

电机学

下册

李发海 陈汤铭 朱东起 编著
郑逢时 张麟征

出版社

电 机 学

下 册

李发海 陈汤铭 朱东起 编著
郑逢时 张麟征

科 学 出 版 社

1 9 8 2

内 容 简 介

本书是作者在清华大学电机系讲授《电机学》讲义的基础上编写而成的。全书分上、下二册。

下册着重阐明同步电机和异步电机的基本工作原理。其中第三篇介绍了同步电机的绕组、电势、磁势、对称运行、并联运行、不对称运行、突然短路、振荡以及同步电动机和补偿机。第四篇介绍了异步电动机的基本工作原理、机械特性、起动、调速、单相异步电动机、异步电机的其他运行方式、交流换向器式电动机以及交流电机的发热和冷却问题。

本书系按教学要求编写的，可作为工科大学电机系各专业电机学课程的教材或参考书，也可供有关科技人员学习参考。

电 机 学

下 册

李发海 陈汤铭 朱东起 编著
郑逢时 张麟征

责任编辑 范铁夫

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1982年12月第一版 开本：787×1092 1/32
1982年12月第一次印刷 印张：21 插页：2
印数：0001—11,650 字数：485,000

统一书号：15031·459

本社书号：2898·15—5

定价：3.39 元

目 录

第三篇 同步电机

第十八章	同步电机的结构与基本工作原理	475
§ 18-1	基本工作原理	475
§ 18-2	同步电机的基本类型与结构	477
第十九章	交流电机的绕组和电势	486
§ 19-1	同步电机的磁路	486
§ 19-2	对电枢绕组的要求	492
§ 19-3	三相单层集中整距绕组	493
§ 19-4	三相单层分布绕组	508
§ 19-5	三相双层分布短距绕组	521
§ 19-6	单双层绕组	534
§ 19-7	齿谐波电势及其减小方法	536
§ 19-8	分数槽绕组	541
第二十章	电枢绕组的磁势	550
§ 20-1	概述	550
§ 20-2	单相整距集中单层绕组的磁势	550
§ 20-3	三相绕组的磁势	567
§ 20-4	绕组的短距和分布对磁势的影响	583
§ 20-5	三相绕组的磁势图	593
§ 20-6	正弦绕组	595
§ 20-7	分数槽三相绕组磁势	600
§ 20-8	漏磁通和漏电抗	604
第二十一章	同步电机的基本电磁关系	613
§ 21-1	同步发电机的无载特性及负载电流对端电压的影响	613

§ 21-2	隐极同步发电机的负载运行——磁势电势向量图	615
§ 21-3	隐极同步发电机的负载运行——电势向量图	638
§ 21-4	凸极同步发电机的负载运行——双反应理论	648
§ 21-5	瑞典电工学会向量图法	664
§ 21-6	同步发电机的无载特性曲线、短路特性曲线和同步电抗的测定	667
§ 21-7	同步发电机的零功率因数负载特性曲线及普梯尔电抗的测定	678
§ 21-8	取出转子法	683
§ 21-9	对同步电机电枢电阻的讨论	684
§ 21-10	标么值	685
第二十二章 同步发电机的并联运行		690
§ 22-1	并联运行的优点	690
§ 22-2	并联合闸的条件与方法	692
§ 22-3	同步发电机并联运行的理论基础	706
§ 22-4	同步发电机的功角特性和静态稳定	710
§ 22-5	并联运行时无功功率的调节——U形曲线	724
第二十三章 同步电动机		729
§ 23-1	概述	729
§ 23-2	同步电动机的运行原理	730
§ 23-3	同步电动机的起动机	742
§ 23-4	反应式同步电动机	744
§ 23-5	同步调相机	746
§ 23-6	异步电动机的同步化	749
第二十四章 同步电机的振荡		756
§ 24-1	同步电机自由振荡和强制振荡的物理现象	756
§ 24-2	同步发电机在振荡时的转矩平衡方程式	758
§ 24-3	同步发电机单独运行时的强制振荡	769
§ 24-4	同步发电机并联运行与单独运行时振荡的比较	771
第二十五章 同步电机的非正常运行		775

§ 25-1	同步电机非正常运行的发生	775
§ 25-2	同步发电机的单相负载运行	776
§ 25-3	负序阻抗和零序阻抗	786
§ 25-4	不对称运行与电机的关系	791
§ 25-5	分析同步发电机突然短路的工具——超导体回路磁链守恒概念	794
§ 25-6	同步发电机无载时三相突然短路的分析	797
§ 25-7	同步发电机负载时三相突然短路的分析	817
§ 25-8	不对称突然短路	821
§ 25-9	突然短路与同步电机及电力系统的关系	825

