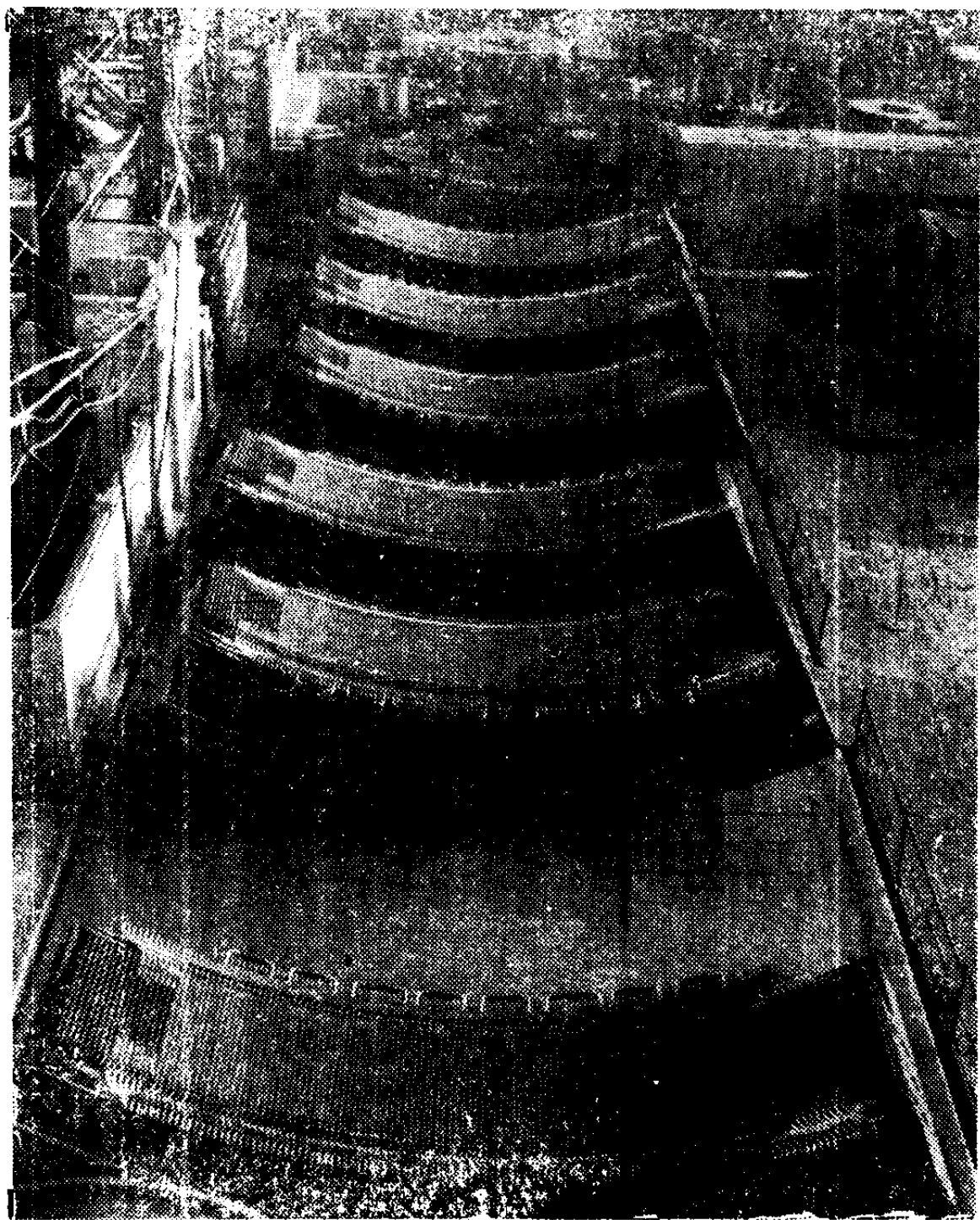


图 36-10 125000千瓦水轮发电机的分瓣定子

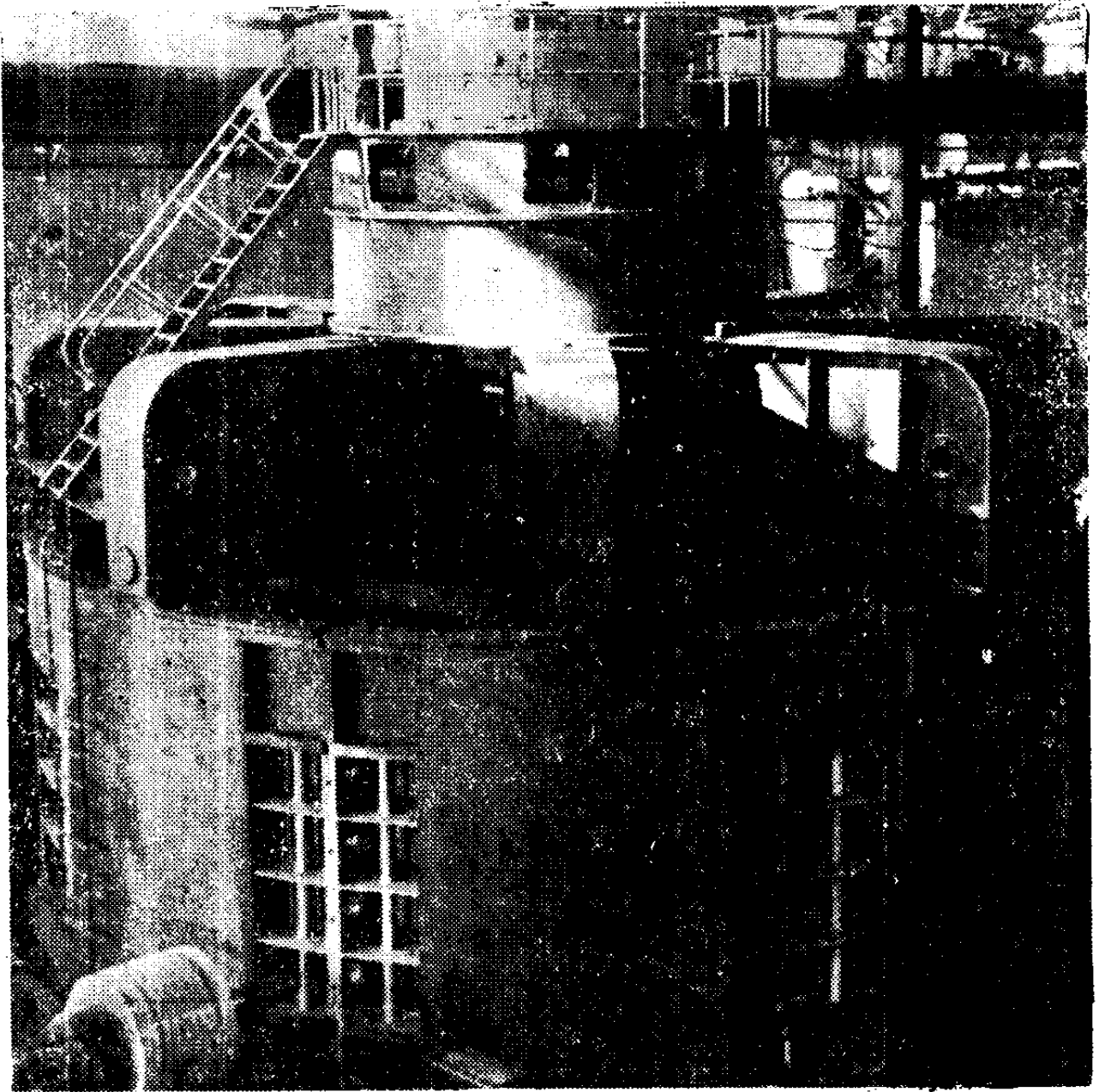


图 36-11 100000千瓦水轮发电机外型图

第三十七章 同步发电机的基本原理

本章主要研究三相对称负载时同步发电机内部的电磁过程，并由此导出其基本方程式、相量图和等效电路。

37-1 同步发电机的空载运行

同步发电机的主磁场由直流励磁产生。图37-1表示一台四极同步发电机的空载磁路，图中 Φ_0 表示既链过转子、又通过气隙