



21 世纪高等院校电气信息类系列教材

Electrical Information •
Science and Technology

电机与拖动基础

单海欧 王立岩 刘权中 王天施 编著



附赠电子教案

[http:// www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

电机与拖动基础

单海欧 王立岩 刘权中 王天施 编著



机械工业出版社

本书的编写以培养和提高学生自主学习能力为基本指导思想,内容主要包括基本理论、直流电机及其拖动系统、变压器、三相异步电动机及其拖动系统、同步电机、特殊电机等几大部分。全书主要分析电机的对称稳态运行问题,着重阐述电机学的基本概念、基本理论和基本分析方法,强调对电机学基本知识的深入理解和掌握,并要求读者学习后具备一定的灵活应用能力。书中精选了典型的例题和习题,以便读者及时检查学习情况,加深对重要知识和方法的理解。全书以电机为主线,讲述清晰,重点突出,循序渐进,富于启发,便于读者自学。

本书配有电子教案及配套使用的教材《电机与拖动学习指导与习题解答》。本书适合作为普通高等学校电气工程及其自动化专业的教材,也可用作其他相关专业的参考书或供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础/单海欧等编著. —北京:机械工业出版社, 2018. 1

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

ISBN 978-7-111-58465-0

I. ①电… II. ①单… III. ①电机-高等学校-教材 ②电力传动-高等学校-教材 IV. ①TM3 ②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 303961 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:李 昂

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·16.75 印张·398 千字

0001-2500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-58465-0

定价:49.00 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

《电机与拖动基础》为适应高等院校电类专业教学改革实际需要而编写，本教材主要内容有直流电机、变压器、三相异步电动机、同步电机、特殊电机的基本结构及理论，电动机的电力拖动和电动机的选择等。本书共分 10 章，为了适应工学结合、项目驱动的教学改革原则，每章前后均附有主要内容提示、学习小结和习题。

本书难度适宜，实用性强，层次分明，条理清晰，概念阐述清楚、准确。可作为普通高等院校电气工程及其自动化专业的教材，也可作为相关专业的培训教材或相关工程技术人员的技术参考及学习用书。

本书由辽宁石油化工大学单海欧、王立岩、刘权中、王天施编著，孙海军、柳强参与编写，本书编写过程中参考了许多同行及前辈编写的专著和教材，在此一并表示感谢。由于作者学识有限，编写仓促，书中难免会有疏漏和错误之处，敬请读者批评指正。

编者

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 电机与电力拖动的发展简况	1
1.2 本课程的性质、任务和学习方法	2
1.2.1 课程性质和任务	2
1.2.2 学习方法	3
1.3 电机理论中的常用物理概念和定律	3
1.4 小结	7
1.5 思考题与习题	7
第2章 电力拖动系统动力学	9
2.1 电力拖动系统	9
2.2 单轴电力拖动系统的动力学分析	10
2.3 多轴电力拖动系统的简化	11
2.3.1 工作机构转矩的折算	12
2.3.2 工作机构直线作用力的折算	13
2.3.3 传动机构与工作机构飞轮矩的折算	15
2.3.4 工作机构直线运动质量的折算	15
2.4 负载的转矩性质与电力拖动系统稳定运行的条件	16
2.4.1 负载的转矩性质	16
2.4.2 系统稳定运行的条件	20
2.5 小结	22
2.6 思考题与习题	23
第3章 直流电机	24
3.1 直流电机的工作原理和基本结构	24
3.1.1 直流电动机的结构	24
3.1.2 直流电动机的工作原理	28
3.1.3 直流发电机的工作原理	29
3.1.4 电机的可逆原理	30
3.2 直流电机的主要型号及用途	30
3.2.1 直流电机的型号	30
3.2.2 直流电机的铭牌数据	31
3.2.3 直流电机的用途	31
3.2.4 直流电机的分类	32
3.3 直流电机的电枢绕组	34

