



普通高等教育电气信息类规划教材



免费电子教案下载

www.cmpedu.com

电机与拖动基础

主 编 徐胜军
副主编 郭春燕 刘光辉



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育电气信息类规划教材

电机与拖动基础

主编 徐胜军

副主编 郭春燕 刘光辉

参编 孟月波 陈 静 陈俊英



机械工业出版社

在自动化、电气工程等相关专业中,电机与拖动基础是一门十分重要的专业基础课。本书共 11 章,主要阐述了电机与拖动的基本理论和基础知识,包括电力拖动系统动力学、直流电机直流电动机的电力拖动、变压器、交流电机电枢绕组的电动势与磁动势、异步电动机、三相异步电动机的电力拖动以及同步电动机,并简要分析了控制电机以及电动机的选择等。全书编写注重基本原理的分析和阐述,同时,各章都精心设计了结合实际和注重应用的例题,以利于学生复习提高。

本书可作为高等院校自动化、自动控制、机电一体化等相关专业的教材,亦可供有关工程技术人员参考。

本书配套授课电子课件,需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册、审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 2399929378, 电话: 010 - 88379753)。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础/徐胜军主编. —北京:机械工业出版社, 2015. 3

普通高等教育电气信息类规划教材

ISBN 978-7-111-48632-9

I. ①电… II. ①徐… III. ①电机 - 高等学校 - 教材 ②电力传动 - 高等学校 - 教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 021820 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:尚晨 责任校对:张艳霞

责任印制:刘岚

涿州市京南印刷厂印刷

2015 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·15.25 印张·376 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-48632-9

定价:35.00 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

服务咨询热线:(010)88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:(010)88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

根据自动化类专业的特点与现阶段教学改革的要求,结合作者多年来在“电机学”和“电力拖动”课程的教学实践中所积累的教学研究成果,编写了本教材。本书力图做到教材内容由浅入深、通俗易懂且理论联系实际,将经典内容与最新成果结合起来,使学生既能掌握经典内容,又能了解电力拖动领域的最新研究动态和成果。

本书共 11 章,主要介绍了电机与拖动的基础理论和基础知识、电力拖动系统动力学、直流电机、直流电动机的电力拖动、变压器、交流电机电枢绕组的电动势与磁通势、异步电动机、三相异步电动机的电力拖动以及同步电动机,并简要分析了电动机的选择和控制电机等。

本书的主要特点有:

1) 将“电机学”与“电力拖动”课程有机地结合为一个整体,论述完每一种类型电机的原理性问题后,接着论述该电机拖动负载的运行性能,较好地进行了内容的衔接,使学生接受内容顺畅,且节约授课时间。

2) 侧重于基本理论知识、计算方法及分析方法的阐述,并注意将上述三种基本知识应用到实际的电力拖动系统中。

3) 采用了参考国外教材和国内教材相结合的方式进行编写。吸收了国外教材中先进的思想和内容,并结合我国教学体系的具体情况,参考了国内教材的体系结构,使得本书既保持内容的先进性又符合国内的教学体系。

4) 本书加强了工程实际应用背景,在相关章节中列出了工程实例,使基础知识和工程实践相结合,以培养学生的工程素质。

5) 本书增加了用 MATLAB 仿真的实例,以简化复杂的计算,使学生把注意力集中在概念上和对所得到结果的检查分析上,而不是繁杂的数学计算上。

6) 本书第一章均单独安排了本章重点、本章难点、习题与思考题等内容,方便学生自学、复习和练习。

本书第 1、2、3、6、7 章由徐胜军负责编写,第 4、5、8 章由郭春燕负责编写,第 9、10、11 章由刘光辉负责编写。孟月波、陈静、陈俊英进行了书稿部分绘图和排版工作。

