



普通高等教育“十二五”规划教材

电机学

(第二版)

曾令全 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

014061571



普通高等教育“十二五”规划教材

爱 敬 空 间

TM3-43
20-2

电机学

(第二版)

主编 曾令全
编写 李月玲 庄旭 赵妍
主审 胡虔生



TM3-43
20-2



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



北航 C1748057

173130510

内 容 提 要

全书共分为5篇24章,内容安排按照一根主线,即“磁路—变压器—交流绕组—异步电机—同步电机—直流电机”,从应用角度出发,分别论述了变压器、异步电机、同步电机和直流电机的基本结构、运行原理和运行性能等。侧重于基本概念和基本分析方法的分析 and 阐述,加大了解释性段落的编写。为了方便教学,本书各章配置了针对性强的例题和适量的思考题及习题;同时考虑到不同学校、不同专业的需要,对交直流电机的机械特性和起动、制动及调速原理与方法做了较多的介绍。本书重点突出基本理论和基本分析方法,密切联系实际,力求将学生普遍认为难以理解的知识通俗化,但不失严谨,以引导学生理解和掌握相关的内容,提高学生分析问题和解决问题的能力。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、自动化等专业的教学用书,也可供相关专业从业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/曾令全主编. —2版. —北京:中国电力出版社, 2014.8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-5961-1

I. ①电… II. ①曾… III. ①电机学—高等学校—教材
IV. ①TM3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第116498号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007年8月第一版

2014年8月第二版 2014年8月北京第五次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 20.5印张 492千字

定价 37.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书自2007年第一版出版以来,得到了许多兄弟院校的支持和广大读者的厚爱,我们陆续收到了读者给出的中肯建议和好的修改意见。根据这些建议和意见,结合我校在使用过程中发现的问题,对本书进行了修订。同时为了便于读者学习,在原有思考题与习题的基础上,将二者分开,并修改了题目的内容和数量,以便更好地配合教学和学生自学。最后在书末附上了习题参考答案。

本书的编写原则在于激发学生思考的积极性和学习的主动性,提高学生的自主学习能力。编写过程中侧重于基本概念和基本分析方法的分析和阐述,加大了解释性段落的编写。内容体系的安排强调一根主线,即“磁路—变压器—交流绕组—异步电机—同步电机—直流电机”,各部分相对独立又紧密联系成为一个有机的整体。每部分遵循“结构—原理—特性—应用”的顺序进行安排,构建了符合认知规律的内容体系。力求将学生普遍认为难以理解的知识浅显化但不失严谨,便于学生理解和掌握,从而提高学生分析问题和解决问题的能力。

本书可作为普通高等学校电气工程学科相关专业“电机学”课程的教材或教学参考书,也可供有关科技人员学习参考。

本书由东北电力大学曾令全任主编并统稿,李月玲、庄旭、赵妍参与编写。其中李月玲编写第一篇变压器部分,庄旭编写绪论和第三篇异步电机部分,赵妍编写第二篇交流电机的共同理论及第五篇的直流电机部分,其余由曾令全编写。在编写过程中,编者力求体现我校多年的电机学教学成果和教学经验,并吸纳各版电机学教材的优点。在本书再版之际,诚恳地期待着所有使用本书作为教材或参考书的教师、学生和读者都能慷慨赐教,提出您宝贵的意见和建议。

编 者



第一版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《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》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书是按相关专业《电机学》教学大纲编写的,包括绪论、变压器、交流电机的共同理论、异步电机、同步电机和直流电机。本书从应用的角度出发,分析变压器、异步电机、同步电机和直流电机四类主要电机的基本结构、工作原理、电磁关系和运行特性,为掌握本专业课程和为学习后续课程打下理论基础。考虑到不同学校、不同专业的需要,对交直流电机的机械特性和起动、制动及调速原理与方法做了较多的介绍。因此,本教材可作为电气工程及其自动化、自动化等专业本科四年“电机学”或“电机与拖动基础”课程的教学用书,也可供有关科技人员参考。

为适应 21 世纪市场经济和知识经济的需要,有利于学生素质和综合能力的提高,本教材重点突出基本理论和基本分析方法,密切联系实际,使学生通过本课程的学习,能够掌握电机的基本理论和基本分析方法,能够解决所遇到的各种实际问题。为便于学习,每章配有例题,章后附有小结和习题。

