



高职高专“十二五”规划教材

# 电机与拖动技术基础

主 编 王石莉 张卫华  
副主编 张 晶 徐荣丽  
主 审 刘永华



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



配有课件



高职高专“十二五”规划教材

# 电机与拖动技术基础

主 编 王石莉 张卫华  
副主编 张 晶 徐荣丽  
主 审 刘永华

北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书以“模块+专题(项目)”的形式讲解了电机与拖动技术。全书共12个模块,每个模块由相应的专题或项目组成。模块1为电磁基本理论的知识。模块2为变压器,介绍变压器的结构和工作原理、三相变压器和仪用变压器。模块3~4为直流电动机,介绍直流电动机的结构和工作原理、型号、工作特性及电力拖动等方面的知识。模块5~6为三相异步电动机,介绍三相异步电动机的结构和工作原理、型号、工作特性和电力拖动等方面的知识。模块7~11分别介绍单相异步电动机、同步电机、步进电动机、伺服电动机和其他微特电动机。模块12介绍电动机的选用。

本书可作为高职高专院校机电类、电气自动化类专业的教材,或作为职业技术培训教材,也可作为从事机电、自动化技术的工程技术人员的参考用书。

本书配有教学课件供任课教师参考,有需要者请发邮件至 [goodtextbook@126.com](mailto:goodtextbook@126.com) 或致电 010-82317037 申请索取。

### 图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动技术基础 / 王石莉,张卫华主编. -- 北

京:北京航空航天大学出版社,2012.8

ISBN 978-7-5124-0810-4

I. ①电… II. ①王… ②张… III. ①电机—基本知识  
②电力传动—基本知识 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 091921 号

版权所有,侵权必究

### 电机与拖动技术基础

主 编 王石莉 张卫华

副主编 张 晶 徐荣丽

主 审 刘永华

责任编辑 张军香 刘福军 朱红芳

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82317026

读者信箱:[goodtextbook@126.com](mailto:goodtextbook@126.com) 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:15.75 字数:400千字

2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 978-7-5124-0810-4 定价:29.00元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

# 前 言

“电机与拖动技术基础”是机电一体化专业、数控技术专业、自动控制专业的主干课程之一。本书根据高职高专人才培养目标,结合专业教育教学改革与实践经验,本着“工学结合、‘教学做’一体化”的原则而编写。

本书以模块为单元,采用专题(项目)的形式,将知识贯穿于各模块中。内容安排上,在兼顾常用直流电机和交流电机等普通电机知识的基础上,详细介绍新兴的步进电机和伺服电机等微特电机。内容由浅入深,层次分明,通俗易懂,便于自学。本书参考学时为50~80课时。

全书共12个模块。模块1为电磁基本理论的介绍。模块2为变压器,介绍变压器的结构和工作原理、三相变压器和仪用变压器。模块3~4为直流电动机,介绍直流电动机的结构和工作原理、型号、工作特性及电力拖动等方面的知识。模块5~6为三相异步电动机,介绍三相异步电动机的结构和工作原理、型号、工作特性及电力拖动等方面的知识。模块7~11分别介绍单相异步电动机、同步电机、步进电动机、伺服电动机和其他微特电动机。模块12介绍电动机的选用。

本书由王石莉、张卫华担任主编。书中模块1、模块4、模块8由陆苗霞编写,模块2由徐荣丽编写,模块5、模块6和模块12由王石莉编写,模块9由彭爱梅编写,模块3、模块7和模块11中的专题11.3~专题11.5由张卫华编写,模块10及模块11中的专题11.1和专题11.2由张晶编写,全书由王石莉负责统稿。刘永华老师认真审阅了全书并提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。