本书的读者定位是自动化、电气工程及机电一体化等相关专业的本科学生;同时,对于长期从事运动控制领域的工程技术人员,本教材也有一定的参考价值。

由于作者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

作 者

2014 年 11 月

目 录

前言	1
第1章 绪论	1
1.1 电机拖动技术的应用	1
1.2 电机理论中常用的基本电磁定律	2
1.2.1 电机中的铁磁材料及其特性	2
1.2.2 常用的物理概念和基本电磁定律	3
第2章 电力拖动系统动力学	8
2.1 电力拖动系统的转动方程式	8
2.2 多轴电力拖动系统的简化	10
2.2.1 旋转运动负载转矩和飞轮矩的折算	10
2.2.2 平移运动负载转矩和飞轮矩的折算	12
2.3 生产机械的负载转矩特性	17
2.4 电力拖动系统稳定运行的条件	19
习题与思考题	21
第3章 直流电机	22
3.1 直流电机的用途	22
3.2 直流电机的结构和基本工作原理	24
3.2.1 直流电机的工作原理	24
3.2.2 直流电机的结构	25
3.3 直流电机的电枢绕组	28
3.3.1 电枢绕组概述	28
3.3.2 单叠绕组	29
3.3.3 单波绕组	32
3.4 直流电机的磁场	34
3.4.1 直流电机的励磁方式	34
3.4.2 直流电机的空载磁场	35
3.4.3 直流电机的负载磁场	37
3.5 直流电机的电枢电动势、电磁转矩和电磁功率	40
3.5.1 直流电机的电枢电动势	40
3.5.2 直流电机的电磁转矩	41
3.5.3 直流电机的电磁功率	42

3.6 直流发电机的运行原理	43
3.6.1 直流发电机的能量转换过程	43
3.6.2 他励发电机的运行特性	44
3.6.3 并励直流发电机	45
3.7 直流电动机的运行原理	46
3.7.1 直流电动机的基本方程	46
3.7.2 直流电动机的工作特性	49
3.8 直流电动机的机械特性	51
3.8.1 他励电动机的机械特性	51
3.8.2 串励电动机的机械特性	56
3.8.3 复励电动机的机械特性	57
3.8.4 根据电机的铭牌数据估算机械特性	57
3.9 直流电机的换向	58
习题与思考题	60
第4章 直流电动机的电力拖动	63
4.1 他励直流电动机的起动	63
4.1.1 电枢回路串电阻起动	64
4.1.2 降压起动	65
4.1.3 直接起动	65
4.2 他励直流电动机的调速	66
4.2.1 电枢串电阻调速	67
4.2.2 改变电枢电压调速	67
4.2.3 改变励磁回路电阻调速	68
4.2.4 调速的性能指标	69
4.3 他励直流电动机的制动	71
4.3.1 他励直流电动机的能耗制动	72
4.3.2 他励直流电动机的反接制动	74
4.3.3 他励直流电动机的回馈制动	76
4.4 直流电力拖动系统的过渡过程	79
4.4.1 电力拖动系统的运动方式	79
4.4.2 他励直流电动机过渡过程分析	81
4.4.3 机械过渡过程实例	84
习题与思考题	86
第5章 变压器	88
5.1 变压器概述及分类	88
5.1.1 概述	88
5.1.2 变压器的分类	88
5.2 变压器的基本结构和工作原理	89

5.2.1	变压器的基本结构	89
5.2.2	变压器的铭牌数据	91
5.2.3	变压器的基本工作原理	92
5.3	变压器的空载运行	94
5.3.1	变压器空载运行时的磁场	94
5.3.2	变压器空载时各电磁量的正方向规定	94
5.3.3	变压器空载时的基本电磁关系	95
5.3.4	变压器的空载电流	97
5.3.5	变压器空载时的相量图	98
5.3.6	变压器空载运行时的等效电路	98
5.4	变压器的负载运行	100
5.4.1	变压器负载时各电磁量的正方向规定	100
5.4.2	变压器负载时的基本电磁关系	100
5.4.3	变压器的折算	102
5.4.4	变压器负载运行时的等效电路	105
5.4.5	变压器负载运行时的相量图	108
5.5	标么值	109
5.6	变压器的参数测定	111
5.7	变压器的运行特性	115
5.7.1	变压器的电压变化率和外特性	116
5.7.2	变压器的效率和效率特性	116
5.8	变压器的联结组标号	118
5.8.1	单相变压器绕组的标志方式	118
5.8.2	三相变压器绕组的联结	119
5.8.3	三相变压器的联结组标号	120
5.9	变压器的并联运行	124
5.9.1	变压器并联运行的条件	124
5.9.2	变比不等时的并联运行	125
5.9.3	不同联结组标号的变压器不能并联运行	126
5.9.4	负载阻抗不等时的并联运行	126
5.10	其他用途的变压器	127
5.10.1	自耦变压器	127
5.10.2	交流互感器	128
	习题与思考题	130
第6章	交流电机电枢绕组的电动势与磁动势	132
6.1	交流电机的电枢绕组	132
6.1.1	交流绕组的基本知识	132
6.1.2	三相单层绕组	134

