

电机 与电力拖动基础

刘翠玲 孙晓荣 编著

配电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电机与电力拖动基础

刘翠玲 孙晓荣 编著



机械工业出版社

本书主要介绍电机与电力拖动基本理论和基础知识,作者根据多年的教学经验和体会,将电机与电力拖动基础基本内容共分12章阐述,主要介绍直流电机的原理结构与拖动基础、变压器的原理与运行、交流电机原理与拖动、控制电机与电机选择等内容。另外,并以先进的影视制作手段和多媒体技术,制成多媒体课件、交流异步电机制造工艺过程教学片,便于学生更好地了解电机的结构原理,内容编写由浅入深,每章有例题、思考题与习题,便于学生自己预习和复习,符合当前教育教学的指导思想。

本书适合电气工程及其自动化、自动化、机电一体化等非电机专业的“电机与电力拖动基础”课程教学及从事电气工程、电力系统、电机及控制、水电工程、工业自动化等领域工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电力拖动基础/刘翠玲,孙晓荣编著. —北京:
机械工业出版社,2010.1
ISBN 978-7-111-29091-9

I. 电… II. ①刘…②孙… III. ①电机学—基本知识
②电力传动—基本知识 IV. TM3 TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第212774号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:顾谦 责任编辑:赵任 版式设计:霍永明
封面设计:马精明 责任校对:程俊巧 责任印制:乔宇
北京京丰印刷厂印刷
2010年2月第1版·第1次印刷
184mm×260mm·13印张·321千字
0 001—3 000册
标准书号:ISBN 978-7-111-29091-9
ISBN 978-7-89451-302-1(光盘)(含1DVD)
定价:39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面防伪标均为盗版

前 言

《电机与电力拖动基础》是研究交直流电机原理及其起动、调速、制动等拖动理论、分析方法、基本特性及变压器运行原理、特性及工程应用等的一门专业基础课程，是电气工程与自动化类专业学生学习多数后续专业课程所必需的主要的技术基础，也是从事电气工程、电力系统、电力拖动、电机及控制、水电工程、工业自动化等领域工作重要的理论和技术基础，其内容给工科专业大学生奠定了扎实的工程实践基础，是当今工科大学不可撼动的强电基础课之一。本课程理论与实际相结合较紧密，而且其原理部分较为抽象深奥，对初学者来说不易理解，历来都是难教难学的课程之一，易形成后续专业课程的瓶颈。随着教育教学改革的推进，《电机与电力拖动基础》课程的学时数越来越少，选课越来越灵活，如何让学生在规定的学时内掌握应有的知识，又如何教好这门课程给教师提出了新的难题。

根据以上问题，我们课程组在多年积累的教学经验基础上，着眼于人才培养目标的需要，从2004年对该课程进行了全方位的改革与建设，取得了显著的效果，积累了素材丰富的多媒体课件及教学视频片，到工厂实地拍摄了电机的制造工艺录像片，解决了学生到工厂实习难、开放性实验开展难的矛盾，为学生学好这门课程提供了有效的手段。基于我们多年的授课讲义编写了《电机与电力拖动基础》教材并配带上述光盘，目前市场上还没有此类教材，该教材有广阔的推广价值。

本书配套课件已上传至机械工业出版社教材服务网 (www.cmpedu.com)，以供读者下载学习。本书的一大特色就是附有一张教学光盘，由于光盘内容录制的比较早，涉及的专业术语以正文中的表述为准。

《电机与电力拖动基础》共分绪论和12章内容阐述，覆盖直流电机的原理结构与拖动基础、变压器的原理与运行、交流电机的原理与拖动、控制电机与电机选择等教学内容，符合当前的教育教学的指导思想。编写由浅入深，每章有思考题与习题，便于学生自己预习和复习，是一本实用的教学书籍。

本书由刘翠玲、孙晓荣编著。绪论、第1、2、7、8、9章由刘翠玲执笔，第3、4、5、6、10、11、12章由孙晓荣执笔。北京交通大学范瑜教授对全书进行了审阅，肯定了该书的特色之处及教学思想，并提出了许多宝贵的建议。刘翠玲、段新安策划了本书“交流异步电动机制造工艺”教学片的拍摄和制作，孙晓荣、刘欢、刘雪连、郭滨参加了编辑制作，研究生李乃珊在课件的制作中做了大量工作，同时本书得到了本单位其他相关部门和同志从各方面给予的热情支持和帮助。另外，在编写本书时，参阅了一些国内外相关优秀著作和资料，作者在此一并表示诚挚的谢意。

