

电 机 学

上 册

章 名 涛 主 编

科 学 出 版 社

电 机 学

上 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：第一篇变压器；第二篇直流电机；第三篇同步电机；第四篇异步电机；第五篇交流整流子电机。分上、下两册出版。

上册包括第一篇及第二篇。第一篇讲述了变压器的运行分析，三相变压器，变压器的过渡过程、发热和冷却。第二篇讲述了直流机无载时磁场，电枢绕组，发电机，电动机，换向，特殊电机。

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

上 册

章 名 涛 主 编

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

北 京 印 刷 一 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1964 年 7 月 第 一 版	开本：850×1168 1/32
1973 年 5 月 第 五 次 印 刷	印张：10 3/8 插页：2
印数：23,851—145,850	字数：272,000

统一书号：15031·65

本社书号：195·15—7

定 价：1.60 元

序 言

本书是清华大学电机教研组在 1961 年集体编的“电机学”讲义基础上经过修改和补充编写成的。

本书分为五篇,共三十三章,对主要类型电机的基本原理进行了分析,以便读者能掌握电机中的主要问题。书后有附录、思考题及习题供读者参考。

本书是在 1964 年出版的,这次仅是重印。本书存在不少缺点和错误,希望读者帮助指正,提出批评。

编 者

1973 年 1 月

目 录

緒論	1
----	---

第一篇 变 压 器

第一章 概述	11
§ 1-1 变压器的用途及分类	11
§ 1-2 变压器的主要部件的结构	13
§ 1-3 变压器的额定数据	19
§ 1-4 結語	20
第二章 变压器的运行分析	22
§ 2-1 概述	22
§ 2-2 理想变压器的运行	23
§ 2-3 变压器的无载情况	27
§ 2-4 变压器的负载运行	32
§ 2-5 变压器参数的计算和测定	44
§ 2-6 阻抗的标么值	53
§ 2-7 变压器的运行性能	56
§ 2-8 結語	61
第三章 变压器的联接组及三相变压器的运行問題	63
§ 3-1 概述	63
§ 3-2 变压器的联接	63
§ 3-3 三相变压器无载运行时的电势波形	71
§ 3-4 三相变压器不对称运行問題	74
§ 3-5 V/V 联接变压器	86
§ 3-6 結語	87
第四章 变压器的并联运行	89
§ 4-1 概述	89

§ 4-2 并联运行时的負載分配	91
§ 4-3 变比不等的变压器并联运行	94
§ 4-4 变压器联接組別对并联运行的关系	96
§ 4-5 結語	97
第五章 变压器的过渡过程	99
§ 5-1 概述	99
§ 5-2 过电流現象	99
§ 5-3 过电压現象	110
§ 5-4 結語	114
第六章 特殊变压器	116
§ 6-1 概述	116
§ 6-2 三繞組变压器	116
§ 6-3 自耦变压器	122
§ 6-4 調压变压器	128
§ 6-5 电焊变压器	131
§ 6-6 結語	131
第七章 变压器的发热和冷却	133
§ 7-1 概述	133
§ 7-2 油浸变压器的发热和冷却	134
§ 7-3 变压器的各种冷却方式	138
§ 7-4 变压器的允許溫升和变压器的負載問題	142
§ 7-5 油浸变压器油箱的保护装置	145
§ 7-6 結語	147

第二篇 直流机

第八章 直流机的用途、基本工作原理及結構	148
§ 8-1 直流机的用途	148
§ 8-2 直流机的基本工作原理	149
§ 8-3 直流机的主要結構部件	151
§ 8-4 直流机的发展概况	157
§ 8-5 直流机的分类和我国生产的直流机的型号	158
§ 8-6 結語	158