6.1.3 三相双层绕组	135
6.2 交流电机电枢绕组的磁动势	136
6.2.1 单相绕组的磁动势	136
6.2.2 三相绕组的磁动势	140
6.3 交流电机电枢绕组的电动势	143
6.3.1 导体的感应电动势	143
6.3.2 线圈的感应电动势	145
6.3.3 线圈组的感应电动势	146
6.3.4 相绕组的感应电动势	147
习题与思考题	147
第7章 异步电动机	149
7.1 异步电动机概述	149
7.2 异步电动机的结构和工作原理	150
7.2.1 异步电动机的结构	150
7.2.2 异步电动机的工作原理	153
7.3 三相异步电动机的电磁关系	155
7.3.1 三相异步电动机转子绕组开路时的电磁关系	155
7.3.2 三相异步电动机转子堵转时的电磁关系	158
7.3.3 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系	162
7.4 三相异步电动机的功率与转矩关系	166
7.4.1 功率平衡方程	166
7.4.2 电磁转矩	168
7.5 三相异步电动机的机械特性	171
7.6 三相异步电动机的工作特性	175
7.7 三相异步电动机的参数测定	176
习题与思考题	179
第8章 三相异步电动机的电力拖动	181
8.1 笼型异步电动机的起动	181
8.1.1 直接起动	181
8.1.2 降压起动	182
8.1.3 软起动	186
8.1.4 高起动转矩的三相笼型异步电动机	187
8.2 绕线转子异步电动机的起动	190
8.2.1 转子串频敏变阻器起动	190
8.2.2 转子串电阻分级起动	191
8.3 三相异步电动机的制动	194
8.3.1 能耗制动	195
8.3.2 反接制动	196

8.3.3 回馈制动	197
8.4 三相异步电动机的调速	198
8.4.1 三相异步电动机的降电压调速	199
8.4.2 绕线转子异步电动机转子回路串电阻调速	199
8.4.3 笼型三相异步电动机的变极调速	200
8.4.4 三相异步电动机的变频调速	201
8.4.5 绕线转子异步电动机的串级调速	203
习题与思考题	204
第9章 同步电动机	206
9.1 同步电动机概述	206
9.2 同步电动机的基本结构和工作原理	206
9.2.1 基本结构	206
9.2.2 基本工作原理	207
9.3 同步电动机的功率关系和矩角特性	208
9.3.1 功率关系	208
9.3.2 电磁功率	209
9.3.3 矩角特性	209
9.4 同步电动机功率因数的调节	210
9.4.1 同步电动机功率因数的变化规律	210
9.4.2 U型曲线	211
9.5 同步电动机的起动	211
习题与思考题	212
第10章 电动机的选择	213
10.1 概述	213
10.2 电动机的一般选择	213
10.3 电动机的发热与冷却	215
10.3.1 电动机的发热与冷却	215
10.3.2 电动机的发热过程	215
10.4 电动机容量的选择	216
10.4.1 电动机的工作方式	216
10.4.2 连续工作方式电动机容量的选择	217
10.4.3 短时工作方式电动机容量的选择	217
10.4.4 周期性断续工作方式电动机容量的选择	217
习题与思考题	218
第11章 控制电机	219
11.1 伺服电动机	219
11.1.1 直流伺服电动机	220
11.1.2 交流伺服电动机	221

11.2 步进电动机	224
11.2.1 步进电动机的分类	224
11.2.2 反应式步进电动机的工作原理	224
11.3 测速发电机	226
11.3.1 直流测速发电机	226
11.3.2 交流测速发电机	228
11.4 自整角机	229
11.4.1 力矩式自整角机工作原理	230
11.4.2 控制式自整角机工作原理	231
11.5 旋转变压器	231
11.5.1 正余弦旋转变压器	232
11.5.2 线性旋转变压器	232
11.6 本章小结	233
习题与思考题	234