限于作者水平和实践经验有限，书中错误之处在所难免，恳请读者批评、指正。

作 者

2010年1月

目 录

前言	
绪论	1
0.1 电机的定义及分类	1
0.2 电机及电力拖动系统在国民经济中的作用	1
0.3 电机及电力拖动系统发展概况	2
0.4 本课程的性质、任务与学习方法	3
0.5 本书常用的电磁知识与定律	4
0.5.1 电路的基本定律	4
0.5.2 磁场的基本知识	5
0.5.3 电磁学的基本定律	5
0.5.4 简单磁路的计算方法	6
0.5.5 铁磁材料的磁化特性	7
思考题与习题	8
第1章 直流电机	9
1.1 直流电机的基本工作原理	9
1.1.1 直流发电机的工作原理	9
1.1.2 直流电动机的工作原理	10
1.2 直流电机的主要结构与铭牌	10
1.2.1 直流电机的定子部件	11
1.2.2 直流电机的转子部件	12
1.2.3 直流电机的铭牌数据	12
1.3 直流电机的电枢绕组	13
1.3.1 电枢绕组的基本知识	14
1.3.2 单叠绕组	15
1.3.3 单波绕组	17
1.4 直流电机的励磁方式及磁场	20
1.4.1 直流电机的励磁方式	20
1.4.2 直流电机的空载磁场	20
1.4.3 直流电机负载时的磁场	22
1.4.4 直流电机的电枢反应	24
1.5 直流电机的感应电动势和电磁转矩	25
1.5.1 感应电动势	25
1.5.2 电磁转矩	26
1.6 直流电机的换向	26
1.6.1 换向过程	26
1.6.2 改善换向的方法	27
1.7 直流发电机	29
1.7.1 直流发电机的基本方程式	29
1.7.2 直流发电机的运行特性	31
1.8 直流电动机	34
1.8.1 直流电机的可逆原理	34
1.8.2 直流电动机的基本方程式	34
1.8.3 直流电动机的工作特性	36
1.9 他励直流电动机的机械特性	37
1.9.1 机械特性的表达式	37
1.9.2 固有机械特性和人为机械特性	38
1.9.3 机械特性的求取	40
思考题与习题	42
第2章 直流电动机的电力拖动	43
2.1 电力拖动系统的动力学基础	43
2.1.1 电力拖动系统的运动方程式	43
2.1.2 负载的转矩特性	45
2.1.3 电力拖动系统稳定运行的条件	46
2.2 他励直流电动机的起动	47
2.2.1 电枢回路串电阻起动	48
2.2.2 减压起动	49
2.3 他励直流电动机的制动	49
2.3.1 能耗制动	50
2.3.2 反接制动	51
2.3.3 回馈制动	53
2.4 他励直流电动机的调速	54
2.4.1 调速指标	54
2.4.2 调速方法	55
2.4.3 调速方式与负载类型的配合	59
思考题与习题	60
第3章 变压器的基本原理	62
3.1 变压器的用途、工作原理及分类	62
3.1.1 变压器的用途	62
3.1.2 变压器的工作原理	62
3.1.3 变压器的分类	63
3.2 变压器的基本结构	63
3.3 变压器的额定值与主要系列	66

思考题与习题	68	7.1.2 单层绕组	98
第4章 变压器的运行分析	69	7.1.3 双层叠绕组	102
4.1 单相变压器的空载运行	69	7.2 交流绕组的电动势	103
4.1.1 空载时的磁场	69	7.2.1 线圈的感应电动势	104
4.1.2 电压、电动势和磁通的关系	69	7.2.2 线圈组电动势	105
4.1.3 空载电流和空载损耗	70	7.2.3 相电动势	106
4.1.4 空载运行时的等效电路和 相量图	71	7.2.4 短距绕组与分布绕组对电动势 波形的影响	107
4.2 单相变压器的负载运行	72	7.3 交流绕组的磁通势	108
4.2.1 负载时的物理状况	72	7.3.1 单相绕组的磁通势——脉振 磁通势	108
4.2.2 负载运行时的基本方程式	73	7.3.2 三相绕组基波合成磁通势—— 旋转磁通势	110
4.2.3 负载运行时的等效电路和 相量图	74	思考题与习题	112
4.3 变压器参数的测定	77	第8章 异步电动机原理	113
4.3.1 空载试验	77	8.1 异步电动机的结构与工作原理	113
4.3.2 短路试验	78	8.1.1 异步电动机的结构	113
4.4 标么值	79	8.1.2 异步电动机的工作原理	115
4.5 变压器的运行特性	80	8.1.3 异步电动机的铭牌数据	117
4.5.1 变压器的外特性与电压变化率	80	8.2 三相异步电动机的空载运行	119
4.5.2 变压器的效率特性	81	8.2.1 空载运行时的电磁关系	119
思考题与习题	82	8.2.2 空载运行时的电压平衡方程	120
第5章 三相变压器	84	8.3 三相异步电动机的负载运行	121
5.1 三相变压器的磁路系统	84	8.3.1 负载运行时的物理情况	121
5.2 三相变压器的电路系统—— 联结组标号	85	8.3.2 负载运行时的电磁关系	123
5.2.1 三相变压器绕组的联结法	85	8.4 三相异步电动机的等效电路和 相量图	123
5.2.2 三相变压器的联结组标号	86	8.4.1 参数折算	124
5.2.3 标准联结组	88	8.4.2 异步电动机的等效电路与 相量图	126
5.3 变压器的并联运行	89	8.5 三相异步电动机的功率平衡和 转矩平衡	126
5.3.1 变压器并联运行的理想条件	89	8.5.1 功率平衡	126
5.3.2 不满足并联运行理想条件时的 运行分析	89	8.5.2 转矩平衡	127
思考题与习题	91	8.6 三相异步电动机的工作特性	128
第6章 其他种类变压器	92	8.7 三相异步电动机的参数测定	129
6.1 自耦变压器	92	8.7.1 空载试验	129
6.2 仪用互感器	93	8.7.2 堵转试验	131
思考题与习题	95	思考题与习题	131
第7章 交流电机的电枢绕组、磁通势及 感应电动势	96	第9章 三相异步电动机的电力 拖动	133
7.1 交流电机的电枢绕组	96	9.1 三相异步电动机的电磁转矩	
7.1.1 三相交流绕组的基本结构与 分类	96		

