



普通高等院校电子信息与电气工程类专业教材

辜承林 陈乔夫 熊永前 编 著

电机学

(第四版)

Dianji Xue



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

普通高等院校电子信息与电气工程类专业教材

电机学

(第四版)

辜承林 陈乔夫 熊永前 编著

华中科技大学出版社

中国·武汉



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、基本分析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;在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、同步电机和电机瞬态分析等。各章均配有适量例题和大量思考题及习题,书后还附有部分习题答案,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他机电类、自动化类专业的教学用书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/辜承林,陈乔夫,熊永前编著. —4版. —武汉:华中科技大学出版社,2018.4
ISBN 978-7-5680-3924-6

I. ①电… II. ①辜… ②陈… ③熊… III. ①电机学-高等学校-教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 063582 号

电机学(第四版)

Dianjixue

辜承林 陈乔夫 熊永前 编著

策划编辑:谢燕群

责任编辑:谢燕群

封面设计:原色设计

责任校对:刘峻

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录排:武汉市洪山区佳年华文印部

印刷:武汉华工鑫宏印务有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:25.75

字数:627千字

版次:2018年4月第4版第1次印刷

定价:55.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

第四版前言

不忘初心,砥砺前行。又一个轮回,8年过去了,我们一如既往地留意着各方的关注和期许,终能在各种激励和支持下,将第四版奉献予大家。

依托前三个版本的积淀,本教材的形式和内容基本定格,风格和特色也基本形成,故而回馈的大量修改建议、细节雕琢方面的期许相对集中。事实上,这也是本教材一直没有做好的地方,积久成疾,深感愧疚。于是,字斟句酌,对文图进行全面梳理,就成了本次修订的中心任务。诚然,循多方指点,研修书稿,矫枉纠偏,推敲取舍,我们做了本应早该做好的工作;但付梓之际,依旧惶然,深知百密一疏,遗误难免,还是要拜托大家,不吝赐教,呵护本教材继续成长。

时光荏苒,白驹过隙。1978年进入华中工学院电机专业,之前做了5年铣工,加工电机零件,这样算来,人行逾40年了。筚路蓝缕,格物致知,师友相扶,善莫大焉。尤为幸之,参与了本教材的编写,并走进了第二十个年头。收获季节品茗,源活渠清,上善若水,甘醇似泉,绵长如涓。感慨系之,唯有谢忱。

谢谢大家,谢谢了。

辜承林

2017年10月

于金秋之喻家山麓,华中科技大学

第三版前言

十年树木。本教材自付印以来,受宠于太多的呵护,得益于太多的支持和关爱,欣然走过了十个年头,更迎来了第三次出版的机会。此时此刻,由衷感谢众多兄弟院校的师生和朋友,由衷感谢社会各界的广大读者和同仁,更感激出版社领导和责任编辑的特别提携,真诚地谢谢你们。

本次改版的前提依然是广泛收集并采纳各兄弟院校和广大读者的修改建议。累积再版四年多来不间断的征集和梳理,特别是编者近年来教学实践中的探索与思考,本次修改在内容的优化组合和形式的浑然一体两方面都作了更多的考量,修改幅度比较大,但终极目标不外乎是更加有利于教学。真心希望改版中的这些努力会使本教材的传统特色更为突出,并有更多的读者受益。

交稿付印又是一个新的轮回。从新的起点出发,我们期待承载更多来自读者的点拨,负重前行,收获在新的季节。

编者

2009年6月

于华中科技大学

再版前言

本教材第一版自付印五年多来,多谢兄弟院校的支持和广大读者的关爱,我们陆续收集了一些中肯的建议和很好的修改意见。但抱歉的是,因为忙碌,除了第三次印刷时曾对书中一些文字和印刷错误进行过更正外,一直未能顾得上出版社多次催促的再版要求。

然而,随着新一轮按学科大类实施学分制教学改革工作的展开,教材内容的整合势在必行,电机学教材的再版工作也被纳入了正式编写计划。为此,我们认真梳理了方方面面的建议,在保留第一版原有特色的基础上,增删或改写了部分章节内容,更新了部分数据和图表,添加了部分例题和习题。其目的依然是突出基本概念,便于教学,有利于能力培养。