3.3.1	电枢绕组的基本知识	34
3.3.2	单叠绕组	36
3.3.3	单波绕组	39
3.4	直流电机的磁场	42
3.4.1	直流电机空载磁场	42
3.4.2	直流电机有载磁场	43
3.4.3	电枢反应影响	46
3.5	直流电机电枢电动势和电磁转矩	47
3.5.1	直流电机电枢磁电动势	47
3.5.2	直流电机电磁转矩	47
3.6	直流电动机的基本方程	48
3.6.1	电枢电路电压平衡方程	48
3.6.2	功率平衡方程	49
3.6.3	转矩平衡方程	49
3.6.4	直流电机电磁功率	49
3.7	直流发电机	51
3.7.1	直流发电机励磁方式	51
3.7.2	直流发电机基本方程式	52
3.7.3	直流发电机空载特性和自励条件	54
3.8	直流电动机和直流发电机的运行特性	55
3.8.1	直流电动机的运行特性	55
3.8.2	直流发电机的运行特性	57
3.9	直流电机的换向	57
3.9.1	直流电机的换向问题和换向极绕组	57
3.9.2	直流电机的补偿绕组	59
3.10	小结	59
3.11	思考题与习题	60
第4章	直流电机拖动系统的静态特性	62
4.1	直流电动机的机械特性	62
4.1.1	直流他励电动机的机械特性	62
4.1.2	串励电动机的机械特性	67
4.2	他励直流电动机的起动	68
4.2.1	他励直流电动机的起动特性	68
4.2.2	电枢回路串电阻起动	69
4.2.3	降压起动	72
4.3	直流他励电动机制动运转状态的特性	73
4.3.1	能耗制动	73
4.3.2	反接制动	75
4.3.3	回馈制动	77

4.4	直流电机拖动的速度调节及其特性	78
4.4.1	调速指标	79
4.4.2	调速方法	80
4.4.3	他励直流电动机的反转	82
4.5	串励直流电动机的起动、调速、反转与制动	82
4.5.1	串励电动机的起动、调速和反转	82
4.5.2	串励电动机的制动	83
4.6	复励直流电动机的起动、调速与制动	85
4.7	小结	85
4.8	思考题与习题	86
第5章	变压器	88
5.1	变压器的基本结构和工作原理	88
5.1.1	变压器的基本结构	88
5.1.2	变压器的工作原理	89
5.1.3	变压器的额定值	90
5.1.4	变压器的分类	91
5.2	变压器的空载运行	91
5.2.1	变压器的空载运行电磁关系	92
5.2.2	变压器的空载运行电压方程与等效电路	93
5.2.3	变压器的空载电流和空载损耗	95
5.3	变压器的负载运行	95
5.3.1	变压器的负载运行电磁关系	95
5.3.2	变压器的负载运行电压方程	96
5.3.3	变压器的负载运行等效电路	96
5.4	变压器参数的试验测定	98
5.4.1	变压器的空载试验	98
5.4.2	变压器的有载试验(短路实验)	98
5.5	变压器的运行特性	99
5.5.1	变压器的外特性及电压变化率	99
5.5.2	变压器的损耗及效率	101
5.6	三相变压器	102
5.6.1	三相变压器的结构	102
5.6.2	三相变压器的磁路系统	104
5.6.3	三相变压器的电路系统	105
5.6.4	三相变压器的联结组别	106
5.6.5	三相变压器的并联运行	109
5.7	其他用途变压器	110
5.7.1	自耦变压器	110
5.7.2	仪用互感器	111

5.7.3 电焊变压器	113
5.8 小结	114
5.9 思考题与习题	114
第6章 三相异步电动机	116
6.1 三相异步电动机的基本结构和工作原理	116
6.1.1 三相异步电动机的基本结构	116
6.1.2 三相异步电动机的铭牌及主要系列	118
6.1.3 三相异步电动机的基本工作原理	119
6.2 三相异步电动机的绕组	124
6.2.1 交流绕组的基本知识	124
6.2.2 三相单层绕组	127
6.2.3 三相双层绕组	129
6.3 三相异步电动机绕组的感应电动势	132
6.3.1 线圈的感应电动势及短距系数	133
6.3.2 线圈组的感应电动势及分布系数	137
6.3.3 相绕组基波感应电动势	139
6.4 三相异步电动机绕组的磁动势	141
6.4.1 单相绕组的磁动势——脉动磁动势	141
6.4.2 三相绕组基波合成磁动势——旋转磁动势	149
6.5 三相异步电动机空载运行	157
6.5.1 空载运行时的电磁关系	157
6.5.2 空载运行时的基本方程式	158
6.5.3 空载运行时等效电路和相量图	159
6.6 三相异步电动机负载运行	160
6.6.1 负载运行时的电磁关系	164
6.6.2 负载运行时的基本方程式	165
6.6.3 负载运行时的等效电路和相量图	168
6.7 三相异步电动机的功率和转矩	177
6.7.1 功率平衡和转矩平衡	178
6.7.2 电磁转矩公式	180
6.8 三相异步电动机的工作特性	181
6.9 三相异步电动机的参数测定	183
6.9.1 空载试验	184
6.9.2 短路试验	185
6.10 小结	186
6.11 思考题与习题	189
第7章 三相异步电动机拖动系统的静态特性	191
7.1 三相异步电动机的机械特性	191
7.1.1 三相异步电动机机械特性的三种表达形式	191

