



教育科学“十五”国家规划课题研究成果

电机与拖动基础

许建国 主编
陶醒世 主审

▼
……
(第2版)
……
▲



高等教育出版社



教育科学“十五”国家规划课题研究成果

电机与拖动基础

许建国 主编
陶醒世 主审

▼……(第2版)……▲



高等教育出版社

内容提要

本书包含电机和电力拖动两部分内容。

第1章至第5章是电机部分,其中:前4章主要阐述直流电机、变压器、交流异步电机和同步电机的基本结构、工作原理及运行特性;第5章特种电机着重分析了直线电动机和磁悬浮装置的工作原理及应用。

第6章至第10章为电力拖动部分,其中:第6章和第7章分别阐述直流电动机、三相异步电动机电力拖动系统的拖动原理、调速方法、控制规律;第8章阐述同步电动机和直线电动机及磁浮列车的电力拖动,分析了磁浮列车的牵引原理、导向原理及调速方法;第9章可再生能源发电技术主要介绍了风力发电技术;第10章介绍了电力拖动系统中电动机的选择。

本书是高等学校电气及电子信息类专业的规划教材,可以作为高等院校自动化专业、电气工程及其自动化专业、机电一体化专业的本科生教材,亦可供有关师生和工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础/许建国主编. —2版. —北京:高等教育出版社, 2009.6

ISBN 978-7-04-026455-5

I. 电… II. 许… III. ①电机-高等学校-教材②电力传动-高等学校-教材 IV. TM3

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第067929号

策划编辑 李 慧 责任编辑 李 慧 封面设计 赵 阳
版式设计 范晓红 责任校对 俞声佳 责任印制 张泽业

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 中国农业出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 17.5
字 数 390 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2004年8月第1版
2009年6月第2版
印 次 2009年6月第1次印刷
定 价 26.70元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 26455-00

总 序

为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展的需要,满足我国高校从精英教育向大众化教育的重大转移阶段中社会对高校应用型人才培养的各类要求,探索和建立我国高等学校应用型人才培养体系,全国高等学校教学研究中心(以下简称“教研中心”)在承担全国教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上,组织全国100余所培养应用型人才为主的高等院校,进行其子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索,在高等院校应用型人才培养的教学内容、课程体系研究等方面取得了标志性成果,并在高等教育出版社的支持和配合下,推出了一批适应应用型人才培养需要的立体化教材,冠以“教育科学‘十五’国家规划课题研究成果”。

2002年11月,教研中心在南京工程学院组织召开了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题立项研讨会。会议确定由教研中心组织国家级课题立项,为参加立项研究的高等院校搭建高起点的研究平台,整体设计立项研究计划,明确目标。课题立项采用整体规划、分步实施、滚动立项的方式,分期分批启动立项研究计划。为了确保课题立项目标的实现,组建了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题领导小组(亦为高校应用型人才立体化教材建设领导小组)。会后,教研中心组织了首批课题立项申报,有63所高校申报了近450项课题。2003年1月,在黑龙江工程学院进行了项目评审,经过课题领导小组严格的把关,确定了首批9项子课题的牵头学校、主持学校和参加学校。2003年3月至4月,各子课题相继召开了工作会议,交流了各校教学改革的情况和面临的具体问题,确定了项目分工,并全面开始研究工作。计划先集中力量,用两年时间形成一批有关人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等理论研究成果报告和 In 研究报告基础上同步组织建设的反映应用型人才培 养特色的立体化系列教材。

与过去立项研究不同的是,“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题研究在审视、选择、消化与吸收多年来已有应用型人才培 养探索与实践成果基础上,紧密结合经济全球化时代高校应用型人才培 养工作的实际需要,努力实践,大胆创新,采取边研究、边探索、边实践的方式,推进高校应用型人才培 养工作,突出重点目标,并不断取得标志性的阶段成果。

教材建设作为保证和提高教学质量的重要支柱和基础,作为体现教学内容和教学方法的知识载体,在当前培养应用型人才中的作用是显而易见的。探索、建设适应新世纪我国高校应用型人才培 养体系需要的教材体系已成为当前我国高校教学改革和教材建设工作面

临的十分重要的任务。目前,教材建设工作存在的问题不容忽视,适用于应用型人才培养的优秀教材还较少,大部分国家级教材对一般院校,尤其是新办本科院校来说,起点较高、难度较大、内容较多,难以适应一般院校的教学需要。因此,在课题研究过程中,各课题组充分吸收已有的优秀教学改革成果,并和教学实际结合起来,认真讨论和研究教学内容和课程体系的改革,组织一批学术水平较高、教学经验较丰富、实践能力较强的教师,编写出一批以公共基础课和专业、技术基础课为主的有特色、适用性强的教材及相应的教学辅导书、电子教案,以满足高等学校应用型人才培养的需要。

