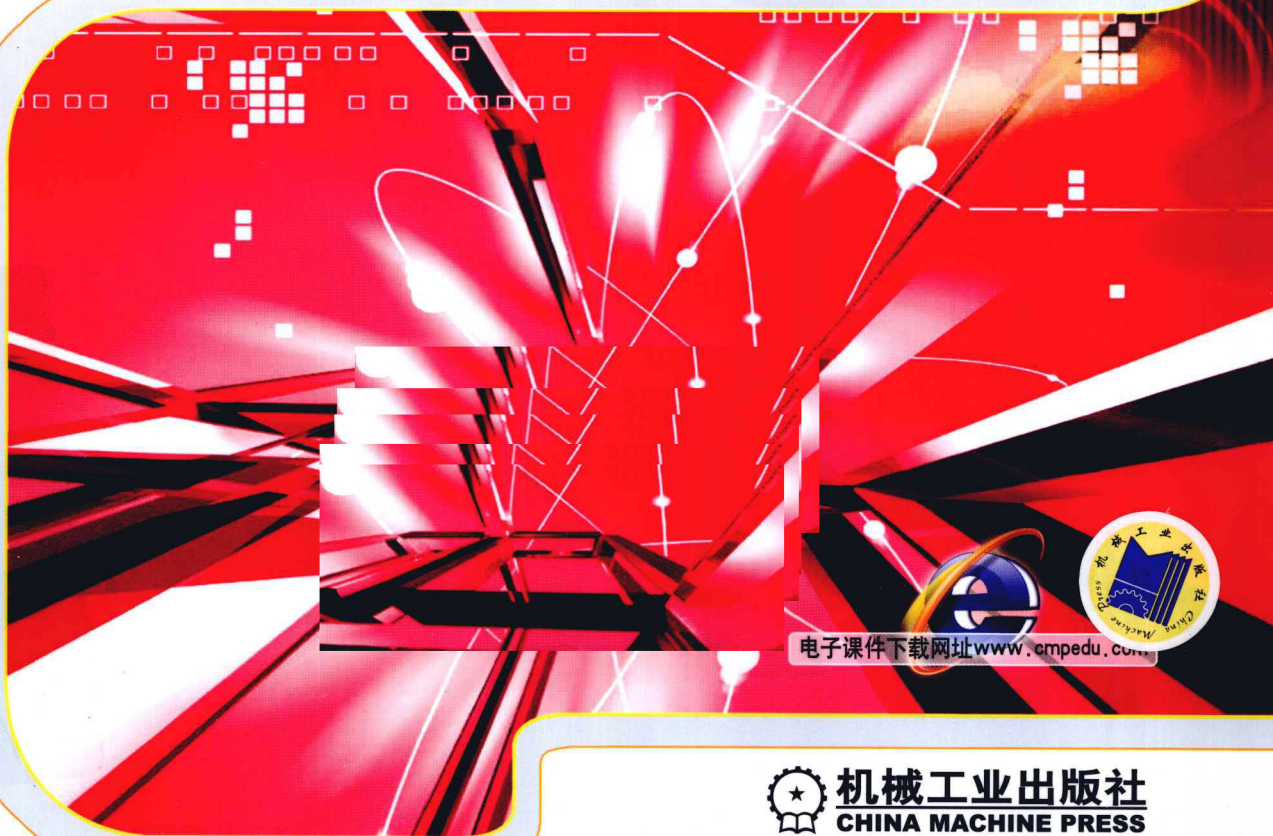




全国高等职业教育规划教材

电机与拖动

主编 任艳君 张浩波



电子课件下载网址 www.cmpedu.com



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

全国高等职业教育规划教材

电机与拖动

主 编 任艳君 张浩波
副主编 陈爱群 谢定明
参 编 王华平 贾霄龙 文 武 刘 韵 李彩霞
主 审 任德齐

机械工业出版社

本书介绍了直流电机、变压器、交流电机和控制电机的工作原理、结构特点、电磁关系和能量关系,着重分析直流电机和交流电机的机械特性以及起动、调速和制动的原理、方法及相关计算,简要介绍电动机容量选择的基本知识和方法,最后还附有三相异步电动机控制电路的应用实例。本书每章有例题,章末附有小结和习题。

本书可作为高职高专机电一体化、电气自动化、建筑电气工程技术、供用电技术等非电机专业的教材;也可作为企业对相关从业人员的培训教材;还可作为中职、技工院校师生以及相关专业的工程技术人员学习参考和自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动/任艳君,张浩波主编. —北京:机械工业出版社,2010.11
全国高等职业教育规划教材
ISBN 978-7-111-32115-6

I. ①电… II. ①任…②张… III. ①电机—高等学校:技术学校—教材②电力传动—高等学校:技术学校—教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第193488号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:王颖 版式设计:张世琴