本书在编写过程中参考了相关文献资料,在此,对参考文献的作者表示衷心感谢。

由于编者水平有限,错误和疏漏之处恳请读者批评指正。

编 者  
2012年4月

# 目 录

模块 1 电机理论的基本电磁定律 .....	1
专题 1.1 有关磁场的几个物理量 .....	1
1.1.1 磁场和磁感应强度 .....	1
1.1.2 磁通量 .....	1
1.1.3 磁场强度 .....	2
1.1.4 磁动势 .....	2
专题 1.2 电机理论中常用的基本电磁定律 .....	2
1.2.1 电路定律 .....	3
1.2.2 磁路定律 .....	3
1.2.3 电磁感应定律 .....	4
1.2.4 电磁力定律 .....	5
专题 1.3 电机所用材料和铁磁材料的特性 .....	5
1.3.1 电机中所用的材料 .....	5
1.3.2 铁磁材料的磁化特性 .....	5
习题与思考题 .....	6
模块 2 变压器 .....	7
专题 2.1 变压器的结构和工作原理 .....	7
2.1.1 变压器的作用和分类 .....	7
2.1.2 变压器的基本结构 .....	7
2.1.3 变压器的工作原理 .....	10
2.1.4 变压器的铭牌 .....	10
项目 2.2 单相变压器的空载运行及其参数测定 .....	11
2.2.1 项目简介 .....	11
2.2.2 项目相关知识 .....	12
2.2.3 项目的实现 .....	14
项目 2.3 单相变压器的负载运行及其参数的测定 .....	15
2.3.1 项目简介 .....	15
2.3.2 项目相关知识 .....	15
2.3.3 项目的实现 .....	17
专题 2.4 变压器的运行特性 .....	18
2.4.1 外特性 .....	18
2.4.2 效率特性 .....	19
项目 2.5 三相变压器 .....	20
2.5.1 项目简介 .....	20
.....	1

2.5.2	项目相关知识	20
2.5.3	项目的实现	24
项目 2.6	变压器的并联运行	27
2.6.1	项目简介	27
2.6.2	项目的相关知识	27
2.6.3	项目的实现	28
专题 2.7	电力变压器的故障诊断和维护	29
2.7.1	电力变压器的维护	29
2.7.2	电力变压器的常见故障及检修	29
专题 2.8	特殊变压器	31
2.8.1	自耦变压器	31
2.8.2	仪用互感器	33
2.8.3	电焊变压器	34
	习题与思考题	35
<b>模块 3</b>	<b>直流电机</b>	<b>36</b>
项目 3.1	直流电机的拆装	36
3.1.1	直流电机的拆装项目介绍	36
3.1.2	项目相关知识	36
3.1.3	项目的实现	38
3.1.4	项目中常见故障的处理	41
专题 3.2	直流电机的铭牌和额定值	42
3.2.1	直流电机的铭牌数据	42
3.2.2	直流电机的额定值	43
3.2.3	直流电机的主要系列	43
专题 3.3	直流电机的电枢绕组和磁场	44
3.3.1	直流电机的电枢绕组	44
3.3.2	直流电机的磁场	50
专题 3.4	直流电机的换向	53
3.4.1	直流电机的换向过程	54
3.4.2	影响换向的电磁原因	55
3.4.3	产生火花的原因	55
3.4.4	改善换向的方法	55
专题 3.5	直流电机的电枢电动势、电磁转矩和电磁功率	56
3.5.1	直流电机的电枢电动势	57
3.5.2	直流电机的电磁转矩	57
3.5.3	直流电机的电磁功率	59
专题 3.6	直流电动机的运行特性	59
3.6.1	直流电动机的损耗	59
3.6.2	直流电动机的基本方程式	60

3.6.3	他励(并励)直流电动机的工作特性	62
3.6.4	串励直流电动机的工作特性	63
专题 3.7	直流发电机的运行特性	64
3.7.1	直流电机的可逆原理	64
3.7.2	直流发电机的基本方程式	64
3.7.3	他励直流发电机的运行特性	65
3.7.4	并励直流发电机的运行特性	67
	习题与思考题	68
<b>模块 4</b>	<b>直流电机的电力拖动</b>	<b>70</b>
专题 4.1	电力拖动系统的动力学基础	70
4.1.1	电力拖动系统的运动方程式	70
4.1.2	生产机械的负载转矩特性	72
专题 4.2	他励直流电动机的机械特性	73
4.2.1	直流电动机机械特性的表达式	73
4.2.2	固有机械特性和人为机械特性	74
项目 4.3	他励直流电动机的启动和反转	76
4.3.1	项目简介	76
4.3.2	项目相关知识	76
4.3.3	项目的实现(实验实训步骤)	78
项目 4.4	他励直流电动机的调速	80
4.4.1	项目简介	80
4.4.2	项目相关知识	80
4.4.3	项目的实现(实验实训步骤)	83
专题 4.5	他励直流电动机的制动	84
4.5.1	能耗制动	84
4.5.2	反接制动	86
4.5.3	回馈制动	88
项目 4.6	直流电动机的故障诊断与维修	89
4.6.1	项目简介	89
4.6.2	项目相关知识	89
4.6.3	项目的实现	96
	习题与思考题	96
<b>模块 5</b>	<b>三相异步电动机</b>	<b>98</b>
项目 5.1	三相异步电动机	98
5.1.1	项目简介	98
5.1.2	项目相关知识	98
5.1.3	项目的实现	107
专题 5.2	三相异步电动机的定子绕组	111

