

电 机 学

下 册

章 名 涛 主 编



科 学 出 版 社

电 机 学

下 册

章 名 涛 主 編

科 学 出 版 社

1 9 7 3

内 容 简 介

本书是根据清华大学电机教研组历年教学经验而编写成的。编写的重点放在阐明电机的基本原理方面。全书共分五篇，分上下两册出版。

下册包括第三篇、第四篇及第五篇。第三篇讲述了同步电机的磁路和绕组；磁势；对称运行；不对称运行；突然短路；并联运行；电动机及补偿机；振荡；损耗、效率、发热和冷却。第四篇讲述了异步电机的运行原理；圆图；起动；调速；其它运行方式；单相异步电动机。第五篇讲述了三相整流子电机；单相整流子电机。

本书可作为工科大学电机系各专业的电机学课程教本或参考书，也可供有关的工程技术人员参考。

电 机 学

下 册

章 名 涛 主 编

*

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

北京市安定门南宝钞五七装订厂装订

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1964 年 8 月 第 一 版 开本：850×1168 1/32
1973 年 5 月 第 五 次 印 制 印张：14 15/16 插页：2
印数：22,151—147,150 字数：396,000

统一书号：15031·66

本社书号：196·15—7

定 价：2.20 元

目 录

第三篇 同步电机

第十五章 同步电机概論	327
§ 15-1 概述	327
§ 15-2 同步电机的基本类型及其結構	330
§ 15-3 同步电机的发展概况	342
§ 15-4 結語	344
第十六章 同步电机的磁路、电枢繞組及电势	346
§ 16-1 概述	346
§ 16-2 同步电机的磁路	346
§ 16-3 对电枢繞組的要求及繞組結構	350
§ 16-4 导綫中的电势	352
§ 16-5 綫匝及元件中的电势	355
§ 16-6 整数槽繞組的电势	360
§ 16-7 齿諧波电势	370
§ 16-8 分数槽繞組	373
§ 16-9 結語	378
第十七章 电枢繞組的磁势	380
§ 17-1 概述	380
§ 17-2 一匝及元件的磁势	381
§ 17-3 相繞組的磁势	386
§ 17-4 三相繞組的磁势, 交流电机的旋轉磁場	392
§ 17-5 三相繞組的諧波磁势及其磁通	399
§ 17-6 三相繞組的磁势图	406
§ 17-7 分数槽三相繞組磁势的概念	408
§ 17-8 漏磁通及漏电抗	410

§ 17-9 結語	417
第十八章 同步发电机的对称运行	419
§ 18-1 概述	419
§ 18-2 无载特性	421
§ 18-3 对称負載时的电枢反应	422
§ 18-4 時間向量图与空間向量图	430
§ 18-5 对称負載时的向量图	432
§ 18-6 电压变化率及其求法	438
§ 18-7 短路特性和短路比	441
§ 18-8 負載特性	443
§ 18-9 发电机的运行特性	446
§ 18-10 参数的实验求法	447
§ 18-11 标么值	451
§ 18-12 結語	455
第十九章 同步发电机的不对称运行	457
§ 19-1 概述	457
§ 19-2 发电机不对称运行的分析	458
§ 19-3 发电机不对称短路的分析	465
§ 19-4 发电机不对称負載的分析	469
§ 19-5 不对称运行对发电机的影响	471
§ 19-6 不对称运行的高频干扰	472
§ 19-7 阻尼繞組在不对称运行中的作用	473
§ 19-8 結語	474
第二十章 同步发电机的突然短路	475
§ 20-1 概述	475
§ 20-2 突然短路分析的理論基础——超导体迴路的概念	475
§ 20-3 三相突然短路分析	478
§ 20-4 不对称突然短路	496
§ 20-5 突然短路与同步电机及电力系统的关系	500
§ 20-6 結語	504
第二十一章 同步发电机的并联运行	505

