

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANJIXUE

电机学

曾令全 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHU

TM3/93

2007

DIANJIXUE
电机学

主编 曾令全
编写 李月玲 庄旭
赵妍 李书权
主审 胡虔生



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书共分为5篇25章，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、运行性能。同时为了方便教学，有利于学生的能力培养，各章配置了针对性强的例题和适量的思考题及习题。

本书可作为普通高等院校电气工程及其自动化、自动化及其相关专业电机学课程教材，也可作为高职高专和函授教材，同时可供工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/曾令全主编. —北京: 中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5859 - 8

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 112391 号

中国电力出版社出版、发行

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

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007年8月第一版 2007年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 19.25印张 464千字

印数 0001—3000册 定价 28.80元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
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

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。

由于编者水平有限,缺点和错误在所难免,希望广大读者批评指正。

编者

2007 年 6 月

目 录

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
习题及思考题	16

第一篇 变 压 器

第1章 变压器的基本工作原理和结构	18
1.1 变压器的分类和基本结构	18
1.2 变压器的基本工作原理	21
本章小结	22
习题及思考题	23
第2章 变压器运行原理	24
2.1 变压器的空载运行	24
2.2 变压器的负载运行	28
2.3 变压器参数的测定	35
2.4 标么值	38
2.5 变压器的运行性能	40
本章小结	43
习题及思考题	44
第3章 三相变压器	46
3.1 三相变压器的磁路系统	46
3.2 三相变压器的电路系统——绕组的连接组别	47
3.3 三相变压器绕组连接法和磁路系统对空载电动势波形的影响	50
3.4 变压器的并联运行	51
3.5 三相变压器的不对称运行	54
本章小结	61
习题及思考题	62
第4章 变压器的瞬变过程	65
4.1 空载合闸到电网	65

4.2 二次侧突然短路	67
本章小结	69
习题及思考题	69
第5章 特种变压器	71
5.1 三绕组变压器	71
5.2 自耦变压器	77
5.3 电压互感器和电流互感器	80
本章小结	81
习题及思考题	82

第二篇 交流电机的共同理论

第6章 交流绕组的电动势	83
6.1 交流绕组的一般介绍	83
6.2 三相对称绕组的构成	86
6.3 正弦分布磁场下绕组的电动势	91
6.4 非正弦分布磁场下电动势的高次谐波及削弱方法	96
本章小结	99
习题及思考题	100
第7章 交流绕组的磁动势	101
7.1 单相绕组磁动势	101
7.2 三相绕组的基波合成磁动势	107
7.3 三相绕组的谐波磁动势	110
7.4 三相绕组流过不对称电流时的磁动势	112
7.5 交流电机的主磁通和漏磁通	114
本章小结	115
习题及思考题	115

第三篇 异步电机

第8章 异步电机的结构和工作原理	117
8.1 异步电机的基本结构及其分类	117
8.2 异步电机的基本工作原理	121
8.3 异步电动机的型号及额定数据	123
本章小结	125
习题及思考题	125
第9章 异步电动机的运行分析	127
9.1 转子不转时异步电动机的运行	127
9.2 转子旋转时异步电动机的运行	132

本章小结	142
习题及思考题	143
第 10 章 三相异步电动机的功率、转矩及特性	145
10.1 三相异步电动机的功率与转矩	145
10.2 三相异步电动机机械特性	149
10.3 三相异步电动机工作特性	153
10.4 三相异步电动机参数的测定	155
本章小结	157
习题及思考题	157
第 11 章 三相异步电动机起动、制动与调速	159
11.1 三相鼠笼式异步电动机起动	159
11.2 双鼠笼式和深槽式三相异步电动机	164
11.3 绕线式异步电动机的起动	165
11.4 三相异步电动机的调速	168
11.5 异步电动机的制动	172
本章小结	173
习题及思考题	173
第 12 章 三相异步电动机在不对称电压下运行	176
12.1 三相异步电动机在不对称电压下运行	176
12.2 单相异步电动机	177
本章小结	180
习题及思考题	180
第 13 章 特种异步电机	182
13.1 异步发电机	182
13.2 感应调压器	184
本章小结	185
习题及思考题	186