第四篇 异步电机

第二十六章	三相异步电动机的结构和基本工作原理	831
§ 26-1	异步电机的用途	831
§ 26-2	异步电机的基本类型和主要结构部件	832
§ 26-3	国产三相异步电动机系列及型号	837
✓ § 26-4	异步电机的基本工作原理	838
第二十七章	三相异步电动机的运行原理	842
✓ § 27-1	异步电动机在转子不转时 ($n=0, s=1$) 的状况	843
✓ § 27-2	异步电机在旋转时的电磁关系	862
✓ § 27-3	鼠笼转子的极数、相数和参数的折合	873
第二十八章	异步电动机的功率、转矩和运行性能	885
✓ § 28-1	异步电动机的功率传递、各部分损耗和转矩	885
✓ § 28-2	异步电动机的机械特性	892
✓ § 28-3	转矩的实用公式	899
§ 28-4	三相异步电动机的运行性能	901
§ 28-5	异步电机的圆图	906
§ 28-6	异步电机的准确圆图	920
第二十九章	三相异步电动机的起动	927
§ 29-1	概述	927

§ 29-2	鼠笼式电动机的起动	929
§ 29-3	绕线式异步电动机的起动	939
§ 29-4	具有较高最初起动转矩的鼠笼式电动机	942
§ 29-5	异步电机的附加转矩以及对起动的影响	951
第三十章	三相异步电动机的调速	957
§ 30-1	概述	957
§ 30-2	转子回路串联电阻调速	957
§ 30-3	串级调速	959
§ 30-4	电磁调速异步电动机(电磁滑差离合器调速)	961
§ 30-5	改变定子端电压调速	963
§ 30-6	变频调速	964
§ 30-7	变极调速	967
第三十一章	异步电机的其他运行方式	993
§ 31-1	概述	993
§ 31-2	异步发电机	993
§ 31-3	异步电机的制动运行	1008
§ 31-4	移相器	1012
§ 31-5	感应调压器	1014
§ 31-6	三相异步电机转子电路里具有不对称阻抗的分析	1017
§ 31-7	三相异步电机转子为单相,但所加电源电压是对称的	1028
第三十二章	单相异步电动机	1033
§ 32-1	概述	1033
§ 32-2	单相异步电动机的工作原理	1033
§ 32-3	单相电容电动机	1042
§ 32-4	遮极式电动机	1058
第三十三章	交流换向器式电机	1069
§ 33-1	概述	1069
§ 33-2	异步电动机副边回路串入附加电势时的转速调节	1069
§ 33-3	三相并联换向器电动机	1074

§ 33-4 单相串励换向器电动机	1086
第三十四章 交流电机的损耗、效率、发热和冷却.....	1092
§ 34-1 概述	1092
§ 34-2 交流电机的损耗和效率	1093
§ 34-3 大型同步电机的发热与冷却	1101
§ 34-4 大型汽轮发电机的冷却方式	1104
参考文献	1113
附录习题	1114

第三篇同步电机

第十八章 同步电机的结构与基本工作原理

§ 18-1 基本工作原理

同步电机主要用来作为发电机运行。现在工农业生产中所用的交流电能，几乎全由同步发电机发出。

同步电机还可以作为电动机使用，用以拖动生产机械。尤其是在不要求调速的大功率生产机械中，同步电动机用得很多。

此外，同步电机还可以作为同步补偿机使用，它能够专门向电网发出感性或容性的无功功率，满足电网对无功功率的要求。

同步电机作为发电机使用时，它的工作原理简单说明如下。图 18-1 是同步电机最简单的原理图。在图 18-1 所画的定子上开了槽，在槽内放上导体，这些导体按一定的规律联接起来，叫定子绕组。电机转子上装了磁极，每个磁极上都套上一个线圈，把这些线圈也按一定规律联接起来，叫励磁绕组。给励磁绕组通入直流电流，电机里就产生了磁场，由原动机拖动电机的转子旋转，磁场与定子上的导体之间就有了相对运动，于是，在定子绕组里便感应出交流电势来。一般都把同步发电机的定子绕组联接成三相绕组，这样便得到三相交流电。定子绕组里交流电势的频率 f 决定于电机的极对数 p 和转子的转速 n ，即

$$f = \frac{pn}{60} \text{ 周/秒,}$$

式中转速 n 的单位是转/分。

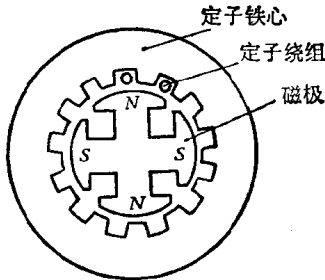


图 18-1 同步电机运行原理图

由上式可以看出，当电机的极对数和转速一定时，发出交流电势的频率也是固定的。我国的电力系统，规定交流电的频率为 50 周/秒（简称 50 周）。为此，如果把电机的极对数设计成一对极时，它的转速 n 必定是 3000 转/分；设计成二对时，转速是 1500 转/分，依此类推。