我们深知,在教学改革不断深化、科技进步日新月异的今天,编写教材是一项极富挑战性的工作。吾辈深感力不从心,实乃学识使然。若还要兼顾各兄弟院校在教学内容和课时设置上的差异,专业教材所肩负的教学参考书和工程技术参考书的双重职能,以及核心技术基础课的传统内容应保持的体系完整性等等,约束条件之多,更难得到完善之解。有鉴于此,我们认为,再版教材要在总体框架上做大的修改是比较困难的,也是不必要的,因此,我们建议读者一定要强化教材只是一本主要“教学参考书”的观念,教学内容的组织和学习章节的取舍一定不要受到具体教材的束缚。若能如此,无论是对编写出更多各具特色的教材(实为“教学参考书”),还是对有利于培养出更多出色的高级专门人才,都是有益的。在本教材再版之际,我们希望有更多的同仁保有这种共识,更期待着所有使用本教材的同仁们不吝赐教,一如既往。

谢谢大家。

编者

2005年5月

于华中科技大学

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,有利于学生能力的培养。

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:辜承林同志编写第一、二、六、七章,陈乔夫同志编写第三、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

第 1 版
2000 年 9 月
华中科技大学

第 1 目 录

第 1 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	(10)
1.4 铁磁材料特性	(14)
1.5 磁路基本定律及计算方法	(18)
1.6 电机中的机电能量转换过程	(29)
1.7 电机的发热和冷却	(31)
1.8 电机的分析研究方法	(34)
习题	(36)
第 2 章 直流电机	(39)
2.1 概述	(39)
2.2 直流电机的电枢绕组	(45)
2.3 直流电机的磁场	(54)
2.4 直流发电机的基本特性	(66)
2.5 直流电动机的基本特性	(75)
2.6 直流电力传动	(80)
2.7 直流电机的换向	(88)
2.8 特殊用途的直流电机	(97)
习题	(100)
第 3 章 变压器	(106)
3.1 概述	(106)
3.2 变压器的运行原理与特性	(109)
3.3 三相变压器	(127)
3.4 变压器的并联运行	(134)
3.5 变压器的不对称运行	(137)
3.6 变压器的瞬变过程	(142)
3.7 特殊用途的变压器	(147)
习题	(156)
第 4 章 交流电机绕组的基本理论	(163)
4.1 交流绕组的基本要求	(163)
4.2 三相交流绕组	(165)
4.3 交流绕组的电动势	(169)

4.4	交流绕组的磁动势	(175)
	习题	(186)
第 5 章	异步电机	(189)
5.1	概述	(189)
5.2	三相异步电动机的运行原理	(193)
5.3	三相异步电动机的运行特性	(211)
5.4	三相异步电动机的启动与调速	(219)
5.5	单相异步电动机	(237)
5.6	特殊用途的异步电机	(246)
	习题	(250)
第 6 章	同步电机	(254)
6.1	概述	(254)
6.2	同步电机的运行原理	(261)
6.3	同步发电机的运行特性	(274)
6.4	同步发电机的并联运行	(284)
6.5	同步电动机和调相机	(296)
6.6	同步发电机的不对称运行	(303)
6.7	同步电机的突然短路	(312)
6.8	特殊用途的同步电机	(326)
	习题	(331)
第 7 章	电机瞬态过程	(338)
7.1	交流电机在相坐标系中的瞬态分析模型	(338)
7.2	交流电机在正交坐标系中的瞬态分析模型	(351)
7.3	状态方程的数值求解	(362)
7.4	异步电机动态行为数值仿真	(366)
7.5	同步电机动态行为数值仿真	(377)
	习题	(394)
	部分习题参考答案	(396)
	附录 实用三角恒等式	(403)
	参考文献	(404)