第九章 无載时的磁場	159
§ 9-1 磁通的分布, 气隙磁密分布曲綫	159
§ 9-2 产生磁通的磁势	160
§ 9-3 磁化曲綫	163
§ 9-4 結語	164
第十章 直流机的电枢繞組	166
§ 10-1 概述	166
§ 10-2 环形繞組轉化为鼓形繞組	167
§ 10-3 单迭繞組	169
§ 10-4 复迭繞組	174
§ 10-5 单波繞組	176
§ 10-6 复波繞組	180
§ 10-7 直流机电枢繞組的均压綫	182
§ 10-8 混合繞組	189
§ 10-9 槽內每层元件边“大于1”的情况	191
§ 10-10 应用电势多边形的方法来分析电枢繞組	192
§ 10-11 各种繞組的应用范围	195
§ 10-12 繞組的感应电势	195
§ 10-13 結語	198
第十一章 直流发电机	199
§ 11-1 直流发电机的用途及分类	199
§ 11-2 直流发电机的运行原理	200
§ 11-3 直流发电机的运行特性	214
§ 11-4 直流发电机的并联运行	227
§ 11-5 結語	231
第十二章 直流电动机	233
§ 12-1 直流电动机的用途及分类	233
§ 12-2 直流电动机的运行原理	234
§ 12-3 直流电动机的运行性能	239
§ 12-4 直流电机的制动	254
§ 12-5 結語	257
第十三章 換向	259

§ 13-1 概述	259
§ 13-2 换向的电磁理论	261
§ 13-3 产生火花的原因	268
§ 13-4 改善换向的方法	271
§ 13-5 调整换向的方法	275
§ 13-6 直流机的环火现象	278
§ 13-7 結語	281
第十四章 特殊直流电机	282
§ 14-1 概述	282
§ 14-2 单极电机	283
§ 14-3 电机放大器	284
§ 14-4 結語	291
主要参考书	292
附录	293
一、关于变压器的基本公式	293
二、用对称分量解三相变压器不对称运行的方法	296
三、自耦变压器的等值电路和短路阻抗	300
习题	304
变压器习题	304
直流机习题	315

緒 論

1. 电机制造工业的发展及其在国民經济中的作用

自从 1820 年, 奥斯特发现了, 随后安培总结了电流在磁場中的机械力之后, 电动机的雛形就出現在实验室内。同样, 自 1831 年法拉第提出了电磁感应定律后, 各种各样的发电机雛形也先后出現。当时所提出的电动机和发电机远远不同于現代的构造, 与其称之为电机还不如称之为仪器。由于电灯的发明, 发电机有了工业上的用途, 直流发电机找到了发展的基础。这时交流单相发电机也已出現。为了扩大饋电区域, 使有可能集中发电, 形成中央发电站, 激发了变压器的出現和发展。直到十九世紀末叶, 工业上的主要动力还是来自蒸汽机和水輪机。最初的电动机是由电池供电的, 随后由直流发电机供电。但直流供电受到距离的限制, 其发展也同时受到限制。当时的单相交流电动机(异步机)不能自己起劲, 必須用其它方法先把它轉起来才能发生力矩, 这在工业应用上很不方便。直到 1885 年, 費拉里斯提出了二相交流异步机的模型, 在以后的年代中得到了一定的应用。到 1888 年, 多利沃-多勃罗沃尔斯基提出了三相制和三相异步机, 这才奠定了交流电动机在工业上应用的基础。自 1891 年三相制开始使用起, 工业上的动力很快地为电动机所代替。以上简单的叙述虽不能說明电机发展中的多方面問題, 但可以看出它的发展是有一定規律的, 整个经济的发展是它的基础, 而科学技术的发展反过来又起了促进作用。

在这里不准备詳細討論电机中的科学技术問題, 但了解一下在电机发展中遇到了哪些性質的科学技术問題还是有益的。

最先遇到的是电磁方面的問題。一台电机总是有电压、电流、功率、力矩、轉速和效率。我們必須能够計算这些量, 通过这些量提出它的規格和性能, 只有这样才能正确地运用它。这些量的計