7.1.2 固有机械特性和人为机械特性	194
7.2 三相异步电动机的起动特性	196
7.2.1 三相异步电动机的起动性能	196
7.2.2 三相笼型异步电动机的起动	196
7.2.3 三相绕线型异步电动机的起动	198
7.3 三相异步电动机制动运转状态的特性	201
7.3.1 能耗制动	201
7.3.2 反接制动	202
7.3.3 回馈制动	203
7.4 三相异步电动机拖动的速度调节及其特性	204
7.4.1 变极调速	205
7.4.2 变频调速	206
7.4.3 变转差率调速	206
7.5 小结	208
7.6 思考题与习题	208
第8章 同步电机	210
8.1 同步电机的结构和工作原理	210
8.1.1 同步电机的结构	210
8.1.2 同步电机的工作原理	212
8.1.3 同步电机的铭牌数据	214
8.2 同步电机的运行方式	215
8.2.1 同步电机的空载运行方式	215
8.2.2 同步电机的负载运行方式	216
8.3 同步电动机的电压方程和相量图	218
8.4 永磁同步电动机	220
8.4.1 永磁同步电机的发展状况	220
8.4.2 永磁同步电机的基本结构	220
8.4.3 永磁同步电机的分类	221
8.4.4 永磁同步电机的数学模型	221
8.5 同步电动机的电力拖动	224
8.5.1 同步电动机的起动	224
8.5.2 同步电动机的调速	225
8.6 小结	226
8.7 思考题与习题	226
第9章 特殊电机	227
9.1 单相异步电动机	227
9.1.1 单相异步电动机工作原理	227
9.1.2 单相异步电动机应用	228
9.2 伺服电动机	231

9.2.1 伺服电动机工作原理	231
9.2.2 伺服电动机控制方式	232
9.3 步进电动机	234
9.3.1 步进电动机的结构和分类	234
9.3.2 反应式步进电动机的运行方式	235
9.3.3 反应式步进电动机的特性	237
9.4 测速发电机	239
9.4.1 直流测速发电机	239
9.4.2 交流测速发电机	240
9.5 直线异步电动机	242
9.5.1 直线电动机的结构形式	242
9.5.2 直线异步电动机的工作原理	244
9.6 小结	245
9.7 思考题与习题	245
第10章 电力拖动系统中电动机的选择	247
10.1 电动机选择的一般概念	247
10.1.1 电动机发热及冷却	247
10.1.2 电动机的工作方式	247
10.2 电动机容量选择方法	248
10.2.1 连续工作制容量选择	249
10.2.2 短时工作制容量选择	250
10.2.3 断续周期工作制容量选择	251
10.3 电动机的选择	251
10.3.1 电动机类型的选择	251
10.3.2 电动机额定电压的选择	251
10.3.3 电动机额定转速的选择	252
10.3.4 电动机功率的选择	252
10.4 电动机的维护处理及故障	252
10.5 小结	254
10.6 思考题与习题	254
参考文献	255