§ 21-1 概述	505
§ 21-2 并联条件及方法	506
§ 21-3 同步发电机与无穷大电网并联运行	512
§ 21-4 同步发电机与相近容量的电网并联运行	523
§ 21-5 結語	526
第二十二章 同步电动机及补偿机	527
§ 22-1 同步电动机	527
§ 22-2 反应式同步电动机	535
§ 22-3 补偿机	537
§ 22-4 結語	540
第二十三章 同步电机的振荡	541
§ 23-1 概述	541
§ 23-2 同步电机在振荡过程中力矩平衡方程式	544
§ 23-3 同步电机的自由振荡	547
§ 23-4 同步电机的强制振荡	547
§ 23-5 結語	550
第二十四章 同步电机的损耗、效率、发热和冷却	551
§ 24-1 概述	551
§ 24-2 大型同步机的损耗和效率	552
§ 24-3 大型同步机的发热与冷却	557
§ 24-4 結語	567

第四篇 异步电机

第二十五章 异步电机概論	568
§ 25-1 异步电机的用途	568
§ 25-2 基本工作原理及运行中的問題	569
§ 25-3 异步机的分类和主要結構部件	572
§ 25-4 异步电机的发展概况	577
§ 25-5 我国生产的异步机的型号	578
§ 25-6 結語	579
第二十六章 异步电机运行原理	580

§ 26-1 概述	580
§ 26-2 异步机在轉子不动时的情况及其基本原理	581
§ 26-3 异步机在旋轉时的情况及其基本方程式及等值电路	589
§ 26-4 异步机的等值电路及其簡化	593
§ 26-5 鼠籠轉子的参数及折合	596
§ 26-6 异步机的力矩	600
§ 26-7 力矩的实用公式	605
§ 26-8 异步机的运行特性	606
§ 26-9 結語	611
第二十七章 异步机的圓图	613
§ 27-1 概述	613
§ 27-2 异步机的簡單圓图	615
§ 27-3 由无載及短路試驗作出簡單圓图	618
§ 27-4 由簡單圓图确定异步机的运行特性	624
§ 27-5 柯斯琴柯的較准确圓图	631
§ 27-6 結語	633
第二十八章 三相异步电动机的起动	634
§ 28-1 概述	634
§ 28-2 鼠籠式电动机的起动	635
§ 28-3 有較高起动力矩的鼠籠式电动机	639
§ 28-4 繞綫式电动机的起动	647
§ 28-5 异步电机的附加力矩和对起动的影響	648
§ 28-6 同步电动机的异步起动	653
§ 28-7 結語	655
第二十九章 三相异步电动机的調速	657
§ 29-1 概述	657
§ 29-2 变更电压 U_1 的調速	657
§ 29-3 变更极对数的調速	658
§ 29-4 变更頻率的調速	664
§ 29-5 变更轉子串聯电阻的調速	665
§ 29-6 串級联接的調速	665

§ 29-7 結語	668
第三十章 异步机的其它运行方式	669
§ 30-1 概述	669
§ 30-2 异步发电机的原理	669
§ 30-3 异步发电机的运行	672
§ 30-4 异步机的制动	675
§ 30-5 移相器	678
§ 30-6 感应調压器	679
§ 30-7 結語	682
第三十一章 单相异步电动机	684
§ 31-1 概述	684
§ 31-2 单相电动机的工作原理	684
§ 31-3 单相电容器电动机	690
§ 31-4 遮极电动机	693
§ 31-5 結語	693

第五篇 交流整流子电机

第三十二章 三相整流子电机	695
§ 32-1 概述	695
§ 32-2 三相整流子电机中的几个共同問題	696
§ 32-3 异步电动机副边串入附加电势	700
§ 32-4 三相并联整流子电动机	703
§ 32-5 三相串联整流子电动机	708
§ 32-6 相位补偿机	712
§ 32-7 变频器	716
§ 32-8 三相整流子发电机	717
§ 32-9 异步电动机的串級联接	721
§ 32-10 結語	722
第三十三章 单相整流子电动机	723
§ 33-1 概述	723
§ 33-2 单相整流子电动机的电势、力矩及换向	723

§ 33-3 串联电动机	727
§ 33-4 推斥电动机	730
§ 33-5 結語	735
主要参考书	736
附录	737
四、关于繞組系数的符号	737
五、异步机的基本原理(瞬时值法)	740
六、电机的力矩	747
七、电机中的慣例	756
习题	758
同步电机习题	758
异步电机习题	789