第1章 绪 论

【本章重点】

电机中的铁磁材料及其特点。

安培环路定律、磁路的欧姆定律、电磁力定律、电磁感应定律，以及基本电磁定律的使用。

【本章难点】

安培环路定律、磁路的欧姆定律、电磁感应定律。

1.1 电机拖动技术的应用

在现代工业企业中，随着生产过程中自动化程度越来越高，电机的应用几乎遍及工农业生产的各个领域。从能量转换角度来说，电机是一种能够将机械能转换为电能或者将电能转换为机械能的装置。为了实现现代工业生产工艺过程的需求，大多数的生产机械都采用电动机拖动，如生产车间的各种机床（龙门刨床、龙门铣床等）采用他励直流电动机；风机、水泵、压缩机、皮带运输机等通用机械，在允许直接启动时，多采用笼型异步电动机；当启动电流受到限制时，常采用绕线转子异步电动机；当启动次数少而又希望能产生一定的无功功率来提高电网的功率因数时，可以采用同步电动机拖动；对于大型矿井卷扬机、高炉卷扬机、电铲、轧钢机等，可采用绕线转子异步电动机或他励直流电动机；纺织机械、印染机械、造纸机械等除了采用直流拖动系统外，还采用交流整流子机。在交通运输业中，电力牵引机车通常采用具有优良启动性能和调速性能的直流电动机，近几年多采用基于变频技术的交-直-交供电的异步交流牵引电动机。新能源电动汽车的电机主要采用异步电动机（用于纯电动汽车）、永磁同步电动机（用于混合动力汽车）、开关磁阻电动机（用于客车）。

在民用产品中，电冰箱、洗衣机、搅拌机、空调、风扇、光驱、水泵等家用电器中，电机的身影无处不在。随着现代工农业生产中机械化和自动化的程度不断提高，除了高精度的转速控制和位置控制需要使用各种专用电机以满足生产工艺的不同需求，而且在控制系统中的信号检测、放大和转换，甚至数学解算等需要形形色色的控制电机。例如，在控制系统中作为执行元件的交直流伺服电动机、测量机械转角的旋转变压器和自整角机、测量转速用的交直流测速发电机以及能够将电脉冲信号转换为角位移或者线位移的步进电动机等。

总之，电机在现代工农业生产中具有广泛的应用。据统计，在我国电网的总负荷中，电动机的用电量已经占到总用电量的60%左右，占整个工业用电的70%左右，这充分说明了电动机应用在我国国民经济发展过程中所起的重要作用。因此，电机拖动技术已经成为现代工业实现生产的电气化与自动化的基础和核心，这对提高生产机械运行的准确性、可靠性和快速性以及改善工业、民用产品的质量，具有重要的研究意义和应用价值。

变压器是一种与电机紧密关联的电气装置，其作用是实现不同电压等级的交流电的转换。在电力传输系统中，热能、机械能等可以在远处转换成电能，通过远距离的传输，把电能送到需要用电的地方，使人们在工厂、办公室、家庭等地方就可以使用电力。而变压器在电力生产中把电压转换成高电压甚至超高电压，然后通过电力传输系统传送到电力使用地，再通过变压器把高电压转换成用户可以使用的低电压。通过这种方式的传输可以大大减小电力从生产地传输到使用地之间的电能损耗。由于变压器实现交流电转换的原理与发电机和电动机的原理相同，也依赖于磁场的作用。因此，通常将变压器和电机的学习放在一起进行。