第1章 导论

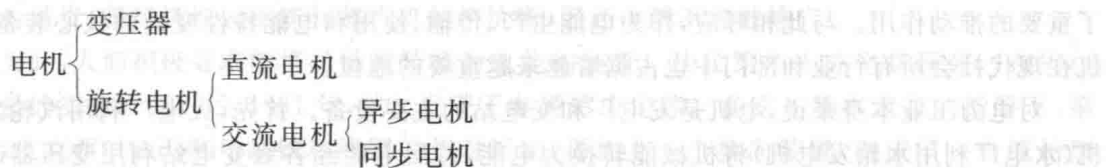
1.1 概述

1.1.1 电机的定义

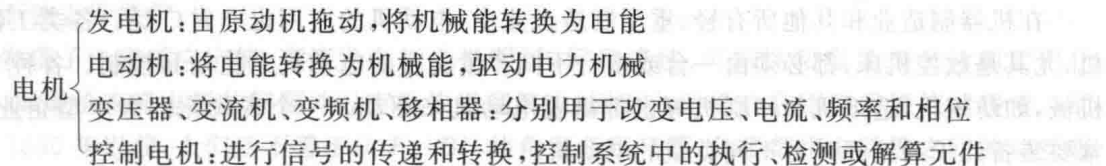
广义言之,电机可泛指所有实施电能生产、传输、使用和电能特性变换的机械装置。然而,由于生产、传输、使用电能和实施电能特性变换的方式很多,原理各异,如机械摩擦、电磁感应、光电效应、磁光效应、热电效应、压电效应、记忆效应、化学效应和电磁波等等,内容广泛,不可能由一门课程包括,因此,作为涉电类学科,特别是电气工程学科的主要技术基础课,电机学的主要研究范畴仅限于那些依据电磁感应定律和电磁力定律实现机电能量或信号转换的电磁装置。依此界定,严格地讲,这类装置的全称应该是电磁式电机,但习惯上已将之简称为电机。虽然这在含义上是狭义的,但就目前应用状况而言,能够大量生产电能、实施机电能量转换的机械装置主要还是电磁式电机,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。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,而电机学主要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,具体如下。



需要指出的是,发电机和电动机只是电机的两种运行形式,其本身是可逆的。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,无论是作为发电机运行,还是作为电动机运行,电机的基本任务都是实现机电能量转换,其前提也就是必须能够产生机械上的相对运动。对于旋转电机,它在结构上就必然要求有一个静止部分和一个旋转部分,且两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。由于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,因而成为电机学研究的重点问题之一,这将在后续相关章节中进行具体介绍,并进行深入讨论。

1.1.3 电机中使用的材料

由于电机是依据电磁感应定律和电磁力定律来实现能量转换的,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。具体来说,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)。导磁材料又称为铁磁材料,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、云母片和玻璃纤维板等),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,不同绝缘等级对应不同的极限工作温度。如B级绝缘材料可在 130°C 下长期使用,超过 130°C 则很快老化,但H级绝缘材料允许在 180°C 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、远距离经济传输和智能化自动控制的突出特点,它不但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、调速器和传送带等,也都需要电动机驱动。

在机器制造业和其他所有轻、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,都必须由一台或多台不同容量类型的电动机来拖动和控制。各种专用机械,如纺织机、造纸机和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、转炉和平炉都必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,所用电动机的数量和类型就更多了。

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,在工农业生产、国防、科技、文教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。

纵观电机的发展,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,理论研究也不断深入。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,尤其是高温超导、碳纤维、石墨烯等新材料的重大突破和新原理、新结构、新材料、新方法的不断推动,电机发展更是呈现出勃勃生机,前景不可限量。

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,其发展历程可简述如下。

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(水银杯实验装置)表演了这种把电能转换为机械能的过程。很快,制造出来了原始结构形式的电动机。但由于其驱动源是蓄电池,当时极为昂贵,其经济性远不能与蒸汽机的相抗衡,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。

发现了电磁感应定律,直流发电机也发明了,但经济性、可靠性和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。而且在 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,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. Siemens & 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,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芯槽中。1880年,爱迪生(Edison)提出采用叠片铁芯,进一步减少了铁芯损耗,降低了绕组温升。鼓形电枢绕组和有槽叠片铁芯结构一直沿用至今。

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年开始用炭粉制作电刷。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. Hopkinson & 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2 kW直流电通过一条长57 km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,加上受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(Yaporchikov)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。具体来说,就是当时的单相交流电还不能用作电动机电源。换句话说,直接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方法,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动机,还是从费拉里斯(Ferraris)和特斯拉(Tesla)两人的工作开始的。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,耗铜少,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已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,提出了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。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19世纪90年代初期,许多电站已经装有单机容量为1000 kW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)的结构形式。随着电力系统规模的逐步扩大,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50 Hz,美国为60 Hz,我国统一为50 Hz,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。至此,交流电机的主要结构形式基本确定。

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(Goege)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。

① 原译为“司坦麦茨”。

② 原译为“勃朗德爾”。

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,对电机内部的电磁过程、发热过程及其他物理过程开展了越来越深入的研究,材料和冷却技术不断改进,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5 MW,到1920年,转速为3 000 r/min的汽轮发电机的容量已达25 MW,而转速为1 000 r/min的汽轮发电机的容量达到60 MW;至1937年,用空气冷却的汽轮发电机的容量已达到100 MW。1928年氢气冷却方式首次应用于同步补偿机,1937年推广应用于汽轮发电机后,就使转速为3 000 r/min的汽轮发电机的容量上升到150 MW。20世纪下半叶,电机冷却技术有了更大的发展,主要表现形式就是直接将气体或液体通入导体内部进行冷却。于是,电机的温升不再成为限制电机容量的主要因素,单机容量也就有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208 MW,1960年上升为320 MW。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,单机容量已接近2 000 MW。