本书由东北电力大学曾令全、李月玲、庄旭、赵妍、李书权共同编写,曾令全任主编。李月玲编写第 1 篇变压器部分,庄旭编写绪论和第 3 篇异步电机部分,赵妍编写第 2 篇交流电机的共同理论问题和第 5 篇直流电机部分,李书权编写第 4 篇同步电机的 14、15、16、17 章,曾令全编写第 4 篇同步电机的 18、19、20 章,并对全书统稿。

本书由东南大学胡虔生老师担任主审,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

限于编者水平,不足和疏漏之处在所难免,希望广大读者批评指正。

编者

2007 年 6 月

目 录

前言

第一版前言

绪论	1
0.1 电机的一般介绍	1
0.2 电机学常用的物理概念和基本电磁定律	3
0.3 磁路	7
0.4 本课程的性质及学习方法	15
思考题	16
习题	16

第一篇 变 压 器

第1章 变压器的基本工作原理和结构	20
1.1 变压器的分类和基本结构	20
1.2 变压器的基本工作原理	23
本章小结	24
思考题	24
习题	24
第2章 变压器的运行原理	25
2.1 变压器的空载运行	25
2.2 变压器的负载运行	29
2.3 变压器参数的试验测定	36
2.4 标么值	40
2.5 变压器的运行性能	42
本章小结	45
思考题	45
习题	46
第3章 三相变压器	49
3.1 三相变压器的磁路系统	49
3.2 三相变压器的电路系统——绕组的联结组标号	50
3.3 三相变压器绕组连接方式及磁路系统对空载电动势波形的影响	53
3.4 变压器的并联运行	54
3.5 三相变压器的不对称运行	57
本章小结	64

思考题	65
习题	66
第 4 章 变压器的瞬变过程	68
4.1 空载合闸到电网	68
4.2 二次侧突然短路	70
本章小结	72
思考题	72
习题	73
第 5 章 特种变压器	74
5.1 三绕组变压器	74
5.2 自耦变压器	80
5.3 电压互感器和电流互感器	83
本章小结	85
思考题	85
习题	86

第二篇 交流电机的共同理论

第 6 章 交流绕组及其电动势	88
6.1 交流绕组的一般介绍	88
6.2 三相对称绕组的构成	90
6.3 正弦分布磁场下绕组的电动势	94
6.4 非正弦分布磁场下电动势的高次谐波及削弱方法	99
本章小结	102
思考题	103
习题	103
第 7 章 交流绕组的磁动势	105
7.1 单相绕组的磁动势	105
7.2 三相绕组的基波合成磁动势	111
7.3 三相绕组的谐波磁动势	114
7.4 三相绕组流过不对称电流时的磁动势	116
7.5 交流电机的主磁通和漏磁通	117
本章小结	118
思考题	119
习题	120

第三篇 异步电机

第 8 章 异步电机的结构和工作原理	122
8.1 异步电机的基本结构及其分类	122

8.2	异步电机的基本工作原理	125
8.3	异步电动机的型号及额定数据	127
	本章小结	129
	思考题	129
	习题	130
第9章	三相异步电动机的运行分析	131
9.1	转子不转时异步电动机的运行	131
9.2	转子旋转时异步电动机的运行	136
9.3	三相异步电动机参数的测定	144
	本章小结	146
	思考题	146
	习题	147
第10章	三相异步电动机的功率、转矩及特性	149
10.1	三相异步电动机的功率与转矩	149
10.2	三相异步电动机的机械特性	153
10.3	三相异步电动机的工作特性	157
	本章小结	159
	思考题	159
	习题	160
第11章	三相异步电动机起动与调速	162
11.1	三相笼型异步电动机起动	162
11.2	双笼型和深槽式三相异步电动机	167
11.3	绕线转子异步电动机的起动	168
11.4	三相异步电动机的调速	171
	本章小结	176
	思考题	176
	习题	176
第12章	三相异步电动机的特殊运行方式及特种异步电动机	178
12.1	三相异步电动机在不对称电压下运行	178
12.2	单相异步电动机	179
12.3	异步发电机	182
12.4	感应调压器	184
	本章小结	186
	思考题	186