我们相信,随着我国高等教育的发展和高校教学改革的不断深入,特别是随着教育部“高等学校教学质量和教学改革工程”的启动和实施,具有示范性和适应应用型人才培养的精品课程教材必将进一步促进我国高校教学质量的提高。

全国高等学校教学研究中心

2003年4月

第2版前言

国力的竞争是人才的竞争,人才的竞争体现在创新能力的竞争上。高等学校的教材是为培养人才服务的,要培养创新型人才,教材必须创新。

本教材本着为培养创新型人才服务的宗旨,努力在“新”上着力。作为一门重要的技术基础课,“新”就体现在新技术上:在第1版的第5章和第8章中编写了高速列车和磁浮列车电力拖动技术。时速高达350 km的高速列车和磁浮列车集机械制造、电子电气、计算机控制等多种高新技术于一体,是现代电力拖动技术发展的最新成果。第2版在修订这两章时又补充了新内容,对于帮助学生开拓视野是很有意义的。

本书第2版“新”的特色还体现在“新能源”上。随着全世界能源消耗越来越大,以及煤、石油和天然气等化石燃料资源的日渐枯竭,人们渴望用可再生能源来发电,这就是风能发电。风能是太阳能的转换形式,可谓取之不尽,用之不竭,是遍布全球的可再生能源。风能发电不会污染环境,也不会有温室效应的问题,所以风能是绿色、环保的能源,用风能发电也是节能减排及缓解能源短缺的有效方法。本书第2版增编了第9章可再生能源发电技术,介绍风能发电原理和风能发电技术。

根据整体优化的原则,在增编有关新技术、新能源内容的同时,也压缩和删去了一些内容。例如,在直流电机一章中压缩了有关换向方面的内容;在变压器部分删去了磁路系统对电动势波形影响的内容;在特种电机中删去了自整角机和旋转变压器;在电力拖动中删去了串励直流电动机的电力拖动等。全书内容更加精练,重点更加突出。

本书第2版由许建国教授进行全面修订,书中所有符号和术语都得到了统一,各章节之间进行了有机地连接,增强了系统性和连贯性。华中科技大学陶醒世教授对本书进行了细致认真地审阅,提出了很多宝贵的意见,在此深表谢忱。由于编者学识有限,第2版仍难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2009年1月

第1版前言

迈入21世纪,我国高等教育事业进入了蓬勃发展的新时期。高等教育事业的发展推动了教学改革,开创了教材建设的新局面。本教材就是在这种新形势下为适应高等教育事业的发展,为电气及电子信息类专业而编写的规划教材。

本教材是编者在总结多年教学工作的基础上,结合当前有关科技研究成果而编写的,具有如下特点:

1. 传统技术与高新技术相结合

伴随着工业化的进程,电动机及电力拖动技术不断地发展,逐步形成了电力拖动领域中的传统技术,如电动机的起动、制动和调速等;但是随着电力电子技术的发展,电动机及电力拖动技术又不断地在技术上取得重大突破,形成了一系列高新技术,例如近年来随着我国铁路电气化改造速度的加快,随着铁路列车不断的提速,随着磁(悬)浮列车的运行,电动机及电力拖动技术取得了令人瞩目的成就。所以本教材在讲述传统的拖动技术后,紧接着在第八章中讲述磁(悬)浮列车的拖动技术,以反映最新的科研成果。

2. 讲述基础理论与分析应用实例相结合

电动机及电力拖动技术涉及电学、磁学、力学、机械学等多种学科,基础理论丰富,需要重点讲述;但是学习理论的目的归根结底在于应用,所以在教材中增加了应用实例的分析,如磁悬浮装置、熔融玻璃液搅拌器等。

本教材由许建国教授主编,姚裕安副教授任副主编。绪论、第二章、第四章、第五章和第八章由许建国教授编写,第一章和第六章由邵可然教授编写,第三章和第七章由姚裕安副教授编写,第九章由杨刚副教授和吴雨川副教授编写。全书由许建国教授统稿和定稿。许鼎衡在网上查询及下载资料与收集资料方面做了大量工作,许雪清在资料整理及计算机处理等方面做了大量的工作。