如果作为同步电动机运行时，就必须在电机的定子绕组加上三相交流电。三相交流电流流过定子绕组，会在电机里产生旋转磁场。当励磁绕组也加上励磁电流时，转子好象是一个磁铁。于是，旋转磁场带动这个磁铁，按旋转磁场的旋转速度旋转。这时转子的转速 n 为

$$n = \frac{60f}{p}$$

由此可见，同步电机无论作为发电机，或是作为电动机，当极对数一定时，它的转速 n 和频率 f 之间有严格的关系，用电机专业的术语说，就是同步。同步机的词意就是由此而

来的。

以上仅介绍了同步电机的最简单的原理，深入的分析将在下几章里进行。

从运行原理可知，各种同步电机都是由定子、转子两个基本部分组成的。转子部分是由转子铁心、励磁绕组、滑环和转轴等组成。定子部分是由定子铁心、定子绕组（也叫电枢绕组）组成的。

§ 18-2 同步电机的基本类型与结构

关于同步电机的分类有各种方法。如按用途来分：有发电机、电动机和补偿机。按结构特点分：有凸极式的和隐极式的；立式的和卧式的。按通风方式分：有开启式、防护式、封闭式（循环通风）。按冷却方式分：有空气冷却、氢气冷却、水冷却和混合冷却方式（例如定子用水内冷，转子也用水内冷，铁心用空气冷却，简称水水空冷却；也有用水水氢或水氢氢冷却的）。按发电机的原动机来分：有汽轮发电机、水轮发电机和其他原动机带动的发电机（如柴油机等）。按电动机带动的负载来分：有均匀负载（也叫负荷）、交变负载或冲击负载的电动机。

第三篇里主要分析同步发电机的运行原理，最后也要介绍一下同步电动机。

在分析电机运行原理之前，先简单地介绍一下汽轮发电机、水轮发电机以及中小型同步电机的结构。

一、汽轮发电机

图 18-2 是一台汽轮发电机，它是由定子、转子等部分组成的。分别叙述如下：

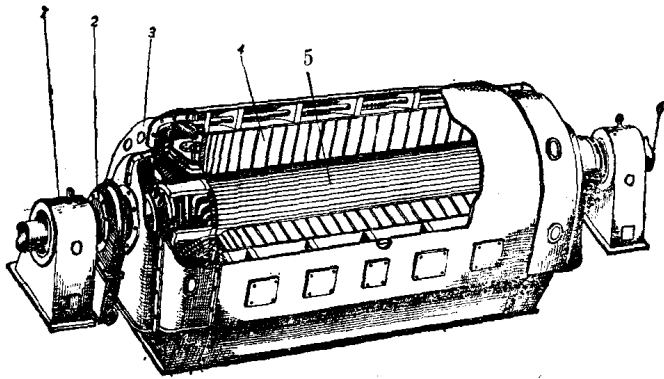


图 18-2 汽轮发电机

- 1——轴承座； 2——出水支座； 3——端盖；
4——定子； 5——转子； 6——进水口

1. 转子

汽轮发电机由于转速较高（一般都是 3000 转/分），为了很好地固定励磁绕组，大容量的电机几乎全作成隐极式转子。隐极式转子从外形来看，没有明显凸出的磁极，见图 18-2。但是在它的励磁绕组里通入直流电流，转子的周围也会出现 *N* 极和 *S* 极的磁场。

由于转速高，转子直径受离心力的影响，有一定的限制。为了增大容量，只能增加转子的长度（当然也不可能无限制的增长）。因此汽轮发电机的转子是一个细而长的圆柱体。

转子铁心除了要求它能固定励磁绕组外，还要求它的导磁性能好，一般由高机械强度和导磁较好的合金钢锻成，并且和转轴作成一个整体。图 18-3 是汽轮发电机转子装配图。

转子铁心上开了槽，在槽里放上励磁绕组，槽的排列形状如图 18-4 所示。从图中看出，沿着转子外圆，有一部分表面上开的槽较多，那里的齿较窄，叫小齿。在另外的一部分没有