第1章 绪 论

【本章主要内容】

1. 简单了解电机与电力拖动的发展简况；
2. 了解课程的性质、任务和学习方法；
3. 重点掌握电机理论中的常用物理概念和定律。

1.1 电机与电力拖动的发展简况

现代社会中，电能是使用最广泛的一种能源。电能有很多优点，它的生产和变换比较经济，传输和分配比较容易，使用和控制比较方便，是我国国民经济中各行业部门动力的主要来源。在电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制中，需要一种装置或设备来进行能量的转换或信号的变换，这种装置或设备就是电机。电机可按能量转换的形式划分为发电机、变压器和电动机等类型，这些电机在各行各业中都得到广泛的应用。在电力工业中，发电机和变压器是电站和变电所中的主要设备：如发电机可将机械能转换为电能，主要用于生产电能的发电厂中；在火电厂、水电厂和核电厂中，水轮机、汽轮机带动发电机，把燃料燃烧产生的热能、水流势能转换的机械能或原子核裂变的原子能都转换为电能。然而，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失，一般采用高压输电，输电电压为 110 kV 、 220 kV 、 330 kV 、 500 kV 或更高。把发电机发出的电压升高到输电电压是由变压器完成的。同理，高压输电线将电能输送到各个用电区，转换为各种用电设备，如电动机、电炉、电灯等不同的低电压等级，亦需要变压器将高电压降压为所需的低压等级。电动机可将电能转换为机械能，在工业企业中，电动机被广泛用为原动机去拖动各种生产机械。在机械工业、冶金工业、煤炭工业、石油化工、轻纺工业以及工矿行业中，机床、挖掘机械、轧钢机、起重机械、纺织机、造纸机、抽水机、鼓风机等大型生产机械都使用电动机来驱动。除此之外，各式各样的小巧灵敏的控制电机也被作为检测、放大、执行和解算元件应用在自动控制技术中。

1821 年，法拉第 (Faraday) 发现了载流导体在磁场内受力的现象。1831 年，法拉第又发现电磁感应定律。1835 年，皮克西 (Pixii) 制成一台旋转磁极式直流发电机，被称为是现代直流发电机的雏形。到 19 世纪末，各种交、直流电机的基本类型及其基本理论和设计方法的体系已经搭建完成，随着社会生产力的不断提高，电机得到了广泛应用和不断发展；反过来，电机的发展同时也促进了社会生产力的跃进和提升。如今已由电气化时代进入原子能、计算机及自动化时代，我们对电机的要求，包括性能、可靠性、单位重量、体积等方面也提出了更高的要求；在旋转电机的理论基础上，高精度、快响应的控制电机已成为电机学科的一个独立分支。电力电子学等学科的渗透也推动了电机的新发展。应用各种电动机拖动各种生产机械的电力拖动技术，其发展历程如下：

(1) 成组拖动

由一台电动机拖动一组生产机械,从电动机到各生产机械的能量传递以及在各生产机械之间的能量分配完全用机械方法,靠天轴(安装于厂房上方由一台电动机驱动多台设备的长轴)及机械传动系统来实现。电力拖动代替蒸汽或水力拖动,通过天轴实现的,称为“成组拖动”。

(2) 单电动机拖动系统

自 20 世纪 20 年代以来,为克服成组拖动的缺点,生产机械上广泛采用一种新的拖动方式,即“单电动机拖动系统”。在这一系统中,一台生产机械用一台单独的电动机拖动。这样,电动机与生产机械在结构上配合密切,可以用电气方法调节每台生产机械的转速,使得机械结构得到简化,而且易于实现生产机械运转的全部自动化。

(3) 多电动机拖动系统

如果用“单电动机拖动系统”,即一台电动机拖动具有多个工作机构的生产机械,则机械内部仍将保留着复杂的机械传动机构。因此,自 20 世纪 30 年代起,广泛采用了“多电动机拖动系统”,即每一个工作机构用单独的电动机拖动,可使生产机械的机械结构大为简化。某些生产机械的生产过程长而且连续,如造纸、印刷、纺织、轧制等机械,均可采用多电动机拖动系统。

(4) 自动化电力拖动系统

现代工业的电力拖动一般都要求局部或全部的自动化,因此必然要与各种控制元件组成的自动控制系统联系起来,而电力拖动则视为自动化电力拖动系统的简称。在这一系统中可对生产机械进行自动控制,如实现自动控制起动、制动、调速、同步。自动维持转速、转矩或功率为恒定值,按给定程序或事先不知道的规律改变速度、改变转向和工作机构的位置以及使工作循环自动化等。