1.2 电机理论中常用的基本电磁定律

1.2.1 电机中的铁磁材料及其特性

电机是一种能够进行能量传递或者机电能量转换的机电装置，通过磁场作为耦合媒介实现电能和机械能之间的转换。1827 年，匈牙利物理学家安幼思·杰德利克 (Ányos Jedlik) 开始尝试用电磁线圈进行试验，构建了世界上第一台电动机，如图 1-1 所示。虽然这台电动机只用于教学，但是其结构已经包含了当今直流电动机的三个主要部分：定子、转子和换向器。电机的磁路如图 1-2 所示，磁力线 I_1 、 I_2 表示电机工作时铁心中的磁通走向。在电机中，磁场把转子线圈和定子线圈耦合起来，通过电磁感应实现电能和机械能的相互转换。因此，电机系统主要由两部分组成：电路系统和磁路系统。在电机的磁路系统分析中，一个重要的物理量就是磁场的磁通 (Flux)。磁通穿过的路径称为电机的磁路。由图 1-2 可知，磁路主要由电机的铁磁材料和气隙组成。电机中的铁磁材料由导磁性能好的铁、镍、钴等金属元素以及它们的合金组成。铁磁材料的磁导率 μ 要远远大于真空的磁导率 μ_0 ，例如，铸钢的磁导率约为真空磁导率的 1000 倍，硅钢片的磁导率约为真空磁导率的 6000 ~ 7000 倍。非铁磁材料的磁导率接近于真空磁导率。电机中，铁磁材料在外磁场作用下，呈现出很强的磁性，这种现象称为磁化。这是因为铁磁材料内部存在很多小的磁畴，每个磁畴可看作一个微型磁铁。在磁化前，磁畴是随机排列的，因此铁磁材料没有表现出磁性。但是铁磁材料在磁化时，这些磁畴沿着磁场方向顺序排列，在铁磁材料内部形成一个附加的磁场，叠加在外磁场上，使得合成磁场显著增强。因此，电机或者变压器就利用铁磁材料的这种特性，在一定的励磁磁场的作用下，以期获得更强的磁场。



图 1-1 1827 年生产的电动机

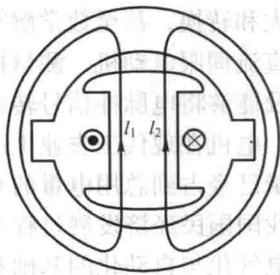


图 1-2 电机的磁路

在铁磁材料中，磁导率 μ 与磁场强度以及物质磁状态有关，所以铁磁材料的磁导率 μ 不是一个常数。在工程计算时，事先通过试验测得各种铁磁材料在不同磁场强度 H 下对应的磁感应强度 B ，并绘制成 $B-H$ 曲线，该 $B-H$ 曲线称为磁化曲线。如图1-3所示，铁磁材料的 $B-H$ 曲线不是单值的，而是具有磁滞回线的特点。同一个磁场强度 H 对应着两个磁感应强度值 B 。这种情况表明，同一个磁场强度 H 下对应的磁感应强度 B 的值和其历史状态值有关。当铁磁材料的磁滞回线较窄时，可以采用它的平均磁化曲线来进行计算，如图1-3中曲线2所示。不同的铁磁材料对应的磁滞回线的宽窄程度是不同的。根据磁滞回线形状的不同，铁磁材料可以分为硬磁材料和软磁材料。硬磁材料对应的磁滞回线较宽，如钨钢、钴钢、镍铝钴合金、钕铁硼等材料，硬磁材料主要用作永久磁铁。软磁材料对应的磁滞回线较窄，如硅钢片、铁镍合金、铁氧体、铸钢等材料，这些材料的磁滞损耗小，主要用于电机、变压器的铁心等。

磁化特性还具有一个特点，即磁化特性的饱和性。如图1-4所示，将未经磁化的铁磁材料进行磁化时，磁场强度 H 从零开始增加，磁感应强度 B 随着磁场强度 H 的增加而随之增大，所得到的 $B=f(H)$ 曲线称为原始磁化特性。如图1-4所示，在 Oa 段，磁感应强度 B 随着磁场强度 H 的增加较慢；在 ab 段则随着磁感应强度 B 的增加迅速增大；过了 b 点之后，磁感应强度 B 的增速又减慢了；在 cd 段，磁感应强度 B 的值呈现直线，几乎很难继续增大，把这一区域称为磁饱和区，在这一段铁磁材料的磁导率趋近于真空磁导率。图中线段对应的各点中， a 点称为跖点，拐点 b 称为膝点， c 点称为饱和点。