由于编者学识有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2004年2月

目 录

绪论	1	1.5 直流电机的感应电动势和 电磁转矩	23
0.1 电机与电力拖动在国民经济 中的重要作用	1	1.5.1 直流电机电枢绕组的感应 电动势	23
0.2 课程的性质、教学要求及 学习方法	2	1.5.2 电枢绕组的电磁转矩	24
0.3 常用的基本定律与定则	2	1.6 直流电动机	25
0.3.1 电机磁场的描述	2	1.6.1 直流电动机稳态运行的 基本关系式	25
0.3.2 电磁感应定律	3	1.6.2 并励直流电动机的 工作特性	27
0.3.3 电磁力定律	4	1.6.3 串励直流电动机的 工作特性	27
0.3.4 全电流定律	5	1.7 他励直流电动机的机械特性	28
0.3.5 铁磁材料的特性	6	1.7.1 机械特性方程式	28
第1章 直流电机	8	1.7.2 固有机械特性与人为机械 特性	29
1.1 直流电机的工作原理	8	1.8 直流发电机	30
1.1.1 直流电动机的基本工作 原理	8	1.8.1 直流发电机稳态运行时 的基本方程式	30
1.1.2 直流发电机的基本工作 原理	9	1.8.2 他励直流发电机的运行 特性	32
1.2 直流电机的结构和额定值	10	1.8.3 并励直流发电机的自励 过程和自励条件	33
1.2.1 直流电机的结构	10	1.8.4 并励直流发电机的运行 特性	34
1.2.2 直流电机的额定值	13	1.9 直流电机的换向	35
1.3 直流电机的电枢绕组	14	思考题与习题	36
1.3.1 元件与节距	14	第2章 变压器	38
1.3.2 单叠绕组	16	2.1 变压器的结构和铭牌数据	38
1.3.3 单波绕组	18	2.1.1 变压器的结构	38
1.4 直流电机的磁场	18	2.1.2 变压器的铭牌数据	40
1.4.1 直流电机的励磁方式	19		
1.4.2 直流电机的空载磁场	19		
1.4.3 直流电机的电枢反应及 负载磁场	20		

2.2 变压器的空载运行	41	第3章 交流异步电动机	78
2.2.1 变压器空载运行时的物理 状况	41	3.1 三相异步电动机的工作原理与 结构	78
2.2.2 电磁量参考方向的习惯 规定	42	3.1.1 三相异步电动机的工作 原理	78
2.2.3 变压器绕组的感应电动势 ...	43	3.1.2 组成异步电动机的主要 部件	79
2.2.4 励磁电流	44	3.1.3 三相异步电动机的铭牌 数据	82
2.2.5 空载运行时电压平衡 方程式	45	3.2 三相异步电动机的定子绕组	83
2.2.6 空载运行时的相量图及 等值电路	45	3.2.1 三相单层绕组	84
2.3 变压器的负载运行	47	3.2.2 三相双层绕组	86
2.3.1 负载运行时的物理状况 及磁动势平衡方程式	48	3.3 三相异步电动机定子绕组的 感应电动势	87
2.3.2 负载运行时的基本方程式 ...	49	3.3.1 导体的感应电动势	87
2.3.3 变压器的折算法	50	3.3.2 线圈的感应电动势	90
2.3.4 折算后的基本方程式和 等值电路	51	3.3.3 线圈组的感应电动势	91
2.3.5 变压器负载运行时的 相量图	52	3.3.4 一相绕组的感应电动势	93
2.3.6 标么值	55	3.3.5 定子绕组的谐波电动势	93
2.4 用试验方法测定变压器的 参数	56	3.4 三相异步电动机的定子 磁动势	94
2.4.1 空载试验	56	3.4.1 单相绕组产生的脉动磁 动势	94
2.4.2 短路试验	58	3.4.2 三相绕组产生的旋转磁 动势	99
2.5 变压器的运行特性	60	3.5 三相异步电动机的等值电路 和相量图	100
2.5.1 外特性与电压变化率	60	3.5.1 转子绕组开路时的等值 电路和相量图	101
2.5.2 效率及效率特性	61	3.5.2 转子绕组闭合时的等值 电路和相量图	103
2.6 三相变压器及联结组标号	62	3.6 三相异步电动机的功率和 转矩	109
2.6.1 三相变压器的连接	62	3.6.1 三相异步电动机的功率 关系	109
2.6.2 变压器的联结组标号	63	3.6.2 三相异步电动机的电磁 转矩	111
2.7 三相变压器的并联运行	67	3.7 三相异步电动机的工作特性 ...	113
2.8 特种变压器	70		
2.8.1 自耦变压器和接触式 调压器	70		
2.8.2 仪用互感器	72		
2.8.3 电焊变压器	74		
思考题与习题	75		

