



高等院校网络教育系列教材

机电传动控制

吴 清 刘小成 夏春明 ©编著

华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

$$\begin{aligned} i(2\theta-2\phi) &= a(\cos 2\theta \cos 2\phi + \sin 2\theta \sin 2\phi) \\ &= a\left[\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2a} \cos 2\phi + \frac{\tau_{12}}{a} \sin 2\phi\right] \\ &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\phi + \tau_{12} \sin 2\phi \end{aligned}$$

高等院校网络教育系列教材

机电传动控制

吴清 刘小成 夏春明 编著

图书在版编目(CIP)数据

机电传动控制/吴清,刘小成,夏春明编著.

—上海:华东理工大学出版社,2011.2

(高等院校网络教育系列教材)

ISBN 978-7-5628-2977-5

I. ①机... II. ①吴... ②刘... ③夏... III. ①电力传动
控制设备-高等学校-教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 004679 号

高等院校网络教育系列教材

机电传动控制

编 著 / 吴 清 刘小成 夏春明

责任编辑 / 周 萍

责任校对 / 张 波

出版发行 / 华东理工大学出版社

社 址:上海市梅陇路 130 号, 200237

电 话:(021)64250306(营销部)

传 真:(021)64252707

网 址:press.ecust.edu.cn

印 刷 / 上海展强印刷有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 16.25

字 数 / 390 千字

版 次 / 2011 年 2 月第 1 版

印 次 / 2011 年 2 月第 1 次

印 数 / 1—2000 册

书 号 / ISBN 978-7-5628-2977-5/TH·83

定 价 / 39.50 元



(本书如有印装质量问题,请到出版社营销部调换。)

前 言

“机电传动控制”课程是机械设计制造及其自动化专业的一门必修专业基础课,是机电一体化人才所需电气知识结构的基础。由于电力传动控制装置和机械设备是一个不可分割的整体,所以本课程以电动机、控制元件及控制系统为主线,详细介绍了机电传动的基础知识、电动机特性、常规控制元件、典型控制线路及现代机械设备中所需要的先进控制技术,如可编程控制器(PLC)、变频器和组态软件技术。

本书内容根据学科的发展及其内在规律,把机电一体化技术所需的强电控制知识都集中在本书中,避免了不必要的重复,加强了系统性,而且理论联系实际,突出实用,使读者对机电一体化产品中电控技术的强电控制部分有更全面、系统的了解和掌握。在每章结尾都有思考题和习题,并在书的附录部分给出了部分习题答案和提示,便于读者自学。

本书共分十个章节。

第1章 概述,介绍了机电传动系统的发展。

第2章 机电传动分析的基础知识,将本书中用到的基础知识汇总,读者可以根据自己的基础情况学习对应的内容,为后续章节的学习打下基础。

第3章 直流电机,介绍了直流电机的工作原理、机械特性、启动、调速和制动。

第4章 交流电机,介绍了交流电机的工作原理、机械特性、启动、调速和制动。

第5章 继电器—接触器控制系统,介绍了常用电器和各典型控制线路。

第6章 电动机和低压电器的选择。

第7章 可编程序控制器(PLC),重点介绍了 S7-200 的原理和使用。

第8章 变频器,介绍了变频器的工作原理及使用。

第9章 触摸屏及组态软件。

第10章 控制电机,介绍了目前常用的各种控制电机。

在本书的编写过程中,借鉴了许多现行教材的宝贵经验,在此谨向这些作者表示诚挚的感谢。在本书的资料收集整理过程中,曹炜、曹默、罗巍巍、马畅、沈天柱、尚文、张滨、朱佳华给予了很大的帮助,在此表示感谢。由于编者水平有限,书中错误或不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

