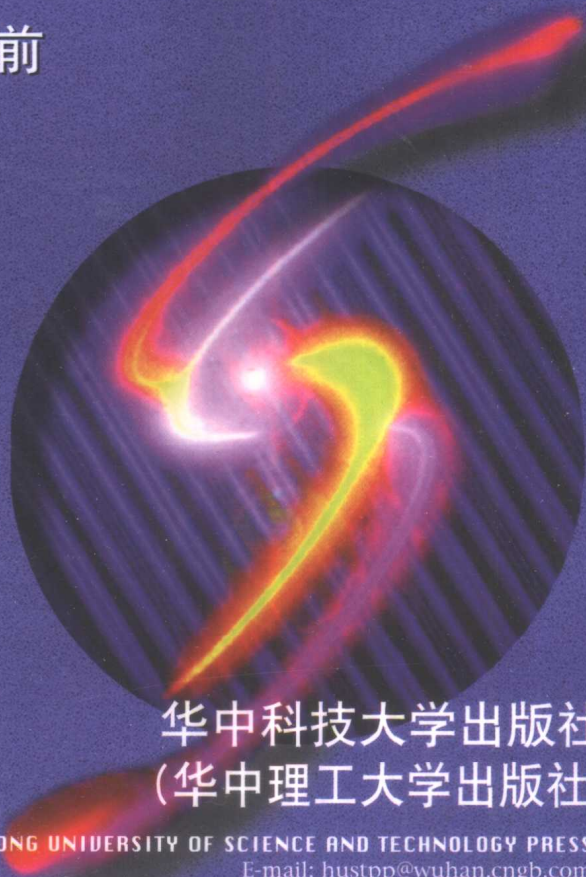




21世纪电气工程及其自动化系列教材

电机学

辜承林 陈乔夫 熊永前



华中科技大学出版社
(华中理工大学出版社)

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS
E-mail: hustpp@wuhan.cngb.com

21 世纪电气工程与自动化系列教材

电 机 学

辜承林 陈乔夫 熊永前 编

华中科技大学出版社
(华中理工大学出版社)

图书在版编目(CIP)数据

电机学/辜承林 等

武汉:华中科技大学出版社, 2001年2月

ISBN 7-5609-2372-0

I. 电…

II. ①辜… ②陈… ③熊…

III. 电机学

IV. TM3

电机学

辜承林 等

责任编辑:胡章成

封面设计:潘群

责任校对:张欣

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

经 销:新华书店湖北发行所

录 排:华中科技大学出版社照排室

印 刷:核工业中南三〇九印刷厂

开本:787×960 1/16

印张:29.25

字数:558 000

版次:2001年2月第1版

印次:2001年2月第1次印刷

印数:1—3 000

ISBN 7-5609-2372-0/TM·85

定价:32.00元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

前 言

原由我校许实章教授主编的《电机学》曾经是全国工科院校电类专业的首选教材之一。该教材自 20 世纪 50 年代中期开始使用,历经 40 余载,四易其版,印数逾 40 万册,1988 年获原机械部优秀教材二等奖,在国内具有较大的影响、较高的地位和一定的权威性。

电机学历来是电类专业的必修课,实施新的专业目录后,依然是电气工程与自动化专业的技术基础课程,但要求涵盖面更宽。然而,由于原教材主要是为电机和强电类专业编写的,内容侧重于电机本体,较少涉及电机作为系统中执行元件的作用和行为特点,不能适应宽口径打通培养模式对教材的需要。因此,迫切要求编写与新的专业设置接轨的教材。

本教材以保持原教材在国内的影响、地位和权威性为基本出发点,努力继承原教材特色,但注意强调电机作为系统执行元件时的功能,总体编排上亦尽可能淡化结构,突出基本原理、基本方法和基本运行控制规律的介绍,并特别增加反映电机发展新成就和电机行为计算机辅助分析的内容。此外,在章节安排、习题选配和插图设置等方面也都作了较大改进,力图方便教学,有利于学生能力培养。

本教材的编写和出版得到了华中科技大学教材建设“555 工程”和华中理工大学出版社的资助和支持,在此深表感谢。教材编写分工为:辜承林同志编写一、二、六、七章,陈乔夫同志编写三、四、五章,熊永前同志编写全部习题,并用计算机绘制绝大部分插图。虽然在过去的一年多时间内,我们都尽了自己的最大努力,但我们知道,限于学识,不足之处总是不可避免的。因此,我们诚恳地期望所有使用本教材的老师、学生和读者都能慷慨赐教,提出您的意见和建议。