责任校对:李秋荣 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2011年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14.5印张·353千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-32115-6

定价:26.00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 封面无防伪标均为盗版

全国高等职业教育规划教材

电子类专业编委会成员名单

主 任 曹建林

副 主 任 张中洲 张福强 董维佳 俞 宁
杨元挺 任德齐 华永平 吴元凯
蒋蒙安 祖 炬 梁永生

委 员 （按姓氏笔画排序）

尹立贤	王用伦	王树忠	王新新	邓 红
任艳君	刘 松	刘 勇	华天京	吉雪峰
孙学耕	孙津平	朱咏梅	朱晓红	齐 虹
张静之	李菊芳	杨打生	杨国华	汪赵强
陈子聪	陈必群	陈晓文	季顺宁	罗厚军
姚建永	钮文良	聂开俊	袁 勇	袁启昌
郭 勇	郭 兵	郭雄艺	高 健	崔金辉
曹 毅	章大钧	黄永定	曾晓宏	蔡建军
谭克清				

秘 书 长 胡毓坚

副秘书长 戴红霞

出版说明

根据《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位,促进学生技能的培养,以及教材内容要紧密结合生产实际,并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神,机械工业出版社组织全国近60所高等职业院校的骨干教师对在2001年出版的“面向21世纪高职高专系列教材”进行了全面的修订和增补,并更名为“全国高等职业教育规划教材”。

本系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会分别会同各高职高专院校的一线骨干教师,针对相关专业的课程设置,融合教学中的实践经验,同时吸收高等职业教育改革的成果而编写完成的,具有“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。在几年的教学实践中,本系列教材获得了较高的评价,并有多品种被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。在修订和增补过程中,除了保持原有特色外,针对课程的不同性质采取了不同的优化措施。其中,核心基础课的教材在保持扎实的理论基础的同时,增加实训和习题;实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合;涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。同时,根据实际教学的需要对部分课程进行了整合。

归纳起来,本系列教材具有以下特点:

- 1) 围绕培养学生的职业技能这条主线来设计教材的结构、内容和形式。
- 2) 合理安排基础知识和实践知识的比例。基础知识以“必需、够用”为度,强调专业技术应用能力的训练,适当增加实训环节。
- 3) 符合高职学生的学习特点和认知规律。对基本理论和方法的论述要容易理解、清晰简洁,多用图表来表达信息;增加相关技术在生产中的应用实例,引导学生主动学习。
- 4) 教材内容紧随技术和经济的发展而更新,及时将新知识、新技术、新工艺和新案例等引入教材。同时注重吸收最新的教学理念,并积极支持新专业的教材建设。
- 5) 注重立体化教材建设。通过主教材、电子教案、配套素材光盘、实训指导和习题及解答等教学资源的有机结合,提高教学服务水平,为高素质技能型人才的培养创造良好的条件。

由于我国高等职业教育改革和发展的速度很快,加之我们的水平和经验有限,因此在教材的编写和出版过程中难免出现问题和错误。我们恳请使用这套教材的师生及时向我们反馈质量信息,以利于我们今后不断提高教材的出版质量,为广大师生提供更多、更适用的教材。

机械工业出版社

前 言

以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。由于电动机拖动具有控制简单、方便、快速、稳定、效率高等优点，在现代工业、交通运输、农业等各行行业中，它已成为主要的拖动方式。随着现代科学技术的发展，各种新技术、新方法在电力拖动领域中的应用，使得电力拖动技术得到了迅猛发展。

为了使学生在有限的学时内了解电机、变压器与电力拖动的概念、原理和方法，具备选择、使用和维护电机并利用其实现拖动的技能，根据教育部《高等职业院校培养目标和人才规格》的精神，我们编写了本教材。在编写过程中，我们结合生产实际以及企业对人才的需求来组织内容。体现了基础理论以“必须、够用”为度，突出应用性和针对性的编写原则，旨在培养学生具有一定的工程技术应用能力，以适应职业岗位实际工作的需要。

为密切结合企业的实际需求，本教材与重庆金维实业有限责任公司电气保运分公司合作共同编写，是一本校企合作教材。

本书共分5大模块9章，其内容主要有直流电机及其拖动、变压器的应用、交流电机及其拖动、电力拖动系统电动机的选择及其他控制电机、三相异步电动机的控制电路应用实例等。本书可作为高职高专机电一体化、电气自动化、建筑电气工程技术、供用电技术等非电机专业的教材，同时也可作为企业对相关从业人员的培训教材，还可作为中职、技工院校师生以及从事电气工程、电力系统、水利水电工程、工业自动化等领域的工程技术人员学习参考和自学用书。