5.2.1	交流绕组基本知识	111
5.2.2	交流绕组基本术语	112
5.2.3	三相单层绕组	113
5.2.4	三相双层绕组	114
5.2.5	三相绕组的感应电动势	115
5.2.6	交流电机绕组的磁场	115
专题 5.3	三相异步电动机的运行原理	115
5.3.1	三相异步电动机的空载运行	115
5.3.2	三相异步电动机的短路运行	117
5.3.3	三相感应电动机的负载运行	117
专题 5.4	三相异步电动机的功率转换	118
5.4.1	功率平衡	118
5.4.2	转矩平衡	119
项目 5.5	三相异步电动机的工作特性、空载和短路试验	120
5.5.1	项目介绍	120
5.5.2	项目相关知识	120
5.5.3	项目的实现	123
习题与思考题		124
<b>模块 6 三相异步电动机的电力拖动</b>		<b>126</b>
专题 6.1	三相异步电动机的机械特性	126
6.1.1	三相异步电动机的机械特性概述	126
6.1.2	固有机械特性	128
6.1.3	人为机械特性	129
6.1.4	三相异步电动机的稳定运行	130
项目 6.2	三相异步电动机的启动	131
6.2.1	项目简介	131
6.2.2	项目相关知识	131
6.2.3	项目的实现	136
专题 6.3	三相异步电动机的调速	137
6.3.1	变极调速	138
6.3.2	变频调速	139
6.3.3	改变转差率调速	140
专题 6.4	三相异步电动机的制动和反转	141
6.4.1	三相异步电动机的反转	141
6.4.2	三相异步电动机的制动	141
习题与思考题		144
<b>模块 7 单相异步电动机</b>		<b>145</b>
专题 7.1	单相异步电动机的结构和工作原理	145



7.1.1	单相异步电动机的结构 .....	145
7.1.2	单相异步电动机的铭牌 .....	146
7.1.3	单相异步电动机的工作原理 .....	147
专题 7.2	单相异步电动机的主要类型和启动方法 .....	150
7.2.1	电阻分相式单相异步电动机及启动 .....	150
7.2.2	电容分相式单相异步电动机及启动 .....	151
7.2.3	罩极式单相异步电动机及启动 .....	152
专题 7.3	单相异步电动机的调速、反转及应用 .....	153
7.3.1	单相异步电动机的调速 .....	153
7.3.2	单相异步电动机的反转 .....	155
7.3.3	单相异步电动机的日常应用 .....	155
	习题与思考题 .....	156
<b>模块 8</b>	<b>同步电机</b> .....	<b>157</b>
专题 8.1	同步电机的结构和工作原理 .....	157
8.1.1	同步电机的结构与分类 .....	157
8.1.2	同步电机的工作原理 .....	159
8.1.3	同步电机的铭牌数据 .....	160
专题 8.2	同步发电机 .....	160
8.2.1	同步发电机的运行特性 .....	161
8.2.2	同步发电机的并联运行 .....	163
专题 8.3	同步电动机 .....	167
8.3.1	同步电动机的功角特性和机械特性 .....	167
8.3.2	同步电动机的工作特性 .....	169
8.3.3	同步电动机的启动方法 .....	170
项目 8.4	同步电动机的故障诊断与维修 .....	171
8.4.1	项目简介 .....	171
8.4.2	同步电动机常见故障及排除方法 .....	171
8.4.3	同步电动机的修理 .....	173
8.4.4	项目实施 .....	173
	思考与练习题 .....	175
<b>模块 9</b>	<b>步进电动机</b> .....	<b>176</b>
专题 9.1	概 述 .....	176
专题 9.2	反应式步进电动机的结构和工作原理 .....	176
9.2.1	反应式步进电动机的结构 .....	177
9.2.2	反应式步进电动机的工作原理 .....	177
专题 9.3	其他形式的步进电动机 .....	178
9.3.1	永磁式步进电动机 .....	179
9.3.2	混合式步进电动机 .....	179