1.2 本课程的性质、任务和学习方法

1.2.1 课程性质和任务

本课程是自动化、电气工程及其自动化等专业的一门专业基础课,其先修课包括高等数学、物理、电路及磁路等课程。

本课程的任务是要求学生掌握直流电机、变压器、交流电机、控制电机的基本结构与工作原理以及电力拖动系统的运行性能、分析计算、电机选择与实验方法,为学习电力拖动自动控制系统(运动控制系统)、反馈控制理论以及计算机控制技术等课程准备必要的基础知识。本课程主要研究电机与电力拖动系统的基本理论问题,同时也联系到科学实验与生产实际的内容。在学完本课程之后,应达到下列要求:

1) 掌握磁路基本定律及计算方法。

2) 掌握常用交、直流电机及变压器的基本结构和工作原理,了解对交、直流电机绕组的基本形式及其连接规律。

3) 掌握交、直流电机及变压器稳态运行时的基本理论、运行性能及其分析方法。

4) 掌握等效电路、基本方程式、向量图三种方式计算变压器和三相异步电动机的

性能。

- 5) 掌握控制电机的工作原理、特性及用途。
- 6) 掌握分析电动机机械特性及各种运行状态（起动、反接制动、能耗制动、回馈制动）的基本理论。
- 7) 掌握电力拖动机械过渡过程的基本特性及其主要的分析方法，了解机械惯性和电磁惯性同时作用时对直流电力拖动过渡过程的影响。
- 8) 掌握电力拖动系统中电动机参数调速方法的基本原理和技术经济指标。
- 9) 了解电机与电力拖动今后的发展方向。

1.2.2 学习方法

本课程具有研究对象多，研究内容广的特点，既有较强的理论性，又具备一定的工程性，综合性较强。研究对象包括直流电机，变压器，异步电机，同步电机，控制电机等多个机种；研究内容包括各种电机的工作原理和运行原理，不但涉及电压、电流随时间的变化，还要涉及磁动势和磁场在空间的分布和变化；不但涉及定、转子绕组间的电磁耦合和机电关系，还要涉及转子与原动机（或机械负载）之间的动力学关系。因此学习本课程时要注意以下几点：

1) 由表及里：首先要弄清各种电机的基本结构（包括铁心、绕组、换向器、电刷、集电环等结构），主要部件的作用和构成。为此，可到电机实验室（展览室）或电机厂实地参观，对实物建立初步印象。在此基础上，进一步通过结构的用途，理解和掌握各种电机的原理。

2) 由简入繁：在分析电机和变压器的工作特性时，先从相对简单的空载运行入手，并注意主磁场、电枢（二次绕组）磁场和漏磁场在电机内是如何分布的，合成磁场是如何形成的，各种磁通的作用是如何表达的，做到概念清楚。进而，在空载运行的基础上，学习负载运行时，磁场、磁通是如何变化的，有联系又区别地进行学习。

3) 推导演练：注意推导基本公式（电动势公式，磁动势公式，电磁转矩公式）和基本方程时有哪些假设，使推导得以合理简化；推导时应用了哪些基本电磁定律和力学定律，哪些原理、理论和方法。重要的公式和方程要自己独立地推导一遍，找出其中的关键点。同时，可结合课外实验去理解和验证这些公式的假设和结论。

4) 加强复习：要经过听课、课后复习、做习题、做实验、再复习，从理论到实践、从实践到理论的多次反复，才能逐步掌握课程内容，使学到的电机及其拖动知识逐步巩固起来。

1.3 电机理论中的常用物理概念和定律

下面介绍磁场的 6 个常用物理量：

• 磁通 Φ

国际单位：Wb（韦伯，简称“韦”）。在均匀磁场中，磁感应强度 B 的大小与垂直于磁场方向面积 A 的乘积，为通过该面积的通量，称为磁通量，简称磁通 Φ （一般情况下，磁通量定义为 $\Phi = \int B dA$ ）。由于 $B = \Phi/A$ ，也称为“磁通量密度”，可简称“磁通密度”。若用磁