编 者

2000 年 9 月

于华中科技大学

内 容 提 要

本书在继承传统电机学教材特色的基础上,努力适应新的专业设置和课时设置需要;在突出基本原理、基本方法和基本运行控制规律的同时,适当注重电机作为系统中控制执行元件时的功能;总体编排上亦尽可能淡化结构,但特别增加了电机动态行为计算机辅助分析和反映电机发展新成就的内容。此外,在章节安排、习题选配和插图设置等方面也都作了较大改进,力图方便教学,有利于学生的能力培养。

全书分七章,内容包括直流电机、变压器、交流电机绕组的基本理论、异步电机、同步电机、电机瞬态分析等。各章均配有适量例题和大量思考题及习题,书后还附有习题答案,便于自学。

本书可作为普通高等学校电气工程与自动化专业及其它机电类、自动化类专业的教学用书,也可供有关工程技术人员参考。

21 世纪电气工程及其自动化系列教材

编委会

主任委员	潘 垣	院 士	华中科技大学
副主任委员	尹项根	教 授	华中科技大学
委 员	顾国彪	院 士	中科院电工所
	梁维燕	院 士	哈尔滨动力设备 股份有限公司
	张勇传	院 士	华中科技大学
	杨奇逊	院 士	华北电力大学
	陈德树	教 授	华中科技大学
	何仰赞	教 授	华中科技大学
	陈 坚	教 授	华中科技大学
	王兆安	教 授	西安交通大学
	孙雨耕	教 授	天津 大 学
	孙亲锡	副教授	华中科技大学
	姜新祺	副编审	华中科技大学
秘 书	李 德	副编审	华中科技大学

目 录

第一章 导论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 电机发展简史	(3)
1.3 电机中的基本电磁定律.....	(11)
1.4 铁磁材料特性.....	(15)
1.5 磁路基本定律及计算方法.....	(21)
1.6 电机中的机电能量转换过程.....	(32)
1.7 电机的分析研究方法.....	(35)
习题	(36)
第二章 直流电机	(39)
2.1 概述.....	(39)
2.2 直流电机的电枢绕组.....	(46)
2.3 直流电机的磁场.....	(56)
2.4 直流发电机的基本特性.....	(69)
2.5 直流电动机的基本特性.....	(78)
2.6 直流电力传动.....	(84)
2.7 直流电机的换向.....	(94)
2.8 特殊用途的直流电机	(104)
2.9 电机的发热和冷却	(107)
习题.....	(111)
第三章 变压器	(118)
3.1 变压器的分类、基本结构、额定值	(118)
3.2 变压器的空载运行	(121)
3.3 变压器的负载运行	(124)
3.4 变压器的等效电路	(129)
3.5 变压器的参数测定	(134)
3.6 标么值	(137)
3.7 变压器的运行特性	(139)

3.8	三相变压器的磁路、联接组、电动势波形	(142)
3.9	变压器的并联运行	(149)
3.10	三相变压器的不对称运行	(153)
3.11	变压器的瞬变过程	(159)
3.12	三绕组变压器	(164)
3.13	自耦变压器	(168)
3.14	电流互感器和电压互感器	(171)
	习题	(174)
第四章	交流电机绕组的基本理论	(182)
4.1	交流绕组的基本要求	(182)
4.2	三相单层绕组	(184)
4.3	三相双层绕组	(186)
4.4	在正弦分布磁场下的绕组电动势	(189)
4.5	在非正弦分布磁场下电动势中的高次谐波 及其削弱方法	(192)
4.6	单相绕组的磁动势	(195)
4.7	三相绕组的基波合成磁动势	(199)
4.8	圆形和椭圆形旋转磁动势	(203)
4.9	谐波磁动势	(205)
4.10	交流电机的主磁通、漏磁通	(206)
	习题	(207)
第五章	异步电机	(211)
5.1	异步电机的基本类型和基本结构	(211)
5.2	异步电机的基本工作原理	(214)
5.3	异步电动机的额定值	(215)
5.4	转子静止时的异步电机	(216)
5.5	转子旋转时的异步电机及其等效电路	(221)
5.6	异步电机等效电路的简化	(226)
5.7	异步电机的参数测定	(230)
5.8	笼型转子的参数计算	(232)
5.9	异步电动机的功率、转矩平衡方程式	(234)
5.10	电磁转矩三种表达式	(237)
5.11	异步电动机的工作特性	(242)
5.12	三相异步电动机的起动	(243)