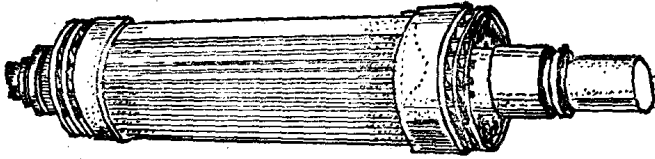


图 18-3 汽轮发电机转子装配

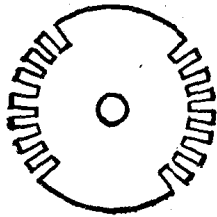


图 18-4 汽轮发电机转子铁心

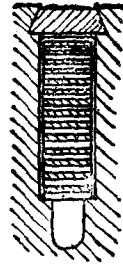


图 18-5 汽轮发电机转子槽

开槽，形成了大齿。大齿的中心线实际上就是磁极的中心。

转子槽形都作成开口槽，好放励磁绕组。有时也在槽底或侧面开有通风沟，如图 18-5 所示。

励磁绕组是用扁铜线绕成同心式线圈，见图 18-6。在水冷电机里，是用空心导线绕成的。

励磁绕组的固定是个很重要的问题。在槽里的导体用槽楔来压紧；端部的导体要用护环来固定。

励磁绕组通过装在转子上的集电环与电刷装置才能和外面的直流电源构成回路。

2. 定子

定子是由导磁的定子铁心和导电的定子绕组，以及固定铁心和绕组用的一些部件组成的。这些部件是机座、铁心压

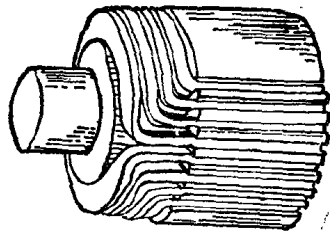


图 18-6 汽轮发电机励磁绕组

板、绕组支架等等。

为了减少定子铁心里的铁损耗,定子铁心是由0.5毫米厚

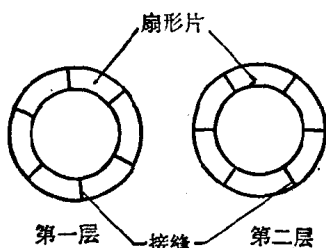


图 18-7 汽轮发电机定子铁心叠片

的硅钢片叠装而成。当定子铁心外径大于1米时,用扇形的硅钢片来拼成一个整圆。在叠装时,把每层的接缝错开,如图18-7所示。扇形片的表面涂上绝缘漆,以减少铁心的涡流损耗。

定子铁心内圆开有槽,槽内放置定子绕组。定子槽形一般都作成开口槽,便于嵌线,如图18-8所示。

定子绕组是由许多线圈联接而成,每个线圈又是由多股铜线绕制成的(水内冷电机用空心导线),线圈的形状如图18-9所示。

绕制多股线圈时,为了减少集肤效应引起的附加损耗,在这些股线之间需要进行换位。换位一般在线圈的直线部分进行。

放在定子槽里的导体是靠槽楔来压紧固定,端接部分用支架固定。

机座的作用是为了固定定子铁心,

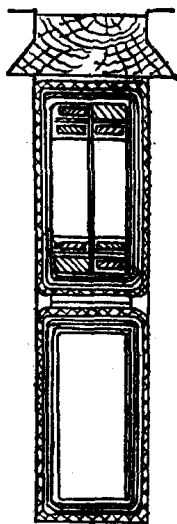


图 18-8 定子槽

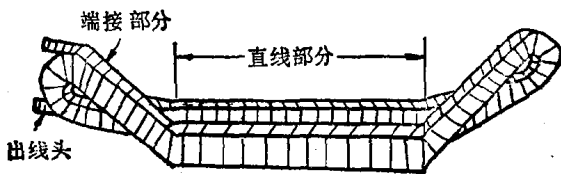


图 18-9 定子线圈

因此，要求它应有足够的机械强度和刚度，以承受加工、运输以及运行过程中的各种作用力。一般，汽轮发电机的机座是由钢板拼焊而成。

二、水轮发电机

由水轮机带动的同步发电机叫水轮发电机。由于水轮机的转速较低（一般每分钟只有几十转到几百转），因此把发电机的转子作成凸极式的。因为凸极式的转子，在结构上和加工工艺上都比隐极式的简单。