专题 9.4	步进电动机的驱动电源 .....	179
9.4.1	驱动电源的组成 .....	180
9.4.2	步进电动机的典型驱动方式 .....	180
专题 9.5	步进电动机的控制和应用 .....	183
9.5.1	步进电动机的控制 .....	183
9.5.2	步进电动机的应用 .....	183
专题 9.6	步进电动机的选用与故障诊断 .....	184
9.6.1	设备、仪表、工具 .....	184
9.6.2	相关训练 .....	184
	思考题与习题 .....	187
<b>模块 10</b>	<b>伺服电动机 .....</b>	<b>188</b>
专题 10.1	直流伺服电动机 .....	188
10.1.1	直流伺服电动机的结构和分类 .....	188
10.1.2	直流伺服电动机的控制方法 .....	190
10.1.3	直流伺服电动机的静态特性 .....	190
10.1.4	直流伺服电动机的动态特性 .....	192
专题 10.2	交流伺服电动机 .....	194
10.2.1	同步交流伺服电动机 .....	195
10.2.2	异步交流伺服电动机 .....	196
专题 10.3	交流伺服电动机与其他电动机的性能比较 .....	197
10.3.1	交、直流伺服电动机的性能比较 .....	197
10.3.2	交流电动机与步进电动机的性能比较 .....	198
专题 10.4	伺服电动机的应用 .....	200
10.4.1	直流伺服电动机在电子电位差计中的应用 .....	200
10.4.2	直流伺服电动机在家用录像机中的应用 .....	200
10.4.3	交流伺服电动机在测温仪表电子电位差计中的应用 .....	201
项目 10.5	直流伺服电动机的使用与维修 .....	202
10.5.1	项目简介 .....	202
10.5.2	项目相关知识 .....	202
10.5.3	项目的实现 .....	203
项目 10.6	交流伺服电动机的使用与维修 .....	204
10.6.1	项目简介 .....	204
10.6.2	项目相关知识 .....	204
10.6.3	项目的实现 .....	205
	习题与思考题 .....	207
<b>模块 11</b>	<b>其他微特电机 .....</b>	<b>208</b>
专题 11.1	直线电动机 .....	208
11.1.1	直线电动机的结构 .....	208

11.1.2	直线电动机的工作原理	210
11.1.3	直线电动机的应用举例	211
专题 11.2	超声波电动机	212
11.2.1	超声波电动机的结构	212
11.2.2	超声波电动机的工作原理	213
11.2.3	超声波电动机的应用举例	215
专题 11.3	旋转变压器	216
11.3.1	旋转变压器的分类	216
11.3.2	旋转变压器的结构	216
11.3.3	旋转变压器的工作原理	216
11.3.4	旋转变压器的应用举例	219
专题 11.4	自整角机	220
11.4.1	自整角机概述	220
11.4.2	自整角机的结构与工作原理	221
11.4.3	自整角机的应用举例	224
专题 11.5	测速发电机	225
11.5.1	测速发电机概述	225
11.5.2	直流测速发电机	226
11.5.3	交流测速发电机	228
11.5.4	测速发电机的应用举例	230
	思考题与习题	230
<b>模块 12</b>	<b>电力拖动系统的选择</b>	<b>231</b>
专题 12.1	电动机发热与冷却、绝缘等级及工作方式	231
12.1.1	电动机的发热与冷却	231
12.1.2	电动机的绝缘等级	231
12.1.3	电动机的工作制分类	232
专题 12.2	不同工作制下电动机的容量选择	233
12.2.1	连续工作制电动机额定功率的选择	233
12.2.2	短时工作制电动机额定功率的选择	234
12.2.3	断续周期工作制电动机额定功率的选择	235
专题 12.3	电动机其他参数的选择	235
12.3.1	电动机类型的选择	235
12.3.2	电动机额定电压的选择	235
12.3.3	电动机额定转速的选择	236
12.3.4	电动机安装防护形式选择	236
	习题与思考题	237
<b>参 考 文 献</b>		<b>238</b>