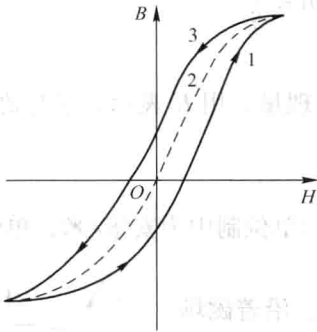


图 1-3 铁磁材料的磁化曲线

1—磁滞回线上升分支 2—平均磁化特性
3—磁滞回线下降分支

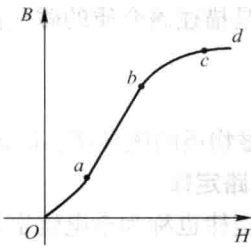


图 1-4 铁磁材料的原始磁化曲线

1.2.2 常用的物理概念和基本电磁定律

1. 磁感应强度（磁通密度）

载流导体的周围存在磁场，这个建立磁场的电流称为励磁电流。磁场的强弱和方向用磁感应强度 B 描述。为了形象地描述这个磁场，通常采用磁力线来描述磁场的分布，其密集程度表示磁场的强弱，磁力线的方向和产生磁场电流的方向满足右手螺旋关系。磁感应强度和产生磁场的电流关系用毕奥-萨伐尔定律描述。典型的磁场与电流的关系如图1-5所示。

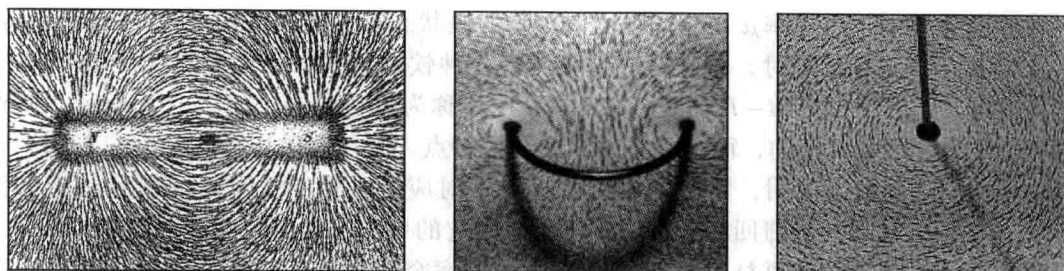


图 1-5 电流磁场中的磁力线

2. 磁感应通量（磁通）

磁感应通量，简称为磁通，表示穿过给定曲面的磁感应强度 B 的通量，即穿过这个曲面的磁力线的个数，这个磁力线的个数是个“净”数量，即从一个方向上通过的磁力线个数减去另一个方向上通过的个数。磁通用 Φ 表示，其国际单位制单位是韦伯，单位符号为 Wb 。一般情况下，磁通是通过磁场中曲面面积上的积分定义的，其数学描述如下：

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \quad (1-1)$$

当一个均匀磁场垂直穿过一个平面时，如图 1-6 所示，上述描述表示如下：

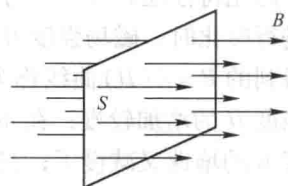


图 1-6 均匀磁场中的磁通

$$\Phi = B \cdot S \quad \text{或者} \quad B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-2)$$