第四篇 同 步 电 机

第13章	同步电机基本知识	188
13.1	同步电机的分类与基本结构	188

13.2	同步电机的励磁方式	191
13.3	同步电机的额定值	192
	本章小结	193
	思考题	193
	习题	194
第 14 章	同步发电机的运行原理	195
14.1	同步发电机的空载运行	195
14.2	对称三相负载时同步发电机的电枢反应	196
14.3	隐极同步发电机的电压方程、相量图和等效电路	199
14.4	凸极同步发电机的电压方程和相量图	202
	本章小结	206
	思考题	206
	习题	207
第 15 章	同步发电机的参数与运行特性	208
15.1	同步电机参数的测定	208
15.2	同步发电机的运行特性	212
	本章小结	215
	思考题	215
	习题	216
第 16 章	同步发电机的并联运行	218
16.1	并联投入的条件和方法	218
16.2	与大电网并联运行时同步发电机的功角特性	222
16.3	同步发电机与大电网并联运行时有功功率的调节和静态稳定	225
16.4	无功功率的调节和 U 形曲线	229
	本章小结	231
	思考题	231
	习题	232
第 17 章	同步电动机及同步补偿机	235
17.1	同步电动机	235
17.2	同步补偿机	239
	本章小结	240
	思考题	241
	习题	241
第 18 章	同步发电机的不对称运行	243
18.1	相序阻抗和相序等效电路	243
18.2	不对称稳态短路	246
18.3	负序和零序参数测定	249
18.4	不对称运行的影响	250

本章小结	251
思考题	251
习题	252
第 19 章 同步发电机的突然短路	253
19.1 超导回路磁链守恒原理	253
19.2 三相突然短路的分析	253
19.3 同步电机的暂态参数	256
19.4 同步发电机的突然短路电流及衰减时间常数	259
19.5 突然短路对电机的影响	265
本章小结	265
思考题	266
习题	266

第五篇 直 流 电 机

第 20 章 直流电机的工作原理和主要结构	270
20.1 直流电机的工作原理	270
20.2 直流电机的结构	271
20.3 直流电机的额定值	273
本章小结	274
思考题	274
习题	274
第 21 章 直流电机的电枢反应	275
21.1 直流电机的励磁方式及空载磁场	275
21.2 直流电机负载时的电枢反应	277
21.3 直流电机的电枢电动势和电磁转矩	279
本章小结	281
思考题	282
习题	282
第 22 章 直流发电机	283
22.1 直流发电机的基本方程式	283
22.2 直流发电机的运行特性	285
22.3 并励直流发电机的自励过程	287
本章小结	289
思考题	289
习题	289
第 23 章 直流电动机	291
23.1 直流电动机的基本方程式	291
23.2 直流电动机的工作特性	293

23.3	直流电动机的机械特性和运行稳定性	296
23.4	直流电动机的起动与调速	298
	本章小结	301
	思考题	301
	习题	301
第 24 章	直流电机的换向	303
24.1	换向过程的物理现象	303
24.2	换向火花及其产生原因	304
24.3	改善换向的方法	305
	本章小结	307
	思考题	307
	习题参考答案	308
	参考文献	314

绪 论

0.1 电机的一般介绍

一、电机的定义

电机是生产、传输、分配及应用电能的主要设备,可泛指借助电磁感应的基本作用原理,进行机电能量转换,如实施电能生产、传输、使用和电能特性变换的装置。

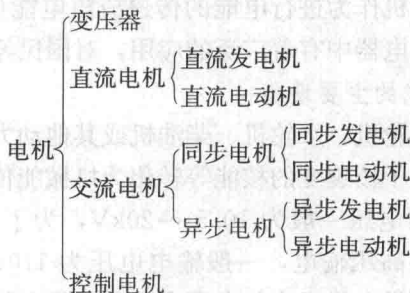
二、电机的主要类型

电机是利用电磁感应原理工作的机械,它应用广泛、种类繁多、性能各异,分类方法也很多。电机主要有两种常用的分类方法。

(1) 按功能用途分类。电机可分为发电机、电动机、变压器和控制电机四大类。其中发电机将机械能转换为电能,电动机则将电能转换为机械能。电动机作为拖动各种生产机械的动力,是国民经济各部门应用最多的动力机械,也是最主要的用电设备,各种电动机所消耗的电能约占全国总发电量的60%~70%。而变压器的作用是将一种电压等级的电能转换为另一种电压等级的电能。控制电机则主要用于信号的变换与传递,在各种自动化控制系统中作为多种控制元件使用,如国防工业、数控机床、计算机外围设备、机器人等均大量使用控制电机。