# 模块 1 电机理论的基本电磁定律

本模块主要讲述电机常用的基本知识,简单介绍一些磁场方面的物理概念,包括磁场的几个物理量、电机理论中常用的基本电磁定律、电机所用材料和铁磁材料的特性。

## 专题 1.1 有关磁场的几个物理量

教学目标:

- 1) 了解磁场的概念;
- 2) 掌握磁感应强度、磁通量和磁场强度的概念及三者之间的关系;
- 3) 了解磁导率及磁动势的概念。

### 1.1.1 磁场和磁感应强度

磁场是由电流产生的,是存在于运动电荷周围空间除电场外的一种特殊物质,对位于其中的运动电荷有力的作用。表征磁场的物理量有磁感应强度  $B$ , 又称磁通密度, 是描述磁场强弱及方向的物理量。通常用磁感线来形象地描绘磁场, 即用磁感线的疏密程度表示磁感应强度  $B$  的大小, 磁感线在某点的切线方向就是该点磁感应强度  $B$  的方向。磁感线是人为地画出来的, 并非磁场中真的有这种线存在。图 1-1 所示为几种载流导线的磁感线。

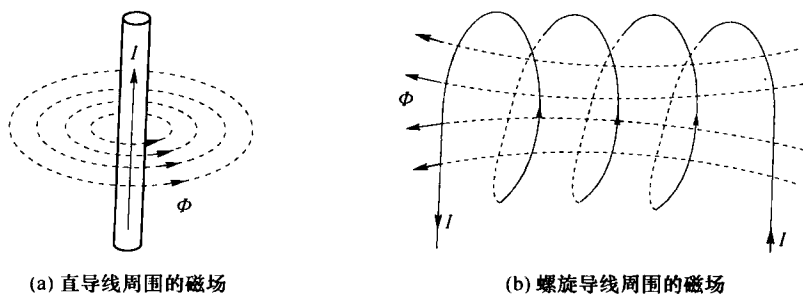


图 1-1 电流磁场中的磁感线

由几种典型的载流导线磁感线的图形可以看出, 磁场与产生它的电流的方向之间满足右手螺旋定则。

### 1.1.2 磁通量

磁通量简称磁通, 用  $\Phi$  表示, 指穿过某一截面  $S$  的磁感应强度  $B$  的通量, 通常用穿过某截面  $S$  的磁感线的数目来表示磁通的大小。磁通量  $\Phi$  与磁感应强度  $B$  之间的关系可表示为

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (1-1)$$

当磁场均匀, 且磁场与截面互相垂直时, 式(1-1)可简化为

$$\Phi = B \cdot S \quad (1-2)$$

在国际单位制中,  $B$  的单位是特斯拉(T),  $S$  的单位是平方米( $\text{m}^2$ ),  $\Phi$  的单位是韦伯(Wb), 有

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \times 1 \text{ m}^2$$

### 1.1.3 磁场强度

磁场强度  $H$  是描述磁场的一个辅助量, 是为建立电流与由其产生的磁场之间的数量关系而引入的物理量, 其方向与  $B$  相同, 大小关系满足

$$B = \mu H \quad (1-3)$$

式中,  $\mu$  为磁导率, 它是反映导磁介质导磁性能的物理量。磁导率  $\mu$  越大的介质, 其导磁性能越好。磁导率的单位为亨利/米(H/m)。

真空中的磁导率为

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

其他导磁介质的磁导率通常用  $\mu_0$  的倍数来表示, 即

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1-4)$$

式中,  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$  为导磁介质的相对磁导率。

在国际单位制中, 磁场强度的单位为安培每米(A/m)。

### 1.1.4 磁动势

在磁场中, 沿任一闭合路径磁场强度矢量的线积分, 等于穿过该闭合路径所有电流的代数和, 这就是安培环路定律。即有如下关系

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i \quad (1-5)$$

在电机中, 当一个  $N$  匝的线圈流过电流  $I$  时, 这一定律可写成

$$\sum_{k=1}^N H_k l_k = \sum I = NI = F \quad (1-6)$$

式中,  $F$  为磁动势, 即  $F = NI$ , 单位为安匝。

磁通大小与磁通通过的路径的关系为

$$\Phi = \frac{F}{R_m}, R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (1-7)$$