第三篇 同步电机

第十五章 同步电机概論

§ 15-1 概 述

同步电机主要用做发电机。现在工农业所用的交流电能，几乎全由同步发电机发出。

同步电机还可以用做电动机，以拖动生产机械。尤其在不要调速的大功率生产机械中，同步电动机用得很广泛。

另外，同步电机还可做同步补偿机用，即只向电网发出电感性的或电容性的无功功率，以满足电网对无功功率的需要。

同步电机作为发电机用时，其运行原理如下。图 15-1 为同步电

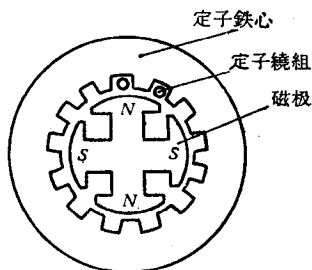


图 15-1 同步电机构造原理图

机的构造原理图。在定子铁心上开槽，槽内放置导线，转子上装有磁极和激磁绕组。当激磁绕组通以直流电流后，电机内就会产生磁场。转动转子，则磁场与定子导线之间有相对运动，就会在定子导线中感应出交流电势。如把这些导线按一定规律联成绕组（一般为三相绕组），则可从绕组（出线端）引出交流电势，这个交流电势的频率 f 决定于电机的极对数 p 和转子转速 n ，就是频率等于极对数乘上每秒的转数，

$$f = \frac{pn}{60} \text{ 周波/秒,} \quad (15-1)$$

上式中， n 的单位是每分钟的转数。

由上式可以看出,当电机的极对数一定和轉速一定时,則发出的交流电势頻率也是一定的。在我国的电力系統中,規定交流电的頻率為 50 周/秒。因此如电机为一对极时,額定轉速為 3000 轉/分;有二对极时,額定轉速就為 1500 轉/分;余类推。

如作为同步电动机運轉时,則需要在定子繞組上加以交流电(一般均为三相),此三相交流电通过定子繞組时,就会在电机內产生一个旋轉磁場。当激磁繞組已加上激磁电流,則轉子好象是一个“磁鉄”,于是旋轉磁場就带动这个“磁鉄”,并按旋轉磁場的轉速来旋轉。这时轉子的轉速 n 仍旧要符合式(15-1)的关系,即

$$n = \frac{60f}{p} \quad (15-2)$$

从这里看出,同步电机無論做为发电机,或是做为电动机,其轉速与頻率間有着严格的关系,这是同步电机的一个特点。在下一篇中,我們要讲到异步电机,它的轉速和頻率之間就沒有同步电机这样的严格关系。

上面介紹的只是同步电机的简单的运行原理,更深入的运行原理和运行性能,将要在这一篇的以后各章中分別加以叙述。

因为同步电机主要用做发电机,故在以后各章的分析中,我們的重点放在发电机部分。而且由于发电机和电动机虽然各有其特点,但在运行中有其共同的基本規律和可逆的关系,在掌握了发电机的运行性能后,电动机的运行性能是可以很快掌握的。因此在第二十一章前主要是分析发电机的运行情况。

在作为发电机运行时,首先的問題是发电机如何能发电,即电势是怎样产生的,电势的大小和波形又如何?这些問題与同步电机的磁路和繞組有密切关系,因此下一章首先要分析“同步电机的磁路及繞組电势”这些問題。

当发电机帶上負載后,电枢繞組中的电流会在电机內产生一个磁势,它的大小、性質又如何?这由“电枢繞組磁势”一章进行分析。至于磁势对运行的性能的影响,将归入运行的几章中去分析。

同步发电机有二种运行情况:一种是单独一台电机帶負載;另

一种是数台发电机并联运行供給負載。現在大多数同步发电机都是并联运行，即并联成一个大电网供給負載。但单机运行还是有的，故这二种运行情况都应当进行分析。从理論分析的次序来看，先从单机运行分析起易于掌握，故我們先分析单机运行。

同步发电机大多为三相，故正常的单机运行总是带三相对称負載。“同步发电机的对称运行”一章就是分析发电机带上三相对称負載，并在稳定运行时的情况。这一章又是学习同步电机的重要理論基础。它将对电机内部的电磁关系进行綜合的研究。其中要分析到电枢反应的作用；要得出向量图这一分析工具；要討論到发电机的特性和参数的意义，和它們的實驗求法等。这些不但在发电机中是重要的理論基础，而且完全可以应用到对电动机的分析中去。