本书最大的特点就是采用了模块化和任务驱动式的编写方式，并辅以大量的应用实例。全书共分为5个相互联系又相对独立的模块，以供不同读者根据自己的需要选学相应的内容，既保持了知识的系统性和完整性，又具有方便学习的灵活性。任务驱动式则立足于学生实际，构建互动模式。任务驱动模式包括提出任务、分析任务、介绍相关知识、完成任务等环节。因此，本教材的每一章都以一个实训项目作为引入，提出本章需要解决的目标任务，再分别介绍完成该任务所需的知识技能。当学生完成一个任务后，其知识也在由浅入深的增加，技能也不断地增强。其次，为满足高职学生的实用性和技能性，列举了大量的应用实例，既便于理解抽象的理论知识，又降低了难度，便于学生更有效地学习本课程。第三，在文字叙述上，力求简明扼要、通俗易懂，以便学生在轻松愉快中学到知识和技能。

本书第1章由刘韵编写，第2章由任艳君编写，绪论和第3章由张浩波编写，第4章由文武编写，第5章由王华平编写，第6章由陈爱群编写，第7章由李彩霞编写，第8章由贾霄龙编写，第9章由谢定明编写，重庆金维实业有限责任公司电气保运分公司的多位高级工程师和技术员对全书的实训项目设置进行了指导，并参与了各章实训内容的编写工作。本书由任艳君、张浩波、陈爱群负责全书的统稿和最后定稿。

本书由任德齐教授主审，任教授仔细审阅了稿件，肯定了本书的特色，并提出了许多

宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢！此外，本书编写过程中翻阅了大量的参考资料，也得到了其他高校教师和许多企业工程技术人员的指导和帮助，在此一并表示诚挚的谢意！

限于编者水平和实践经验有限，本书难免存在缺点和不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

绪论	1
0.1 电机的概念与分类	1
0.2 电机与电力拖动系统发展概况	1
0.3 本课程的性质、任务和学习方法	2
0.4 电机常用的电磁学基础	3
0.5 铁磁材料的磁化特性	6

模块1 直流电机及其拖动

第1章 直流电机的结构和工作原理	8
1.1 直流电机概述	8
1.2 直流电机的结构和工作原理	10
1.2.1 直流电机的结构	10
1.2.2 直流电机的铭牌数据和励磁方式	16
1.2.3 直流电机的工作原理	18
1.3 直流电机的磁场、电枢电动势、电磁转矩、电磁功率	19
1.3.1 直流电机的磁场	19
1.3.2 直流电机的电枢电动势	21
1.3.3 直流电机的电磁转矩	22
1.3.4 直流电机的电磁功率	22
1.4 直流电机的基本公式	23
1.4.1 直流电动机的基本公式	23
1.4.2 直流发电机的基本公式	25
1.5 直流电机的基本特性	26
1.5.1 直流电动机的工作特性	26
1.5.2 直流发电机的运行特性	28
1.6 小结	30
1.7 习题	31
第2章 直流电动机的电力拖动	33
2.1 直流电动机的起动、调速、	

反转	33
2.2 电力拖动系统的特性	34
2.2.1 电力拖动系统的运动方程	34
2.2.2 他励直流电动机的机械特性	35
2.2.3 生产机械的负载特性	38
2.2.4 电力拖动系统的稳定运行条件	39
2.3 他励直流电动机的起动和反转	39
2.3.1 他励直流电动机的起动电路	39
2.3.2 他励直流电动机的起动方法	40
2.3.3 他励直流电动机的反转	42
2.4 他励直流电动机的制动	42
2.5 他励直流电动机的调速	46
2.5.1 他励直流电动机的调速指标	46
2.5.2 他励直流电动机的调速方法	47
2.6 串励及复励直流电动机的电力拖动	49
2.6.1 串励直流电动机的特性	49
2.6.2 复励直流电动机的特性	50
2.7 小结	50
2.8 习题	51

模块2 变压器的应用

第3章 变压器	53
3.1 变压器概述	53
3.2 变压器的结构和工作原理	57
3.2.1 变压器的基本结构及分类	57
3.2.2 变压器的基本工作原理	59
3.2.3 变压器的铭牌数据	60
3.3 单相变压器的运行分析	62
3.3.1 单相变压器的空载运行	62
3.3.2 单相变压器的负载运行	65
3.4 变压器参数的测定	66
3.4.1 变压器的空载试验	66
3.4.2 变压器的短路试验	67