感应矢量线来描述磁场，通过单位面积磁感应矢量线的疏密反映了磁感应强度（磁通密度）的大小以及磁通量的多少。

● 磁感应强度 B

国际单位：T（特斯拉，简称“特”）， $1\text{ T} = 1\text{ Wb/m}^2$ 。磁场是电流通入导体后产生的，表征磁场强弱及方向的物理量是磁感应强度 B ，它是一个矢量。磁场中各点的磁感应可以用闭合的磁感应矢量线来表示，它与产生它的电流方向可以用右手螺旋定则来确定，如图 1-1 所示。

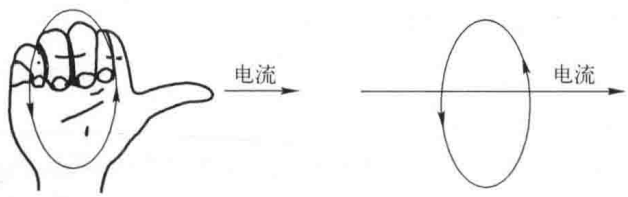


图 1-1 磁感应矢量线回转方向与电流方向的关系

● 磁场强度 H

国际单位：A/m（安培/米，简称“安/米”）。磁场强度 H 是计算磁场时所引用的一个物理量，它也是一个矢量。用来表示物质磁导能力大小的物理量称为“磁导率” μ ，它与磁场强度 H 的乘积等于磁感应强度 B ，即

$$B = \mu H \tag{1-1}$$

真空的磁导率为 μ_0 ，国际单位制中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{ H/m}$ 。

● 磁动势 F

国际单位：At（安培 - 匝数，简称“安匝”）。磁动势（MMF，Magnetic Motive Force）的标准定义是电流流过导体所产生磁通量的势力，是用来度量磁场或电磁场的一种量，类似于电场中的电动势或电压，1 安匝代表一匝导线线圈流过 1 安培电流时所产生的磁势。

● 磁阻 R_m

国际单位： $(\text{H}^{-1} = 1\text{ A/Wb})$ ，每亨利，简称“每亨”）。磁阻（Magnetic Reluctance）是指含有永磁体的磁路中的一个参量。表征铁心对磁通的阻碍作用。源于磁路中存在漏磁。磁路中的总磁通量是守恒的，但在空隙处的磁通密度相对降低，因有部分磁通在非空隙处流失，称之为漏磁，导致磁路中的磁阻。一段磁路的磁位差和磁通量的比值。磁导的定义式便是 $R_m = F/\Phi$ ，磁阻由该磁路的几何形状、尺寸、材料的磁特性等因素决定。

● 磁导 Λ

国际单位： $(\text{H} = 1\text{ Wb/A})$ ，亨利，简称“亨”）。磁阻的倒数称作磁导。用 Λ 代表磁导，磁导的定义式便是 $\Lambda = \Phi/F$ 。接下来，再介绍磁路的概念，如同把电流流过的路径称为电路一样，磁通所通过的路径称为磁路。图 1-2 所示表示两种常见的磁路，其中图 1-2a 为变压器的磁路，图 1-2b 为四极直流电机的磁路。

最后，再来介绍磁路的 7 个基本定律：

● 磁路的欧姆定律

磁路中通过的磁通等于磁路的磁动势除以磁路的磁阻，即

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \tag{1-2}$$

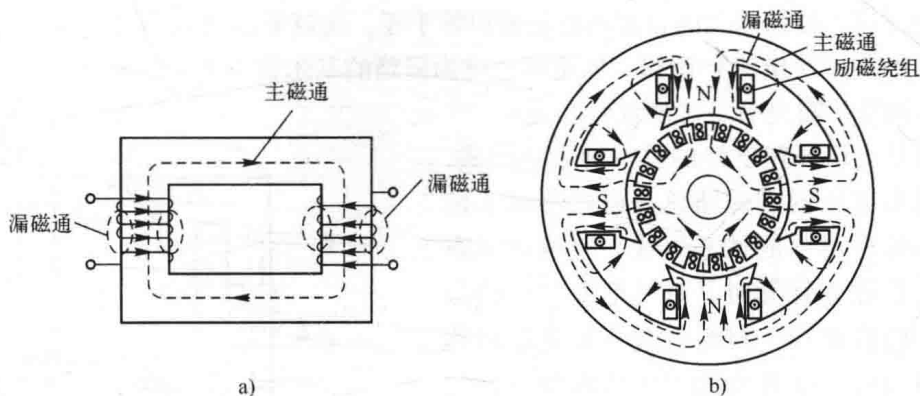


图 1-2 两种常见的磁路

a) 变压器磁路 b) 四极直流电机磁路

F 是作用在磁路上的磁动势。若磁路上有多个线圈共同产生磁动势，则磁动势为

$$F = \sum N \cdot i \quad (1-3)$$

其中，磁路磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu S}$ ，即磁阻与磁路长度 l 成正比，与磁路的磁导率 μ 及磁路截面积 S 成反比。