5.13	异步电动机的制动	(255)
5.14	异步电动机的调速	(258)
5.15	三相异步电动机在不对称电压下 运行及单相异步电动机	(264)
5.16	特种异步电机	(274)
	习题	(278)
第六章	同步电机	(283)
6.1	概述	(283)
6.2	同步电机的运行原理	(291)
6.3	同步发电机的运行特性	(307)
6.4	同步发电机的并联运行	(319)
6.5	同步电动机和调相机	(333)
6.6	同步发电机的不对称运行	(342)
6.7	同步电机的突然短路	(352)
6.8	特殊用途的同步电机	(369)
	习题	(375)
第七章	电机瞬态过程	(384)
7.1	交流电机在相坐标系中的瞬态分析模型	(384)
7.2	交流电机在正交坐标系中的瞬态分析模型	(398)
7.3	状态方程的数值求解	(411)
7.4	异步电机动态行为数值仿真	(416)
7.5	同步电机动态行为数值仿真	(428)
	习题	(444)
	习题参考答案	(446)
	附录 实用三角恒等式	(454)
	参考文献	(455)

第一章 导 论

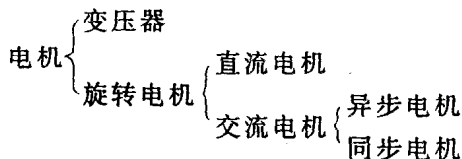
1.1 概 述

1.1.1 电机的定义

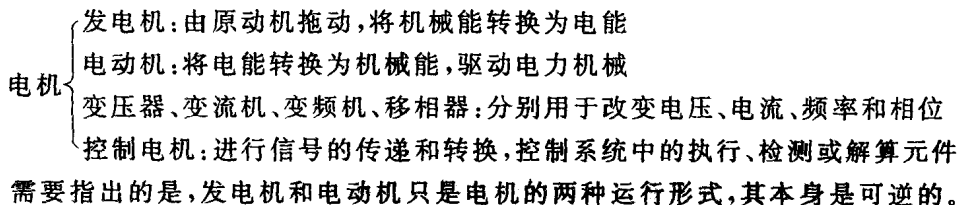
广义言之,电机可泛指所有实施电能生产、传输、使用和电能特性变换的机械或装置。然而,由于生产、传输、使用电能和实施电能特性变换的方式很多,原理各异,如机械摩擦、电磁感应、光电效应、磁光效应、热电效应、压电效应、记忆效应、化学效应、电磁波等等,内容广泛,不可能由一门课程包括,因此,作为电类相关学科,特别是电气工程学科的主要技术基础课,电机学的主要研究范畴仅限于那些依据电磁感应定律和电磁力定律实现机电能量转换和信号传递与转换的装置。依此定义,严格地说,这类装置的全称应该是电磁式电机,但习惯上已将其简称为电机。虽然涵义上是狭义的,但就目前来说,能够大量生产电能、实施机电能量转换的机械主要还是电磁式电机,因此,在理解上不会有歧义。

1.1.2 电机的主要类型

电机的种类很多,分类方法也很多。如按运动方式分,静止的有变压器,运动的有直线电机和旋转电机,直线和旋转电机继续按电源性质分,又有直流电机和交流电机两种,而交流电机按运行速度与电源频率的关系又可分为异步电机和同步电机两大类。分类还可以进一步细分下去,这里就不一一列举了。鉴于直线电机较少应用,而电机学只侧重于旋转电机的研究,故上述分类结果可归纳为:



以上分类方法从理论体系上讲是合理的,也是大部分电机学教材编写的基本构架。但从习惯角度,人们还普遍接受另一种按功能分类的方法,具体是:



也就是说,同一台电机,既可作发电机运行,也可作电动机运行,只是从设计要求和综合性能考虑,其技术性和经济性未必兼得罢了。

然而,无论是发电机运行,还是电动机运行,电机的基本任务都是实现机电能量转换,而前提也就是必须能够产生机械上的相对运动。对旋转电机,这在结构上就必然要求有一个静止部分和一个旋转部分,且二者之间还要有一个适当的间隙。在电机学中,静止部分被称为定子,旋转部分被称为转子,间隙被称为气隙。气隙中的磁场分布及其变化规律在能量转换过程中起决定性作用,这是电机学研究的重点问题之一。

1.1.3 电机中使用的材料

由于电机是依据电磁感应定律实现能量转换的,因此,电机中必须要有电流通道和磁通通道,亦即通常所说的电路和磁路,并要求由性能优良的导电材料和导磁材料构成。具体说来,电机中的导电材料是绕制线圈(在电机学中将一组线圈称为绕组)用的,要求导电性能好,电阻损耗小,故一般选用紫铜线(棒)。电机中的导磁材料又叫做铁磁材料,主要采用硅钢片,亦称为电工钢片。硅钢片是电机工业专用的特殊材料,其磁导率极高(可达真空磁导率的数百乃至数千倍),能减小电机体积,降低励磁损耗,但磁化过程中存在不可逆性磁滞现象,在交变磁场作用下还会产生磁滞损耗和涡流损耗。这些将在 1.4 节中专门讲述。

除导电和导磁材料外,电机中还需要有能将电、磁两部分融合为一个有机整体的结构材料。这些材料首先包括机械强度高、加工方便的铸铁、铸钢和钢板,此外,还包括大量介电强度高、耐热性能好的绝缘材料(如聚酯漆、环氧树脂、玻璃丝带、电工纸、云母片、玻璃纤维板等),专用于导体之间和各类构件之间的绝缘处理。电机常用绝缘材料按性能划分为 A、E、B、F、H、C 等 6 个等级。如 B 级绝缘材料可在 130℃ 下长期使用,超过 130℃ 则很快老化,但 H 级绝缘材料允许在 180℃ 下长期使用。

1.1.4 电机的作用和地位

在自然界各种能源中,电能具有大规模集中生产、远距离经济传输、智能化自动控制的突出特点,它不但已成为人类生产和生活的主要能源,而且对近代人类文明的产生和发展起到了重要的推动作用。与此相呼应,作为电能生产、传输、使用和电能特性变换的核心装备,电机在现代社会所有行业和部门中也占据着越来越重要的地位。

对电力工业本身来说,电机就是发电厂和变电站的主要设备。首先,火电厂利用汽轮发电机(水电厂利用水轮发电机)将机械能转换为电能,然后电能经各级变电站利用变压器改变电压等级,再进行传输和分配。此外,发电厂的多种辅助设备,如给水泵、鼓风机、调速器、传送带等,也都需要电动机驱动。

在机器制造业和其它所有轻、重型制造工业中,电动机的应用也非常广泛。各类工作母机,尤其是数控机床,都须由一台或多台不同容量和型式的电动机来拖动和控制。各种专用机械,如纺织机、造纸机、印刷机等也都需要电动机来驱动。一个现代化的大中型企业,通常要装备几千乃至几万台不同类型的电动机。

在冶金工业中,高炉、转炉和平炉都须由若干台电动机来控制,大型轧钢机常由数千乃至数万千瓦的电动机拖动。近代冶金工业,尤其是大型钢铁联合企业,电气化和自动化程度非常高,所用电机的数量和型式就更多了。

在石油和天然气的钻探及加压泵送过程中,在煤炭的开采和输送过程中,在化学提炼和加工设备中,在电气化铁路和城市交通以及作为现代化高速交通工具之一的磁悬浮列车中,在建筑、医药、粮食加工工业中,在供水和排灌系统中,在航空、航天领域,在制导、跟踪、定位等自动控制系统以及脉冲大功率电磁发射技术等国防高科技领域,在加速器等高能物理研究领域,在伺服传动、机器人传动和自动化控制领域,在电动工具、电动玩具、家用电器、办公自动化设备和计算机外部设备中……总之,在一切工农业生产、国防、文教、科技领域以及人们的日常生活中,电机的应用越来越广泛。一个工业化国家的普通家庭,家用电器中的电机总数在 50 台以上;一部现代化的小轿车,其内装备的各类微特电机已超过 60 台。事实上,电机发展到今天,早已成为提高生产效率和科技水平以及提高生活质量的主要载体之一。