3.5 变压器的运行特性	68	5.2 三相异步电动机的电磁转矩表 达式	112
3.5.1 变压器的电压变化率与外特性	68	5.3 三相异步电动机的机械特性	114
3.5.2 变压器的损耗、效率和效率 特性	68	5.3.1 三相异步电动机的固有机械 特性	114
3.6 三相变压器	69	5.3.2 三相异步电动机的人为机械 特性	115
3.6.1 三相变压器的磁路系统	69	5.4 三相异步电动机的起动	116
3.6.2 三相变压器的电路系统——联结 组别	70	5.4.1 三相笼型异步电动机的起动	116
3.6.3 三相变压器并联运行	75	5.4.2 三相绕线转子异步电动机的 起动	120
3.7 其他用途的变压器	77	5.4.3 三相异步电动机的反转	124
3.7.1 自耦变压器	77	5.5 三相异步电动机的制动	124
3.7.2 仪用互感器	78	5.5.1 三相异步电动机的能耗制动	124
3.7.3 电焊变压器	79	5.5.2 三相异步电动机的反接制动	125
3.8 小结	80	5.5.3 三相异步电动机的回馈制动	127
3.9 习题	81	5.6 三相异步电动机的调速	129
模块3 交流电机及其拖动			
第4章 三相异步电动机的结构及其 特性			
4.1 三相异步电动机概述	84	5.6.1 变极调速	129
4.2 三相异步电动机的结构和工作 原理	87	5.6.2 变频调速	131
4.2.1 三相异步电动机的结构	87	5.6.3 改变转差率调速	133
4.2.2 三相异步电动机的铭牌数据	90	5.6.4 电磁调速	135
4.2.3 三相异步电动机的工作原理	92	5.7 小结	136
4.3 三相异步电动机的交流绕组	93	5.8 习题	137
4.3.1 三相异步电动机的电枢绕组	93	第6章 单相异步电动机和同步电机 ...	
4.3.2 交流绕组的感应电动势	97	6.1 单相异步电动机、同步电机的 结构及起动运转	138
4.3.3 交流绕组磁通势	100	6.2 单相异步电动机	141
4.4 三相异步电动机的运行性能	100	6.2.1 单相异步电动机的结构和工作 原理	141
4.4.1 三相异步电动机的空载运行	100	6.2.2 单相异步电动机的起动、反转 及调速	143
4.4.2 三相异步电动机的负载运行	102	6.3 同步电机的结构	147
4.5 三相异步电动机的工作特性	105	6.3.1 同步电机的结构	147
4.5.1 三相异步电动机的功率平衡	105	6.3.2 同步电机的铭牌	148
4.5.2 三相异步电动机的转矩平衡	106	6.4 同步电动机	149
4.5.3 三相异步电动机的工作特性	106	6.4.1 同步电动机的工作原理	149
4.6 小结	108	6.4.2 同步电动机的工作特性和“V” 形曲线	150
4.7 习题	108	6.4.3 同步电动机的起动	153
第5章 三相异步电动机的电力拖动 ...			
5.1 三相异步电动机接触器联锁正 反转控制电路	110	6.5 同步发电机	154
		6.5.1 同步发电机的工作原理	154

6.5.2 同步发电机的励磁方式	155
6.5.3 同步发电机的特性	157
6.6 同步调相机	160
6.7 小结	161
6.8 习题	162

模块4 电力拖动系统电动机的选择及其他控制电机

第7章 电力拖动系统电动机的选择 ...	163
7.1 电动机种类的选择	163
7.2 电动机结构型式的选择	164
7.3 电动机额定电压的选择	164
7.4 电动机额定转速的选择	165
7.5 电动机的容量选择	165
7.5.1 电动机的发热、冷却与工作制 ...	165
7.5.2 电动机容量选择的基本方法	169
7.5.3 选择电动机容量的统计法和类比法	171
7.6 小结	172
7.7 习题	173
第8章 控制电机和其他电机	174
8.1 控制电机的特性	174
8.2 伺服电动机	177
8.2.1 直流伺服电动机	177
8.2.2 交流伺服电动机	179
8.3 步进电动机	182
8.3.1 步进电动机的结构和工作原理 ...	183
8.3.2 反应式步进电动机的特性	186
8.4 测速发电机	187
8.4.1 直流测速发电机	188
8.4.2 交流测速发电机	189
8.5 自整角机	190

8.5.1 力矩式自整角机	191
8.5.2 控制式自整角机	192
8.6 旋转变压器	192
8.6.1 正、余弦旋转变压器	193
8.6.2 线性旋转变压器	193
8.7 直线电动机	193
8.8 微型同步电动机	195
8.9 小结	196
8.10 习题	197

模块5 三相异步电动机的控制电路应用实例

第9章 三相异步电动机的常用拖动控制电路	198
9.1 三相异步电动机的直接起动控制电路实训	198
9.2 三相异步电动机的降压起动控制实训	200
9.3 三相异步电动机的制动控制实训	204
9.4 三相异步电动机的调速控制实训	207
9.5 C650 型车床的电气控制与安装	210
9.6 CD 型电动葫芦的电气控制检修	211
附录	214
附录A 部分习题参考答案	214
附录B 本书主要物理量符号表	216
参考文献	219