2010年9月

目 录

第1章 概 述	1
1.1 机电传动的目的和任务	1
1.2 机电传动及其控制系统的发展概况	1
1.3 课程的性质和任务	3
1.4 课程的内容安排	3
第2章 机电传动分析的基础知识	4
2.1 电机中的基本电磁知识	4
2.1.1 磁场和磁路分析中常用物理量	4
2.1.2 磁路的概念	6
2.1.3 电磁基本定律	6
2.1.4 功率因数的提高	10
2.1.5 导磁材料及其特性	10
2.1.6 电路与磁路的区别	11
2.2 控制系统的基本知识	12
2.2.1 系统及控制系统	12
2.2.2 控制系统的分类	12
2.3 机电传动系统的动力学基础	13
2.3.1 直线运动	13
2.3.2 旋转运动	15
2.3.3 机电传动系统的运动方程式	17
2.3.4 转矩、转动惯量和飞轮转矩的折算	19
2.3.5 电动机所需输出功率的计算基础	21
2.4 生产机械的机械特性	25
2.4.1 恒转矩型机械特性	25
2.4.2 离心式通风机型机械特性	25
2.4.3 直线型机械特性	25
2.4.4 恒功率型机械特性	26
2.5 机电传动系统稳定运行的条件	26
2.6 机电传动系统的过渡过程	27
2.6.1 机电传动系统中的惯性	28
2.6.2 机电传动系统的过渡过程时间	28
2.6.3 加快过渡过程的方法	29

思考题与习题	29
第3章 直流电机	31
3.1 直流电机的工作原理和基本结构	31
3.1.1 直流电机的工作原理	31
3.1.2 直流电机的基本结构	32
3.1.3 直流电机的励磁方式	34
3.2 直流发电机	35
3.2.1 他励直流发电机	35
3.2.2 并励直流发电机	36
3.2.3 复励直流发电机	38
3.3 直流电动机	39
3.3.1 他励和并励直流电动机	39
3.3.2 串励直流电动机	39
3.3.3 复励直流电动机	40
3.4 直流电动机的机械特性	41
3.4.1 直流他励电动机的固有机机械特性	42
3.4.2 直流他励电动机的人为机械特性	43
3.5 直流他励电动机的启动	44
3.6 直流他励电动机的调速	45
3.6.1 改变电枢回路电阻的调速特性	46
3.6.2 改变电枢回路电压的调速特性	46
3.6.3 改变励磁磁通的调速特性	47
3.7 直流他励电动机的制动	49
3.7.1 能耗制动	49
3.7.2 反馈制动	51
3.7.3 反接制动	52
思考题与习题	54
第4章 交流电机	55
4.1 三相异步电动机的结构和工作原理	55
4.1.1 三相异步电动机的结构	55
4.1.2 三相异步电动机的工作原理	58
4.2 三相异步电动机的定子电路和转子电路	62
4.2.1 定子电路	62
4.2.2 转子电路	63
4.3 三相异步电动机的转矩与机械特性	64
4.3.1 三相异步电动机的电磁转矩	64
4.3.2 三相异步电动机的机械特性	65

4.4 三相异步电动机的工作特性	68
4.4.1 转速特性	68
4.4.2 定子电流特性	68
4.4.3 功率因素特性	68
4.4.4 电磁转矩特性	69
4.4.5 效率特性	69
4.5 三相异步电动机的启动特性	69
4.5.1 鼠笼式异步电动机的启动方法	70
4.5.2 线绕式异步电动机的启动方法	72
4.6 三相异步电动机的调速特性	73
4.6.1 调压调速	73
4.6.2 转子电路串电阻调速	73
4.6.3 变极对数调速	73
4.6.4 变频调速	74
4.7 三相异步电动机的制动特性	75
4.7.1 反接制动	75
4.7.2 回馈制动	76
4.7.3 能耗制动	77
4.8 单相异步电动机	78
4.8.1 单相异步电动机的结构和工作原理	78
4.8.2 单相异步电动机常用的启动方式	79
思考题与习题	80
第5章 继电器—接触器控制系统	82
5.1 常用低压电器	82
5.1.1 低压配电电器	82
5.1.2 低压控制电器	86
5.2 电气控制线路的绘制	95
5.2.1 常用电气图形符号和文字符号	95
5.2.2 电气原理图绘制及其原则	99
5.3 三相异步电动机的控制线路	100
5.3.1 三相异步电动机的启动控制线路	100
5.3.2 三相异步电机的正反转控制线路	104
5.3.3 三相异步电机的制动控制线路	105
5.4 三相异步电动机的调速及软启动	107
5.4.1 三相异步电动机调速控制	107
5.4.2 三相异步电动机软启动控制线路	110
5.5 常用控制线路	113
思考题与习题	114