算是通过电机上电路和磁路的计算而实现的，在这里电磁学的发展和它在电机上的应用使电机的电磁计算达到了在工程计算中较高的准确度。电路指的是电机上的绕组，主要是电枢绕组，它的结构和理论，即它的形式、联接方式、电势的数量和质量（波形）、绕组带负载电流后对磁场的影响（通过电枢绕组的磁势）成为绕组的中心问题。电机中的电压、电势和电流之间采用克希霍夫第二定律的方式联系着的，这样就引入电机的电阻和电抗做为参数的概念。不同的运行情况规定了电机中各种电量间不同的关系，由此也必然引出各种不同的参数来表达这些关系。

电机是一种电和磁的机构，除了电路之外必然有磁路，磁路计算的准确度直接反映到电路的计算中。磁路也有不同结构，在各种类型电机中满足各方面的要求。电枢在初期发展阶段，其铁心由环状发展到有槽和齿，由实心发展到用迭片，材料由铁片到热轧硅钢片再到冷轧硅钢片。其它的磁路部分由铸铁发展到铸钢、轧钢和合金钢。总的要求是高磁导率、低损耗和足够的机械强度。

电机是电能与机械能之间转化的机械（变压器虽是电能之间的转化，但也存在电磁力的问题）必然有机械结构，力的传递、强度计算等问题。由于容量的增大，这些问题的重要性和复杂性也愈大，关系到电机的安全运行。除了一般的机械零件设计问题之外，电机还有它独特的零件设计问题。

电机由于内部产生了损耗，引起了内部发热，影响了绝缘的寿命和耐电的性能，必须加以冷却。电机愈大，其冷却的困难亦愈大。为了减少材料和体积，减轻电机的重量和成本，冷却的困难也随之增加。

电机的发展和用于电机的各种材料的发展是分不开的。除了前述的磁性材料外，主要的是绝缘材料，还有导线材料、电刷材料、机械结构上用的钢材等都直接决定了电机的质量。

有了设计图，有了材料，最后还要通过制造工艺来造出电机产品。

电机的发展与电机愈来愈广的应用也是分不开的。随着工农

业的发展,对电机的品种在数量上和质量上提出更多的要求。

因此,电机工业的发展是多方面的综合发展,它的科学技术问题也是多方面的。这就需要一定的分工与协调。电机制造工厂的任务主要是设计、工艺、生产及试验研究,以便为工农业及国防工业提供更好更多的电机产品。

电机之所以有这样巨大的发展是由于它在整个国民经济中起着巨大的作用,电机可称为电气化的心脏。从国民经济的范畴来讲,电机工业的服务对象为电力工业、工矿企业及农业、交通运输业等方面。

电力工业方面:随着国民经济的发展,对电力工业要求愈来愈大,而电力工业对发电机的容量和数量的要求也愈来愈大。现在,全世界的发电量几乎全部是由汽轮发电机和水轮发电机发出来的。已制成的最大的单机汽轮发电机达50.6万千瓦,水轮发电机达22.5万千瓦,而且已设计成了更大容量的汽轮发电机和水轮发电机。由于冷却技术、绝缘材料和设计工艺等的改进,特别是冷却技术,使汽轮发电机的单机容量迅速提高。水轮发电机也是由于冷却技术、冷轧硅钢片的应用、转子钢材、推力轴承设计等的改进而提高了它的单机容量。今后对提高发电机的效率、减少各种附加损耗、改善电机的参数、改进电机的结构、改进励磁方式等还需要做许多工作,使它能更好地满足电力系统的要求,得到更安全可靠的运行。

电力工业对变压器也有很高的要求,容量要与每台发电机相适应,使能组成一个单元,而且能耐雷电的冲击和短路时短路电流的冲击。在这里,冷轧硅钢片、冷却技术和高压技术起了决定性作用。