(2) 按照电机的结构或转速分类。电机可分为变压器和旋转电机,其中变压器为静止电机。根据电源电流的不同,旋转电机又分为直流电机和交流电机两类。交流电机又分为同步电机和异步电机两类:同步电机转速恒为同步转速,电力系统中的发电机几乎都是同步电机;异步电机处于电动机状态运行时转速低于同步转速,当处于发电机运行状态时转速高于同步转速,异步电机主要用作电动机。需要指出的是,发电机和电动机只是电机的两种运行方式,其自身是可逆的。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。

综合以上两种分类方法,可归纳如下:



三、电机中所用的材料

电机一般是以磁场为耦合场,利用电磁感应和电磁力的作用而实现能量转换的。因此,电机中所用的材料可分为以下四类。

1. 导电材料

导电材料用在电机的电路系统中,最常用是铜。在导电材料中,虽然铜的导电率不如

银,但铜比银的价格低得多。同时铜的抗锈能力比钢好,且容易焊接,因此,一般电机的绕组都用铜线绕制而成。

铝也是常用的导电材料,其重要性仅次于铜。铝在输电线路应用很广,且小型异步电动机的转子绕组也常用铝模铸成,称铸铝转子。另外,还可用铝线绕制变压器的绕组和小型异步电动机的定子绕组。

2. 导磁材料

导磁材料用在电机的磁路系统中。电机中最重要的导磁材料是铸铁、铸钢和各种型号的硅钢片。其中铸铁的导磁性能较差,应用较少;各种成分的铸钢的导磁性能较好,应用较广,但主要用于传导不随时间变化的磁通;为了减少交变磁通在铁心中的电能损耗,导磁材料用含硅的电工钢片,也称硅钢片。

3. 绝缘材料

电机和变压器中,使用大量不同等级的绝缘材料,用来实现导体之间或导体与铁心之间的绝缘。电机中的绝缘材料,由于运行中除受电和磁的影响外,还受到热和力的作用。因此,绝缘材料不但要有介电、耐温、耐潮的性能,还要有足够的机械强度。

电机运行过程中,绝缘材料长时间在热的作用下,会逐渐老化,以至失去它的机械强度和绝缘能力。由于绝缘材料的使用寿命受温度影响很大,为了保证电机在一定年限(一般为20年)内可靠运行,对各种绝缘材料都规定了最高允许温度。实验表明,在空气中工作的A级绝缘,若其工作温度连续保持并超过正常允许温度 $8\sim 10^{\circ}\text{C}$,绝缘材料的使用寿命期限要平均缩短一半。其他等级的绝缘材料也有类似特性。绝缘材料按绝缘等级的不同可分为下列六个等级:A级绝缘最高允许温度为 105°C ,E级为 120°C ,B级为 130°C ,F级为 155°C ,H级为 180°C ,C级为 180°C 以上。

4. 结构材料

结构材料用于制造传递或承受机械应力的部件,要求机械强度高、加工方便、质量轻,常用的材料有铸铁、铸钢、钢板、铝合金及工程塑料。

四、电机在国民经济中的作用

由于电能适宜于大量生产、集中管理、远距离传输、灵活分配及自动控制,因而电能成为现代最常用的一种能源。电机作为进行电能的传递或机电能量转换的主要机械,在工业、农业、国防、交通运输和家用电器中有着广泛的应用,对国民经济有着重要的作用。

1. 生产、传输和分配电能的主要设备

在发电厂中,发电机由汽轮机、水轮机、柴油机或其他动力机械带动,这些原动机将燃料燃烧的热能、水的位能、原子核裂变的核能等转化为机械能传给发电机,由发电机将机械能转化为电能。发电机发出的电压一般为 $10.5\sim 20\text{kV}$,为了减少远距离输电中的能量损耗、经济地传输电能,常采用高压输电,一般输电电压为 $110、220、330、500、750\text{kV}$ 或更高,因此采用升压变压器将发电机发出的电压升高再进行电能的传输。电能传输到各用电区,为安全使用电能,各用电设备又需要不同等级的低电压,因此还需要各种电压等级的降压变压器将电压降低,然后供给各用户使用。