绪 论

0.1 电机的概念与分类

电机是一种利用电磁感应原理而运行的电气设备。它可以实现机械能和电能间的转换、不同形式电能间的变换以及信号的传递与转换。在实际生产应用中,电机的种类繁多,可以按不同的标准进行分类。按功能分类,电机可分为发电机、电动机、变压器和控制电机 4 大类;按结构或转速分类,电机可分为变压器和旋转电机两类。一般电机的分类如图 0-1 所示。

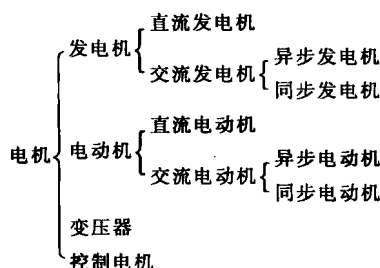


图 0-1 电机的分类

发电机的作用是把机械能转变成电能,即发电;电动机的作用是把电能转变成机械能,拖动各种生产机械设备运转,实现生产过程的机械化和自动化。变压器是一种利用电磁感应原理制成的静止电器,它能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,通常应用于自动控制系统,作为检测、校正及执行元件使用。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。

伺服电动机是一种控制电机,它能将所输入的电压信号转换为轴上的角位移或角速度输出,其转速和转向随输入电压信号的大小和方向而变化。

步进电动机将脉冲信号转换为角位移或线位移输出。

测速发电机是一种测量转速的微型发电机,即把输入的机械转速变换为电压信号输出。

0.2 电机与电力拖动系统发展概况

自蒸汽机启动了 18 世纪第一次产业革命以后,19 世纪末到 20 世纪上半叶电机又引发了第二次产业革命,使人类进入了电气化时代。1831 年法拉第发现了电磁感应现象,为电机的产生奠定了基础;1833 年楞次证明了可逆原理;1889 年多里-多勃罗沃尔斯基提出三相制,设计和制造了第一台三相变压器和三相异步电动机。从此以后,电机技术得到不断发展和完善,电机的容量不断增大,性能不断提高,应用日益广泛。20 世纪下半叶的信息技术

引发了第三次产业革命，使生产从工业化向自动化、智能化时代转变，并推动了新一代高性能电机驱动系统与伺服系统的研究与发展。

电力拖动是电动机在拖动系统中作为动力机械装置和元件拖动机械做功的运行方式。电力拖动又称为电气拖动。

电力拖动系统是用电动机带动负载完成一定工艺要求的系统，一般由电源、控制装置、电动机、传动机构和机械装置 5 部分组成，如图 0-2 所示。电动机作为原动机，通过传动机构带动生产机械执行生产任务；控制装置由各种控制电机、电器、自动化元件、工业控制计算机、可编程控制器等组成，用以控制电动机的运行，从而对机械装置的运动实现自动控制；电源的作用是向电动机和其他电气设备供电。因此，电力拖动的任务就是用电动机实现由电能向机械能的转换，拖动机械装置进行起动、运行、调速、制动等工作。可见，电动机是电力拖动的关键。

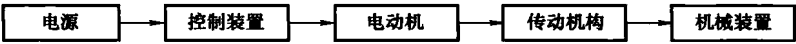


图 0-2 电力拖动系统的组成

电动机出现后，电力拖动大量替代了蒸汽和水力拖动。最初为“组拖动系统”，即一台电动机拖动一组生产机械，通过大量的轴传动、带传动实现能量从电动机到机械装置的传递。20 世纪上半叶以来，大量采用“单电动拖动系统”，即一台电动机拖动一台生产机械，便于通过对电动机的控制，实现对机械装置的电气控制，从而实现生产自动化。但随着机械装置的要求日益提高，很多机械装置为完成复杂的工作，使用了大量的机械传动机构，由于受到机械零件加工技术和机械自身特性的限制，使得系统难以达到所要求的传动控制和传动精度。因此，往往使用“多电动机拖动系统”，即在一个机械装置中，每个部件的每个传动工作或运动方式均由一台电动机驱动，使得传动机构大大减少，从而简化了机械系统，提高了传动精度。

随着自动化元件和控制技术的发展，通过对每台电动机的控制，就可对机械装置的每个动作进行电气控制，从而实现自动化电机拖动系统。

近年来，随着计算机技术、微电子技术、电力电子技术以及网络通信等新技术的发展和广泛应用，采用微电子、计算机与控制技术相结合的手段来改造传统产业，从而实现了高性能、电子化、小型化和智能化的电机拖动系统。

