

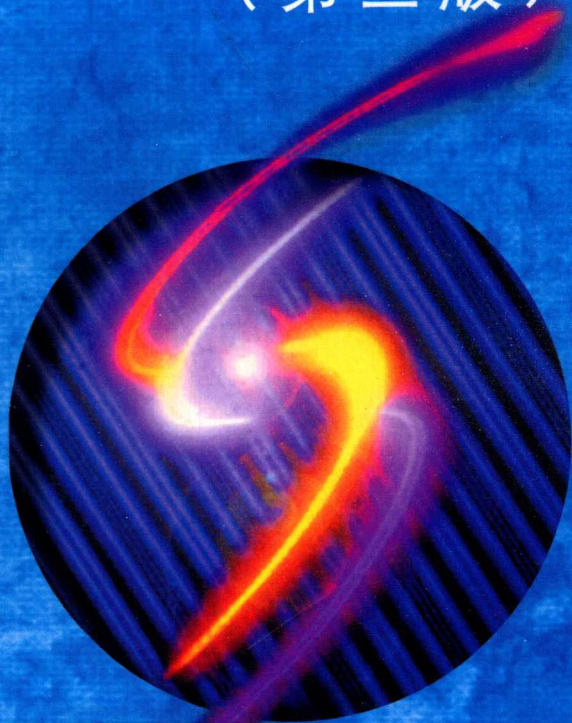


普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
国家级精品课程教材

# 电机学

(第三版)

辜承林 陈乔夫 熊永前



华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
国家级精品课程教材

ISBN 978-7-5603-3461-7

2010年11月第3版第1次印刷

1

# 电 机 学

(第三版)

辜承林 陈乔夫 熊永前

张勇

杨奇

陈德树

黄诚根

何仰赞

陈 坚

王兆安

孙南群

孙宗扬

姜新祺

李 德

前承编 夫乔陈

编 者：何仰赞  
副 编：陈 坚

书 号：7-5603-3461-7  
定 价：49.80元

2017年8月第2次印刷

华中科技大学出版社

中国·武汉





图书在版编目(CIP)数据

电机学(第三版)/辜承林 陈乔夫 熊永前. —武汉:华中科技大学出版社,2010年1月

ISBN 978-7-5609-3461-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 169103 号

电机学(第三版)

辜承林 陈乔夫 熊永前

策划编辑:李 德

责任编辑:姚 幸

责任校对:刘 竣

封面设计:潘 群

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:武汉众心图文激光照排中心

印 刷:武汉华工鑫宏印务有限公司

开本:787mm×960mm 1/16

印张:29.25

字数:560 000

版次:2010年1月第3版

印次:2017年8月第25次印刷

定价:49.80元

ISBN 978-7-5609-3461-7/TM·98

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

图书在版编目(CIP)数据

# 内 容 提 要

ISBN 978-7-5609-3461-7

会委编

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。

主编	樊森林 中南	副主编	樊森林 中南	陈乔夫 熊永前
副主编	樊森林 中南	樊森林 中南	樊森林 中南	
责任编辑	樊森林 中南	樊森林 中南	樊森林 中南	封面设计:潘新
责任编辑	樊森林 中南	樊森林 中南	樊森林 中南	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)81221932	地址:武汉市洪山区珞珈山	
印	樊森林 中南	樊森林 中南	樊森林 中南	
开本	787mm×1092mm	印张	25	字数:560千字

版次:2010年1月第3版 印次:2017年8月第25次印刷 定价:49.80元

ISBN 978-7-5609-3461-7/TM · 樊森林 中南

(本书若有印刷质量问题,请向出版社发行部调换)

# 前 言

## 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

编者

2009年9月  
于华中科技大学

编者

2008年2月

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,我们建议教师、学生和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。

谢谢诸位。

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

# 21 世纪电气与电子工程系列教材

## 编委会

主任委员	潘 垣	院 士	华 中 科 技 大 学
副主任委员	辜承林	教 授	华 中 科 技 大 学
	熊 蕊	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 有 限 股 份 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
	尹项根	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 电机的发热和冷却	(35)
1.8 电机的分析研究方法	(39)
习题	(40)
第二章 直流电机	(43)
2.1 概述	(43)
2.2 直流电机的电枢绕组	(51)
2.3 直流电机的磁场	(60)
2.4 直流发电机的基本特性	(74)
2.5 直流电动机的基本特性	(83)
2.6 直流电力传动	(89)
2.7 直流电机的换向	(99)
2.8 特殊用途的直流电机	(109)
习题	(112)
第三章 变压器	(119)
3.1 概述	(119)
3.2 变压器的运行原理与特性	(122)
3.3 三相变压器	(143)
3.4 变压器的并联运行	(151)
3.5 变压器的不对称运行	(154)