第 6 章 电动机和低压电器的选择	116
6.1 电动机容量选择原则	116
6.2 不同工作方式下电动机容量选择	117
6.2.1 电动机负载基本恒定时电动机额定功率的选择	117
6.2.2 变动负载下电动机额定功率的选择	118
6.2.3 重复短时工作方式电动机额定功率的选择	121
6.3 电动机的种类、额定电压、额定转速及形式的选择	122
6.3.1 电动机种类的选择	122
6.3.2 电动机额定电压的选择	122
6.3.3 电动机额定转速的选择	123
6.3.4 电动机形式的选择	123
6.4 低压电器的选择	123
6.4.1 低压开关	123
6.4.2 熔断器	124
6.4.3 主令电器	125
6.4.4 接触器	126
6.4.5 继电器	127
思考题与习题	128
第 7 章 可编程序控制器(PLC)	129
7.1 PLC 的基本结构和原理	129
7.1.1 PLC 的基本结构	129
7.1.2 PLC 的基本工作原理	131
7.2 PLC 的性能指标	132
7.3 PLC 的编程语言	134
7.4 西门子系列 PLC	136
7.4.1 S7-200 的模块组成	136
7.4.2 I/O 地址的分配	141
7.4.3 S7-200 基本指令系统	143
7.5 PLC 控制系统设计的内容步骤	150
7.5.1 PLC 应用系统设计的基本原则	150
7.5.2 系统设计和调试的主要步骤	151
7.6 PLC 的硬件设置	153
7.6.1 PLC 型号的选择	153
7.6.2 I/O 模块的选择	154
7.6.3 输入/输出点的配置	157
7.7 PLC 的软件设计	157
7.7.1 PLC 应用系统的软件设计过程	157

7.7.2 常用的程序设计方法	158
思考题与习题	161
第8章 变频器	162
8.1 通用变频器的基本工作原理	162
8.1.1 基本控制方式	162
8.1.2 逆变的基本原理	163
8.1.3 逆变器	165
8.1.4 智能功率模块(IPM)	168
8.1.5 脉宽调制(PWM)型变频器	168
8.2 通用变频器的参数设置及功能选择	170
8.2.1 通用变频器的外部接口电路	170
8.2.2 主要控制功能	172
8.2.3 变频器的参数设定实例	174
8.3 变频器调速系统设计	175
8.3.1 转速控制的基本概念	175
8.3.2 开环转速控制	176
8.3.3 高精度速度控制的实现方法	176
8.4 变频器外围设施的选用及安装	176
8.4.1 变频器的外围设施的选用	176
8.4.2 变频器的安装	179
思考题与习题	181
第9章 触摸屏及组态软件	183
9.1 触摸屏	183
9.1.1 eView 触摸屏	183
9.1.2 制作一个简单的 EB 500 工程文件	185
9.2 组态软件	193
9.2.1 WinCC 组态软件	194
9.2.2 组态一个简单的 WinCC 项目	195
思考题与习题	205
第10章 控制电机	206
10.1 伺服电动机	206
10.1.1 直流伺服电动机	207
10.1.2 交流伺服电动机	208
10.1.3 交/直流伺服电动机的性能比较	210
10.2 力矩电动机	211
10.2.1 永磁式直流力矩电动机的结构特性	211

10.2.2 直流力矩电动机的特点	212
10.3 微型同步电动机	212
10.3.1 永磁式微型同步电动机	212
10.3.2 反应式微型同步电动机	213
10.3.3 磁滞式微型同步电动机	214
10.4 测速发电机	215
10.4.1 直流测速发电机	216
10.4.2 交流(感应)测速发电机	217
10.5 自整角机	218
10.5.1 控制式自整角机	218
10.5.2 力矩式自整角接收机	220
10.5.3 控制式自整角变压器	221
10.5.4 控制式差动发送机	221
10.5.5 自整角机的选择和使用	222
10.6 直线电动机	222
10.7 步进电动机	225
10.7.1 步进电动机的结构与工作原理	226
10.7.2 小步距角步进电动机	228
10.7.3 步进电动机的分类	229
10.7.4 步进电动机的运行特性及影响因素	230
10.7.5 步进电动机的主要性能指标和应用	234
10.7.6 步进电动机的开、闭环控制	235
思考题与习题	238
附录 思考题与习题部分答案	239
参考文献	246