式中,  $R_m$  为磁路的磁阻;  $l$  为磁路的长度;  $\mu$  为磁路的导磁率;  $S$  为磁路的截面面积。

## 专题 1.2 电机理论中常用的基本电磁定律

教学目标:

- 1) 掌握磁路定律、电磁感应定律和电磁力定律;
- 2) 掌握电路定律和磁路定律之间的关系。

### 1.2.1 电路定律

#### 1. 基尔霍夫电流定律(KCL)

在电路中,流入、流出节点的电流之和等于零。其数学表达式为

$$\sum I = 0 \quad (1-8)$$

#### 2. 基尔霍夫电压定律

在电路中,任一闭合回路的电位升等于电位降。其数学表达式为

$$\sum E = \sum U \text{ 或 } \sum U = 0 \quad (1-9)$$

#### 3. 欧姆定律

在同一电路中,导体中的电流与导体两端的电压成正比,与导体的电阻阻值成反比,这就是欧姆定律。其数学表达式为

$$U = \pm IR \quad (1-10)$$

### 1.2.2 磁路定律

磁路是用强磁材料构成并在其中产生一定强度的磁场的闭合回路,一般由通电电流激励磁场的线圈(有些场合也可用永磁铁作为磁场的激励源)、软磁材料制成的铁芯,以及适当的空气间隙组成。

#### 1. 磁路的基尔霍夫第一定律

磁路中的任一闭合面内,在任一瞬间,穿过该闭合面的各分支磁路磁通的代数和等于零,即

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-11)$$

#### 2. 安培环路定律

在磁场中,沿任意一个闭合磁回路的磁场强度矢量的线积分,等于穿过该闭合路径的所有电流的代数和,这就是安培环路定律。也称为磁路基尔霍夫第二定律,有如下关系

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i \quad (1-12)$$

在电机中,当一个  $N$  匝的线圈流过电流  $I$  时,这一定律可写成

$$\sum Hl = \sum I \quad (1-13)$$

即沿着闭合磁路中,各段平均磁场强度与磁路平均长度的乘积  $Hl$ (称为磁压降)之和等于它所包围的全部电流  $\sum I$ 。

如图 1-2 所示,应用安培环路定律可写成

$$\oint_i \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_1 + I_2 - I_3 \quad (1-14)$$

如图 1-3 所示,可写成

$$\sum Hl = \sum IN \quad (1-15)$$

式中, $N$  为线圈匝数; $Hl$  称为磁压降; $IN$  称为磁动势。对于磁路中的任一闭合路径,在任一瞬间,沿该闭合路径的磁压降的代数和等于该路径的所有磁动势的代数和。

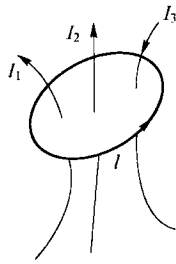


图 1-2 闭合线圈的全电流定律的应用

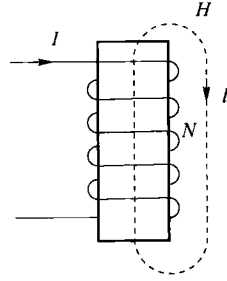


图 1-3 螺线管的全电流定律的应用

当  $H$  与闭合路径  $l$  的循行方向一致时,  $Hl$  取正; 当电流方向与上述选定的  $l$  循行方向符合右手螺旋定则时,  $IN$  取正。