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1 000 kW增至目前的1 200 MW,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1 200 kV。

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:小型异步电动机的比重量在19世纪末时大于60 kg/kW,第一次世界大战后已降至20 kg/kW左右,到20世纪70年代则降到10 kg/kW;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三个方面。首先是设计技术的进步和完善。这其中有电机理论研究成果的直接应用,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形处理、硅钢片涂漆自动化、异步电机转子铸铝等等,辅以专用设备、模夹具及生产线和装配线,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类型的电磁式放大机,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。现今多种类型的伺服电动机、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,20世纪60年代以后基本完善,但在功能、精度、

可靠性和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、材料和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 500 000 r/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;有的用做大功率脉冲电源,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 1 W,采用印刷绕组,尺寸不足 2 mm,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,其原理和运行控制方式也与电磁式电机的截然不同。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的行为叠加,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

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”。

就可以求出其他各种电机的运动方程。线圈的连接、电刷或集电环的引入、对称分量和其他各种分量的应用等,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。

20世纪40年代前后,受第二次世界大战的影响,自动控制技术得到了很大的发展,相应地,各类控制电机和小型分马力电机的理论也有了较大的发展。至50年代,很多学者进一步利用物理模拟和模拟计算机,研究同步电机和异步电机的机电瞬态过程,亦使一些比较复杂的交流电机动态运行问题得到了解决。

在旋转电机理论体系方面,从1959年起,由怀特(White)和伍德森(Woodson)倡导,已逐步建立起了以统一的机电能量转换理论为基础的新体系。这种体系的特点是:把旋转电机作为广义机电系统中的一种,从电磁场理论出发导出电机的参数,从汉密尔顿(Hamilton)原理和拉格朗日-麦克斯韦(Lagrange-Maxwell)方程出发建立电机的运动方程,用统一的方法来研究各种电机的电动势、电磁转矩以及实现能量转换的条件和机理,还统一利用坐标变换、方块图和传递函数、状态方程等方法分析各种电机的稳态和动态性能及电机与系统的联系,从而使电机理论建立在更为严密的基础之上。不过,从教学角度看,这种新体系的理论起点较高,对基础知识的要求与我们目前的课程设置不衔接,因此,我国高校在电机学的教学中仍然采用传统的理论体系。

进入20世纪60年代以后,电力电子技术和计算机技术的应用使电机的发展经历了并继续经历着一场持久的革命性的变化。大功率可控硅开关元件问世后,出现了便于控制、体积小、噪音小,并且完全可以取代直流发电机的大容量直流电源,使直流电动机良好调速性能得以更充分发挥。与此同时,还出现了高性能价格比的变频电源,使交流电机的经济、平滑、宽调速成为可能,既拓宽了交流电机的应用领域,也变更了交流电机的传统观念。在此基础上,1970年,勃拉希克(Blaschke)^①提出了异步电机磁场定向控制方法(通称矢量变换控制,简称矢量控制)。该方法采用坐标变换和解耦处理后,能分别控制电流的励磁分量和转矩分量,使交流电机可获得与直流电机相媲美的调速性能,由此带动了交流变速传动的高速发展。近30年来,交流电机矢量控制在理论和实践上不断得以改进和完善,直接转矩控制和无位置传感器控制思想使系统结构更为简化,数字信号处理器(DSP, digital signal processor)和各类先进、智能控制技术的应用使系统性能不断提高,不仅在绝大部分场合替代了直流传动系统,而且已发展到全面追求系统高品质的程度,如数控设备中就采用了高品质交流伺服系统。这说明,高品质交流变速传动系统已经工业化、实用化。

对电机的近代发展来说,与电力电子技术应用同样重要的是计算机的广泛应用。这主要表现在三个方面。首先,计算机使电机的运行控制变得更为简便,也更为可靠,并使电机能以在线监测方式实现故障诊断和运行维护的智能化,而现代高品质电力传动赖以产生和发展的基础也正是计算机监控技术和电力电子技术的有机结合。其次,非线性特性和动态行为分析这些传统电机学中的研究难点,可运用计算机辅助分析(CAA)及数值仿真技术得以圆满解决,并且还能够虚拟实际系统,包括实际系统难以实现的一些理想或极限运行工况

^① 原译为“布拉什克”。