表达式	133	10.4.3 同步电动机的工作特性和 “V”形曲线	172
9.1.1 物理表达式	133	10.4.4 同步电动机的起动方法	174
9.1.2 电磁转矩的参数表达式	133	思考题与习题	175
9.1.3 电磁转矩的实用表达式	135	第11章 控制电机	176
9.2 三相异步电动机的机械特性	136	11.1 伺服电动机	176
9.2.1 固有机械特性	136	11.1.1 直流伺服电动机	177
9.2.2 人为机械特性	137	11.1.2 交流伺服电动机	178
9.3 三相异步电动机的起动	138	11.2 测速发电机	182
9.3.1 三相笼型异步电动机的起动	138	11.2.1 直流测速发电机	182
9.3.2 深槽式及双笼型异步电动机	140	11.2.2 交流测速发电机	182
9.3.3 绕线转子异步电动机的起动	141	11.3 步进电动机	184
9.3.4 三相异步电动机的软起动	144	11.3.1 步进电动机概述	184
9.4 三相异步电动机的制动	145	11.3.2 反应式步进电动机	185
9.4.1 能耗制动	145	11.4 自整角机	187
9.4.2 反接制动	146	11.4.1 力矩式自整角机的工作原理	188
9.4.3 回馈制动	148	11.4.2 控制式自整角机的工作原理	189
9.5 三相异步电动机的调速	149	11.4.3 自整角机的误差与选用时应注意的 事项	190
9.5.1 变压调速	149	11.5 旋转变压器	190
9.5.2 绕线转子异步电动机转子回路串 电阻调速	150	思考题与习题	192
9.5.3 三相笼型异步电动机变极调速	151	第12章 电动机的选择	193
9.5.4 变频调速	154	12.1 电动机的一般选择	193
9.5.5 绕线转子异步电动机的 串级调速	156	12.1.1 电动机种类的选择	193
思考题与习题	157	12.1.2 电动机形式的选择	193
第10章 同步电机	159	12.1.3 电动机额定电压的选择	194
10.1 同步电机的用途和分类	159	12.1.4 电动机额定转速的选择	194
10.2 同步电机的基本结构及工作原理	159	12.2 电动机的发热与冷却	194
10.2.1 同步电机的结构	159	12.2.1 电动机的发热过程	194
10.2.2 同步电机的工作原理	161	12.2.2 电动机的冷却过程	196
10.2.3 三相同步电机的铭牌数据	161	12.2.3 电动机的允许温升	196
10.3 同步发电机	162	12.3 电动机额定功率的选择	197
10.3.1 同步发电机的励磁方式	162	12.3.1 连续工作制电动机额定功率的 选择	197
10.3.2 同步发电机的运行特性	164	12.3.2 短时工作制电动机额定功率的 选择	199
10.3.3 同步发电机的并联运行	166	12.3.3 断续周期工作制电动机额定功率的 选择	199
10.4 同步电动机	168	思考题与习题	200
10.4.1 同步电动机的基本方程式和 相量图	168	参考文献	202
10.4.2 同步电动机的功角特性和 机械特性	170		

绪 论

0.1 电机的定义及分类

电机是指依靠电磁感应作用而运行的电气设备，用于机械能和电能之间的转换、不同形式电能之间的变换或者信号的传递与转换。

电机的种类繁多，按其功能分类，可分成常规电机和控制电机，具体分类如图 0-1 所示。

常规电机的主要任务是完成能量的转换。

其主要功能有：

发电机——将机械能转换成电能输出。

电动机——将电能转换成机械能输出，主要用于电力拖动系统中，带动生产机械运转。

变压器——将一种电压等级的交流电能转换成同频率的另一种电压等级的交流电能。

控制电机的主要任务是完成控制信号的传递和转换，通常用于自动控制系统中，作检

测、校正及执行元件使用。它主要包括交、直流伺服电动机，步进电动机，交、直流测速发电机等，控制电机的主要功能有：

伺服电动机——将控制电压信号转换成转轴上的角位移或角速度输出，用作执行元件。

步进电动机——将电脉冲信号转换成转轴上的角位移或线位移输出，用作执行元件或驱动元件。

测速发电机——将转速信号转换成电压信号输出，主要用作速度检测元件。

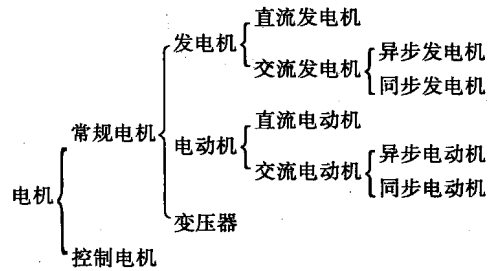


图 0-1 电机的分类

0.2 电机及电力拖动系统在国民经济中的作用

在国民经济生产中，电机工业是机械工业的一个重要组成部分，电机是机电一体化中机和电的结合部位，是机电一体化的重要基础，电机可称为电气化的心脏。它对国民经济的发展起着举足轻重的作用，并随着国民经济和科学技术的发展而不断发展。电机的发展又与电能的发展紧密联系在一起。电能是现代社会一种最主要的能源，这主要是由于它的生产和变换比较经济，传输和分配比较容易，使用和控制比较方便，而要实现电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制都离不开电机。

在电能的生产输配中（即电力工业），发电机和变压器是发电厂（站）和变电站（所）的主要设备。在发电厂，利用发电机可将原始能源，如水力、风力、热力、化学能、太阳能、核能等转换为电能。在变电站，电能远距离传输前，利用升压变压器把发电机发出的