除了上述的主要输电设备外,还有许多辅助设备,要求电机工业成套地供应。由此可见,电力工业的发展在一个独立的国家里是不能离开电机工业的。

工矿企业及农业方面:在工矿企业里主要是对各种电动机的要求,首先是异步电动机、直流电动机和同步电动机,还有其它所

謂特殊电机(如交流整流子电机、放大机等)和控制电机(如自整角机、执行电机、測速机、旋转变压器等)。在不同的工矿企业中由于环境条件的不同而提出了不同的要求。在煤矿和石油工业中要求防爆、防腐蝕,在紡織工业中要防尘,在化学工业中要防各种气体和酸碱的腐蝕。不同企业中的工艺过程对电动机的起动性能、調速性能及其它在控制上的性能有不同的要求。由于地区的不同如干热带、湿热带和高原地带也要求有不同的电机来符合其运行条件。电动机在規格上有不同的电压、容量、轉速及其它相应于不同类型电机的規定。在各工业部門中如冶金工业、化工工业、石油工业、造纸工业、紡織工业、煤矿工业、机械工业、建筑材料工业等,凡用到动力就离不开电动机。它們的生产率和产品质量与电动机的性能有密切关系,电机的任何故障会在生产中造成損失。为了提高劳动生产率及提高生产质量,許多部門采用了自动化,在自动化系統中采用了各种控制电机。

在农业电气化中为了排灌和农产品加工,需要各种适合于农村用的电动机;为了利用当地的水力資源和燃料,需要中小型的发电设备;为了从高压电网上取得电源,需要农村用的降压变压器。

总之,工矿企业和农业向电机工业提出的是:在品种上要满足需要,在质量上要合乎要求。

交通運輸方面:电气铁道上的干綫機車和內燃機車,郊区及市区的電車和无軌電車都需要全套的电气设备包括电动机在內。輪船上、汽車上、拖拉机上、飞机上都有大小不同、具有不同复杂程度的电的系統,这里的发电机和电动机要满足各种不同的条件。起重机械和工矿的運輸也需要特定条件的电机装备。

从上述十分簡略的敘述里,我們可以初步了解电机工业与国民經济各部門的密切关系。

2. 我国电机制造工业的概况

电机的发展自其萌芽始,迄今也不过一百四十年。而自它形成一个工业部門到現在則不过一百年左右。我国解放前能制造的发电机不过二百瓩,电动机不过一百八十匹馬力,变压器不过二千

千伏安。解放后在党和政府的正确领导下，现代化的电机工厂已建立起来，并逐步生产出了各种产品。作为一个现代化的电机工业已经有了良好的基础，可以说基本上能满足国内经济建设的主要需要。例如从容量来说，1959年已经制成汽轮发电机五万千瓦，水轮发电机七万二千五百瓩，变压器组十二万千瓦安。在十年之内，从无到有，这种速度是从来没有过的。

现在我们的电机工业已进入自行试验研究和自行设计的阶段，在这阶段中要用自己的材料和结构来进行设计，建立我们自己的系列产品。

现在面对着日益发展的工农业，对电机工业提出了更多更高的要求。这些要求一方面是发展品种，即用于不同环境的，具有不同性能的，具有不同容量、电压、转速的电机，另一方面是提高质量，包括提高其技术经济指标，以保证性能良好、经久耐用、损耗小、效率高，同时还能降低成本。还有制造新的材料，如新型的绝缘材料、新型磁性材料、各种钢材等和它们在电机上的应用。努力改进生产方法和生产组织，提高劳动生产率，降低每台电机所需工时。设计人员必须进一步掌握电机的电磁规律，准确地计算电机各部件的强度，掌握新的冷却技术。工艺人员必须掌握工艺过程，改进工艺设备及工艺操作方法。运行人员必须更好地掌握电机的特性，结合使用单位的工作要求，提高运行的效率与性能。在党的领导下，高举三面红旗，坚持自力更生的原则，使电机制造工业在整个国民经济的发展中发挥更大的作用。