第四篇 同 步 电 机

第 14 章 同步电机的结构	187
14.1 同步电机的基本结构	187
14.2 同步电机的励磁方式	190
14.3 同步电机的额定值	192
本章小结	192
习题及思考题	193
第 15 章 同步发电机的运行原理	194
15.1 同步发电机的空载运行	194

15.2	对称三相负载时同步发电机的电枢反应	195
15.3	隐极同步发电机的电压方程、相量图和等效电路	198
15.4	凸极同步发电机的电压方程和相量图	200
	本章小结	204
	习题及思考题	204
第 16 章	同步发电机的运行特性	206
16.1	同步电机参数的测定	206
16.2	同步发电机的运行特性	210
	本章小结	213
	习题及思考题	213
第 17 章	同步发电机的并联运行	215
17.1	并联投入的条件和方法	215
17.2	与电网并联运行时同步发电机的功角特性	219
17.3	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	221
17.4	无功功率的调节和 U 形曲线	225
	本章小结	228
	习题及思考题	228
第 18 章	同步电动机及同步补偿机	230
18.1	同步电动机	230
18.2	同步补偿机	234
	本章小结	235
	习题及思考题	235
第 19 章	同步发电机的不对称运行	237
19.1	相序阻抗和等效电路	237
19.2	不对称稳态短路	240
19.3	负序和零序参数测定	243
19.4	不对称运行的影响	244
	本章小结	245
	习题及思考题	245
第 20 章	同步发电机的突然短路	246
20.1	超导回路磁链守恒原理	246
20.2	三相突然短路的分析	246
20.3	同步电机的暂态参数	249
20.4	同步发电机的突然短路电流及衰减时间常数	252
20.5	突然短路对电机的影响	258
	本章小结	258
	习题及思考题	258

第五篇 直 流 电 机

第 21 章 直流电机的工作原理和主要结构	260
21.1 直流电机的工作原理	260
21.2 直流电机的结构	261
21.3 直流电机的额定值	263
本章小结	264
习题及思考题	264
第 22 章 直流电机的电枢反应	265
22.1 直流电机的空载磁场	265
22.2 直流电机负载时的电枢反应	267
22.3 直流电机的电枢电动势和电磁转矩	269
本章小结	271
习题及思考题	272
第 23 章 直流发电机	273
23.1 直流发电机的基本方程式	273
23.2 直流发电机的运行特性	275
23.3 并励直流发电机的自励过程	277
本章小结	279
习题及思考题	279
第 24 章 直流电动机	280
24.1 直流电动机的基本方程式	280
24.2 直流电动机的工作特性	283
24.3 直流电动机的机械特性和运行稳定性	285
24.4 直流电动机的起动与调速	287
本章小结	290
习题及思考题	290
第 25 章 直流电机的换向	292
25.1 换向过程的物理现象	292
25.2 换向火花及其产生原因	293
25.3 改善换向的方法	294
本章小结	296
习题及思考题	296
参考文献	297

绪 论

0.1 电机的一般介绍

一、电机的定义

电能在现代化工农业生产、交通运输、科学技术、信息传输、国防建设以及日常生活等各个领域获得了极为广泛的应用。而电机是生产、传输、分配及应用电能的主要设备。所谓电机可泛指借助于电磁感应的基本作用原理,进行机电能量变换,如实施电能生产、传输、使用和电能特性变换的装置。

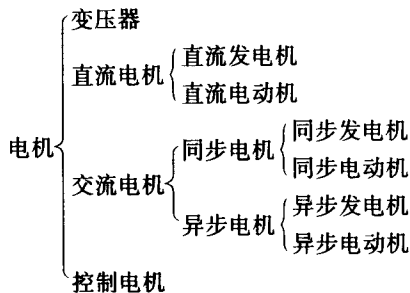
二、电机的主要类型

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:可分为发电机、电动机、变压器和控制电机四大类。发电机是将机械能转换为电能。电动机则是将电能转换为机械能,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%。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、机器人和音像设备等均大量使用控制电机。

(2) 按照电机的结构或转速分类:可分为变压器和旋转电机。变压器为静止不旋转电机。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动形式,其自身是可逆的。也就是说,同一台电机,即可作发电机运行,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机械。因此,电机中所用的材料可分为以下四类。