3. 磁场强度

磁场强度是描述磁介质的磁化问题的一个辅助物理量，用 H 表示。它与磁感应强度 B 的关系为

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

式中， μ 为导磁物质的磁导率。磁场强度的单位在国际单位制中为安培/米，单位符号为 A/m 。

4. 安培环路定律

安培环路定律也称为全电流定律，如图 1-7 所示，沿着磁场中任意一条闭合磁回路的磁场强度的线积分等于该回路所包围的电流的代数和，用公式描述如下：

$$\oint_l H \cdot dL = \sum I \quad (1-4)$$

式中， l 表示一个环绕着电流的闭合磁回路。若电流的方向与闭合磁回路的方向符合右手螺旋关系，则电流取为正值，否则取为负值。

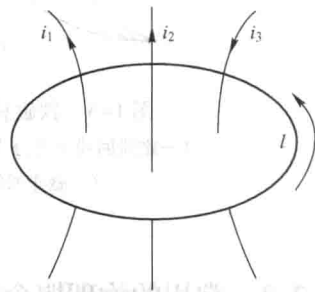


图 1-7 安培环路定律

上式也可以理解为，消耗在任一闭合磁回路上的磁通势等于该磁路所环链的全部电流。

在实际应用中，磁路的形状比较复杂，因此直接采用安培环路定律的积分进行计算比较困难，通常采用分段的方法来进行简化计算。对一个闭合磁回路，把几何形状规则的分为一段，并求出其平均磁场强度，再乘以这段磁路的长度，得到这段磁路的磁通势，最后把所有分段磁路的磁通势加起来，可以近似得到闭合磁回路的总磁通势，即

$$\sum_k H_k \cdot dl_k = \sum I \quad (1-5)$$

式中, H_k 为磁路第 k 段的磁场强度; l_k 是第 k 段磁路的长度。

图 1-8 是一个简单磁路, 由铁磁材料和空气两部分组成。铁心上绕的线圈匝数为 W , 线圈电流为 I 。进行磁路计算时, 可以把这个磁路分为两段, 一段为铁心, 长度为 l_{Fe} , 截面积为 S , 磁场强度为 H_{Fe} ; 另一段为空气, 长度为 δ , 磁场强度为 H_δ 。根据磁路的简化计算方法, 有

$$H_{Fe} l_{Fe} + H_\delta \delta = IW \quad (1-6)$$

式中, 气隙长度 δ 、铁心长度 l_{Fe} 、线圈匝数 W 和电流 I

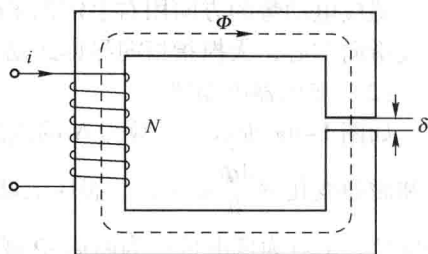


图 1-8 简单磁路

为已知, 各段磁路的磁场强度根据给定各段磁路的磁通 Φ , 利用磁通密度公式 (1-2) 求出各段磁路的磁感应强度 B , 然后利用磁场强度公式 (1-3) 求出各段磁路的磁场强度 H 。对于铁磁材料, 也可以根据其磁化特性查出磁场强度 H 。

由式 (1-6) 可见, 作用在磁路上的总磁通势等于该磁路上各段磁通势之和。

5. 磁路欧姆定律

磁路的磁通 Φ 等于作用在该磁路上的磁通势 F 除以磁路上的磁阻 R_m , 这就是磁路的欧姆定律, 也称为霍普金森定律。这个定义可以表示为

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad \text{或者} \quad F = \Phi R_m \quad (1-7)$$

磁通势 F 的单位为安培匝 (At); 磁阻 R_m 的单位为安培匝/韦伯 (At/Wb)。磁阻类似于电路中的电阻, 电流总是沿着电阻最小的路径前进。在磁路中, 磁通量也是沿着磁阻最小的路径前进的。

对于分段均匀的磁路, 组成该磁路的各分段的磁通是同一个磁通, 这种磁路称为串联磁路。显然, 串联磁路的总磁阻等于各段磁阻之和。对于图 1-8 所示的磁路, 总磁阻由两部分组成, 即铁心部分磁阻 R_{mFe} 和气隙部分磁阻 $R_{m\delta}$ 。该磁路的磁通势 F 表示如下:

$$F = \Phi (R_{mFe} + R_{m\delta})$$

6. 电磁力定律

载流导体在磁场中受到磁场对导体施加的力, 这个力称为安培力。在均匀磁场中, 若载流导体与磁场方向垂直, 导体长度为 l , 流过导体的电流大小为 i , 则载流导体所受的安培力 f 大小为

$$f = Bli \quad (1-8)$$

安培力的方向按照左手定则确定, 即左手伸开, 大拇指与其他四指成 90° 。让磁力线指向掌心, 四指指向导体电流方向, 则大拇指方向为导体的受力方向。

7. 电磁感应定律

变化的磁场使得导体产生感应电动势, 这种现象称为电磁感应现象。在电机中, 电磁感应现象主要表现在两个方面: 1) 磁场中的导体运动时切割磁力线产生的切割电动势; 2) 线圈中变化的磁场在线圈内产生的感应电动势。