总之，电力拖动技术具有许多其他拖动方式无法比拟的优点，其起动、制动、反转和调速的控制简单、方便、快速且高效。电动机的类型很多，可利用不同的运行特性来满足各种类型生产机械的要求；由于整个系统各参数的检测和信号的变换与传送方便，所以易于实现最优控制。

0.3 本课程的性质、任务和学习方法

“电机与拖动”这门课程是机电一体化、电气自动化、建筑电气工程技术、供用电技术等专业的一门主干课程。由于电机大量在拖动系统中作为动力机械装置和元件使用，因此，我们有必要研究其基本原理、电气特性、机械特性以及在系统中的匹配问题。

本课程主要讲述电机的基本理论及其在电力拖动系统中的应用，包括直流电机及拖动、变压器、交流电机及拖动、控制电机及电力拖动系统中电动机的选择及应用等几部分内容。

本课程电机部分的主要任务是使学生掌握直流电机、变压器、交流异步电机、同步电机、控制电机的工作原理、电磁过程、基本方程式、等效电路等内容；掌握电力拖动部分直流电动机、异步电动机的各种机械特性、电动机的起动、调速、制动运行的特性分析及其相关计算等内容；掌握选择电机的原理与方法；掌握电机及电力拖动控制技术在实际生产中的控制方法。

“电机与拖动”是一门理论性很强的技术基础课，同时又具有专业课的性质，涉及的基础理论和实际知识面较广，是电磁学、动力学、机械等学科知识的综合课程。在用理论分析电机及拖动的实际问题时，必须结合电机的具体结构，采用工程观点和分析方法。在掌握基本理论的同时，还要注意培养实际操作技能和计算方法。

为了学好本门课程，必须做到以下几点：

1) 学习本课程之前，必须掌握电磁学的基本概念，理解电路和磁路定律、电磁力公式、电磁感应定律、力学等知识。

2) 抓住重点，牢固掌握基本概念、基本原理和主要特性，对于有关公式要理解其物理意义，不要孤立地去死记硬背。对于本课程涉及的不同类型的电机，要注意其异同点，加以对比分析。

3) 要有良好的学习方法，要特别注意运用比较的方法，分析电机的共性和特点，加深对原理和性能的理解。

4) 通过理论联系实际、重视实训内容和参加工程实践，既可加深对理论知识的理解和提高，又可培养实际的操作技能和工作能力。

5) 为了提高学习效果，应加强课前预习，课后应认真复习总结，完成一定数量的习题。

0.4 电机常用的电磁学基础

电机是通过电磁感应原理来实现能量转换的机械装置，因此，电和磁是构成电机的两大要素。“电”，在电机中主要以“路”的形式出现，即由电机内的线圈绕组构成电机的电路；“磁”，在电机中是以“场”的形式存在的，但在进行工程分析计算时，为了方便起见，常把磁场的问题简化为磁路问题来处理。

1. 电路中的两个基本定律

(1) 基尔霍夫第一定律

电路中流入某一节点的各支路电流的代数和等于零，即

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

又称作基尔霍夫电流定律 (KCL)。应用时，若规定流出节点的电流为正，则流入节点的电流为负，由此列出的方程叫做节点电流方程。上式表明，流入某一节点电流之和等于流出该节点的电流之和。

(2) 基尔霍夫第二定律

电路中任一闭合回路电压的代数和为零，即

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

又称为基尔霍夫电压定律 (KVL)。上式表明，任一闭合回路的电动势的代数和等于回路各无源元件上的电压的代数和。

由于基尔霍夫定律只与电路的连接方式（即电路的拓扑结构）有关，而与电路所含元件的性质无关，故对任何集总参数电路都适用，即不论电路是线性的还是非线性的，是时变的还是时不变的，是处于稳态还是处于暂态的。

2. 磁场的基础知识

(1) 磁感应强度 B

在磁极和通电导体周围都存在磁场，磁场的强弱通常用磁感应强度 B 来描述。磁场是一个矢量，其单位为 T（特斯拉）。通电导体所产生的磁场方向可用右手定则判定，如图 0-3 所示。

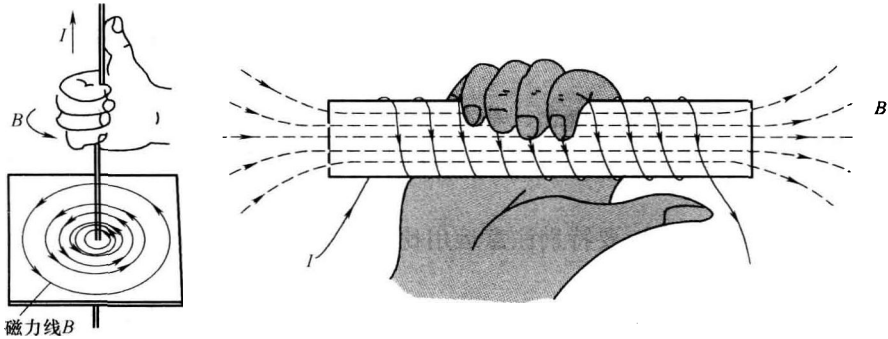


图 0-3 磁感应强度 B 的方向与电流 I 间的关系（右手定则）

通电导体产生的磁感应强度的大小由毕奥-萨伐尔定律确定，利用该定律可计算出无限长载流直导线在距离该导线为 d 的一点产生的磁场大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \quad (0-3)$$