在电力工业中,发电机和变压器是发电厂和变电站的主要设备,简单的电力系统示意图如图0-1所示。

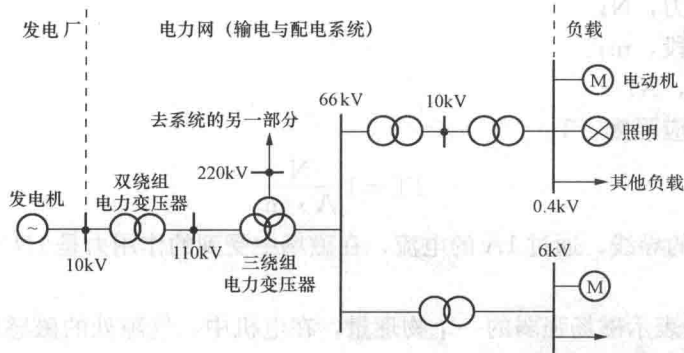


图 0-1 简单电力系统示意图

2. 各种生产机械和装备的动力设备

在机械、冶金、石油和化学工业中，广泛应用电动机驱动各种生产机械和装备，一个现代化的企业需要几百台以至几万台各种不同型号的电动机；在交通运输中需要的各种专用电机，如汽车电机、船用电机和航空电机，以及在电车、电气机车中需要的具有优良起动性能和调速性能的牵引电动机，特别是近年来电动汽车和以直线电动机为动力的磁悬浮高速列车的开发，极大地推动了新型电动机的开发；同时随着农业现代化发展，电力排灌、谷物和农副产品加工，也需要电动机拖动；在医疗器械、家用电器等的驱动设备也都采用了各种交、直流电动机。

3. 自动控制系统中的重要元件

随着科学技术的发展，工农业和国防设施的自动化程度越来越高。各种各样的控制电机被用作执行、检测、放大和解算元件。这类电机一般功率较小，品种繁多，用途各异，控制精度要求较高。例如火炮和雷达的自动定位，人造卫星发射和飞行的控制，舰船方向舵的自动操纵，机床加工的自动控制和显示、自动记录仪表、医疗设备、录像、摄影和现代家用电器等的运行控制、检测或记录显示等，都用到了控制电机。

社会的发展和科学技术的进步，特别是近年来超导技术、磁流体发电技术、电子与计算机技术的迅猛发展，为新的电机理论和电机技术的发展开辟了广阔的前景。

0.2 电机学常用的物理概念和基本电磁定律

一、常用的物理概念

为学习本课程，先复习几个常用的物理概念和定律。

1. 磁感应强度（或磁通密度） \vec{B}

在永磁体及通电导体周围存在磁场。磁场最基本的特性是对场域中的载流导体有力的作用，研究磁场的强弱就是从分析载流导体在磁场中受力情况着手。当载流导线段 Δl 与磁力线相垂直时，作用在该导线上的电磁力为