纵观电机发展,其应用范围不断扩大,使用要求不断提高,结构类型不断增多,理论研究不断深入。特别是近 30 年来,伴随着电力电子技术和计算机技术的进步,尤其是超导技术的重大突破和新原理、新结构、新材料、新工艺、新方法的不断推动,电机发展更是呈现出勃勃生机,其前景是不可限量的。

1.2 电机发展简史

电机发明至今,已有近 200 年的历史。电机学科已发展成为一个比较成熟的学科,电机工业也已成为近代社会的支柱产业之一,其发展历史可简述如下。

1.2.1 直流电机的产生和形成

工业革命以后,蒸汽动力得以普遍应用。但随着生产力的发展,蒸汽动力输送和管理不便的缺点日益突出,迫使人们努力寻找新的动力源。19 世纪初期,人们已积累了有关电磁现象的丰富知识。在此基础上,法拉第(Faraday)于 1821 年发现了载流导体在磁场中受力的现象(即电动机的作用原理),并首次使用模型表演了这种把电能转换为机械能的过程。很快,原始型式的电动机就被制造出来了。但由于驱动源是蓄电池,当时极为昂贵,经济性远不能与蒸汽机相抗衡,因而也就不能被推广。

为此,人们积极寻求能将机械能转换为电能的装置。法拉第本人亦坚持研究。在进行了大量的实验研究以后,1831年,他又发现了电磁感应定律。在这一基本定律的指导下,第二年,皮克西(Pixii)利用磁铁和线圈的相对运动,再加上一个换向装置,制成了一台原始型旋转磁极式直流发电机。这就是现代直流发电机的雏形。虽然早在1833年,楞次(Lenz)已经证明了电机的可逆原理,但在1870年以前,直流发电机和电动机一直被看作两种不同的电机而独立发展着。

电磁感应定律发现了,直流发电机也发明了,但经济性、可靠性、容量却未达到实用化要求,即廉价直流电源的问题并没有很快得到解决,因而电动机的应用和发展依然缓慢。加之在1860年以前,人们还不善于从 $F=Bli$ 的角度考察问题,几乎都将电磁铁之间的相互吸引和排斥作为电动机结构设计的基本指导思想,这本身就带有很大的局限性,更何况以蓄电池为主的昂贵的供电方式也确实起到了制约作用。

需求产生动力。为解决廉价直流电源这一电动机应用中的瓶颈问题,直流发电机获得了快速发展。在1834—1870年这段时间内,发电机研究领域产生了三项重大的发明和改进。在励磁方面,首先从永磁体转变到采用电流线圈,其后,1866年,西门子兄弟(W & C W Siemens)又从蓄电池他励发展到发电机自励。在电枢方面,格拉姆(Gramme)于1870年提出采用环形绕组。虽然这种绕组早在电动机模型中就已经提出过,但没有受到重视,直至在发电机中被采用之后,人们才将发电机和电动机中的这两种结构进行了对比,并最终使电机的可逆原理被大家所接受,从此,发电机和电动机的发展合二为一。

1870—1890年是直流电机发展的另一个重要阶段。1873年,海夫纳-阿尔泰涅克(Hefner-Alteneck)发明了鼓形绕组,提高了导线的利用率。为加强绕组的机械强度,减少铜线内部的涡流损耗,绕组的有效部分被放入铁心槽中。1880年爱迪生(Edison)提出采用叠片铁心,进一步减少了铁心损耗,降低了绕组温升。鼓形电枢绕组和有槽叠片铁心结构一直沿用至今。

上述若干重大技术进步使直流电机的电磁负荷、单机容量和输出效率大为提高,但换向器上的火花问题随之上升为突出问题。于是,1884年出现了换向极和补偿绕组,1885年开始用碳粉制作电刷。这些措施使火花问题暂告缓和,反过来又促进了电磁负荷和单机容量的进一步提高。

在电机理论方面,1886年霍普金森兄弟(J & E Hopkinson)确立了磁路欧姆定律,1891年阿诺尔特(Anoret)建立了直流电枢绕组理论。这就使直流电机的分析和设计建立在更为科学的基础上。因此,到19世纪90年代,直流电机已经具备了现代直流电机的主要结构特点。