### 3. 磁路欧姆定律

由安培环路定律可得

$$F = IN = Hl = \frac{lB}{\mu} = \frac{l\Phi}{\mu A} = R_m \Phi$$

式中,  $R_m = \frac{l}{\mu A}$ ,  $R_m$  称为磁路的磁阻。则

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{IN}{R_m} \quad (1-16)$$

## 1.2.3 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 当线圈中的磁通变化时, 线圈内产生感应电动势。
- ② 当导体与磁场有相对运动, 导体切割磁感线时, 导体内产生感应电动势, 称为切割电动势。

### 1. 感应电动势

一个匝数为  $N$  匝的线圈, 若与线圈交链的磁通  $\Phi$  随时间发生变化, 则在线圈内会产生感应电动势, 如图 1-4 所示。

感应电动势的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋关系, 即右手的大拇指表示磁通的正方向, 其余 4 个手指表示电动势的正方向, 则感应电动势可表示为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (1-17)$$

式中,  $\Psi$  为磁链;  $\Phi$  为磁通;  $N$  为线圈匝数。

式(1-17)表明, 由电磁感应产生的电动势大小与线圈所交链的磁链变化率成正比, 或者说, 与线圈的匝数和磁通的变化率成正比。

### 2. 切割电动势

导体与磁场有相对运动, 导体切割磁力线, 在导体中会

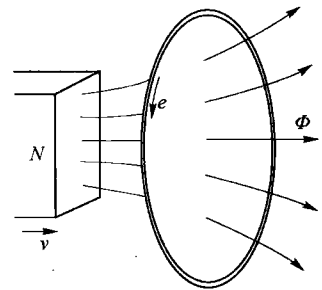


图 1-4 线圈中感应电动势的产生

产生感应电动势。在均匀磁场中,若直导体的有效长度为  $l$ ,磁感应强度为  $B$ ,导体相对切割速度为  $v$ ,则其感应电动势为

$$e = Blv \quad (1-18)$$

切割电动势的方向可以用右手定则来确定,如图 1-5 所示。展开右手,使拇指与其余 4 指垂直,让磁力线穿过手心,大拇指指向导体切割磁场的方向,则 4 指所指的方向即为切割电动势的方向。

发电机就是按此原理工作的。

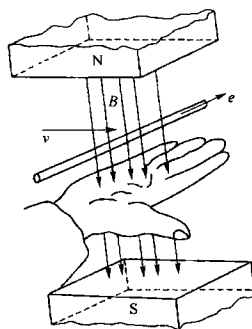


图 1-5 切割电动势的产生

### 1.2.4 电磁力定律

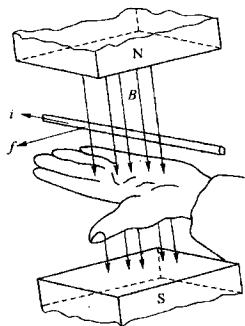


图 1-6 载流导体  
电磁力的产生

载流导体在磁场中会受到力的作用。由于这种力是磁场和电流相互作用产生的,所以称为电磁力。若磁场与载流导体相互垂直,导体的有效长度为  $l$ ,磁感应强度为  $B$ ,导体中的电流为  $i$ ,则作用在导体上的电磁力为

$$f = Bli \quad (1-19)$$

电磁力的方向可以用左手定则来确定,如图 1-6 所示。展开左手,大拇指与其余 4 指垂直,让磁力线穿过掌心,4 指指向电流的方向,则大拇指所指方向就是电磁力的方向。

电动机就是按此原理工作的。

## 专题 1.3 电机所用材料和铁磁材料的特性

教学目标:

- 1) 了解电机中所用的主要材料;
- 2) 了解铁磁材料的磁特性。

### 1.3.1 电机中所用的材料

通常将电机所用的材料分为 4 大类。第 1 类是导电材料,用于构成电路,常用铝或铜制成。第 2 类是导磁材料,用于构成磁路,常用 0.35 mm 或 0.5 mm 厚的两面涂有绝缘漆的硅钢片叠成。第 3 类为绝缘材料,用其把带电部分分隔开来,用云母、瓷等材料制成。第 4 类为机械支撑材料,用钢铁或铝合金制成。