3. 电机的分类及基本原理

电力装备包括各种电机、各种开关设备、保护装置、控制器和自动调节装置等。本课程将只讨论电机。但应了解在运行中，电机和其它各种电器是有密切关系的。

从电机的结构上看，大体上可分成下列各类型：

{	变压器	{	直流机	{	同步机
	旋转电机		交流机		异步机

必须指出，这样的分类并不是绝对的，它们之间有极密切的内在

联系，这样分仅为了便于研究分析，决不要机械地把它們割裂开来。

电机作为一个动力机械来看，它的任务是进行能量轉換，或是把一种形式的电能轉換成另一种形式的电能，或是把机械能轉換成电能，或是把电能轉換成机械能。因此，从用途上电机又可区别为下列各类：

- (1) 变压器——主要是改变电压大小，也有改变相数或频率的，
- (2) 发电机——变机械能为电能，
- (3) 电动机——变电能为机械能。

同样要指出，它們是相互密切联系而不能分割的。此外，有些电机主要已不作为动力机械用，而作为量测或控制用的装置，例如用在程序控制机床上的步进电机和自整角机等，将在其它課程中討論。

电机中的能量轉換是通过电磁感应作用而实现的，因此分析电机要根据有关电和磁的規律。我們应用哪些电和磁的規律，要看我們想解决哪些电机上的問題。一般來說，每台电机必然有磁路和电路，而磁路和电路又是磁場和电場的簡化。凡用路的方法能解决的就尽量采用路的方法，只当遇到更深入細致的問題才必須用場的方法。过去电机学的理論是在磁路和电路的基础上发展起来的，由研究其稳态的过程到暫态的过程，由简单的运行方式到复杂的运行方式。在这过程中我們遇到如何准确地計算电机的参数和損耗等問題，这就有必要从簡化了的路又回到原来的場的問題。电机学作为研究电机的基本規律(不是研究某些專門問題)的課程，着重在它的稳态的过程，因为这是它的最基本运行方式。因此在电机学中常用的电磁規律是电路的規律和磁路規律。一般电机中的电路就是指它的綫圈和由許多綫圈所組成的繞組。磁路是指磁通所通过的部分，包括磁性材料所組成的部件及有关的空气隙(包括磁极之間的空間)。主要的有下列几項：

- (1) 克氏第一和第二定律 这是电路的定律，即在电路的联结点上，电流的代数和等于零，和在閉合的迴路中所有的电势之和

等于所有压降之和。第二定律也可以称为电势平衡规律。如果把迴路中的压降看做为负的电势，迴路中电势的总和等于零；

(2) 磁路规律 由于磁与电有相似的规律，克氏第一和第二定律同样可以应用到磁路上。设 Φ 为磁路中的磁通， Λ 为磁路的磁导或 R 为磁路的磁阻， F_0 为磁势，应用欧姆定律

$$\Phi = F_0 \Lambda = \frac{F_0}{R}.$$

如在同一磁路上有几个线圈产生几个磁势，磁通决定于磁势的总和，即其合成磁势。当有两个磁势时，合成磁势为

$$F_0 = F_1 + F_2,$$

电路上的串并联规律也同样可以应用。

(3) 全电流定律 在闭合的磁路中，磁场强度的线积分等于作用在该迴路上的总的磁势(安，或安匝)，即

$$\oint H \cdot dl = I\omega,$$

这是空间的积分，与时间无关。如电流 I 为直流，则 H 亦为恒值；如 I 为交流的瞬时值， H 亦瞬时值；如 I 为交流有效值， H 亦为有效值。在电机中谈到某绕组磁势是指它的总的 $I\omega$ ，用 F 来代表，这不是指消耗在磁路中某一段的磁势。这是电生磁的规律。

