

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专科系列教材

电机学

Dianjixue

辜承林 熊永前 李滨波 肖鸿杰 编著

为继续教育（函授）量身定做



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专科系列教材

电 机 学

辜承林 熊永前 李滨波 肖鸿杰 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书专为电气工程及其自动化专业函授教学需要而编写,因而特别注重基本内容的整合和难易程度的取舍,力求方便教学,更适合于自学。

全书共六章。第一章为绪论,介绍电机的基本理论、基本方法,以及一些共性问题。第二章介绍直流电机的基本原理和直流发电机、电动机的基本特性,并简单介绍了电力传动的基本知识。第三章介绍变压器,特别是电力变压器的运行原理和并联方法,并介绍了对称分量法在不对称运行分析中的应用。第四章为交流电机绕组基本理论,主要介绍三相交流绕组的电动势和磁动势。第五章重点介绍三相异步电机的运行原理和基本特性,还涉及到了单相异步电动机。第六章介绍同步电机,内容包括同步发电机运行原理、运行特性、并联方法和同步电动机运行特点等。对于各类微特电机,在相关章节中均有应用介绍。为便于教学,各章均配有适量例题和大量思考题及习题,书后还附有参考答案。

本书可作为电气工程及其自动化专业和其他涉电类专业(机电、自动化等)的教学用书和教学参考书,亦可供一般电气工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/辜承林等编著. —北京:中国电力出版社,
2006

(电气工程及其自动化专业继续教育(函授)专科
系列教材)

ISBN 7-5083-4366-2

I. 电... II. 辜... III. 电机学-函授大学-教
材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 058409 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京铁成印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

2006 年 8 月第一版 2006 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.5 印张 417 千字
印数 0001—3000 册 定价 30.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）系列教材

参 编 学 校

华中科技大学

武汉大学

华北电力大学

东北电力学院（大学）

三峡大学

上海电力学院

长沙理工大学

武汉电力职业技术学院

电气与电子工程学院

电气工程学院

电气工程学院

电气工程学院

电气工程学院

电力与自动化工程学院

电气与信息工程学院

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）系列教材

编 委 会

主 任：尹项根

副主任：陈柏超 熊 蕊

委 员：（排名不分先后）

熊信银	朱 凌	张新国	聂宏展	赵 玲	曾祥君
袁兆强	魏涤非	鲁方武	刘克兴	何发斌	林碧英
李裕能	严国志	谢自美	李天云	殷小贡	陈 坚
舒乃秋	熊 蕊	关根志	鲁铁成	张步涵	应敏华
尹项根	丁坚勇	谭 琼	张丽静	王英健	韩学军
王义军	齐 俊	辜承林	张 哲	梁文朝	程乃蕾
喻剑辉	张元芳	曾克娥			

编者按语

根据《中国教育改革与发展纲要》中“要大力发展成人高等教育”的精神，由华中科技大学电气与电子工程学院和武汉大学电气工程学院牵头，组织华北电力大学电气工程学院、东北电力学院（大学）电气工程学院、三峡大学电气工程学院、上海电力学院电力与自动化工程学院、长沙理工大学电气与信息工程学院、武汉电力职业技术学院等单位，成立了电气工程及其自动化专业继续教育（函授）教学工作协作组，于2003年11月在武汉，就国家在新形势下对人才的需求及电气工程及其自动化专业继续教育（函授）的现状、特点和人才供需状况，对电气工程及其自动化专业继续教育（函授）的教学计划、课程体系和使用教材现状进行了充分地研讨，制定了电气工程及其自动化专业继续教育（函授）专科和专升本两个层次的指导性教学计划。在此基础上研究了本专业的教材建设问题，大家一致认为函授教材要遵循自学和面授相结合、理论和实践相结合的原则，体现市场经济和科技发展对继续教育知识更新和理念更新的要求。针对目前电气工程及其自动化专业继续教育（函授）专科和专升本两个层次尚缺乏系统性教材的现状，决定组织各学院有经验的教授和专家编写这两个层次的教材。我们希望这两套系列教材能为规范本专业的教学内容和提高本专业的教学质量起到积极的推动作用。

电气工程及其自动化专业继续教育（函授）的教材建设，现在只是开头，需不断改进和完善。因此，在使用过程中敬请读者随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。

电气工程及其自动化专业继续教育（函授）教学工作协作组
电气工程及其自动化专业继续教育（函授）系列教材编委会

2005年3月

前言

电机是电能生产、传输、使用中的关键设备，电机学是大多数涉电专业必修的技术基础课，历来受到高度重视。

传统电机学的教学内容相当丰富，涉及到基础理论、分析设计、结构材料、制造工艺、运行控制等方面。教学周期和教学环节（含实习和课程设计）也有充分保障，通常安排在两个学期以内，120个学时以上。然而，近年来，随着教育改革和教学改革工作的不断深入，为适应宽口径培养模式和充实教学新内容的需要，与很多传统课程一样，电机学的教学内容也要求整合（精简），教学周期更需要压缩（在一个学期内），并且希望能根据不同教学需求（普通高校、函授、专科等）来编写教材。为此，应电气工程及其自动化专业函授教学需要，我们受命承担了本教材的编写任务。总体编写要求是，内容体系相对完整，教学难度相对适中，亦适合自学，教学时数能控制在60~80学时之间。

接受这样的任务，对我们来说是一项挑战，大家都感到有压力。因为我们都没有过编写这类教材的经历，尤其是主编本人，甚至还没有从事过此类教学实践。但不容我们推诿，恭敬亦不如从命。因此，在实践中学习，我们非常珍惜这次机会，更期望以此来锻炼和提高自己，虽深感责任重大，仍决意负重而为之。