### 1.3.2 铁磁材料的磁化特性

在各种磁介质中最重要的是以铁为代表的一类磁性很强的物质,称为铁磁质。电机是利用电磁感应作用实现能量转换的,所以在电机里有引导磁通的磁路和引导电流的电路。为了在一定的励磁电流下产生较强的磁场,电机中使用了大量的铁磁材料。铁磁材料具有导磁性,具有磁饱和现象及剩磁,铁芯还有损耗。

#### 1. 导磁性

铁磁材料包括铁、钴、镍及它们的合金。所有的非铁磁材料的导磁系数都接近于真空的导



磁系数  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ , 而铁磁材料的导磁系数  $\mu_{\text{Fc}}$  比真空导磁系数大几千倍。因此, 在同样大小的电流下, 铁芯线圈产生的磁通比空心线圈的磁通大很多。

同时, 铁芯也能起到引导磁场的作用, 在电机中铁磁材料都制作成一定的形状, 以使磁场按设计好的路径通过, 并达到分布的要求。

## 2. 磁饱和现象及剩磁

铁磁材料的磁化曲线如图 1-7 所示。铁磁材料之所以有高导磁性能, 是由于铁磁材料内部存在着很多很小的强烈磁化的自发磁化区域, 相当于一块块小磁铁, 称为磁畴。磁化前, 这些磁畴杂乱地排列着, 磁场互相抵消, 所以对外界不显示磁性。但在外界磁场的作用下, 这些磁畴沿着外界磁场的方向做有规则的排列, 顺着外磁场方向的磁畴扩大了, 逆着外磁场方向的磁畴缩小了, 结果磁畴之间的磁场不能互相抵消, 从而形成一个附加磁场, 叠加在外磁场上, 使总磁场增强。随着外磁场的不断增强, 有更多的磁畴顺着外磁场的方向排列, 总磁场不断增强, 如图 1-7 曲线  $bc$  段。当外磁场增强到一定的程度后, 所有的磁畴都转到与外磁场一致的方向, 这时它们所产生的附加磁场达最大值, 总磁场的增强程度减缓, 这就出现磁饱和现象, 如图 1-7 曲线  $cd$  段所示。

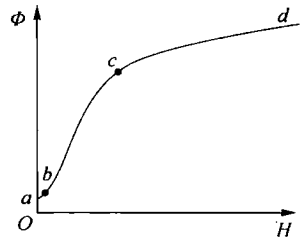


图 1-7 铁磁材料的磁化曲线

由于磁畴靠得非常紧, 彼此间存在摩擦, 当外界磁场消失后磁畴不能完全恢复到磁化前状态, 磁畴与外磁场方向一致的排列被部分保留下来, 这时的铁磁材料对外呈磁性, 这就是剩磁现象, 见图 1-7 中  $a$  点。

## 3. 铁芯损耗

### (1) 磁滞损耗

铁磁材料置于交变磁场中, 材料被反复交变磁化, 磁畴相互不停地摩擦而消耗能量, 并以产生热量的形式表现出来, 造成的损耗称为磁滞损耗。

### (2) 涡流损耗

当通过铁芯的磁通随时间变化时, 根据电磁感应定律, 铁磁材料内将感应电动势并产生感应电流。这些电流在铁芯内部围绕磁通呈漩涡状流动, 称为涡流。涡流在铁芯中引起的损耗 ( $i^2 r$ ) 称为涡流损耗。

### (3) 铁芯损耗

磁滞损耗与涡流损耗之和, 称为铁芯损耗, 用  $p_{\text{Fc}}$  表示。

## 习题与思考题

- 1-1 磁场是如何产生的? 如何根据电流的情况判断磁场的分布?
- 1-2 什么是铁磁材料? 在电机中为什么大量使用铁磁材料?
- 1-3 什么是铁磁材料的磁滞损耗和涡流损耗? 引起铁磁材料磁滞损耗和涡流损耗的原因是什么? 铁损的大小与哪些因素有关?
- 1-4 铁磁材料的磁饱和及剩磁是怎么回事?
- 1-5 导线中可通过哪些方式产生感应电动势? 如何计算电动势的大小? 如何判断电动势的方向?
- 1-6 什么是电磁力定律? 如何计算电磁力的大小? 如何判断电磁力的方向?