低压交流电变换成高压交流电，而电能是在供给用户使用前，利用降压变压器把来自高压电网的高电压变换成低电压后才能安全使用。

在电能的使用中，电动机起着重要的作用。如在机械、冶金、化工等工业企业中，大量应用电动机把电能转换为机械能，去拖动机床、起重机、轧钢机、电铲、抽水机、鼓风机等各种生产机械。在现代化农业生产中，电力灌溉、播种、收割等农用机械都需要不同规格的电动机去拖动。在交通运输业中，电车、地铁机车、电动自行车、飞机、轮船等也需要各种电动机。在医疗器械及家用电器中也离不开功能各异的小功率电动机；在工业、航天和国防科学等领域的自动控制技术中，各式各样小巧灵敏的控制电机被广泛地作为检测、转换和执行元件。

在现代工业、农业、交通运输等各行业，为了实现生产工艺过程的各种要求，需要广泛采用各种各样的生产机械，除一部分生产机械采用气动或液压拖动外，大多数生产机械都采用电动机拖动。由电动机作为原动机来拖动生产机械运行的系统称为电力拖动系统。电力拖动系统容易控制，能够获得控制系统所需的各种静态特性和动态特性，具有良好的起、制动性能和较宽的调速范围，特别是便于实现自动控制，所以当今多数自动控制系统都采用电动机作为原动机。

一个自动控制系统中往往会用到多个不同的电机（包括各种控制电机），一个现代化工厂拥有几百台至几万台电机是很平常的事。随着新型电机、大功率半导体器件、大规模集成电路的发展和计算机技术的应用，电力拖动系统的品种、质量和性能都有了进一步的提高，以全数字式的三相永磁同步电机伺服系统、三相异步电机伺服系统和直流电机伺服系统为代表的新型电力拖动系统的出现，带动了数控机床、工业机器人、交通运输、航空航天及家用电器等一系列高科技产品的迅速发展。随着科学技术的发展，工业、农业和国防等各部门都要求有性能更好的新型电机及电力拖动系统，以满足各种不同的要求。因此，电机与电力拖动系统将在国民经济发展中发挥越来越重要的作用。

0.3 电机及电力拖动系统发展概况

一、电机的发展概况

电机的出现已有一百多年的历史。1820年前后，法拉第发现了电磁感应现象，并提出了电磁感应定律，而后组装了第一台直流电机样机。1829年，亨利制造了第一台实用的直流电机，直至1837年，直流电机才真正变为商业化产品。1887年，特斯拉发明了三相异步电动机。此后，其他各种类型的电机相继问世。各类电机无论在结构材料、特性上，还是在运行原理上，都存在较大差异。应该讲，各类电机的采用，标志着以煤和石油为主要能源体系的电气化时代的开始，从而为现代工业奠定了基础。作为机电能量转换装置，电机既可以作为电动机用于电力拖动，也可以作为发电机用于电能的生产。

在当今工业和日常生活中，人们随处都可以找到电机的踪影。从以煤和石油为原料的火力发电厂中的汽轮发电机、以水资源为动力的水轮发电机、以风能为动力的风力发电机，到高压输电、配电的变压器，从工厂的自动生产线、车间的机床、机器人到家庭中的家用电器甚至电动玩具等，电机几乎无处不在。

目前，电机制造业的发展主要有以下几大趋势：

- 1) 大型化: 单机容量越来越大, 如 60 万 kW 及以上的汽轮发电机。
- 2) 微型化: 为适应设备小型化的要求, 电机的体积越来越小, 重量越来越轻。
- 3) 新原理、新工艺、新材料的电机不断涌现, 如无刷直流电机、开关磁阻电动机、直线电动机、超声波电动机等。

二、电力拖动系统的发展概况

从结构上看, 电力拖动系统经历了最初的“成组拖动”、“单电动机拖动”到“多电动机拖动”三个阶段。

“成组拖动”是由一台电动机拖动一组生产机械, 从电动机到各生产机械的能量传递以及在各生产机械之间的能量分配完全用机械方法, 靠天轴及机械传动系统来实现的。这种方式无法实现自动控制, 且其能量损耗大, 生产安全得不到保证, 容易发生人身、设备事故。如果电动机有故障, 则被拖动的所有生产设备都将一起停车, 这是一种陈旧落后的电力拖动方式。

“单电动机拖动”是系统中的一台生产机械用一台单独的电动机拖动。随着工作机械运行要求的提高, 成组电力拖动系统已经跟不上需要, 因此出现了单电动机拖动。这样使每台生产设备既可独立工作, 实现电气调速, 又省去了大量的中间传动机构, 使机械结构简化, 并且易于实现生产机械运转的全部自动化。

“多电动机拖动”即每一个工作机构用单独的电动机拖动。如果用一台电动机拖动具有多个工作机构的生产机械, 则机械内部仍将保留着复杂的机械传动机构。因此, 自 20 世纪 30 年代起, 广泛采用了多电动机拖动, 目前先进、复杂的生产设备通常都采用该方式。这种拖动方式可以使机械结构大为简化, 而且可使生产设备实现自动控制直至计算机控制。

随着电机及电器制造业以及各种自动化元件的发展, 自动化电力拖动系统得到不断的更新与发展。

最初采用的控制系统是继电器—接触器组成的断续控制系统, 到后来普遍采用由电力电子变流器供电的连续控制系统。连续控制系统包括由相控变流器或斩波器供电的直流电力拖动系统, 以及由变频器或伺服驱动器供电的交流电力拖动系统两大类。后者包括由绕线转子异步电动机组成的双馈调速系统、由异步与同步电动机组成的变频调速与伺服系统等。