(4) 法拉第电磁感应定律 当磁通与线圈有相对运动而产生切割电势时，用

$$e = Blv.$$

这公式用于旋转电机中比较方便。当磁通在线圈中交变时，用

$$e = - \frac{d\Psi}{dt}.$$

这公式用于变压器比较方便，但在旋转电机中切割电势的写法可以转变为这种写法。这两个公式应用在电机中是为求绕组的电势，是磁生电的规律。这个定律是变压器是由原绕组把电功率传给副绕组的基础。

(5) 安培力定律

$$f = Bli$$

主要应用于电动机和发电机来求它的机械力矩。它和电磁感应定律合起来形成电功率与机械功率转化的基础。考虑在旋轉电机上任何一根导线，它的电势是 $e = Blv$ ，

$$\text{电功率} = ei = Blvi \text{ (瞬时值)},$$

$$\text{机械功率} = fv = Bliv \text{ (瞬时值)},$$

所以由切割电势所形成的电功率等于电磁力所产生的机械功率。在同一旋轉电机中不論它是电动机或发电机，这两种功率是同时存在的，其区别在于方向。在发电机中 e 和 i 同方向， f 和 v 反方向，在电动机中 e 和 i 反方向， f 和 v 同方向。这就是电机中的能量转换规律。

在电机学里我們就是把这些规律根据电机的结构（即什么样的磁路，什么样的绕组，什么样的绕组联接方式，）和它的运行方式（即各绕组端上加什么电压，通什么电流，加什么样的负载，什么样的转速等）写出电机的基本方程式，是一些含有电机参数的联立方程式，并进行解答。各个量之间的关系除了用方程式来表达之外，还可以用曲线来表示，如电机的特性曲线。

在交流机中采用复数符号法，向量图，等值电路图，谐波分析和对称分量等，它们是用来更清楚地表达联立方程式中各量的关系，提供更方便解决问题的途径。

电机分析方法的轮廓如上述，至于如何应用到各类型的电机上，在书中各篇内均有详细说明。在每一章里我們应注意这一章要解决或说明什么问题，问题是怎样提出的，用什么方法来解决，得出什么结论。

在电机学里也涉及电机的机械运动的问题，这主要是旋轉电机的力矩平衡，是电磁力矩与机械力矩的平衡。在任何电机里都遵守能量平衡的规律，也就是能量守恒定律。它也必须遵守有功功率和无功功率的平衡。

限制电机容量的因素很多，但主要是它的温升，所以电机的发热和它的冷却也应予考虑。

总之，电机是一种综合性的设备，它的问题是多方面的，但在

电机学中其重点是放在电磁规律方面。

电机学是电机系各专业的技术基础课程，不論是发电厂电力网的工作，或是工业企业中应用电机的工作，或是电机制造本身的工作，都必须对各种主要电机有比較深入的了解。本課程的内容将討論各主要电机的結構概要、工作原理、分析方法和工作性能，主要是电的磁的和机械的方面的問題，也討論到发热的問題。这些是以后的专业课程必要的基础。

电机学是一門既带专业性又带基础性的课程，与电工基础的性質很不同，在电工基础中所要解决的問題总是理想化了的，比較單純的。在电机学中要求运用理論来解决实际問題，而在实际問題中，客观情况常常是比較复杂的，綜合的。因此在分析时，有必要先将問題簡化，找出主要矛盾，运用理論加以解决，这样所得的結果，已經足够正确地反映客观規律，当然还有一定程度的近似性。有需要时，可以再深入分析較次要的矛盾，得到更正确的解答。在实际生产工作中所发现的問題，常是这样逐步来掌握它的規律的。在学习这門課程时要处处从实际出发考虑，不要仅仅满足于公式中数学上的关系，必須通过公式的符号看到它們所代表的物理量之間的关系。同时要重視数学計算，因为实际問題总要牵涉到数量的大小。也要重視实验工作。还有，因为各种电机之間不是毫无关系的，因此学习时应当把它們联系起来学，比較它們的一般矛盾和特殊矛盾，这样才能对各种电机有更好的了解。