1. 导电材料

作为电机中的电路系统。电机中最常用的导电材料是铜。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。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，小型异步电动机的转子绕组常用铝模铸成，称铸铝转子。也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

作为电机中的磁路系统。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。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。对于交变磁通为了减少铁心中的损耗，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，用于导体之间或导体与铁心之间的绝缘。电机中的绝缘材料，由于运行中除受电的作用外，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。

电机运行中，长时间在热的作用下，绝缘材料会逐渐老化，以至逐渐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

用于制造传递或承受机械应力的部件，要求材料的机械强度好、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. 电能在生产、传输和分配中的主要设备

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、原子核裂变的原子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，应采用高压输电，一般输电电压为110、220、330、500、750kV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。

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，如图0-1所示。

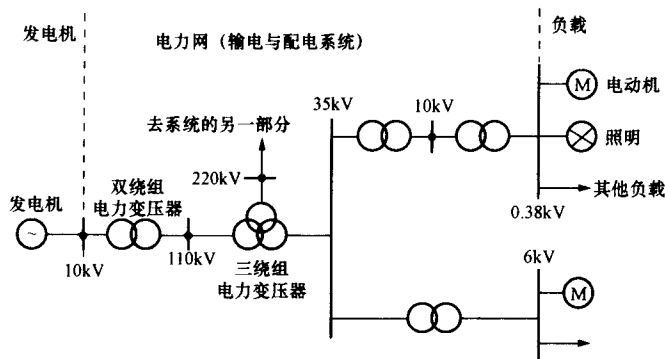


图 0-1 简单的电力系统示意图

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的电动机；在交通运输中需要各种专用电机，如汽车电机、船用电机和航空电机，至于电车、电气机车需要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，推动了新型电动机的开发；随着农业现代化发展，电力排灌、谷物和农副产品加工，都需要电动机拖动；在医疗器械、家用电器等的驱动设备都采用了各种交、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，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、录音、录像、摄影和现代家用电器设备等的运行控制、检测或记录显示等。

随着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。

为了形象地描绘磁场, 人们采用磁感应线或称磁力线, 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的关系用毕奥—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。

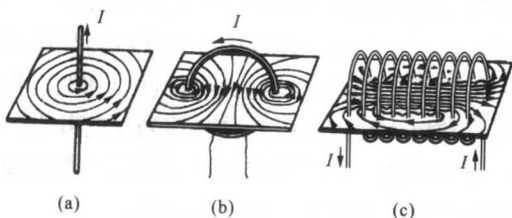


图 0-2 电流磁场中的磁力线
 (a) 导线; (b) 线圈; (c) 螺线管

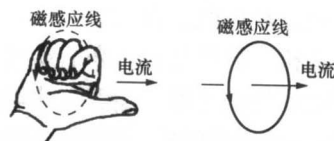


图 0-3 磁力线与电流的
 右手螺旋关系

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, 简称磁通。穿过某一截面 A 的磁感应强度 \vec{B} 的总量, 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

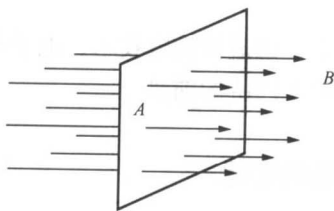


图 0-4 均匀磁场中的磁通

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

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 变为

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

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 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。对电机常用的铁磁材料来说,

μ_{Fe} 约为 $(2000 \sim 6000) \mu_0$ 。

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} , 它与磁密 \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 、 $I_2 \cdots I_n$, 则沿任意可包含所有这些导体的闭合路径 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, 即为

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

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。如在图 0-5 中, 虽有积分路径 l 和 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。写成数学表达形式就是

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

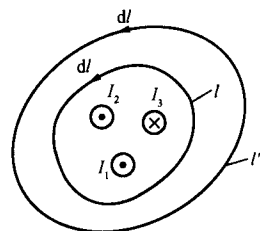


图 0-5 说明全电流定律

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, 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 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