目前, 随着电力电子技术、计算机技术以及控制理论的发展, 电力拖动系统的性能指标也上了一大台阶, 不仅可以满足生产机械快速起、制动以及正、反转的要求(即所谓的四象限运行状态), 而且还可以确保整个电力拖动系统工作在具有较高的调速、定位精度和较宽的调速范围内。这些性能指标的提高, 使得生产设备的生产率和产品质量大大提高。此外, 随着多轴电力拖动系统的发展, 过去许多难以解决的问题也变得迎刃而解, 如复杂曲轴、曲面的加工, 机器人、航天器等复杂空间轨迹的控制与实现等。

目前, 电力拖动系统正朝着网络化、信息化方向发展。包括现场总线、智能控制策略以及因特网技术在内的各种新技术、新方法均在电力拖动领域中得到了应用。电力拖动系统的发展真可谓是日新月异。由于电力拖动是各类工业、各种生产机械的主要拖动方式, 其理论与技术的发展, 必将在我国实现现代化与工业化的进程中起到十分重要的作用。

0.4 本课程的性质、任务与学习方法

“电机与电力拖动基础”是将“电机学”和“电力拖动基础”两门课有机结合起来的

一门课程。它是自动化、电气工程及其自动化等专业的一门主要专业基础课。其内容主要包括直流电机与拖动、变压器、交流电机与拖动、控制电机与电机选择等。

本课程的任务主要是使学生掌握电机的基本知识、基本理论、基本计算方法和一般的应用问题，从而为后续专业课（如“运动控制系统”、“电力电子技术”等）的学习打好基础，并为学生在未来的技术工作中能分析和解决在电机方面所遇到的问题打好扎实的基础。

在“电机与电力拖动基础”课程中，不仅有理论的分析推导和磁场的抽象描述，而且还要用基本理论去分析研究比较复杂的带有机、电、磁综合性的工程实际问题，这是本课程的特点，也是学习的难点。因此，必须有一个良好的学习方法，才能学好本课程。这里提供几点学习方法供大家参考。

1) 学习之前，必须理解和掌握电和磁的基本概念，熟练运用电磁感应定律、电磁力定律、电路和磁路定律、力学、机械制图等已学过的知识。

2) 学习过程中，对于电机结构，要弄清各主要部件的组成和作用；对于有关公式，要从物理概念上去理解和记忆，不要孤立地、单独地去死记硬背；本课程涉及电机的不同类型时，要注意各种电机结构的异同点、电磁关系和能量转换关系的异同点、拖动问题的异同点等，运用总结对比的方法融会贯通，加深理解；分析实际问题时，要运用工程的观点和方法，突出主要矛盾，忽略次要矛盾，从而简化实际问题的分析和计算。

3) 为了提高课堂教学效果，课前应预习，一是对相关的已学知识进行回顾；二是对将要学到的内容预习一遍，对新的名词和术语及相关内容有所了解，便于有的放矢地听课；课后应及时复习和小结，并选做适当的思考题与练习题，以巩固所学的理论知识，提高理解和应用能力。

4) 必须进行必要的实验和实习，这样既可以加深对相关知识的理解和掌握，又可以培养和提高学生的实验操作技能和工作能力。

0.5 本书常用的电磁知识与定律

电机是通过电磁感应原理来实现能量转换的机械装置，电和磁是构成电机的两大要素，缺一不可。因此，本节简要介绍有关电磁学的基本知识与电磁学定律。

0.5.1 电路的基本定律

1. 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律（KCL）指出：电路中流入某一节点电流的代数和等于零，即

$$\sum I_k = 0 \quad (0-1)$$

上式表明，在电路中，电流是连续的，流入某一节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。 I_k 为某一支路电流。

2. 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律（KVL）指出：电路中任一闭合回路电压的代数和为零，即

$$\sum V_k = 0 \quad (0-2)$$

上式表明，在电路中，任一闭合回路的电动势之和全部由无源元件所消耗的压降所平衡。 V_k 为某一回路中的压降。

0.5.2 磁场的基本知识

1. 磁感应强度 B

通电导体周围会产生磁场，磁场是一矢量。通常用磁感应强度 B 来描述磁场的强弱，磁感应强度 B 的单位为 T(特[斯拉])。通电导体中的电流与所产生的磁场之间符合右手定则，如图 0-2 所示。

2. 磁通 Φ

磁场的强弱可用磁力线的疏密来形象地描述。穿过某一截面积 S 的磁力线总数称为磁通量，简称磁通，一般用 Φ 来表示，即

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \quad (0-3)$$

对于均匀磁场，若 B 与 S 相互垂直，则上式变为

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{S} \quad (0-4)$$

由此可见，磁感应强度 B 反映的是单位面积上的磁通量，故又称为磁通密度，简称磁密。磁通量 Φ 的单位为 Wb(韦[伯])， $1\text{T} = 1\text{Wb}/\text{m}^2$ 。

3. 磁场强度 H

磁场强度 H 是表征磁场性质的另一基本物理量，同样是一矢量。磁场强度 H 的单位名称为安[培]/米，单位符号为 A/m。磁感应强度 B 与磁场强度 H 的比值反映了磁性材料的导磁能力。于是 B 与 H 之间可用下式表示：

$$B = \mu H \quad (0-5)$$

式中， μ 为导磁材料的磁导率，真空的磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H}/\text{m}$ ，铁磁材料的磁导率 $\mu \gg \mu_0$ ，即