(1) 切割电动势

均匀磁场中, 长度为 l 的直导体与磁场相对运动, 相对运动的速度为 v , 导体所处位置的磁感应强度为 B , 若导体 l 、磁感应强度 B 以及导体相对运动方向三者互相垂直, 则导体产生

的感应电动势为

$$e = Blv \quad (1-9)$$

感应电动势的方向用右手定则来确定,即右手手掌伸开,大拇指与其他四指成 90° 。让磁力线指向掌心,大拇指指向导体运动方向,则四指方向为导体的感应电动势方向。

(2) 变压器电动势

如图 1-9a 所示,匝数为 N 的线圈,在变化的磁场中产生的感应电动势 e 的大小与线圈匝数和磁通变化率 $\frac{d\Phi}{dt}$ 成正比。感应电动势 e 的方向由楞次定律决定,当磁通 Φ 增加时, A 点为高电位, X 点为低电位;当磁通 Φ 减小时, A 点为低电位, X 点为高电位。感应电动势 e 的正方向与产生它的磁通正方向有两种确定方法,即左手螺旋定则和右手螺旋定则。

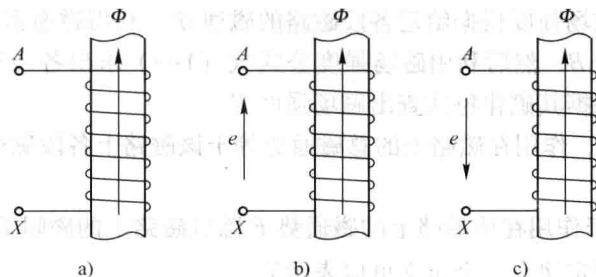


图 1-9 磁通及其感应电动势

1) 按左手螺旋定则确定 e 和 Φ 的正方向

如图 1-9b 所示,此时规定 e 的正方向从 X 指向 A 。与实际电动势方向相比,当 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ 时,实际上 A 点为高电位, X 点为低电位,因此规定的正方向与实际电动势方向相同;当 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ 时,实际上 A 点为低电位, X 点为高电位,因此规定的正方向与实际电动势方向相反。也就是说,按左手螺旋定则规定的 e 的方向与 $\frac{d\Phi}{dt}$ 的方向一致,同时为正或同时为负。这样 e 和 Φ 的关系在左手螺旋定则下可表示为

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-10)$$

2) 按右手螺旋定则确定 e 和 Φ 的正方向

如图 1-9c 所示,此时规定 e 的正方向从 A 指向 X 。与实际电动势方向相比,当 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ 时,实际上 A 点为高电位, X 点为低电位,因此规定的正方向与实际电动势方向相反;当 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ 时,实际上 A 点为低电位, X 点为高电位,因此规定的正方向与实际电动势方向相同。也就是说,按右手螺旋定则规定的 e 的方向与 $\frac{d\Phi}{dt}$ 的方向总是相反。这样 e 和 Φ 的关系在右手螺旋定则下可表示为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-11)$$

本书中,电力变压器和交流电机中的线圈磁通与电动势正方向按右手螺旋定则确定。

8. 磁路与电路的比较

磁路与电路有许多相似之处，为了便于读者查阅和理解磁路的相关知识，表 1-1 给出了磁路和电路常用的物理量和定律。

表 1-1 磁路与电路的比较

磁 路		电 路	
磁导率	μ	电导率	γ
磁通	Φ	电流	I
磁通势	F	电动势	E
磁阻	R_m	电阻	R
磁压降	$HL(\Phi R_m)$	电压降	U
磁路欧姆定律	$\Phi = F/R_m$	电路欧姆定律	$I = U/R$
磁路基尔霍夫第一定律	$\sum \Phi = 0$	电路基尔霍夫第一定律	$\sum I = 0$
磁路基尔霍夫第二定律	$\sum HL = \sum NI$	电路基尔霍夫第二定律	$\sum RI = \sum E$