第 1 章 概 述

本章作为本书的入门引导,介绍机电传动与控制系统的的历史、基本含义、有关概念和基本要求。

1.1 机电传动的目的和任务

机电传动(又称电力传动或电力拖动)就是指以电动机为原动机驱动生产机械的系统总称,它的目的是将电能转变为机械能,实现生产机械的启动、停止以及速度调节,完成各种生产工艺过程要求,保证生产过程的正常进行。

在现代工业中,为了实现生产过程自动化的要求,机电传动不仅包括拖动生产机械的电动机,而且包含控制电动机的一整套控制系统。所以,现代机电传动是和由各种控制元件组成的自动控制系统紧密地联系在一起的,这也是本书取名为《机电传动控制》的原因。

按照现代化生产的要求,机电传动控制系统所要完成的任务,从广义上讲,就是要使生产机械设备、生产线、车间,甚至整个工厂都实现自动化。从狭义上讲,则专指控制电动机驱动生产机械,实现生产产品数量的增加、质量的提高、生产成本的降低、工人劳动条件的改善以及能量的合理利用。

1.2 机电传动及其控制系统的发展概况

机电传动及其控制系统总是随着社会生产的发展而发展的。单就机电传动而言,它的发展大体上经历了成组拖动、单电动机拖动和多电动机拖动三个阶段。(1)成组拖动,就是指一台电动机拖动一根天轴,然后再由天轴通过皮带轮和皮带分别拖动各生产机械,这种拖动方式生产效率低、劳动条件差,一旦电动机发生故障,将造成成组的生产机械停车;(2)单电动机拖动,就是用一台电动机拖动一台生产机械,它虽较成组拖动前进了一步,但当一台生产机械的运动部件较多时,机械传动机构仍十分复杂;(3)多电动机拖动,即一台生产机械的每一个运动部件分别由一台专门的电动机拖动,这种拖动方式不仅大大简化了生产机械的传动机构,而且控制灵活,为生产机械的自动化提供了有利的条件,所以,现代化机电传动基本上均采用这种拖动形式。

原始的机械设备由工作机构、传动机构和原动机组成,控制方式由工作机构和传动机构的机械配合实现。随着以电气元件为主的自动控制系统的的应用,设备的性能不断提高,使工作机构、传动机构的结构大为简化。主要由继电器、接触器、按钮、开关等元件组成的机械设备的电气控制系统称为继电器接触器控制系统。其主要控制对象是三相交流异步电动机,

对电动机的启动、制动、反转和调速等进行控制。这种控制所用的电器一般不是“接通”就是“断开”的,控制是断续的。所以,从控制性质上看,这种继电器—接触器控制属于断续控制或开关控制。因其简单、易掌握、价格低、易维修,许多通用机械设备至今仍采用这种控制系统。但是,它也存在功耗大、体积大、控制方式完全固定和不灵活的缺点。

开关控制不能满足对调速性能要求较高的生产机械,因此出现了直流发电机—电动机调速系统。直流电动机具有启动转矩大、容易进行无级调速的特点。但它需要直流电源,直流电源是由一台交流电动机拖动一台直流发电机提供的。这种直流发电机—电动机调速系统中的电压和电流可以连续变化,属于连续控制。目前龙门刨床、轧钢机和造纸机等仍在应用这种控制方式。但是,这种方式存在所用电机数量多、占地面积大、噪声大和效率低等缺点。20 世纪 60 年代后出现了晶闸管电动机自动调速系统,这种系统中的直流电源由晶闸管组成的可控整流电路提供,具有体积小、重量轻、效率高和控制灵敏等优点,所以得到了普遍应用。

20 世纪 80 年代以后,由于半导体技术的应用与发展,使得交流电动机调速系统有了突破性进展。交流调速有许多优点,单机容量和转速可大大高于直流电动机,交流电动机无电刷与换向器,易于维护,可靠性高,能用于带有腐蚀性、易爆性、含尘气体等特殊环境中。与直流电动机相比,交流电动机还具有体积小、重量轻、制造简单、坚固耐用等优点。交流调速已突破关键性技术,从实用阶段进入了扩大应用、系列化的新阶段。以笼型交流伺服电动机为对象的矢量控制技术是近年来新兴的控制技术,它能使交流调速具有直流调速的优越调速性能。交流变频调速器、矢量控制伺服单元及交流伺服电动机已日益广泛地应用于工业中。