3.6	变压器的瞬变过程 .....	(161)
3.7	特殊用途的变压器 .....	(166)
	习题 .....	(176)
<b>第四章</b>	<b>交流电机绕组的基本理论</b> .....	<b>(184)</b>
4.1	交流绕组的基本要求 .....	(184)
4.2	三相交流绕组 .....	(186)
4.3	交流绕组的电动势 .....	(191)
4.4	交流绕组的磁动势 .....	(197)
	习题 .....	(209)
<b>第五章</b>	<b>异步电机</b> .....	<b>(212)</b>
5.1	概述 .....	(212)
5.2	三相异步电动机的运行原理 .....	(217)
5.3	三相异步电动机的运行特性 .....	(237)
5.4	三相异步电动机的启动与调速 .....	(246)
5.5	单相异步电动机 .....	(267)
5.6	特殊用途的异步电机 .....	(278)
	习题 .....	(282)
<b>第六章</b>	<b>同步电机</b> .....	<b>(287)</b>
6.1	概述 .....	(287)
6.2	同步电机的运行原理 .....	(295)
6.3	同步发电机的运行特性 .....	(311)
6.4	同步发电机的并联运行 .....	(323)
6.5	同步电动机和调相机 .....	(336)
6.6	同步发电机的不对称运行 .....	(345)
6.7	同步电机的突然短路 .....	(355)
6.8	特殊用途的同步电机 .....	(371)
	习题 .....	(377)
<b>第七章</b>	<b>电机瞬态过程</b> .....	<b>(386)</b>
7.1	交流电机在相坐标系中的瞬态分析模型 .....	(386)
7.2	交流电机在正交坐标系中的瞬态分析模型 .....	(400)

7.3 状态方程的数值求解 .....	(413)
7.4 异步电机动态行为数值仿真 .....	(417)
7.5 同步电机动态行为数值仿真 .....	(430)
习题 .....	(447)
部分习题参考答案 .....	(449)
附录 实用三角恒等式 .....	(457)
参考文献 .....	(458)



# 第一章 导 论

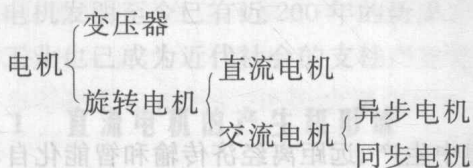
## 1.1 概 述

### 1.1.1 电机的定义

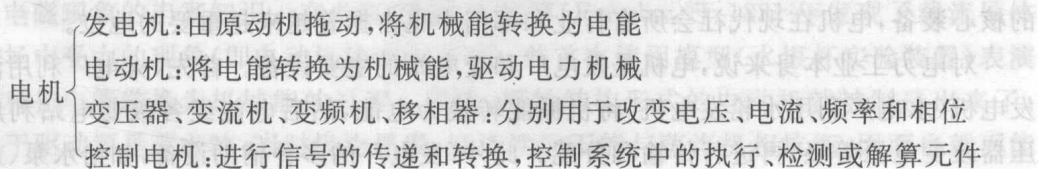
广义言之,电机可泛指所有实施电能生产、传输、使用和电能特性变换的机械装置。然而,由于生产、传输、使用电能和实施电能特性变换的方式很多,原理各异,如机械摩擦、电磁感应、光电效应、磁光效应、热电效应、压电效应、记忆效应、化学效应和电磁波等等,内容广泛,不可能由一门课程包括,因此,作为涉电类学科,特别是电气工程学科的主要技术基础课,电机学的主要研究范畴仅限于那些依据电磁感应定律和电磁力定律实现机电能量或信号转换的电磁装置。依此界定,严格地讲,这类装置的全称应该是电磁式电机,但习惯上已将之简称为电机。虽然这在含义上是狭义的,但就目前应用状况而言,能够大量生产电能、实施机电能量转换的机械装置主要还是电磁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

### 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。具体说来,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,不同绝缘等级对应于不同的极限工作温度。如 B 级绝缘材料可在  $130^{\circ}\text{C}$  下长期使用,超过  $130^{\circ}\text{C}$  则很快老化,但 H 级绝缘材料允许在  $180^{\circ}\text{C}$  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,在一切工农业生产、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,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,原始结构形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。加之在1860年以前,人们还不善于从 $F=Bl_i$ 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 & 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(Yaporochnikov)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。具体说来,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,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,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19世纪90年代初期,许多电站已经装有单机容量为1 000 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)<sup>①</sup>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)<sup>②</sup>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、发热过程及其他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

① 原译为“司坦麦茨”。

② 原译为“勃朗德爾”。