1882年是电机发展史上的一个转折点。这一年,台勃莱兹(Depratz)把米斯巴哈水电站发出的2kW直流电,通过一条长57km的输电线送到了慕尼黑,从而为电能和电机的应用开辟了广阔的前景。

然而,随着直流电的广泛应用,直流电机的固有缺点也很快暴露出来。首先,远距离输电时,要减少线路损耗,就必须升高电压,而制造高压直流发电机却有很多不可克服的困难。此外,单机容量不断增大,电机的换向也就变得越来越困难。因此,19世纪80年代以后,人们的注意力逐渐向交流电机方面转移。

1.2.2 交流电机的形成和发展

1832年,人们就知道了单相交流发电机,而直流电机中的换向器也就是为了实现绕组中交变电流与端口直流电流之间的相互转换而设计的特定装置。不过,1870年以前,由于生产上没有需要,加上当时科学水平的限制,人们对交流电的特点还不大了解。1876年,亚勃罗契柯夫(Yaporochikov)首次采用交流电机和开磁路式串联变压器给“电烛”供电。1884年,霍普金森兄弟发明了具有闭合磁路的变压器,同年,齐波诺斯基(Zipernowski)、德拉(Deri)和勃拉弟(Blathy)三人又提出了芯式和壳式结构。之后,单相变压器就逐渐在照明系统中得以应用,使远距离输电问题得到缓解,但又产生了新的矛盾。这就是,当时的单相交流电还不能用作电动机电源,换句话说,运用交流电驱动各类生产机械的问题仍未获得解决。

交流感应电动机的发明,与产生旋转磁场这一研究工作紧密相连。1825年,阿拉戈(Arago)利用金属圆环的旋转,使悬挂其中的磁针得到了偏转。实际上,这一现象展示的就是多相感应电动机的工作原理。1879年,贝利(Beiley)采用依次变动四个磁极上的励磁电流的办法,首次用电的方式获得了旋转磁场。1883年,台勃莱兹进一步在理论上阐明,两个在时间和空间上各自相差 $1/4$ 周期的交变磁场,合成后可以得到一个旋转磁场。然而,真正用交流电产生旋转磁场,并制造出实际可用的交流电机的,还是从费拉里斯(Ferraris)和特斯拉(Tesla)两人的工作开始。1885年,费拉里斯把用交流电产生旋转磁场和用铜盘产生感应电流这两种思想结合在一起,制成了第一台两相感应电动机。稍后,他又于1888年发表了“利用交流电产生电动旋转”的经典论文。同一时期,特斯拉亦独立地从事于旋转磁场的研究,而且几乎与费拉里斯同时发明了感应电动机。

在此基础上,1889年,多利夫-多布罗夫斯基(Doliv-Dobrovsky)又进一步提出了采用三相制的建议,并设计和制造了三相感应电动机。与单相和两相系统相比,三相系统效率高,用铜省,电机的性能价格比、容量体积比和材料利用率有明显改进,其优越性在1891年建成的从劳芬到法兰克福的三相电力系统中得到了充分显示。该系统的顺利运行表明,三相交流电不但便于输送和分配,而且更有利于电力驱动。三相电动机结构简单,工作可靠,很快得到了大量应用。因此,到20世纪初,交流三相制在电力工业中就占据了绝对统治地位。

随着交流电能需求的不断增加,交流发电站的建设迅速发展,至19世纪80年代末期,研制能直接与发电机连接的高速原动机以替代蒸汽机的要求被提了出来。经过众多工程技术人员的苦心研究,不久就研制出了能高速运转的汽轮机。到90

年代初期,许多电站已经装有单机容量为 1000kW 的汽轮发电机组。此后,三相同步电机的结构逐渐划分为高速和低速两类,高速的以汽轮发电机为代表,低速的以水轮发电机为代表。同时,由于大容量和可靠性等明显原因,几乎所有的制造厂家都采用了励磁绕组旋转(磁极安装在转子上)、电枢绕组静止(线圈嵌放在定子槽中)的结构型式。随着电力系统的逐步扩大,频率亦趋于标准化,但不同的地区和国家的标准不一,如欧洲的标准为 50Hz,美国为 60Hz,我国统一为 50Hz,等等。