$$\Delta F = BI\Delta l$$

所以

$$B = \frac{\Delta F}{I\Delta l} \quad (0-1)$$

式中 F ——电磁力, N;
 Δl ——导线段, m;
 I ——电流, A;
 B ——磁感应强度, T。

$$1\text{T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

也就是说, 1m 长的导线, 通过 1A 的电流, 在磁场中受到的作用力是 1N 时, 磁感应强度就是 1T。

磁感应强度是表示磁场强弱的一个物理量, 在电机中, 气隙处的磁感应强度约为 0.4~0.8T, 铁心中的磁感应强度约为 1~1.8T。

人们采用磁感应线或称磁力线来形象地描绘磁场的强弱。磁力线是无头无尾的闭合曲线。图 0-2 中画出了直线电流、圆电流及螺线管电流产生的磁力线。

磁感应强度 \vec{B} 与产生它的电流之间关系用毕奥—萨伐尔定律描述, 磁力线与电流的方向满足右手螺旋关系, 如图 0-3 所示。

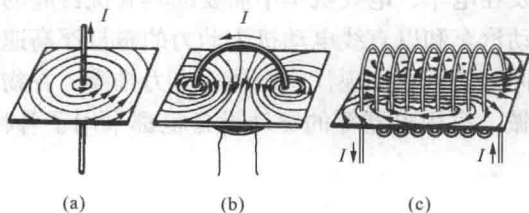


图 0-2 电流磁场中的磁力线

(a) 直线电流; (b) 圆电流; (c) 螺线管电流

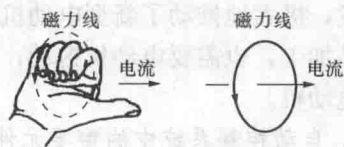


图 0-3 磁力线与电流的

右手螺旋关系

2. 磁通量 (或磁通) Φ

磁感应强度 \vec{B} 描述的只是空间每一点的磁场, 如果要描述一个给定面上的磁场, 就要引入另一个物理量, 叫磁通量。穿过某一截面 A 的磁感应强度 \vec{B} 的通量, 即穿过截面 A 的磁力线根数, 称为磁通量, 简称磁通, 用 Φ 表示, 即

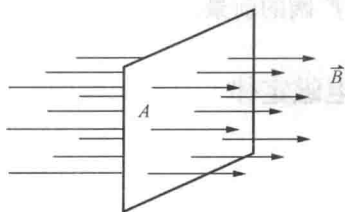


图 0-4 均匀磁场中的磁通

$$\Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

在均匀磁场中, 如果截面 A 与 \vec{B} 垂直, 如图 0-4 所示, 则磁通 Φ 为

$$\Phi = BA \text{ 或 } B = \Phi/A \quad (0-2)$$

在国际单位制中, B 的单位是 T, A 的单位是 m^2 , Φ 的单位便是 Wb。

3. 磁导率 μ

通电线圈所产生磁场强弱与线圈放入的介质有关。当线圈放入某类介质时, 磁场大为增强; 而当放入另一类介质时, 磁场可能略有削弱。表示物质这种磁性质的一个物理量叫做磁导率, 用符号 μ 来表示。

物质根据磁性质的不同, 可以分为三类: 一类叫顺磁性物质, 如空气、铝等, 它的磁导

率比真空的磁导率略大；另一类叫逆磁性物质，如氢、铜等，它的磁导率略小于真空的磁导率；还有一类是铁磁性物质，如铁、钢、钴、镍等，它们的磁导率是真空磁导率的几百倍甚至几千倍，并且与磁场强弱有关，不是一个常数。

磁导率的单位是 H/m，真空磁导率为一个常数， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。对电机常用的铁磁材料来说， μ_{Fe} 为 (2000~6000) μ_0 。

4. 磁场强度 \vec{H}

计算导磁物质中的磁场时，引入辅助物理量磁场强度 \vec{H} ，它与磁通密度 \vec{B} 的关系为

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (0-3)$$

如果 B 的单位是 T， μ 的单位是 H/m，则 H 的单位是 A/m。由于磁动势的单位是 A，因此从 H 的单位可以知道，磁场强度 H 就是单位长度磁路上所消耗的磁动势，或单位长度磁路上的磁压降。

二、基本电磁定律

各种电机的运行原理都以基本电磁定律为出发点，现分别阐述如下。

1. 全电流定律

磁场是由电流的激励而产生的，即磁场与产生该磁场的电流同时存在，全电流定律就是描述这种电磁联系的基本电磁定律。设空间有 n 根载流导体，导体中的电流分别为 I_1 、 I_2 、 \dots 、 I_n ，则沿任意可包含所有这些导体的闭合路径 \vec{l} ，磁场强度 \vec{H} 的线积分等于该闭合路径所包围的电流的代数和，即

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (0-4)$$

这就称为安培环路定律或全电流定律。在式 (0-4) 中，电流的符号由右手螺旋法则确定，即当导体电流的方向与积分路径的方向满足右手螺旋关系时，电流取正值，否则取负值。例如，在图 0-5 中，虽有积分路径 \vec{l} 和 \vec{l}' ，但其中包含的载流导体相同，积分结果必然相等，并且就是电流 I_1 、 I_2 和 I_3 的代数和。依右手螺旋法则， I_1 和 I_2 应取正号，而 I_3 应取负号。写成数学表达式就是