当然发电机的負載不会总是三相对称的，有时也可能带上不对称負載。这时对电机和用戶都可能带来某些不利的影响。因此我們必須掌握不对称运行的影响及分析方法，以及避免某些不利后果的措施。

同步发电机在运行时，有时会发生綫路上或机端的突然短路故障。这时会出现很大的冲击电流，产生很大的电磁力，以致损坏电机。因此在“同步发电机的突然短路”这一章中，我們要分析突然短路时产生电流冲击的原因及后果。

在叙述了单机运行中的主要問題后，我們就要对“同步发电机的并联运行”进行分析。这章要解决的主要問題是：如何进行并联；并联以后有功功率及无功功率如何調节；以及为了保証可靠地稳定并联运行，从原理上如何保持电机的“静态稳定”。

在分析完发电机运行后，我們可以利用发电机运行中的一些基本理論，来分析电动机和补偿机的运行原理和性能。

最后，在这一篇中，还要对发电机和电动机运行中的一些共同問題进行介紹，这些問題是：“同步电机的振蕩”，“同步电机的損耗与效率”，“发热与冷却”等問題。

在具体分析同步电机的性能前，首先要对同步电机的結構有

一个了解。下面我们就对同步电机的结构作一介绍。

§ 15-2 同步电机的基本类型及其结构

同步电机可以按许多种方式来分类。

如按用途分,可以分为发电机、电动机和补偿机。

如按结构特点分,可以分为凸极式和隐极式;或立式和卧式(水平式)。

如按通风方式分,可以分为开启式、防护式、封闭式(循环通风);如按冷却方式分,可以分为空气冷却、氢气冷却和液体冷却。

如按原动机之不同来分,可以分为汽轮发电机、水轮发电机和其他原动机带动的发电机(如柴油机等)。

如按电动机的负载不同来分,可以分为带均匀负载、交变负载和冲击负载的电动机。

当然还可以有其他各种不同的分类方法。不同类型的电机,都有其不同的特点,通过分类后,可以分别进行深入的分析。在电机学中,我们主要是分析同步电机的结构和运行性能之间的关系,因此主要地按凸极式和隐极式来分析。这二种有时就叫做同步电机的基本类型。

凸极式电机从转子上看,有着明显的磁极,如图 15-1 所示。当通以励磁电流后,每个磁极就出现一定的极性,相邻磁极交替出现南极和北极。

隐极式电机从转子上看,没有凸出的磁极,见图 15-3。但通以励磁电流后,转子圆周也会出现南极和北极的极性。因此从运行原理上隐极式和凸极式没有差别,而在结构上,运行性能上和分析方法上是有差别的。

同步电机采用凸极式还是隐极式,主要要从它的容量和转速来定。在大容量(几千或几万瓩)的同步发电机,如原动机为转速很高的汽轮机(例如每分钟达到 1500 转、3000 转),则同轴联接的发电机转速也很高,转子各部分所受的离心力很大,这时采用隐极式较好,因为隐极机可以把励磁绕组很好地固定在转子上。如果

原动机是大型水輪机，則由于水輪机的轉速較低（一般为每分鐘几十轉到几百轉），因此可以做成凸极式。而做成凸极式后，在結構上和加工上都比隱极式要簡單。故汽輪机带动的发电机（又叫汽輪发电机）多为隱极式，水輪机带动的发电机（又叫水輪发电机）全为凸极式。在大容量的同步电动机，也按照它轉速的高低做成隱极或凸极式。另外在中小容量的电机，多半做成凸极式，因为凸极式电机的轉子結構和加工比較簡單。

下面分別对汽輪发电机，水輪发电机和中小容量的同步电机結構作一簡要介紹。

I. 汽輪发电机

汽輪发电机的結構見图 15-2。它分轉子和定子二大部分。

1. 轉子 轉子是汽輪发电机很关键的一部分。它的作用是要在轉子激磁繞組中通入激磁电流后，产生一个磁場，以便在定子繞組中感应出交流电势。同时把軸上輸入的机械功率轉換为电磁功率。因此轉子上主要有导电的激磁繞組和导磁的鉄心二部分。