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (0-6)$$

式中， μ_r 为导磁介质的相对磁导率。

0.5.3 电磁学的基本定律

1. 电生磁的基本定律——安培环路定理

凡有电流流动的导体的周围均会产生磁场，即“电生磁”。由载流导体产生的磁场大小可用磁场强度 H 来表示，磁力线的方向与电流的方向满足右手定则。假定在一根导体中通以电流 I ，则在导体周围空间的某一平面上产生的磁场强度为 H 。沿任何一个闭合磁回路的磁场强度线积分等于该回路所环链的所有电流的代数和，即

$$\oint_L H \cdot dl = \sum I \quad (0-7)$$

假定闭合磁力线是由 N 匝线圈电流产生的，且沿闭合磁力线 l 上的磁场强度 H 处处相等，则上式变为

$$Hl = NI \quad (0-8)$$

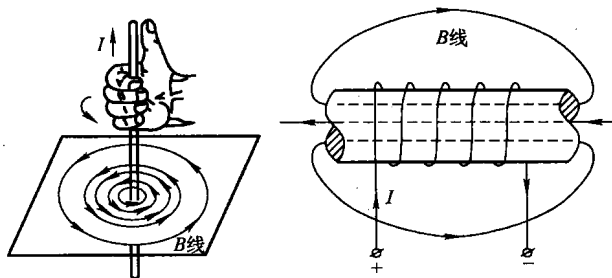


图 0-2 磁力线与电流之间的右手定则

其中 NI 为作用在整个磁路上的磁通势，即全电流数，单位为安匝。

2. 磁生电的基本定律——法拉第电磁感应定律

交变的磁场会产生电场，并在导体中感应电动势。所感应电动势与磁场之间符合法拉第电磁感应定律，即

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \tag{0-9}$$

式中， N 为绕组的匝数。

上述讨论说明磁场的变化会在导体中产生感应电动势。如果磁场静止不变，而让导体在磁场中运动，相对于导体来说，磁场仍是变化的，那么根据法拉第电磁感应定律，同样会在导体中产生感应电动势，其大小为

$$e = Blv \tag{0-10}$$

式中， B 是磁场的磁感应强度； v 是导体切割磁场的速度； l 是导体的有效长度。

感应电动势的方向由右手定则确定，图 0-3 表示了 e 、 B 与 v 三者之间的方向关系。

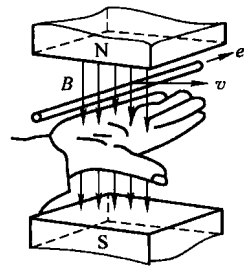


图 0-3 感应电动势与磁场、导体运动速度之间的右手定则

3. 电磁力定律

磁场对磁场中载流导体施加的力称为安培力。在通以电流 I 的导体上取一小段导体 dl ，其电流元 $I dl$ 受安培力的大小及方向，由安培定律来描述，即

$$df = Idl \times B \tag{0-11}$$

式中， B 为电流元所在处的磁感应强度； df 为磁场对电流元的作用力。

在均匀磁场中，若载流直导体与 B 方向垂直，长度为 l ，流过的电流为 I ，则载流导体所受的力为

$$f = BI l \tag{0-12}$$

在电机学中，习惯上用左手定则确定 f 的方向，即把左手伸开，大拇指与其他四指成 90° ，如果磁力线指向手心，其他四指指向导体中电流的方向，则大拇指的指向就是导体受力的方向，如图 0-4 所示。

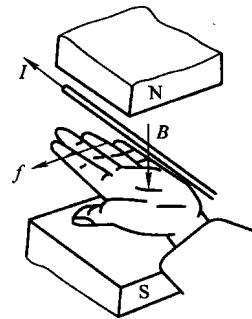


图 0-4 确定载流导体受力方向的左手定则

0.5.4 简单磁路的计算方法

如同电路是电流所经过的路径一样，磁通所经过的路径称为磁路。

图 0-5 是一个最简单的磁路，它是由铁磁材料和气隙两部分串联而成。铁心上绕了匝数为 N 的线圈，称为励磁线圈，线圈电流为 I 。进行磁路计算时，把这个磁路按材料及形状分成两段：一段是截面积为 S 的铁心，长度为 l ，铁心的磁场强度为 H ；另一段是

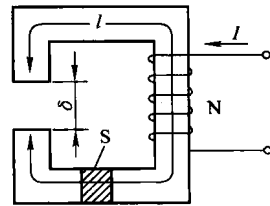


图 0-5 简单的磁路

气隙，长度为 δ ，气隙的磁场强度为 H_0 。根据安培环路定律，有

$$Hl + H_0\delta = IN \quad (0-13)$$

在电机或变压器里作磁路计算时，一般已知的是磁路里各段的磁通 Φ 以及各段磁路的几何尺寸（即磁路长度与截面积），要求出所需的总磁通势 IN 。从上式看出，磁路长度 l 、 δ 以及匝数 N 是已知的，要求出电流 I ，必须先找出各段磁路的 H 和 H_0 。具体计算时，根据给定各段磁路里的磁通 Φ ，先算出各段磁路中对应的磁感应强度 B ($B = \Phi/S$, S 为截面积)，然后根据算出的磁感应强度 B ，求磁场强度 H ($H = B/\mu$)。