为了适应工业自动化和生产过程变动节奏加快的要求,电气控制逐步采用顺序控制技术。所谓顺序控制,就是对机械设备的动作和生产过程按预先规定的逻辑顺序自动进行的一种控制。20 世纪 60 年代末发展起来的实现顺序控制的一种通用的电气控制装置称为顺序控制器(也称程序控制器),一般具有逻辑运算、顺序操作、定时、计数、程序转移、程序分支和程序循环等功能,有的还具有算术运算和数值比较等功能。它不仅用于单机控制,而且用于多机群控和生产线的自动控制等。其主要特点是:编制程序和改变程序方便,通用性和灵活性强,原理简单易懂,工作比较稳定可靠,使用和维修方便,装置体积小,设计和制造周期短,用它可代替大量的继电器。在机床行业,顺序控制器广泛用于单机、组合机床和自动生产线的控制。

近年来,可编程控制器(PLC)在工业过程自动化系统中的应用日益广泛。可编程控制器从一问世起就是以最基层、第一线的工业自动化环境及任务为前提的。它可用梯形图编程,具有硬件结构简单、安装维修方便、抗强电磁干扰、工作可靠等优点,工程技术人员能很快地熟悉它、使用它。可编程控制器是一种数字运算操作的电子系统,是专门为在工业环境下应用而设计的。它采用一类可编程序的存储器,用来存储执行逻辑运算、顺序控制、定时和算术运算等面向用户的指令,并通过数字式或者模拟式的输入和输出,控制各种类型的机械或生产过程。可编程控制器及其有关外部设备,都按易于工业控制系统连成一体,又易于扩充功能的原则设计。近年来,PLC 的一个发展方向是微型、简易、价廉,以图占领一向以继电器系统为主流的(如一般机床、包装机、传输带等)控制领域;另一发展方向是向大型高性能方面延伸。

上述各种控制系统均为电气控制系统。近些年来,在软件方面,许多工业部门都采用了组态软件,组态软件是数据采集监控系统 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition)的软件平台工具,是工业应用软件的一个组成部分。它具有丰富的设置项目,使用方式灵活,功能强大。通过组态软件由上位机程序监控 PLC,然后由 PLC 控制现场的变频器和电动机或直接由组态软件控制现场的变频器和电动机系统。随着组态软件自身以及控制系统的发展,监控组态软件部分地与硬件发生分离,为自动化软件的发展提供了充分发挥作用的舞台。

1.3 课程的性质和任务

机电一体化产品质量和技术水平的高低,已是当今世界衡量一个国家实力和国际地位的重要标志。实现产品的高质量和技术的高水平,其关键是机电一体化技术人才的培养。本课程把驱动电机、控制电机、继电器—接触器控制、可编程序控制器、变频器、组态软件等强电控制的内容,根据学科的发展与其内在规律,以伺服驱动系统为主导,以控制为线索,将元器件与伺服控制系统科学、有机地结合起来,把机电一体化技术所需的强电控制知识都集中在本书中,避免了不必要的重复,加强了系统性,而且理论联系实际,使读者对机电一体化产品中电控技术的强电控制部分有全面、系统的了解和掌握。

1.4 课程的内容安排

全书共分 10 章。第 1 章为概述。第 2 章为基础知识。第 3、第 4 章分别介绍了直流电动机和交流电动机的工作原理及其特性。由于继电器—接触器控制系统,目前还广泛应用于生产实际中,它仍然起着重要的作用,故第 5 章介绍了继电器—接触器控制系统中用到的常用电器和基本控制线路,以及典型的应用实例等。第 6 章介绍了电动机和低压电器的选择。顺序控制器早已应用在自动化的生产中,随着微型计算机的出现和迅速发展,可编程序控制器正在取代传统的顺序控制器,故第 7 章介绍了可编程控制器。变频器的使用越来越普遍;第 8 章介绍了变频器的原理和使用。第 9 章介绍了触摸屏和组态软件,适应目前触摸屏和组态软件的普及应用。随着机电传动控制系统的发展,控制电机作为一种重要的检测、控制元件,被使用得愈来愈多,故第 10 章介绍了各类常用控制电机的结构特点、工作原理、性能和应用。