3.8 三相异步电动机的机械特性	114	5.3.2 反应式步进电机的运行 状态及运行特性	156
3.8.1 机械特性的表达式	114	5.4 直线电动机与磁悬浮装置	158
3.8.2 三相异步电动机的固有 机械特性和人为机械特性	118	5.4.1 直线异步电动机	158
3.9 单相异步电动机	120	5.4.2 直线同步电动机	161
3.9.1 单相异步电动机的工作 原理和机械特性	120	5.4.3 直线电动机的应用	162
3.9.2 单相异步电动机的起动及 运行	121	5.4.4 磁悬浮装置	163
思考题与习题	123	思考题与习题	166
第4章 同步电动机	126	第6章 直流电动机的电力拖动	168
4.1 同步电动机的结构及工作 原理	126	6.1 电力拖动系统的运动方程式	168
4.2 同步电动机的电磁关系	128	6.2 多轴系统中工作机构转矩、 力、飞轮矩和质量的折算	169
4.3 同步电动机的功率关系及 功角特性与矩角特性	133	6.2.1 工作机构转矩的折算	170
4.3.1 功率关系	133	6.2.2 作直线运动的工作机构 作用力的折算	171
4.3.2 功角特性与矩角特性	134	6.2.3 传动机构与工作机构飞轮 矩的折算	172
4.3.3 功角 θ 决定同步电机的 运行状态和稳定状态	136	6.2.4 作直线运动的工作机构 质量的折算	173
4.4 同步电动机功率因数的调节 和V形曲线	138	6.3 生产机械的负载转矩特性	173
4.4.1 同步电动机功率因数的 调节	138	6.4 电力拖动系统稳定运行的 条件	176
4.4.2 V形曲线	139	6.4.1 他励直流电动机机械特性 的绘制	176
思考题与习题	141	6.4.2 电力拖动系统稳定运行 条件分析	179
第5章 特种电机	143	6.5 他励直流电动机的起动	180
5.1 伺服电机	143	6.5.1 他励直流电动机的起动 方法	180
5.1.1 直流伺服电机	144	6.5.2 起动电阻的计算	181
5.1.2 交流伺服电机	145	6.6 他励直流电动机的制动	184
5.2 测速发电机	149	6.6.1 能耗制动	185
5.2.1 直流测速发电机	150	6.6.2 反接制动	188
5.2.2 交流异步测速发电机	151	6.6.3 回馈制动	190
5.2.3 交流同步测速发电机	153	6.7 他励直流电动机的调速	193
5.3 步进电机	154	6.7.1 调速指标	193
5.3.1 反应式步进电机工作 原理	154	6.7.2 电枢回路串电阻调速	195
		6.7.3 可控整流的直流调压调速	196

6.7.4 弱磁调速	197	第8章 同步电动机和直线电动机及 磁浮列车的电力拖动	237
思考题与习题	199	8.1 同步电动机的起动	237
第7章 三相异步电动机的 电力拖动	204	8.2 同步电动机的变频调速	238
7.1 三相异步电动机的起动	204	8.3 直线电动机及磁浮列车的 电力拖动	240
7.1.1 三相异步电动机在起动中存在 的问题及解决办法	204	8.3.1 直线异步电动机和斥浮型 磁浮列车的电力拖动	240
7.1.2 笼型异步电动机的起动	205	8.3.2 直线同步电动机和吸浮型 磁浮列车的电力拖动	243
7.1.3 特殊型号笼型异步电动机的 起动	209	思考题与习题	245
7.1.4 绕线转子三相异步电动机的 起动	211	第9章 可再生能源发电技术	247
7.1.5 三相异步电动机的软起动	216	9.1 风能与风电场	247
7.2 三相异步电动机的调速	217	9.2 风能发电原理	248
7.2.1 改变磁极对数的变极调速	217	9.3 风力发电装置和风力发电 技术	251
7.2.2 三相异步电动机的变频 调速	220	思考题与习题	254
7.2.3 改变定子电压的交流调压 调速	224	第10章 电力拖动系统中电动机的 选择	255
7.2.4 绕线转子异步电动机转子 回路串电阻调速	225	10.1 电动机发热与冷却规律	255
7.2.5 绕线转子异步电动机的串级 调速	226	10.2 电动机的工作制	257
7.3 三相异步电动机的制动	228	10.3 电动机的一般选择	259
7.3.1 三相异步电动机的 回馈制动	229	10.4 电动机额定功率的选择	259
7.3.2 三相异步电动机的 反接制动	230	10.4.1 连续工作制电动机额定 功率的选择	260
7.3.3 三相异步电动机的 能耗制动	232	10.4.2 短时工作制电动机额定 功率的选择	266
7.3.4 三相异步电动机的 软停车和软制动	233	10.4.3 周期性断续工作制电动 机额定功率的选择	267
7.3.5 三相异步电动机的 各种运行状态分析	233	思考题与习题	268
思考题与习题	234	参考文献	269