如果是铁磁材料，可以根据其磁化特性查出磁场强度 H 。

0.5.5 铁磁材料的磁化特性

物质按其磁化效应大致可分为铁磁性物质和非铁磁性物质两类。

铁磁材料由铁磁性物质构成，主要包括铁、镍、钴及其合金。铁磁材料放入磁场后，磁场会大大增强，因此其磁导率 μ_{Fe} 为 μ_0 的数十倍乃至数万倍。铁磁性物质的磁导率 μ_{Fe} 与它所在磁场的强弱以及物质磁状态的历史有关，因此不是常数。

在工程计算时，不按 $H = B/\mu$ 进行计算，而是事先把各种铁磁材料用试验的方法，测出它们在不同磁场强度 H 下对应的 B ，并画成 $B-H$ 曲线（称为磁化曲线）。对尚未磁化的一定尺寸的铁磁材料，从磁场强度 $H=0$ 、磁感应强度 $B=0$ 开始磁化。当 H 从零逐渐增大时， B 将随之增大，得到的曲线 $B=f(H)$ 称为起始磁化曲线，如图 0-6 所示。可见，起始磁化曲线大致可分为 4 段。

第 1 段： H 从零开始增加且 H 很小时， B 增加得不快，磁导率 μ_{Fe} 较小，如图 0-6 中 Oa 段所示。

第 2 段： B 随 H 的增大而迅速增加，两者近似为线性关系， μ_{Fe} 很大且基本不变，如 ab 段所示。

第 3 段：随着 H 继续增大， B 增加得越来越慢，即 μ_{Fe} 随 H 的增加反而减小，如 bc 段所示。这种磁感应强度 B 不随磁场强度 H 的增加而显著增大的状态称为磁饱和，通常简称为饱和。

第 4 段：在饱和以后，磁化曲线趋向于与非铁磁材料的 $B = \mu_0 H$ 曲线平行，如 cd 段所示。

显然，铁磁材料的起始磁化曲线是非线性的，在不同的磁感应强度下有不同的磁导率值。

电机中使用的铁磁材料常受到交变磁化。铁磁材料在这种周期性的磁化过程中， B 和 H 不再是起始磁化曲线的关系，而是图 0-7 所示的磁滞回线关系。从图 0-7 中的曲线 1、3 可看出，铁磁材料的 $B-H$ 曲线

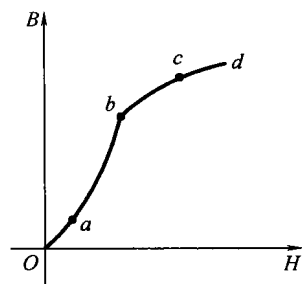


图 0-6 铁磁材料的起始磁化曲线

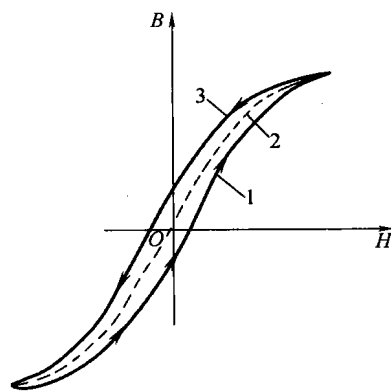


图 0-7 磁滞回线

不是单值的，而是具有磁滞回线的特点，即在同一个磁场强度 H 下，对应着两个磁感应强度 B 值。这就是说，一个 H 究竟是对应着哪一个 B 值，还要看铁磁材料工作状态的历史情况。当铁磁材料的磁滞回线较窄时，可以用两条曲线的平均值，即基本磁化曲线来进行计算，如图 0-7 中的曲线 2 所示。这样， B 与 H 之间便呈现了单值关系。

按照磁滞回线形状的不同，铁磁材料可大致分为软磁材料和硬磁材料两类。

软磁材料的磁滞回线窄，如硅钢片、铁镍合金、铸钢等。这些材料磁导率较高，回线包围面积小，磁滞损耗小，多用于制作电机、变压器的铁心。

硬磁材料的磁滞回线较宽，如钨钢、钴钢等。这些材料在被磁化后，剩磁较大，且不易消失，适合于制作永久磁铁。

思考题与习题

1. 电机中涉及到哪些基本电磁定律？试说明它们在电机中的主要作用。
2. 永久磁铁与软磁材料的磁滞回线有何不同？
3. 什么是磁路饱和现象？

第1章 直流电机

直流电机有直流发电机和直流电动机两种类型。将机械能转化为电能的直流电机是直流发电机；将电能转化为机械能的直流电机是直流电动机。

直流电动机与交流电动机相比，直流电动机结构复杂，成本高，维修不便，而且有换向问题。但直流电动机具有良好的起动和制动性能，且能在较大的范围内平滑地调节速度，所以它仍被广泛应用于起动和制动要求较高的生产机械中，如起重机、矿井提升设备、电力机车、龙门刨床、轧钢机、纺织机械等。直流伺服电动机和直流测速发电机多用于自动控制系统中，作为系统的执行元件和信号检测元件。直流发电机在电力拖动系统中经常作为各种直流电源使用。

1.1 直流电机的基本工作原理

1.1.1 直流发电机的工作原理

直流发电机的基本工作原理如图 1-1 所示。图中 N、S 是静止的主磁极，用于产生磁通。在两磁极之间能够转动的电枢铁心上装有电枢绕组线圈 abcd。线圈的两个端头接在相互绝缘的两个铜质的换向片 1、2 上，它们固定于转轴上且与转轴绝缘。在空间静止的电刷 A 和 B 与换向片滑动接触，使旋转的线圈与外面静止的电路相连。