• 安培环路定律

磁场中沿任意一个闭合环路的磁场强度的线积分等于穿过这个环路的所有电流的代数和，亦称全电流定律，即

$$\oint H \cdot dl = \sum I = \sum N \cdot i \quad (1-4)$$

这一定律运用到电机、变压器中，如磁路不是同一种材料构成时，可以将磁回路按材料及截面不同分成 n 段磁路，如图 1-3 所示，则全电流定律可写成

$$\sum_{k=1}^n H_k \cdot l_k = \sum I = \sum N \cdot i \quad (1-5)$$

• 磁路的基尔霍夫第一（磁通）定律

通常铁心都不会是一个简单回路，而是带有并联分支的磁路，如图 1-4 所示，如当在中间铁心柱上加有磁动势 F 时，磁通的路径将如图中虚线所示。若令进入闭合面 A 的磁通为正，穿出闭合面的磁通为负，则闭合面积分得

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0 \quad (1-6)$$

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-7)$$

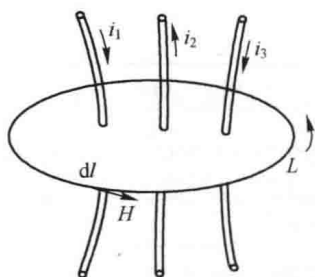


图 1-3 安培环路定律

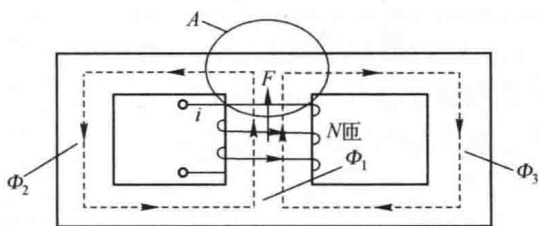


图 1-4 磁路的基尔霍夫第一（磁通）定律

即穿出或进入任何一个闭合面的总磁通恒等于零，这就是磁通连续性定律。比拟于电路中的基尔霍夫第一（电流）定律，该定律也称为磁路的基尔霍夫第一（磁通）定律。

• 磁路的基尔霍夫第二（磁动势）定律

此定律是安培环路定律的另一种表达形式，即由于电机和变压器的磁路总是由数段的不同截面、不同铁磁材料的铁心组成，还可能含有气隙，因此在磁路计算时，总是把整个磁路分成若干段，每段由同一材料构成、其截面面积相同且段内磁通密度处处相等，从而磁场强度亦处处相等。例如，图 1-5 所示磁路由三段组成，其中两段为截面不同的铁磁材料，第三段为气隙。若铁心上的励磁磁动势为 Ni ，根据安培环路定律（磁路欧姆定律）可得

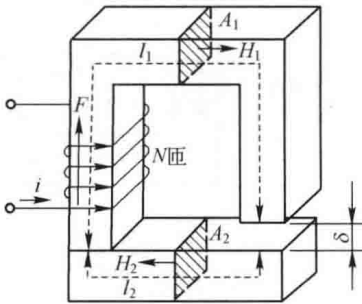


图 1-5 磁路的基尔霍夫第二（磁动势）定律

$$Ni = \sum_{k=1}^3 H_k l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_\delta \delta = \Phi_1 R_{m1} + \Phi_2 R_{m2} + \Phi_\delta R_{m\delta} \tag{1-8}$$

式中， l_1 、 l_2 分别为 1、2 两段铁心的平均长度，其磁路的截面面积各为 A_1 、 A_2 ； δ 分别为气隙长度； H_1 、 H_2 分别为 1、2 两段磁路内的磁场强度； H_δ 为气隙内的磁场强度； Φ_1 、 Φ_2 为分别为 1、2 两段铁心内的磁通； Φ_δ 为气隙内磁通； R_{m1} 、 R_{m2} 分别为 1、2 两段铁心磁路的磁阻； $R_{m\delta}$ 为气隙磁阻。