绪 论

0.1 电机与电力拖动在国民经济中的重要作用

电能易于转换，便于传输，应用方便，是现代使用最为广泛的能源。

电能通常由其他形式的能量转换而来。火力发电厂利用发电机将热能转换为电能；水力发电站利用发电机将水能转换为电能；核电站则将核能转换为电能。

随着能源的消耗越来越大，以及煤、石油、天然气等化石燃料资源的逐渐枯竭，人们渴望用再生能源来发电，这就是风能发电。风电场利用风力发电机将风能转换为电能。

发电厂（站）发出的电能通过电力网实现远距离传输。为了减少传输损耗，常用变压器将发电机发出的电压升高，实现高压传输。由于能实现高压远距离输电，一些火力发电厂就建在煤矿附近，俗称“坑口电站”，就地将煤燃烧产生的热能转换为电能输往大城市；也正是采用了高压远距离输电技术，我国西部水电站发出的电能才能传输到东南沿海一带，形成“西电东送”的格局。电能被输送到用电地区，要经过变压器降压，才能供用户使用。通过电力网和变压器的升压及降压作用，能够很方便地实现电能的传输和分配，由此可以看出，变压器是在国民经济中起着重要作用的变电设备。

用户用电就是将电能转换为其他形式的能量。用户用电的一个重要方面是利用电动机将电能转换为机械能，拖动生产机械工作。

用电动机拖动生产机械工作称为电力拖动，也称电气传动。由电动机拖动生产机械组成的系统称为电力拖动系统，其组成原理示意图如图 0.1 所示，一般由电动机、生产机械、传动机构、控制装置和电源五部分组成。电动机的作用是将电能转换为机械能，为生产机械提供动力。生产机械是直接进行工作的装置，在电动机的带动下完成生产任务。传动机构的作用是在电动机和生产机械之间实现功率传递及速度与运动方式的配合。控制装置的作用是根据生产工艺要求控制电动机的运行，从而控制生产机械的运行。电源向电动机和控制装置提供电能。

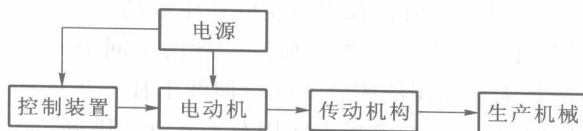


图 0.1 电力拖动系统示意图

电力拖动系统传动效率高、操作简便、能实现自动控制和远距离控制,因而得到了越来越广泛地应用,特别是在现代工业企业中,几乎所有的生产机械都是由电动机来拖动的,例如各种机床、风机、水泵,等等。可以毫不夸张地说,没有电动机、没有电力拖动技术,就没有现代工业。这样,电动机和电力拖动技术在国民经济中的重要作用就不言而喻了。

0.2 课程的性质、教学要求及学习方法

1. 课程的性质

“电机与拖动基础”是专业技术基础课,先修课程是高等数学、大学物理、电路等课程。本课程既是技术基础课,又具有专业课性质,因而理论性强,实践性也强。

在电机中,各种电、磁、力、热等方面的物理定律同时作用,所以,本课程具有复杂性和综合性的特点。

2. 教学要求

通过本课程的教学,使学生掌握常用的交、直流电机和变压器的基本结构、工作原理和运行特性;掌握他励直流电动机的起动、制动及调速方法;掌握交流异步电动机的机械特性;掌握交流电动机起动、制动规律和调速方法;了解选择电动机容量的一般方法。

3. 学习方法

在实际运行的电机中,电、磁、力、热等物理定律同时作用,使得电机内部电磁关系颇为错综复杂,在学习中要抓住本质的和精髓的东西,以期取得良好的学习效果。

虽然电机、变压器等种类繁多,各有特点,各具个性,但其电磁耦合关系、能量转换关系是相同的,具有共性,在学习中要抓住共性,才能做到举一反三。

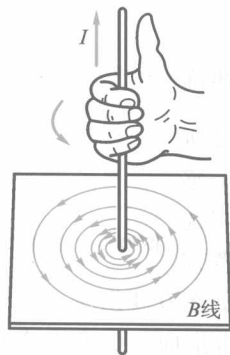
0.3 常用的基本定律与定则

发电机、电动机、变压器等电磁装置,尽管它们的功能及结构有所不同,但是它们都是以磁场为媒介进行能量转换的装置,因而其工作原理都是建立在电磁感应定律、电磁力定律、全电流定律等基本电磁定律之上的。综述这些常用的定律和定则对本课程的学习是有帮助的。