式中 μ_0 ——真空中的磁导率。

同样可得载流长直螺线管内的磁场为

$$B = \mu_0 n I \quad (0-4)$$

式中 n ——螺线管单位长度的匝数。

式 (0-4) 表明螺线管内部磁场是均匀的。

(2) 磁通量 Φ

通过磁场中某截面的磁感应线数称为通过此面的磁通量，简称磁通，一般用 Φ 表示。

$$\Phi = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (0-5)$$

对于均匀磁场，若磁场 B 与平面面积 S 垂直，则其磁通为

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \Phi/S \quad (0-6)$$

由此可知，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。磁通的单位为 $T \cdot m^2$ ，又叫韦伯（Wb）。

（3）电磁力的计算

载流导线在其周围空间要产生磁场，反之，磁场对处于其中的载流导线要产生作用力，该作用力称为安培力。如图 0-4 所示，有一小段电流元 $I dl$ 处于磁场 B 中，该电流元所受的安培力为

$$dF = I dl \times B \quad (0-7)$$

此式叫安培公式。安培力的方向垂直于磁感应强度 B 与导体构成的平面，指向由矢量叉乘规则确定。

在均匀磁场中，载流直导线长度为 l ，流过的电流为 I ，电流方向垂直于磁场 B ，则载流直导线所受的力为

$$f = BIl \quad (0-8)$$

在电机学中，习惯用左手定则确定安培力的方向，即把左手伸开，大拇指与其余 4 指垂直，若磁感应强度 B 垂直穿过手心，其余 4 指指向电流 I 的方向，则大拇指的指向就是导体受力的方向，如图 0-5 所示。

（4）安培环路定理

凡是通有电流的导体，必在周围空间激发磁场。假定在一根导体中通以电流 I ，则在导体周围空间产生磁场，其磁场强度为 H ，它们之间应满足安培环路定理，即

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I \quad (0-9)$$

假定磁场是由 N 匝线圈电流产生的，且在闭合线 L 上的磁场强度 H 的大小处处相等，则由安培环路定理有

$$Hl = NI \quad (0-10)$$

式中 H ——磁场强度，单位为 A/m ；

N ——表示线圈匝数；

NI ——作用在整个磁路上的磁通势，单位为 AT 。

H 与磁感应强度 B 的关系是

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (0-11)$$

式中 μ_r ——导磁材料的相对磁导率，决定于导磁材料的磁性；

μ ——导磁材料的磁导率。

3. 法拉第电磁感应定律

任一闭合回路中感应电动势的大小等于通过该回路磁通量的时间变化率的负值，即

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-12)$$

由上式可知，要在导体中产生电动势，穿过导体回路的磁通 Φ 必须变化。由磁通 Φ 的定义可知，当磁感强度 B 变化或导体回路变化时，都会引起 Φ 的变化而产生电动势。一般将磁场不变而导体运动产生的电动势称为动生电动势，导体不动而磁场变化产生的电动势称为感应电动势。

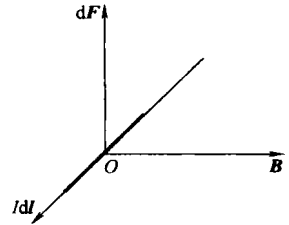


图 0-4 安培定律示意图

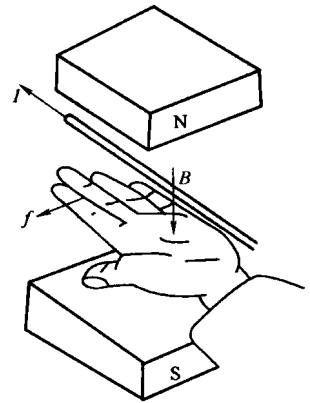


图 0-5 确定导体受力的左手定则

在恒定磁场 B 中, 长度为 l 的直导体以速度 v 在垂直于磁场方向上运动而产生的感应电动势为

$$e = Blv \quad (0-13)$$

其方向可以由右手定则确定, 如图 0-6 所示。

4. 简单磁路的计算

磁路就是磁通所通过的路径, 用强磁材料构成, 在其中产生一定强度的磁场的闭合回路, 如变压器铁心。

磁路的欧姆定律为

$$F = \Phi R_m \quad R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (0-14)$$