• 电磁感应定律

即右手定则：当磁通在线圈中交变时，如规定电动势正方向与磁通的正方向符合右手螺旋定则，切割电动势的方向用右手定则确定。

可用公式表达为

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \tag{1-9}$$

当磁通与导体有相对运动而产生切割电动势时，用如下公式表达

$$e = Blv \tag{1-10}$$

• 电磁力定律

即左手定则：载流导体在磁场中受力，可用左手定则确定，用公式可表达为

$$f = Blv \tag{1-11}$$

通过对比，可以发现磁路和电路有一定的相似性，但也有区别。为了更好地理解二者之间的联系，见表 1-1 所示磁路和电路的比较。

表 1-1 磁路和电路的比较

电 路	磁 路
电动势 $E[V]$	磁动势 $F[A]$
电流 $I[A]$	磁通 $\Phi[Wb]$
电流密度 $J[A/m^2]$	电流密度 $B[Wb/m^2]$
电阻 $R = \rho \frac{l}{s} [\Omega]$	磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu s} [1/H]$

(续)

电 路	磁 路
电导 $G = \frac{1}{R} [S]$	磁阻 $\Lambda = \frac{1}{R_m} [H]$
电路欧姆定律 $I = \frac{E}{R}$	磁路欧姆定律 $\Phi = \frac{F}{R_m}$
电路基尔霍夫第一定律 $\sum i = 0$	磁路基尔霍夫第一定律 $\sum \Phi = 0$
电路基尔霍夫第一定律 $\sum u = \sum e$	磁路基尔霍夫第一定律 $\sum H \cdot l = \sum N \cdot i$

但磁路与电路仅是一种形式上的类似，而不是物理本质的相似，二者还有本质的区别，总结如下：

- 1) 电路中有电流 I 时，就有功率损耗 $I^2 R$ ；而在直流磁路中，维持一定的磁通量 Φ 时，铁心中没有功率损耗。
- 2) 在电路中可以认为电流全部在导线中流通，导线外没有电流。在磁路中，则没有绝对的磁绝缘体，除了铁心中的磁通外，实际上总有一部分漏磁通散布在周围的空气中。
- 3) 电路中导体的电阻率 ρ 在一定的温度下是不变的，而磁路中铁心的磁导率 μ_{Fe} 却不是常值，它是随铁心的饱和程度大小而变化的。
- 4) 对于线性电路，计算时可以应用叠加原理，但对于铁心磁路，计算时不能应用叠加原理，因为铁心饱和时磁路为非线性。

1.4 小结

本章简要介绍了电机及电力拖动技术的发展概况，主要说明了本课程的性质和内容，结合其特点，阐述了本课程的四点学习方法，并重点介绍了电机理论中常用的基本概念和定律，具体回顾了电路的两个定律，复习了磁路中常用的物理量和基本定律，包括安培环路定律、磁路的欧姆定律、基尔霍夫第一定律、基尔霍夫第二定律等，并通过数学公式进行表达；最后，通过类比的方法，帮助读者清晰地理解磁路和电路之间的联系和区别。

1.5 思考题与习题

- 1.1 磁路的磁阻如何计算？磁阻的单位是什么？
- 1.2 磁路的基本定律有哪些？当铁心磁路上有几个磁动势同时作用时，计算磁路能否用叠加原理？为什么？
- 1.3 有一闭合铁心磁路，铁心的截面积 $A = 9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，磁路的平均长度 0.3 m ，铁心的磁导率为 $\mu_{Fe} = 5000\mu_0$ (μ_0 为真空的磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)，套装在铁心上的励磁绕组为 500 匝，不计漏磁。试求在铁心中产生 1 T 的磁通密度时，所需的励磁磁动势和励磁电流。
- 1.4 如图 1-6 所示铁心线圈（单位为 cm ），已知线圈的匝数 $N = 1000$ ，铁心厚度为 0.025 m ，铁心由 0.35 mm 的 DR320 硅钢片叠成，叠片系数（即扣除叠片中的空气层以后，