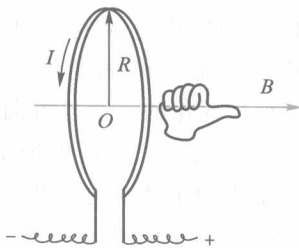
0.3.1 电机磁场的描述

电机和变压器的绕组流过电流时会在周围空间产生磁场。为了表述磁场特性,常用磁感应强度 B 来表示磁场的强弱。为了形象地描绘磁场的空间分布情况,通常使用磁感应线(磁力线)。磁感应线是无头无尾的闭合曲线,曲线上任一点的切线方向表示了该点磁感应强度 B 的方向。电流与其产生的磁场方向用右手螺旋定则确定,如图 0.2 所示。对直导线,用右手握住载流导线,大拇指伸直代表电流方向,弯曲的四指指向磁感应线的回绕方向,如图 0.2(a) 所示;对于线圈,弯曲的四指表示线圈中电流方向,伸直的大拇指

表示了磁感应线的方向,如图 0.2 (b) 所示。



(a) 载流直导线磁场的方向



(b) 线圈中的电流与磁场方向

图 0.2 电流与产生的磁场方向

在均匀的磁场中,如果 B 与截面 A 垂直,如图 0.3 所示,则通过该截面的磁感应通量 Φ 可表示为

$$\Phi = BA \text{ 或 } B = \Phi / A \quad (0.1)$$

Φ 亦称为磁通量,简称为磁通。由上式可知,磁感应强度 B 表示了单位面积上的磁通,故而又被称为磁通密度。在国际单位制中,磁通 Φ 的单位为韦 [伯] (Wb);磁通密度 B 的单位为特 [斯拉] (T), $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$; A 的单位为平方米 (m^2)。

在电机和变压器的磁路计算中,为了计算上的方便,还经常使用磁场强度 H 这一辅助物理量。 H 与 B 的关系是

$$B = \mu H \quad (0.2)$$

式中的 μ 是磁介质的磁导率,单位为亨/米 (H/m),不同的物质具有不同的磁导率。真空的磁导率为 $\mu_0 = 1.25 \times 10^{-6} \text{ H/m}$,是常数。铁磁材料的磁导率 μ 远远大于 μ_0 , μ 约为 μ_0 的数百倍到数千倍,如硅钢片的 μ 为 μ_0 的 6 000 ~ 7 000 倍,但不是一个常数。在同样大小的电流下,铁心线圈的磁通比空心线圈的磁通大得多,这就是电机和变压器通常都用铁磁材料来制造的原因。 H 的单位是安/米 (A/m)。

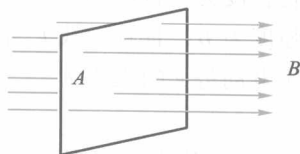


图 0.3 均匀磁场中的磁通

0.3.2 电磁感应定律

电磁感应定律是电机和变压器的理论基础。电机和变压器的绕组 (或线圈) 能够产生感应电动势只有两种情况:一是如变压器,绕组和磁场相对静止不动,与绕组相交链的磁链发生变化而在绕组中产生感应电动势,称为变压器电动势;二是如电机,绕组和磁场之间有相对运动,绕组中的导线切割磁场而产生感应电动势,称为切割电动势 (或称旋转电动势)。