此外,由于工业应用和交通运输方面的需要,19 世纪 90 年代前后还发现了将交流变换为直流的旋转变流机,以及具有调速和调频等调节功能的交流换向器电机。

在交流电机理论方面,1893 年左右,肯涅利(Kennelly)和斯泰因梅茨(Steinmetz)^①开始用复数和相量来分析交流电路。1894 年,海兰(Heyland)提出的“多相感应电动机和变压器性能的图解确定法”,是感应电机理论研究的第一篇经典性论文。同年,费拉里斯已经采用将一个脉振磁场分解为两个大小相等、方向相反的旋转磁场的方法来分析单相感应电动机。这种方法后来被称为双旋转磁场理论。1894 年前后,保梯(Potier)和乔治(Goerge)又建立了交轴磁场理论。1899 年,布隆代尔(Blondel)^②在研究同步电动机电枢反应过程中提出了双反应理论,这在后来被发展成为研究所有凸极电机的基础。

总的说来,到 19 世纪末,各种交、直流电机的基本类型及其基本理论和设计方法,大体上都已建立起来了。

1.2.3 电机理论和设计、制造技术的逐步完善

20 世纪是电机发展史上的一个新时期。这个时期的特点是:工业的高速发展不断对电机提出各种新的、更高的要求,而自动化方面的特殊需要则使控制电机和新型、特种电机的发展更为迅速。在这个时期内,由于对电机内部的电磁过程、发热过程及其它物理过程开展了越来越深入的研究,加上材料和冷却技术的不断改进,交、直流电机的单机容量、功率密度和材料利用率都有显著提高,性能也有显著改进,并日趋完善。

以汽轮发电机为例,1900 年,单机容量不超过 5MVA,到 1920 年,转速为 3000r/min 的汽轮发电机的容量已达 25MVA,而转速为 1000r/min 的汽轮发电机的容量达到 60MVA,至 1937 年,用空气冷却的汽轮发电机的容量已达到 100MW。1928 年氢气冷却方式首次被应用于同步补偿机,1937 年推广应用于汽轮发电机后,就使转速为 3000r/min 的汽轮发电机的容量上升到 150MW。20 世纪下半叶,电机冷却技术有了更大的发展,主要表现形式就是能直接将气体或液体通入

① 原译为“司坦麦茨”。

② 原译为“勃朗德尔”。

导体内部进行冷却。于是,电机的温升不再成为限制容量的主要因素,单机容量也就可能更大幅度地提高。1956年,定子导体水内冷、转子导体氢内冷的汽轮发电机的容量达到了208MW,1960年上升为320MW。目前,汽轮发电机的冷却方式还有全水冷(定、转子都采用水内冷,简称双水内冷)、全氢冷以及在定、转子表面辅以氢外冷等多种,单机容量已达1200MW~1500MW。

水轮发电机和电力变压器的发展情况与此相类似。水轮发电机的单机容量从20世纪初的不超过1000kW增至目前的1200MW,电力变压器的单台容量也完全能够与最大单机容量的汽轮发电机或水轮发电机匹配,电压等级最高已经达到1200kV。

电机功率密度和材料利用率的提高可以从下面一组关于电机重量减轻和尺寸减小的实例数据窥见一斑:小型异步电动机的重量19世纪末时为每千瓦大于60kg,第一次世界大战后已降至每千瓦20kg左右,到20世纪70年代则降到每千瓦10kg;与此同时,电机体积也减小了50%以上,技术进步的作用是非常明显的。

促使电机重量减轻和尺寸减小的主要因素来自于三个方面。首先是设计技术的进步和完善。这其中电机理论研究成果的直接注入,也有设计手段和工具革新的积极影响,尤其是计算机辅助设计(CAD)技术的应用,真正使多目标变参数全局最优化设计成为可能。其次是结构和工艺的不断改进。新工艺措施包括线圈的绝缘和成型处理、硅钢片涂漆自动化、异步机转子铸铝等等,辅以专用设备、模夹具以及生产线和装配线,也就从根本上保证了设计目标的完整实现。第三是新型材料的发展和应用,如铁磁材料采用冷轧硅钢片,永磁材料采用稀土磁体、钕铁硼磁体,绝缘材料采用聚酯薄膜、硅有机漆、粉云母等等。