本教材是按课程学时数为 40~60 编写的。除了课堂讲授的基本内容之外,有一些内容可在教师启发下由学生自学完成,其中第 10 章可以作为选学内容,这部分内容可由教师根据需要,在教学中灵活掌握。本书各章后面附有思考题和习题,书末附有部分思考题和习题的答案或提示,适于读者自学。

第 2 章 机电传动分析的基础知识

电机的工作原理都是建立在电磁感应定律、电磁力定律、安培环路定律和电路定律等基本定律之上。电机又往往是用来驱动负载的,掌握机电传动系统的运动方程式及其相关计算和多轴拖动系统中转矩折算的基本原则和方法,了解几种典型生产机械的负载特性,掌握机电传动系统稳定运行的条件并学会用它来分析系统的稳定平衡点,是必须先要掌握的基本知识。如果这些基本知识已经掌握,可跳过本章。

本章将对以上基本知识作集中介绍,作为后续内容的基本知识的铺垫。

2.1 电机中的基本电磁知识

电机是一种基于电磁感应原理和电磁力定律而实现机电能量转换的机械装置,发电机将机械能转换成电能,电动机将电能转换成机械能。但无论是发电机还是电动机,其工作原理都是建立在电磁感应定律、全电流定律、电路定律和电磁力定律等基础之上的。

2.1.1 磁场和磁路分析中常用物理量

描述磁场的物理量主要有磁感应强度(或磁通密度) B 、磁场强度 H 、磁通 Φ 、磁动势 F 、磁阻 R_m 、磁导 Λ_m 、磁链 ψ 等,下面逐一介绍。

1. 磁感应强度(或磁通密度) B

载流导体周围存在着磁场,描述磁场强弱和方向的物理量是磁感应强度 B , B 是矢量。为了形象地描绘磁场,常采用磁力线。磁力线是闭合的曲线,在磁铁外部由 N 极指向 S 极;在磁铁内部,由 S 极指向 N 极。图 2-1 画出了用磁力线表示的载流长导线、线圈和螺线管周围的磁场分布情况。