本教材编写任务分工为：辜承林执笔第一、二章，李滨波执笔第三章，熊永前执笔第四、五章，肖鸿杰执笔第六章。最后，辜承林对全部内容和文字进行统稿和修改。研究生杜砚为电子文档的整理和文图的编排付出了辛勤劳动。

本教材的编写和出版，得到了中国电力出版社的大力支持，深表谢意。编写过程中，参阅了多种版本的国内外电机学教材，参考文献中未能一一列出，在此一并致谢。几位编者有幸合作，愉快经历已植入美好记忆。两年来，数易其稿，我们都已尽力。但限于学识，限于能力，挂一漏万，错误不足之处在所难免。恳请所有使用本教材的学生、教师、工程技术人员和读者批评指正，不胜感激。

编者

2006年3月

目 录

编者按语	
前言	
第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 电机发展简史	3
第三节 电机中的基本电磁定律	10
第四节 铁磁材料特性	13
第五节 磁路基本定律及计算方法	18
第六节 电机中的机电能量转换过程	28
第七节 电机的发热和冷却	30
思考题和习题	34
第二章 直流电机	36
第一节 概述	36
第二节 直流电机的电枢绕组	42
第三节 直流电机的磁场	50
第四节 直流发电机的基本特性	62
第五节 直流电动机的基本特性	70
第六节 直流电力传动	75
第七节 特殊直流电机	84
思考题和习题	88
第三章 变压器	94
第一节 概述	94
第二节 变压器运行原理	99
第三节 三相变压器	112
第四节 变压器的并联运行	118
第五节 特殊变压器	121
第六节 三相变压器的不对称运行	129
思考题和习题	133
第四章 交流电机绕组基本理论	136
第一节 概述	136

第二节	三相绕组	139
第三节	交流绕组电动势	142
第四节	交流绕组磁动势	147
	思考题和习题	156
第五章	异步电机	158
第一节	概述	158
第二节	三相异步电动机运行原理	162
第三节	三相异步电动机基本特性	178
第四节	三相异步电动机的起动和调速	183
第五节	单相异步电动机	193
	思考题和习题	198
第六章	同步电机	202
第一节	概述	202
第二节	同步电机的运行原理	211
第三节	同步发电机的运行特性	226
第四节	同步发电机的并联运行	237
第五节	同步电动机及同步调相机	248
第六节	同步发电机的非正常运行	253
第七节	特殊同步电机	263
	思考题和习题	267
	参考答案	275
	参考文献	285

第一章 绪论

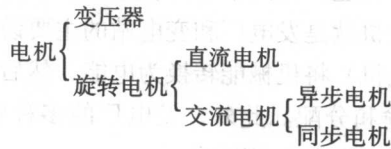
第一节 概 述

一、电机的定义

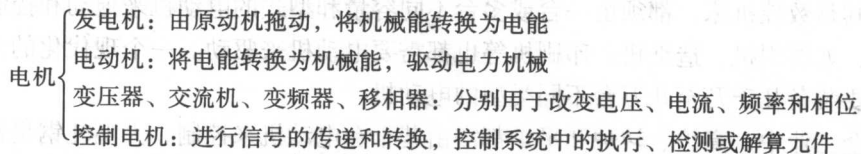
广义言之,电机可泛指所有实施电能生产、传输、使用和电能特性变换的装置。然而,由于生产、传输、使用电能和实施电能特性变换的方式很多,原理各异,如机械摩擦、电磁感应、光电效应、磁光效应、热电效应、压电效应、记忆效应、化学反应、电磁波等等,内容广泛,不可能由一门课程包括。因此,作为电气工程学科的技术基础课,电机学的主要研究范畴还只限于那些依据电磁感应定律实现机电能量转换和信号转换的装置。依此定义,严格地讲,这类装置的全称应该是电磁式电机,但习惯上已将之简称为电机。虽然含义上是狭义的,但就目前来说,能够大量生产电能、实施机电能量转换的装置主要还是电磁式电机,因此,在理解上不会有歧义。

二、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:



需要指出的是,发电机和电动机只是电机的两种不同运行形式,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能兼得罢了。

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，前提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，也是电机学研究的重点问题之一。

三、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。这些将在本章第四节中专门讲述。

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。

四、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、转炉和平炉都需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。

第二节 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。

一、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（Gramm）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，赫夫纳-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（Deprat）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。

二、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，齐波诺维斯基（Zipernowski）、德里（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 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 年代前后还发明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) 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) 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。

三、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则达到了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（1200~1500）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质量减轻和尺寸减小的实例数据窥见一斑：小型异步电动机的质量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。

促使电机质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。这其中有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，至20世纪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）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）两人先后发表了五篇经典性论文，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）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）、庞加（Punga）、弗里茨（Fritz）、马勒（Müller）、海勒尔（Heiller）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,由于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20世纪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以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。大功率晶闸管开关元件问世后,出现了便于控制、体积小、噪声小,并且完全可以取代直流发电机的大容量直流电源,从而使直流电动机良好调速性能得以更充分的发挥。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、宽调速亦成为可能,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)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得系统结构更为简化,专用控制芯片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,不仅已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,如大部分数控设备中就已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能够满足工业化、实用化需要。

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(状态维修),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以及各类故障行为的预演,在强化研究手段、丰富研究内容、降低研究成本、缩短研究周期方面发挥着重要作用。最后,借助于计算机和现代数值方法,如偏微分方程数值解法(有限元法、有限差分法、边界元法等)和最优化数学方法(人工神经网络、遗传算法、模拟退火算法等),还能从综合物理场的角度(电场、磁场、温度场、