由于水轮发电机是立式的结构，转子部分必须支撑在一个推力轴承上。推力轴承要承担整个机组转动部分的重量和水的压力，这些向下的压力有时达几百吨，甚至上千吨重。因此大容量水轮发电机，必须很好地解决推力轴承的结构和工艺，以及推力轴承安放的位置等问题。从推力轴承安放的位置，立式水轮发电机可以分为悬吊式和伞式两种不同的结构。图 18-10 是它们的示意图。

悬吊式是把推力轴承放在转子的上部，整个转子都悬挂在推力轴承之上，见图 18-10 (a)。伞式是把推力轴承放在转子的下部，见图 18-10 (b)。目前，这两种结构都使用，悬吊式稳定性好，用在转速高的水轮发电机里；伞式轴向长度小，可以降低厂房的高度，用于低速水轮发电机里。

水轮发电机的转子是由磁轭、磁极、励磁线圈、转子支架、

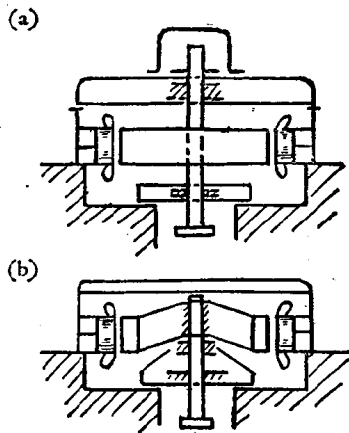


图 18-10 立式水轮发电机

转轴等组成。

磁极由 1—1.5 毫米厚的钢板冲成磁极冲片，用铆钉装成一体。磁极上套有励磁线圈，而励磁线圈是由扁铜线绕制而成的。

磁极的极靴上还有阻尼绕组。阻尼绕组是由一根根的裸铜条，放入极靴的阻尼槽中，然后在两端面用铜环焊在一起，形成一个短接的回路，如图 18-11。

磁极固定在磁轭上。固定的方法有图 18-12 所示的几种方式。在大型电机里，磁极的下部作成 T 尾，见图 18-12 (c)，或鸽尾形，见图 18-12 (b)。轭部冲成同样形状的槽，装配时，两者用铁块撑紧固定。在小型电机里，也可以用螺钉固定，见图 18-12(a)。

磁轭通过转子支架与轴联接。立式水轮发电机中，除了推力轴承外，还装有导轴承。在悬吊式机组里，一般装有两个

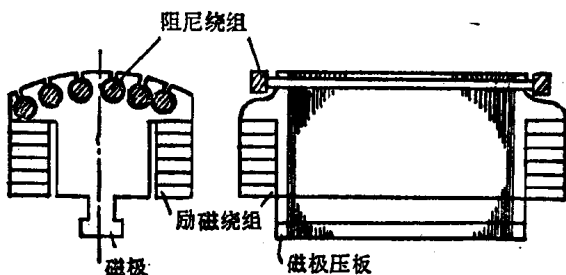


图 18-11 磁极装配

导轴承；在伞式机组里，只装一个。装导轴承的目的是为了保持机组运行稳定。

有的水轮发电机由于直径很大，为了便于运输，把定子铁心连同机座一起分成数瓣，把分瓣的定子运到工地后，再拼成一个整圆定子。

为了保护推力轴承,在转子下面的机架上装有制动器,它的作用是在电机停机过程中,当转速较低时,推力轴承中轴瓦上不能形成油膜。为了避免干摩擦,损坏轴瓦,当转速低到一定程度时,用制动器很快地把转子停下来。

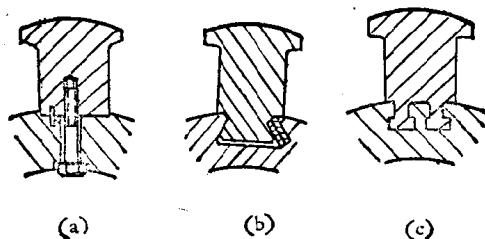


图 18-12 磁极的固定方式

三、中小型同步电机

中小型同步电机,指容量在几十、几百到几千千瓦的同步电机。它们可以作为发电机、电动机或补偿机运行。从结构上来看,它们之间的差别不大。

中小型同步电机多作成卧式的。定子铁心也是由硅钢片叠装成的。当铁心外径小于 1 米时,用整圆冲片;大于 1 米时,用扇形片。

定子槽形根据容量和电压大小的不同而不一样。大容量高电压多用开口槽;小容量低电压多用半闭口槽,如图 18-13 所示。

用半闭口槽时,线圈由几根圆导体并绕而成。嵌线时,把圆导体一根一根地从槽口塞下去,最后经过浸漆处理,增加绝缘强度和导热性。

中小型电机的转子多作成凸极式的。励磁绕组除几十千