当原动机拖动发电机电枢以恒定转速转动时，线圈的两个边 ab 和 cd 切割磁力线，根据电磁感应定律可知，在其中产生感应电动势，其方向可由右手定则判定。电枢逆时针方向旋转，此时导线 ab 中的感应电动势的方向由 b 指向 a；而导线 cd 中的感应电动势的方向由 d 指向 c。因电动势是从低电位指向高电位，此时电刷 A 为正电位，电刷 B 为负电位。外电路中的电流由电刷 A 经负载流向电刷 B。

当电枢旋转 180°，线圈 ab 边转至 S 极中心上，线圈 cd 边转到 N 极中心下，它们的感应电动势方向发生改变。ab 的感应电动势方向变为由 a 指向 b，cd 中的感应电动势方向变为由 c 指向 d。a 所接的换向片 1 转至与电刷 B 相接触，d 所接的换向片 2 转至与电刷 A 相接触。这时，电刷 A 仍具有正电位，电刷 B 仍具有负电位。外电路中的电流，仍是由电刷 A 经负载流向电刷 B。

可见，电枢旋转时，在线圈内部产生交变的电动势，由于换向器与电刷的配合作用，使

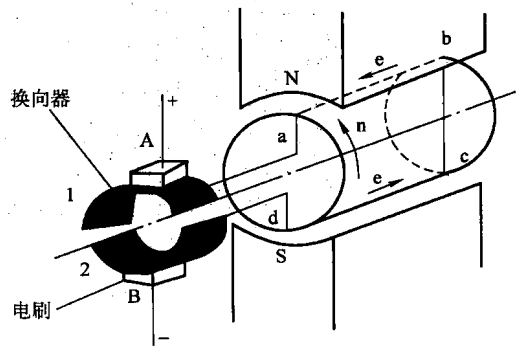


图 1-1 直流发电机的基本工作原理

电刷 A 总是与位于 N 极下的线圈边接触，电刷 B 总是与位于 S 极上的线圈边接触，因此电刷 A 的极性总为正，电刷 B 的极性总为负，在电刷两端可获得直流电动势。这就是直流发电机的基本工作原理。

1.1.2 直流电动机的工作原理

直流电动机是把电能转换成机械能的装置。其基本工作原理如图 1-2 所示。直流电动机工作时，电枢绕组接于直流电源上，如电刷 A 接电源正极，电刷 B 接电源负极。电流从电刷 A 流入，经线圈 abcd，再由电刷 B 流出。如图 1-2 所示瞬间，在 N 极下的线圈边 ab 中的电流方向是由 a 到 b；在 S 极上的线圈边 cd 中的电流方向是由 c 到 d。根据电磁力定律可知，载流导体在磁场中要受力，其方向可由左手定则判定：ab 边受力的方向向左，cd 边受力的方向向右。两个电磁力对转轴所形成的电磁转矩为逆时针方向，电磁转矩使电枢逆时针方向旋转。

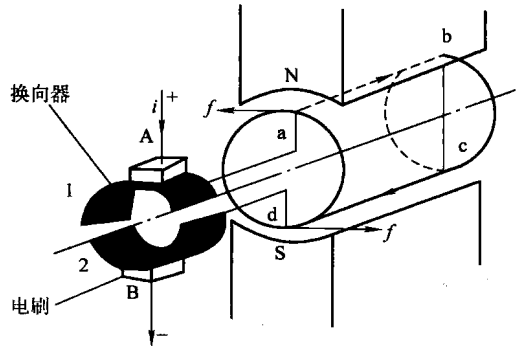


图 1-2 直流电动机的基本工作原理

当线圈转过 180° ，换向片 2 转至与电刷 A 接触，换向片 1 转至与电刷 B 接触。电流由正极经换向片 2 流入，cd 边的电流方向由 d 流向 c，ab 边的电流方向由 b 流向 a，再由换向片 1 经电刷 B 流回负极。再由左手定则可知，线圈仍受到逆时针方向的电磁转矩的作用，这个电磁转矩将使电枢保持逆时针方向转动。

通过电刷和换向器，使每一磁极下的导体中的电流方向始终不变，因而产生单方向的电磁转矩，电枢始终向一个方向旋转，这就是直流电动机的基本工作原理。

通过电刷和换向器，使每一磁极下的导体中的电流方向始终不变，因而产生单方向的电磁转矩，电枢始终向一个方向旋转，这就是直流电动机的基本工作原理。

从以上分析可见：一台直流电机原则上既可以作为电动机运行，也可以作为发电机运行，这取决于外界条件的不同。如果在电刷端外加直流电压，则电机把电能转变成机械能，作为电动机运行；如用原动机拖动直流电机的电枢旋转，则电机将机械能转换为直流电能，作为发电机运行。这种同一台电机既能作电动机运行，又能作发电机运行的原理，在电机理论中称为可逆原理。

1.2 直流电机的主要结构与铭牌

在电机中，要实现机电能量的转换，电路和磁路之间必须有相对运动。所以旋转电机必须具备静止的和旋转的两大部分，而且这两部分之间有一定大小的间隙（又称气隙），电机的主要结构如图 1-3 所示。

静止的部分称为定子。直流电机定子的作用是产生磁场并作为电机的机械支撑。它包括主磁极、换向极、机座、端盖和电刷装置等。

旋转部分称为转子。直流电机转子又称为电枢，其作用是感应电动势并产生电磁转矩，以实现能量转换。它包括电枢铁心、电枢绕组、换向器、轴和风扇等。