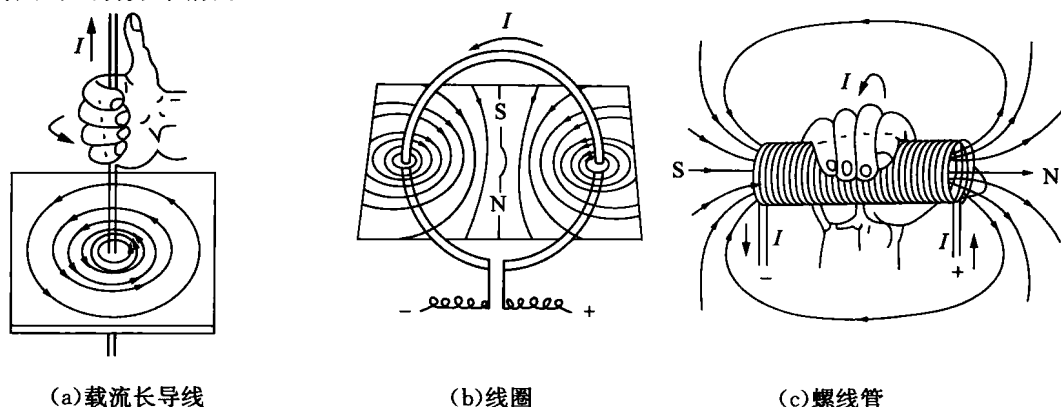


图 2-1 用磁力线表示的载流体周围的磁场分布

磁力线的方向与产生它的电流方向符合右手螺旋定则,如图 2-2 所示。磁感应强度也称为磁通密度,单位为 T(特)。

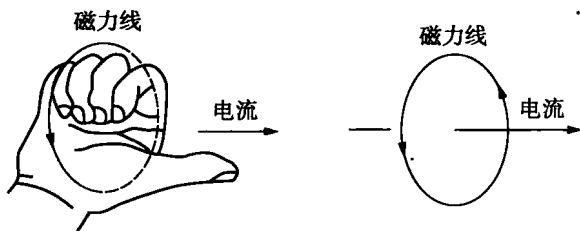


图 2-2 磁力线与电流的右手螺旋关系

2. 磁场强度 H

表征磁场性质的另一个基本物理量是磁场强度 H , H 是矢量,其单位为 A/m。它与磁感应强度 B 的关系为

$$H = B / \mu \quad (2-1)$$

式中, μ 为介质的磁导率。电机中所用的介质,主要是铁磁材料和非导磁材料。空气、铜、铝和绝缘材料等为非导磁材料,它们的磁导率可认为等于真空的磁导率 μ_0 , $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。铁磁材料的磁导率远大于真空的磁导率,如铸钢的磁导率 μ 约为 μ_0 的 1 000 倍,各种硅钢片的磁导率 μ 约为 μ_0 的 6 000~7 000 倍。

3. 磁通 Φ

穿过某一截面(面积为 A)的磁感应强度 B 的通量称为磁通,用符号 Φ 表示,即

$$\Phi = \int_A B \cdot dA \quad (2-2)$$

在均匀磁场中,如果截面 A 与 B 垂直,如图 2-3 所示,则磁通 Φ 和磁感应强度 B 之间的数值关系为

$$\Phi = BA \text{ 或 } B = \Phi / A \quad (2-3)$$

因此, B 又是单位面积上的磁通,称为磁通密度,简称为磁密。在国际单位制中,磁通 Φ 的单位为 Wb(韦伯),磁通密度的单位为 T, $1\text{T} = 1\text{Wb/m}^2$ 。

4. 磁动势 F

线圈中通以电流就会产生磁场,若线圈的匝数为 N ,电流为 I ,则线圈所产生的磁动势 F 为

$$F = NI \quad (2-4)$$

磁动势是产生磁通的“动力”,单位为 A(安)。

5. 磁阻 R_m

磁阻类似于电路中的电阻,表示磁路对磁通所起的阻碍作用。在磁路中取一段由磁导率为 μ 的材料构成的均匀磁路,其横截面积为 A ,长度为 L ,如图 2-4 所示,则该段磁路的磁阻 R_m 为

$$R_m = L / (\mu A) \quad (2-5)$$

磁阻 R_m 的单位为 H^{-1} (1/亨)。

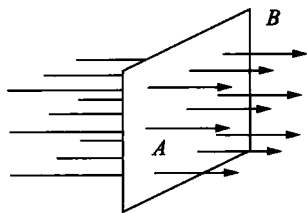


图 2-3 均匀磁场中的磁通

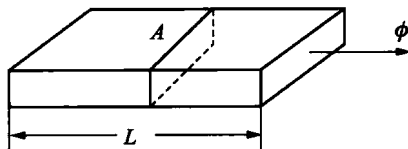


图 2-4 磁路段

6. 磁导 Λ_m

磁阻的倒数称为磁导,用 Λ_m 表示,即

$$\Lambda_m = 1/R_m = \mu A/L \quad (2-6)$$

磁导的单位为 H(亨)。

7. 磁链 ψ

线圈的匝数 N 与通过线圈的磁通 Φ 的乘积,称为磁链,用 ψ 表示,即

$$\psi = N\Phi \quad (2-7)$$

8. 边缘效应

当磁路中存在气隙,磁通经过气隙时,将由气隙段向外扩散,这种现象称为边缘效应。

2.1.2 磁路的概念

磁通所通过的路径称为磁路。图 2-5 表示了几种常见的磁路,其中图 2-5(a)为接触器磁路,图 2-5(b)为继电器磁路,图 2-5(c)为永磁电磁仪表的磁路,图 2-5(d)为变压器磁路,图 2-5(e)为四极直流电机的磁路。