铁磁材料的磁导率 μ 不是一个常数, 所以由铁磁材料构成的磁路, 其磁阻 R_m 也不是一个常数, 而是随着磁路中磁通密度的大小而变化的。

图 0-7 是一个简单的磁路, 它是由铁磁材料和气隙两部分串联而成。铁心上绕了 N 匝的线圈, 电流为 I 。这个磁路按材料及形状可分为两段: 一段是截面积为 S 的铁心, 长度为 l , 铁心的磁场强度为 H ; 另一段是气隙, 长度为 δ , 气隙的磁场强度为 H_δ , 根据磁路的安培环路定理有

$$NI = \sum H_i l_i = Hl + H_\delta \delta \quad (0-15)$$

当对电机或变压器进行磁路计算时, 一般已知的是磁路里各段的磁通以及各段磁路的几何尺寸, 要求得总磁通势 NI , 就可以利用式 (0-15) 来计算。

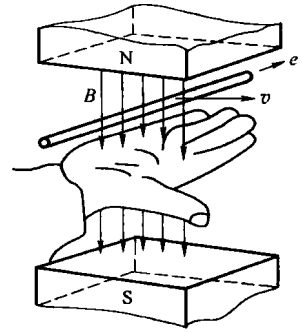


图 0-6 确定电动势方向的右手定则

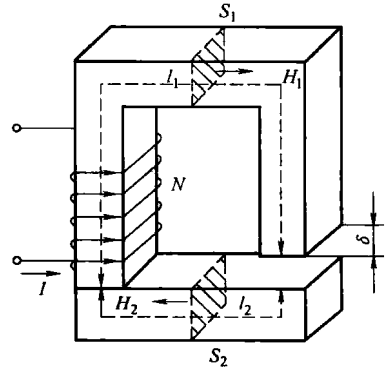


图 0-7 简单磁路示意图

0.5 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、钴、镍、钕等强磁性物质称为铁磁材料。铁磁材料在外磁场的作用下能产生很强的附加磁场, 称为铁磁物质的磁化。在外磁场停止作用后, 铁磁材料仍能保持其磁化状态。由于相对磁导率和磁化率不是常数, 而是随外磁场的变化而变化的, 具有磁滞现象, 因此, B 、 H 之间不具有简单的线性关系。

将一块尚未磁化的铁磁材料进行磁化。当磁场强度 H 由零逐渐增大时, 磁感应强度 B 将随之增大, 曲线 $B = f(H)$ 称为起始磁化曲线, 如图 0-8 所示。当 H 从零开始 (此时 $B = H = 0$), 然后逐渐增大电流, 随着 H 的增大, 至 a 点后, 铁心中的 B 不再显著增加, 介质的磁化达到饱和, 即磁饱和。当铁磁材料达到饱和状态后, 缓慢地减小 H , 铁磁质中的 B 并不按原来的曲线减小, 并且 $H = 0$ 时, B 并不等于 0, 而是具有一定值,

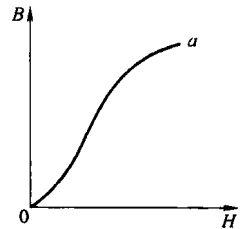


图 0-8 铁磁材料的起始磁化曲线

这种现象称为剩磁。要完全消除剩磁，必须加反向磁场。随着反向磁场的逐渐增加，铁磁材料的磁化将达到反向饱和。不断地朝正向或反向缓慢地改变磁场，磁化曲线就将变为一闭合曲线——磁滞回线。

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、剩磁小，如铸铁、铸钢和硅钢片等，多用于制作电机、变压器的铁心如图 0-9a 所示。硬磁（永磁）材料的磁滞回线宽，剩磁大，如钨钢、钴钢等，适合于制造永久磁铁，如图 0-9b 所示。

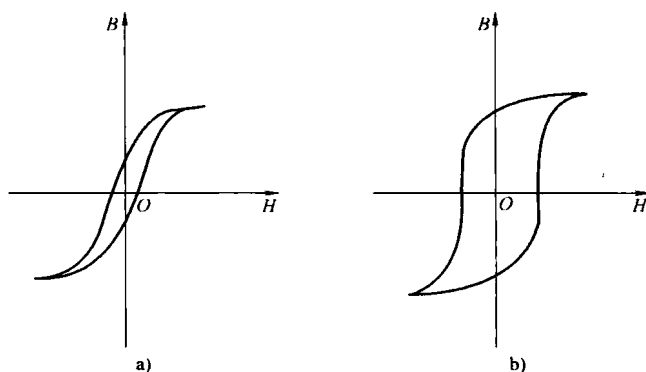


图 0-9 磁滞回线

a) 软磁材料 b) 硬磁材料