自动化技术的特殊需要推动了控制电机的发展。20世纪30年代末期出现的各种型式的电磁式放大机,如交磁放大机和自激放大机等,就是生产过程自动化和遥控技术发展需要的产物。现今多种型式的伺服电动机、步进电动机、测速发电机、自整角机和旋转变压器等,更是各类自动控制系统和武器装备以及航天器中不可缺少的执行元件、检测元件或解算元件。它们大多在第二次世界大战期间陆续出现,60年代以后基本完善,但在功能、精度、可靠性、快速响应能力方面不断有所改进,年产量的平均增长速度明显高于普通电机。

新型、特种电机是所有原理、结构、材料、运行方式有别于普通电机或控制电机,但基本功能又与普通电机或控制电机无本质差异的各类电机的总称。由于这类电机大都是为了满足某种特定需求而专门研制的,具有普通电机或控制电机难以企及的某种特定性能,因而品种繁多,发展速度惊人,应用无所不及。有的以直线运动方式驱动磁悬浮高速列车;有的以50000r/min超高速旋转;有的以蠕动方式爬行;有的还可以直接作二维或三维运动;有的用作大功率脉冲电源,主要以突然短路方式运行,典型应用如环形加速器和电磁发射与推进;有的功率不到1W,采用印刷绕组,尺寸不足2mm,用于人体医学工程;有的甚至直接由压电陶瓷和形状记

忆合金等功能材料制成,可实现纳米级精密定位(压电超声波电机)和柔性伺服传动(形状记忆合金电机),性能卓越,但不再适用电磁理论,原理和运行控制方式也与电磁式电机截然不同。事实上,特种电机,尤其是微特电机一直是电机发展中最有活力、最富色彩、也最具挑战性的分支之一。

综观 20 世纪电机制造技术的发展,由于设计、工艺和材料等方面的长足进步,各类电机的性能几近完善。不过,世界各国发展水平不一,其实际状况是一个国家电工技术水平的客观反映,据此评价一个国家的综合技术实力亦不为过。

在电机理论方面,1918 年,福蒂斯丘(Fortescue)^①提出了求解三相不对称问题的一般化方法——对称分量法。对于不对称的三相系统,无论是变压器、异步电机还是同步电机,总可以把三相电压和电流分解成正序、负序和零序三组对称分量。其中,正序电流在电机内部产生一个正向旋转磁场,负序电流产生反向旋转磁场,零序电流产生脉振磁场。这样,就使电机不对称运行时内部物理过程的描述得到简化,进而在线性假设条件下,应用叠加原理,即认为电机的总体行为是三组分量单独作用行为的叠加,就可以对电机不对称运行时的行为进行分析计算。在此基础上,各类交流电机(器)的分析方法也就得到了进一步统一。接下来,1926—1930 年间,道黑提(Dohadi)和尼古尔(Nigull)两人先后提出了五篇经典性论文,发展了布隆代尔的双反应理论,求出了同步电机的瞬态功角特性,以及三相和单相突然短路时的短路电流。1929 年,帕克(Park)^②又利用坐标变换和算子法,导出了同步电机瞬态运行时的电压方程和算子电抗。同时,许多学者又研究了同步电机内的磁场分布,得出了各种电抗的计算公式和测定方法。这些工作使得同步电机的理论达到了比较完善的地步。在异步电机方面,1920—1940 年间,德雷福斯(Dreyfus)^③、庞加(Punga)、弗里茨(Fritz)、马勒(Müller)^④、海勒尔(Heiller)^⑤等人还对双笼和深槽电机的理论和计算方法、谐波磁场产生的寄生转矩、异步电机噪声等问题进行了系统的研究,奠定了分析设计基础。

为了寻求分析各种电机的统一方法,1935—1938 年间, Kron 首次引入张量概念来研究旋转电机。这种方法的特点是,一旦列出原型电机的运动方程,通过特定的张量转换,就可以求出其它各种电机的运动方程。线圈的连接、电刷或集电环的引入、对称分量和其它各种分量的应用等等,都相当于一定的坐标变换。张量方法的应用,不但揭示了电机及其各种分析方法之间的相互联系,使电机理论趋于统一,而且为许多复杂问题的求解提供了新的、也更有效的途径。

① 原译为“福提斯古”。

② 原译为“派克”。

③ 原译为“卓福斯”。

④ 原译为“穆勒”。

⑤ 原译为“赫勒”。