1. 变压器电动势

若线圈（或绕组）的匝数为 N ，当与线圈相交链的磁链 $\Psi = N\Phi$ 发生变化时，会在线圈两端之间产生感应电动势 e ，其大小与磁链的变化率 $\frac{d\Psi}{dt}$ 成正比；其方向由楞次定律确定，即闭合线圈回路中感应电流的方向总是使得它自己所产生的磁场反抗原来磁通量 Φ 的变化。如果磁通量 Φ 、感应电动势 e 不仅大小是变化的，而且方向也变化时，就需选定一个方向作为参考方向，一般是先选定磁通 Φ 的参考方向，再用右手螺旋定则确定感应电动势 e 的参考方向。如图 0.4 所示，选定向上的方向为 Φ 的参考方向，用大拇指指向 Φ 的参考方向，其余四指指向 e 的参考方向，故 e 的参考方向由 A 点指向 X 点。当磁通增大时，即 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ ，根据楞次定律可知，感应电流所产生的磁通方向应该是向下的，才能反抗磁通的增大，又依照线圈电流与磁场方向之间的右手螺旋定则关系 [如图 0.2 (b)]，可以确定感应电流的方向是由 X 流向 A 的，感应电动势与感应电流同方向，亦是由 X 指向 A 的，这与选定的参考方向是相反的，这时 e 应取负值；当 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ 时，应用楞次定律可知，感应电动势方向与选定的参考方向是相同的，这时 e 应取正值。由此可知， e 的正、负与 $\frac{d\Phi}{dt}$ 的正、负是相反的， $\frac{d\Phi}{dt}$ 为正，则 e 为负， $\frac{d\Phi}{dt}$ 为负，则 e 为正。这样，应用楞次定律， e 与 Φ 之间的关系为

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0.3)$$

2. 切割电动势

若长度为 l 的直导线与磁场有相对运动，其切割磁感应线速度为 v ，导线所在处的磁感应强度为 B ，且直导线 l 、磁感应强度 B 和相对切割速度 v 三者之间互相垂直，则导线中感应电动势 e 的大小为

$$e = Blv \quad (0.4)$$

e 的方向用右手定则确定，即把右手伸开，大拇指与其他四指垂直成 90° ，如图 0.5 所示，让磁感应线指向手心，大拇指指向导线运动方向，其他四指的指向就是导线中感应电动势即切割电动势 e 的方向。

0.3.3 电磁力定律

通电导体受到的磁场对它的作用力称为电磁力，也称安培力。一根长度为 l 的直导线中流过的电流为 i ，其所在的磁场为均匀磁场，磁感应强度为 B ，且直导线 l 与磁感应强度 B 的方向垂直，则导线上所受到的电磁力 f 大小为

$$f = Bli \quad (0.5)$$

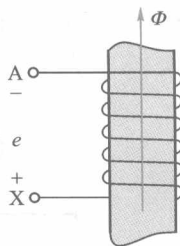


图 0.4 磁通及感应电动势方向

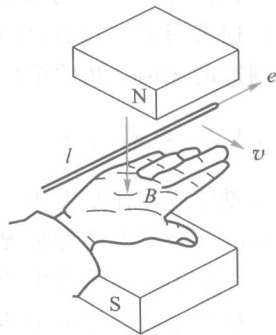


图 0.5 确定感应电动势方向的右手定则

用左手定则确定 f 的方向, 即把左手伸开, 大拇指与其他四指垂直成 90° , 如图 0.6 所示, 让磁感应线指向手心, 四指指向电流 i 的方向, 则大拇指的指向就是导线所受到的电磁力 f 的方向。

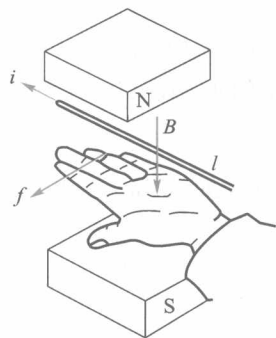


图 0.6 确定载流导体受力方向的左手定则

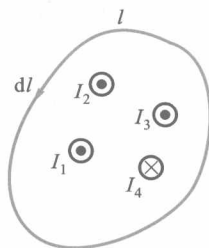


图 0.7 全电流定律

0.3.4 全电流定律

全电流定律亦称安培环路定律, 是表示电流与所产生的磁场之间关系的定律。设空间有多根载流导体, 流过的电流分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 、 $\dots$ 、 I_n , 则沿任何闭合路径 l 对磁场强度 H 的线积分, 等于该闭合回路所包围的电流的代数和, 即全电流 $\sum I$, 于是就有

$$\oint_l H dl = \sum I \quad (0.6)$$

上式就是全电流定律的表达式, $\sum I$ 为电流的代数和, 其正、负由右手螺旋定则确定, 当导体中电流方向与积分路径方向符合右手螺旋定则时, 该电流取正号, 否则取负号。如在图 0.7 中①, 积分路径方向为逆时针方向, 所以 I_1 、 I_2 、 I_3 为正, I_4 为负, 故 $\sum I = I_1 + I_2 + I_3 - I_4$ 。