2.1.3 电磁基本定律

1. 安培环路定律

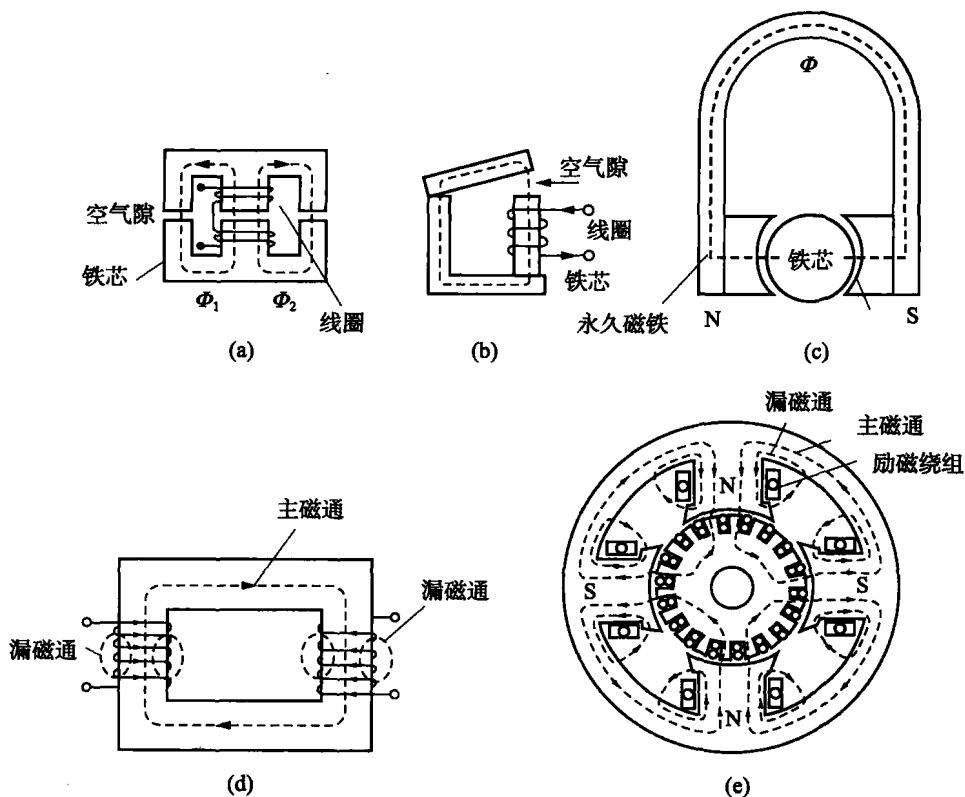
也称为全电流定律。设空间有 N 根载流导体,环绕载流导体任取一磁通的闭合回路,如图 2-6 所示。令 H 表示沿着回路上各点切线方向的磁场强度,则全电流定律的积分形式可表示为

$$\int H dl = NI = \sum I \quad (2-8)$$

式中, N 为磁通回路包围的导体总数; I 为每一根导体中的电流; NI 为该回路所包围的总电流(代数),也就是作用在该磁路上的总磁动势,简称为磁势。

其中电流的正负号这样来确定,凡导体电流的方向与积分路径的方向符合右手螺旋关系,则电流为正,反之为负。

同时还可以得到磁场强度沿闭合回路的积分,其结果与积分路径无关,即



(a)接触器磁路;(b)继电器磁路;(c)永磁电磁仪表的磁路;(d)变压器磁路;(e)四极直流电机磁路

图 2-5 几种常见的磁路

$$\int Hdl = \int Hdl' = NI \quad (2-9)$$

全电流定律在电机中应用很广,它是电机磁路计算的基础。

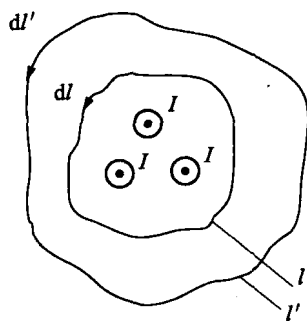


图 2-6 安培环路定律

2. 磁路欧姆定律

假定有一个无分支铁芯磁路,如图 2-7 所示,铁芯上绕有 N 匝线圈,其中的电流为 I ,铁芯截面积为 A ,磁路的平均长度为 L ,材料的磁导率为 μ 。若忽略漏磁通,并认为各截面积上的磁通密度均匀且垂直于各截面,则可得