

电 机 学

上 册

章 名 涛 主 編

科 学 出 版 社

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 变压器的負載运行	32
§ 2-5 变压器参数的計算和測定	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 变压器的联接組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 三相变压器无載运行时的电势波形	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 电鋸变压器	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 产生磁通的磁勢.....	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 u 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 电机放大机	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

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 无載特性	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 突然短路分析的理论基础——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動	634
§ 28-1 概述	634
§ 28-2 鼠籠式电动机的起動	635
§ 28-3 有較高起動力矩的鼠籠式电动机	639
§ 28-4 繞綫式电动机的起動	647
§ 28-5 异步电机的附加力矩和对起動的影响	648
§ 28-6 同步电动机的异步起動	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 变更轉子串联电阻的調速	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 变频机	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、力矩及換向	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

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，电动机的雛形就出现在实验室内。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现。当时所提出的电动机和发电机远远不同于现代的构造，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现。为了扩大饋电区域，使有可能集中发电，形成中央发电站，激发了变压器的出现和发展。直到十九世纪末叶，工业上的主要动力还是来自蒸汽机和水轮机。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）不能自己起动，必须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说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规律的，整个經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质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去运用它。这些量的計

算是通过电机上电路和磁路的計算而实现的，在这里电磁学的发展和它在电机上的应用使电机的电磁計算达到了在工程計算中較高的准确度。电路指的是电机上的繞組，主要是电枢繞組。它的結構和理論，即它的形式、联接方式、电势的数量和质量(波形)、繞組帶負載电流后对磁場的影响(通过电枢繞組的磁势)成为繞組的中心問題。电机中的电压、电势和电流之間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。不同的运行情况規定了电机中各种电量間不同的关系，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，磁路計算的准确度直接反映到电路的計算中。磁路也有不同結構，在各种类型电机中滿足各方面的要求。电枢在初期发展阶段，其鉄心由环状发展到有槽和齿，由实心发展到用迭片，材料由鉄片到热轧硅鋼片再到冷轧硅鋼片。其它的磁路部分由鑄鉄发展到鑄鋼、軋鋼和合金鋼。总的要求是高磁导率、低損耗和足够的机械强度。

电机是电能与机械能之間轉化的机械(变压器虽是电能之間的轉化，但也存在电磁力的問題)必然有机械結構，力的传递、强度計算等問題。由于容量的增大，这些問題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設計問題之外，电机还有它独特的零件設計問題。

电机由于内部产生了損耗，引起了内部发热，影响了絕緣的寿命和耐电的性能，必須加以冷却。电机愈大，其冷却的困难亦愈大。为了減少材料和体积，減輕电机的重量和成本，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，主要的是絕緣材料，还有导綫材料、电刷材料、机械結構上用的鋼材等都直接决定了电机的質量。

有了設計图，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綜合发展,它的科学技术問題也是多方面的。这就需要一定的分工与协调。电机制造工厂的任务主要是設計、工艺、生产及試驗研究,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經济中起着巨大的作用,电机可称为电气化的心脏。从国民經济的范畴来讲,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:随着国民經济的发展,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。現在,全世界的发电量几乎全部是由汽輪发电机和水輪发电机发出来的。已制成的最大的单机汽輪发电机达 50.6 万千瓦,水輪发电机达 22.5 万千瓦,而且已設計成了更大容量的汽輪发电机和水輪发电机。由于冷却技术、絕緣材料和設計工艺等的改进,特别是冷却技术,使汽輪发电机的单机容量迅速提高。水輪发电机也是由于冷却技术、冷轧硅鋼片的应用、轉子鋼材、推力軸承設計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、减少各种附加損耗、改善电机的参数、改进电机的結構、改进励磁方式等还需要做許多工作,使它能更好地滿足电力系统的要求,得到更安全可靠运行。

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,使能組成一个单元,而且能耐雷电的冲击和短路时短路电流的冲击。在这里,冷轧硅鋼片、冷却技术和高压技术起了决定性作用。

除了上述的主要輸电設備外,还有許多輔助設備,要求电机工业成套地供应。由此可見,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、旋轉变压器等)。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、调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 and 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質量,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,在質量上要合乎要求。

交通運輸方面:电气鉄道上的干綫機車和內燃機車,郊区及市区的电車和无軌电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统,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。

从上述十分簡略的叙述里,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瓦，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