全电流定律常用于电机和变压器的磁路计算, 这时根据磁路在几何形状上的特点, 把整个磁路分成若干段, 几何形状相同的为一段, 这样, 磁场强度 H 沿整个磁路的线积分就等于各段磁路磁场强度与磁路长度乘积之和, 即

$$\oint_l H dl = \sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum I = NI = F \quad (0.7)$$

式中, H_k 为第 k 段磁路的磁场强度; l_k 为第 k 段磁路的长度; $H_k l_k$ 为第 k 段磁路的磁压降; $F = NI$ 为作用在整个磁路上的磁动势, 就是电机或变压器励磁绕组的安匝数; N 为励磁绕组串联的匝数。

上式表明, 作用在整个磁路上的磁动势等于各段磁路磁压降之和。

将 $H = \frac{B}{\mu}$ 和 $B = \frac{\Phi}{A}$ 代入磁路的磁压降的表达式中, 则第 k 段磁路的磁压降可表示为

① $\odot$ 表示电流 I 垂直纸面流出, 方向为正; $\otimes$ 表示垂直纸面流入, 方向为负。对书中其他图中的物理量而言, $\odot$ 均表示垂直纸面向外, $\otimes$ 均表示垂直纸面向内。

$$H_k l_k = \frac{B_k}{\mu_k} l_k = \frac{\Phi_k}{\mu_k A_k} l_k = \Phi_k R_k \quad (0.8)$$

式中, $R_k = \frac{l_k}{\mu_k A_k}$ 为第 k 段磁路的磁阻。式 (0.8) 表示, 一段磁路的磁通乘以该段磁路的磁阻等于该段磁路的磁压降, 这与电路的欧姆定律 $U=RI$ 相似。

对于无分支磁路, 由于各段磁路的磁通是相等的, 式 (0.7) 所表示的全电流定律可以写成为

$$F=NI = \sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^n \Phi_k R_k = \Phi \sum_{k=1}^n R_k = \Phi R_z$$

也可写成

$$\Phi = \frac{F}{R_z} \quad (0.9)$$

上式表明, 磁路的磁通 Φ 等于作用在磁路上的总磁动势 F 除以磁路的总磁阻 R_z , 称为磁路的欧姆定律。式中 $R_z = \sum_{k=1}^n R_k$ 为各段磁路磁阻之和, 即磁路的总磁阻。在铁磁材料构成的磁路中, 由于磁路有饱和现象, R_z 不为恒值, 因此式 (0.9) 一般只用于定性分析, 不用于定量计算。

0.3.5 铁磁材料的特性

电机是以磁场为媒介, 利用电磁感应作用实现能量转换的。为了在较小的励磁电流作用下产生较强的磁场, 电机和变压器的磁路都用导磁性能良好的铁磁材料来制造。

与其他材料相比, 铁磁材料具有如下的独特性能。

1. 高导磁性能

所有非铁磁材料 (木材、铜、铝等) 的磁导率都接近真空的磁导率 μ_0 , 而铁磁材料的磁导率 μ 比 μ_0 大数百倍到数千倍, 如各种硅钢片的 μ 为 μ_0 的 6 000 ~ 7 000 倍。这一宝贵的特性, 使得在由铁磁材料构成的电机和变压器的磁路中, 通入较小的励磁电流就能产生较强的磁场, 提高了电机运行效率。

2. 饱和特性

在非铁磁材料中, 磁感应强度 B 与磁场强度 H 成正比, 即 $B=\mu_0 H$, B 与 H 成线性关系。在铁磁材料中, B 与 H 是非线性关系, 即 $B=f(H)$ 是一条曲线, 称为磁化曲线, 如图 0.8 所示。由磁化曲线可见: 随着 H 的增加, 在磁化开始的 Oa 段, B 缓慢增加; 之后, B 迅速增加, 如 ab 段; 再以后, B 的增加又缓慢下来, 如 bc 段所示; 过 c 点后, 当 H 再继续增加时, B 增加很小, 甚至几乎不增加。这种当 H 较大时, 随着 H 的增大 B 的增加缓慢甚至几乎不增加的现象称为饱和现象。铁磁物质具有饱和现象的特性称为饱和特性。由 $\mu=B/H$ 可作出 $\mu=f(H)$ 曲

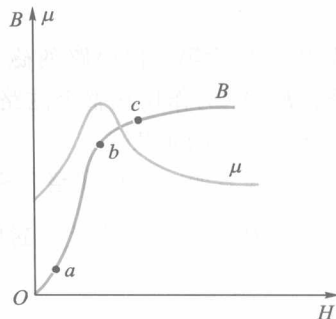


图 0.8 铁磁材料的磁化曲线