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

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, 使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, 称之为运动电动势; 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 v ，导体处的磁感应强度为 B 时，若磁场均匀，且直导体 l 、磁感应强度 B 、导体相对运动方向 v 三者互相垂直，则导体中感应电动势为

$$e = Blv \tag{0-6}$$

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。

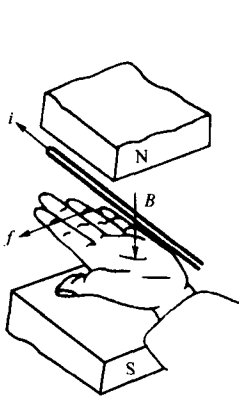


图 0-6 确定载流导体受力方向的左手定则

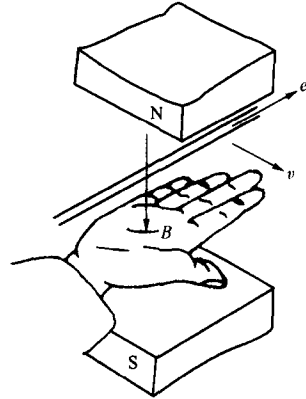


图 0-7 确定感应电动势方向的右手定则

(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，有以下两种方法。

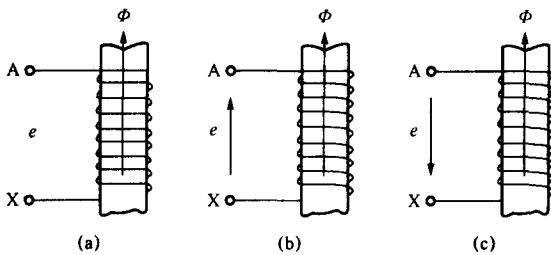


图 0-8 磁通及其感应电动势

- (a) 线圈示意图；
- (b) 按左手螺旋关系 e 和 Φ 的正方向；
- (c) 按右手螺旋关系 e 和 Φ 的正方向

1) 按左手螺旋关系规定 e 和 Φ 的正方向。如图 0-8 (b) 所示，此时 e 的正方向从 X 指向 A。与实际情况比较，当 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ 时，实际上是 A 点为高电位，X 点为低电位，而规定的 e 的正方向与之相同，这样 $e > 0$ ；当 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ 时，实际上是 A 点为低电位，X 点为高电位，而规定的 e 的方向与之正好相反，因此 $e < 0$ 。也就是

说， $\frac{d\Phi}{dt}$ 与 e 的符号是一致的，同时为正或同时为负，这样 e 和 Φ 之间的关系就应写为

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} \tag{0-7}$$

2) 按右手螺旋关系规定 e 和 Φ 的正方向。如图 0-8 (c) 所示, 此时 e 的正方向从 A 指向 X。与实际情况比较, 当 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ 时, 实际上是 A 点为高电位, X 点为低电位, 而规定的 e 的正方向与实际方向相反, 此时 $e < 0$; 同理, 当 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ 时, $e > 0$ 。这就是说, $\frac{d\Phi}{dt}$ 与 e 总是符号相反, e 和 Φ 之间的关系就应写为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-8)$$

以上两种不同正方向的规定下, 数学式的符号不同。

本教材采用图 0-8 (c) 的正方向表示方法。

0.3 磁 路

一、磁路的基本定律

如同把电流流过的区域称为电路一样, 也可以把磁通通过的区域称为磁路。但是, 电路和磁路只是形式上的相似, 本质上是有所区别的。在电路中有真正的带电粒子在作定向运动, 而在磁路中却没有什么东西沿着闭合回路流动。对电来讲, 存在电的导体和绝缘体, 电流可以集中在导体中流过, 可是不存在磁的导体和磁的绝缘体。因此, 磁路概念并不像电路概念那样简明。不过由于铁磁材料的磁导率很大, 能使绝大部分磁通集中在一定的回路中通过, 因此从工程计算的角度来看, 为了简单方便, 将磁场的问题简化成磁路来处理, 在大多数情况下, 准确度已经足够了。在进行磁路计算中, 往往要应用到下面几个定律。

1. 磁路欧姆定律

图 0-9 是一个单框铁心磁路的示意图。铁心上绕有 N 匝线圈, 通以电流 i , 产生的沿铁心闭合的主磁通为 Φ 和沿空气闭合的漏磁通 Φ_o 。设铁心截面积为 A , 平均磁路长度为 l , 铁磁材料的磁导率为 μ (μ 不是常数, 随磁感应强度 B 变化)。