汽輪发电机由于轉速很高，为了很好地固定激磁繞組，大容量的几乎全是隱极式轉子。同时由于轉速很高，轉子直径受离心力的影响，有一定限度。为了增大容量，只能增加轉子长度，因此轉子形成一个細长的圓柱体，見图 15-3。当然轉子长度也是受到轉子刚度和振动等影响而有一定限制的。因此現代汽輪发电机要向大容量发展的主要困难，是受到轉子材料的强度和刚度的限制。另外，由于汽輪发电机轉子較細长，因此激磁繞組和轉子表面的一些損耗所形成的热量，要散出去是比較困难的。以上这些对轉子的要求，包括电磁要求、机械强度和刚度、轉子的散热，以及轉子的加工工艺等，都是在决定轉子的結構中必須加以考慮的問題。下面再对轉子中的几个主要部件結構进行介紹。

鉄心 轉子鉄心由于导磁和固定激磁繞組的要求，一般由高机械强度和导磁較好的合金鋼鍛成。与軸鍛成一个整体。見图 15-4a。有时为了減輕制造大型鍛件的困难，就把轉子鉄心用几块組成，見图 15-4b 及 c。后者称为組合式轉子，这种轉子在結構和

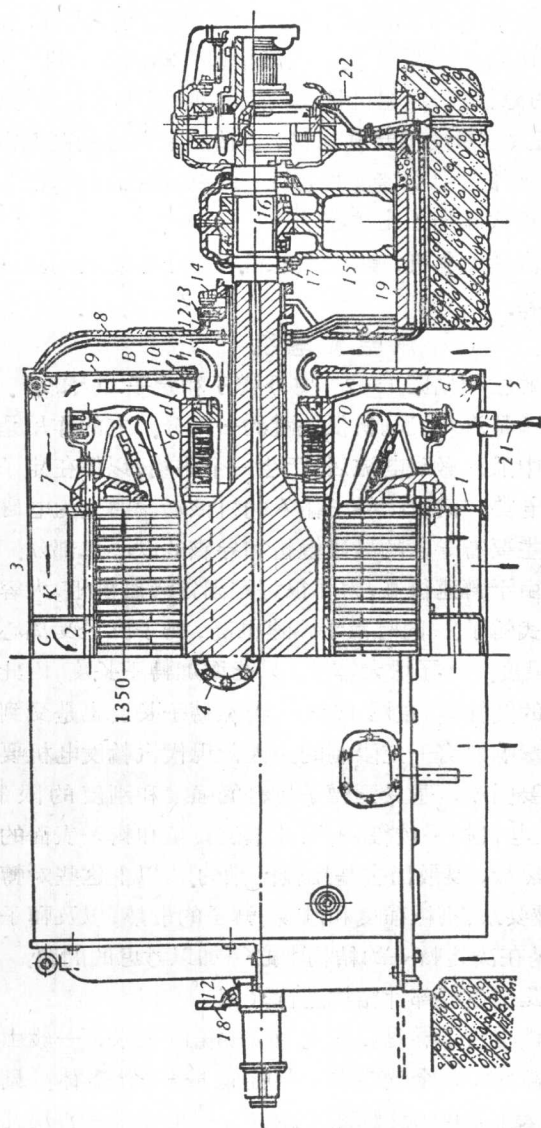


图 15-2 汽轮发电机结构图

- 1——定子机座；2——定子铁心；3——外壳；4——为吊起定子的设备；5——防火导水管；6——定子绕组；
 7——定子的压紧环；8——外护板；9——里护板；10——通风壁；11——导风壁；12——电刷架；
 13——电刷座；14——电刷；15——轴承；16——轴承衬；17——油封衬；18——汽轮机边的油封口；
 19——基础板；20——转子；21——端盖；22——励磁机