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_{l'} \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_1 + I_2 - I_3$$

即积分与路径无关，只与路径内包含的导体电流的大小和方向有关。

2. 电磁力定律

磁场对电流的作用是磁场的基本特征之一。实验表明，将长度为 l 的导体置于磁场 \vec{B} 中，通入电流 i 后，导体会受到力的作用，这个力称为电磁力，其计算公式为

$$\vec{f} = \sum d\vec{f} = i \sum d\vec{l} \times \vec{B}$$

在均匀磁场中，若载流直导体与 \vec{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

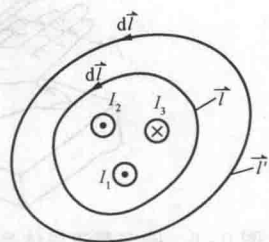


图 0-5 说明全电流定律

$$f = Bli \quad (0-5)$$

在电机学中,习惯用左手定则确定 \vec{f} 的方向,即把左手伸开,大拇指与其他四指成 90° ,如图 0-6 所示,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。

3. 电磁感应定律

变化的磁场会产生电场,在导体中产生感应电动势,这就是电磁感应现象。在电机中,电磁感应现象主要表现在两个方面:① 导体与磁场有相对运动,导体切割磁力线时,导体内产生感应电动势,称为运动电动势;② 线圈中的磁通变化时,线圈内产生感应电动势,称为变压器电动势。下面对这两种情况下产生的感应电动势作定性与定量的描述。

(1) 运动电动势。长度为 l 的直导体在磁场中与磁场相对运动,导体切割磁力线的速度为 \vec{v} ,导体处的磁感应强度为 B 时,若磁场均匀,且直导体 \vec{l} 、磁感应强度 \vec{B} 、导体相对运动方向 \vec{v} 三者互相垂直,则导体中感应电动势为

$$e = Blv \quad (0-6)$$

在电机学中,习惯上用右手定则确定电动势 e 的方向,即把右手手掌伸开,大拇指与其他四指成 90° 角,如图 0-7 所示,如果让磁力线指向手心,大拇指指向导体运动方向,则其他四指的指向就是导体中感应电动势的方向。

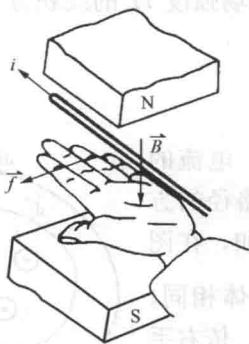


图 0-6 确定载流导体受力方向的左手定则

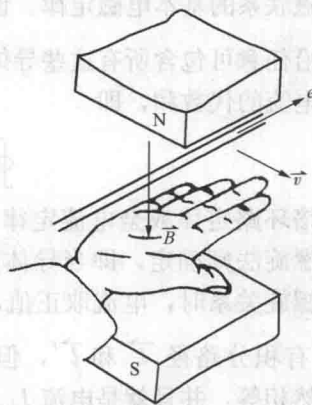


图 0-7 确定感应电动势方向的右手定则

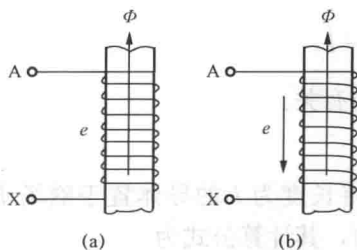


图 0-8 磁通及其感应电动势
(a) 线圈示意图; (b) 按右手螺旋关系 e 和 Φ 的正方向

(2) 变压器电动势。如图 0-8 所示,匝数为 N 的绕组环链着磁通 Φ ,当 Φ 变化时,线圈 AX 两端产生感应电动势 e ,其大小与线圈匝数及磁通变化率成正比,方向由楞次定律决定。当 Φ 增加时,即 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$,A 点为高电位,X 点为低电位;当 Φ 减小时,即 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$,根据楞次定律,X 点为高电位,A 点为低电位。为了写成数学表达式,首先要规定电动势 e 的正方向,一般采用右手螺旋法则确定。

按右手螺旋关系规定 e 和 Φ 的正方向,如图 0-8 (b)