假设漏磁可以不考虑 (即令 $\Phi_o = 0$, 视单框铁心为无分支磁路), 并且认为磁路 l 上的磁场强度 H 处处相等, 于是, 根据全电流定律有

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = Hl = Ni \quad (0-9)$$

因 $H = B/\mu$, 而 $B = \Phi/A$, 故可由式 (0-9) 推得

$$\Phi = \frac{Ni}{l/(\mu A)} = \frac{F}{R_m} = \Lambda_m F \quad (0-10)$$

式中 F ——磁动势, $F = Ni$;

R_m ——磁阻, $R_m = \frac{l}{\mu A}$;

Λ_m ——磁导, $\Lambda_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu A}{l}$ 。

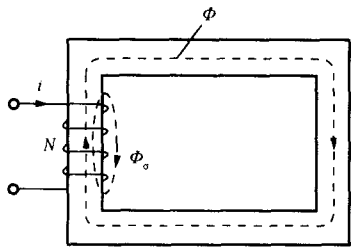


图 0-9 单框铁心磁路示意图

式(0-10)即所谓磁路欧姆定律。它表明,磁动势 F 愈大,所激发的磁通量 Φ 会愈大;而磁阻 R_m 愈大,则可产生的磁通量 Φ 会愈小(磁阻 R_m 与磁导率 μ 成反比, $\mu_0 \ll \mu_{Fe}$,表明 $R_{m0} \gg R_{mFe}$,故分析中可忽略 Φ_0)。这与电路欧姆定律 $I=U/R=UG$ 是一致的,并且磁通与电流、磁动势与电动势、磁阻与电阻、磁导和电导保持一一对应关系。由此可推断,磁路基尔霍夫第一、第二定律必定与电路基尔霍夫第一、第二定律具有相同形式。

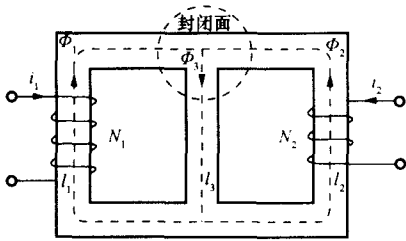


图0-10 有分支磁路示意图(忽略漏磁)

2. 磁路的基尔霍夫第一定律

在磁路计算中,当磁路结构比较复杂时,单用磁路欧姆定律是不够的,还须应用磁路基尔霍夫第一、第二定律进行分析。下面以图0-10的最简单有分支磁路为例展开讨论。

磁路计算时,一般都根据材料、截面积不同而将磁路进行分段。图0-10所示主磁路可分为三段(下标分别为1、2、3),各段的磁动势、主磁通、磁导率、截面积、平均长度分别定义见表0-1。

表0-1

各物理量的定义

分段序号	磁动势	主磁通	磁导率	截面积	路径长
1	$F_1 = N_1 i_1$	Φ_1	μ_1	A_1	l_1
2	$F_2 = N_2 i_2$	Φ_2	μ_2	A_2	l_2
3	$F_3 = 0$	Φ_3	μ_3	A_3	l_3

完全忽略各部分的漏磁作用,在主磁通 Φ_1 、 Φ_2 和 Φ_3 的汇合处作一个封闭面(相当于电路中的一个节点),仿照电路中的基尔霍夫第一定律 $\sum i = 0$ (即电流连续性原理),由磁通连续性原理 $\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$ 有

$$\sum \Phi = 0 \quad (0-11)$$

这就是磁路基尔霍夫第一定律。

对应于图0-10中的磁通假定正方向,式(0-11)可改写为

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_3$$

综上,磁路基尔霍夫第一定律表明,进入或穿出任一封闭面的总磁通量的代数和等于零,或穿入任一封闭面的磁通量恒等于穿出该封闭面的磁通量。

3. 磁路基尔霍夫第二定律

仍以图0-10为例,先考察由路径 l_1 和 l_3 构成的闭合磁路。设漏磁可以忽略,沿 l_1 和 l_3 的均匀磁场强度分别为 H_1 和 H_3 ,则由全电流定律有

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N_1 i_1 = F_1 = H_1 l_1 + H_3 l_3 \quad (0-12)$$

而 $H_1 = B_1/\mu_1 = \frac{\Phi_1}{\mu_1 A_1}$, $H_3 = B_3/\mu_3 = \frac{\Phi_3}{\mu_3 A_3}$, 故得