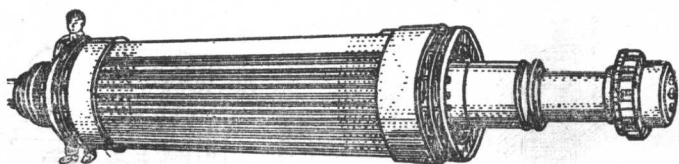


图 15-3 汽輪发电机轉子結構图

工艺方面比較复杂。目前我国这二种結構都已采用。

轉子鉄心上有槽，槽內放置激磁繞組。槽的排列形状有二种(见图15-5)

一种是輻射形排列的，另一种各槽是平行排列的。不論哪一种形状，可以看出沿着轉子圓周，有一部分表面上槽开得較多，那里齿較窄，叫做小齿。而在另外一部分則形成大齿，大齿的中心实际

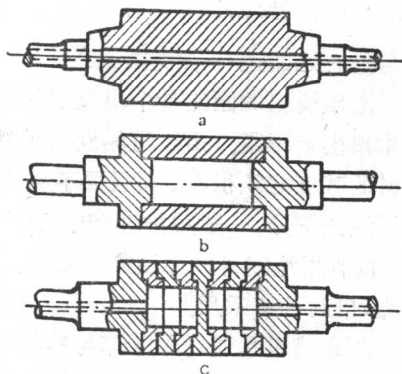


图 15-4 汽輪发电机轉子鉄心

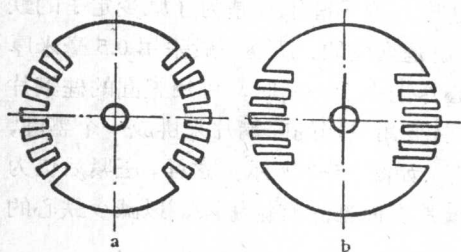


图 15-5 汽輪发电机的轉子槽

上就是磁极的中心。有时大齿上也开一些小槽，当通风孔用，槽中不放繞組。我国生产的都用图 15-5 中 a 所示的輻向式的槽。

轉子槽形一般均做成开口槽，这使激磁繞組安装方便，有利于保証繞組絕緣質量。有时也在槽的底部或側面开

有通风沟。轉子槽的剖面如图 15-6 所示。

激磁繞組 激磁繞組系由扁銅綫繞成，为同心式的綫圈，见图 15-7。各綫匝之間垫有絕緣，絕緣一般用 0.3 毫米厚的云母板。繞

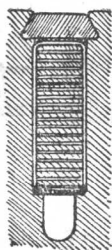


图 15-6 汽轮发电机的转子槽形

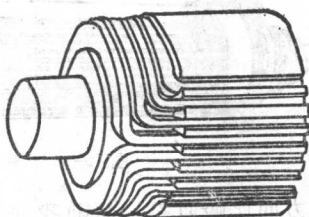


图 15-7 汽轮发电机的激磁绕组

组与铁心之间还有“对地绝缘”。

激磁绕组的固定是个很重要的问题。绕组在槽内的部分，可以用槽楔来压紧。由于汽轮发电机转速高，离心力很大，因此槽楔材料的强度必须很高，而且要不导磁，一般采用青铜或硬铝做成。绕组端接部分，一般用护环和中心环来固定，但在旧式小容量电机中，也有用扎钢丝的办法来固定的。实践证明扎钢丝的结构不够可靠，目前已不采用。

激磁绕组是通过集电环与外面的直流电源接通的。

2. 定子 它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，这些部件就是机座、铁心压板、绕组支架和槽楔等等。

定子铁心 由硅钢片迭成，取用硅钢片是为了减少定子的铁损耗，因为定子铁心中的磁通是交变的。铁心一般采用 0.5 毫米厚的电工硅钢片。当定子铁心外径小于一米时，可用整圆的硅钢片迭成；当外径大于一米时，就要用扇形的硅钢片来拼成一个整圆，拼时把每层的接缝互相错开，如图 15-8 所示。这样，压紧后仍为一个整体的铁心。每张硅钢片表面都涂有绝缘漆，以减少铁心的涡流损耗。

定子铁心沿轴向长度上，每隔 3—6 厘米，留有通风沟，以增加定子铁心的散热面积，见图 15-9（这里借用凸极式的定子铁心，因其结构原理相似）。铁心两端用铁心压板压紧后，整个铁心固定在机座上。