

高等院校教材

自动控制元件及线路

(第三版)

梅晓榕 柏桂珍 张卯瑞 编著



科学出版社
www.sciencep.com

高等院校教材

自动控制元件及线路

(第三版)

梅晓榕 柏桂珍 张卯瑞 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从原理、结构和特性等方面介绍自动控制系统常用的执行元件、传感元件和功率放大元件,包括直流电机、异步电动机、步进电动机、小功率同步电动机、无刷直流电动机与交流伺服电动机、直线电动机、旋转变压器与感应同步器、测速发电机、编码器、阻容感传感器、热电式传感器、线性功率放大器、脉宽调制型(PWM)功率放大器、液压元件、陀螺传感器与超声波电动机、微传感器与微执行器。

本书既讲元件又讲线路,既讲原理又讲应用,既讲静特性又讲动特性,既注意科学性又避免深奥的数学推导。

本书可作为高等学校自动化、机械工程及自动化、飞行器设计与工程等专业的教材,又可供科研人员、工程技术人员和高级技工参考和使用。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制元件及线路/梅晓榕等编著. —3版. —北京:科学出版社, 2005

(高等院校教材)

ISBN 7-03-014915-7

I. 自… II. 梅… III. 自动控制-控制元件-高等学校-教材
IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 005533 号

责任编辑:段博原 朱海磊 贾瑞娜/责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1993年8月第 一 版 开本:BS(720×1000)

2005年3月第 三 版 印张:23 1/4

2005年3月第一次印刷 字数:451 000

印数:18 001—22 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

全书分为电动机及其控制、测量元件、功率放大元件和其他元件共四篇,从原理、结构、特性和选择等方面讲述自动控制系统(特别是机械伺服系统)常用的电机、传感器、功率放大器和液压元件,内容包括直流电机、异步电动机、步进电动机、小功率同步电动机、无刷直流电动机与交流伺服电动机、直线电动机、旋转变压器与感应同步器、测速发电机、编码器、阻容感传感器、热电式传感器、线性功率放大器、脉宽调制型(PWM)功率放大器、液压元件、陀螺传感器、超声波电动机、微传感器与微执行器。

本书在编写时充分注意和考虑到中国自动化学会、国防科工委等部门对“自动控制元件”课程的要求,参考了近几年新出版的相关教材,紧密结合近年控制系统的科研和技术工作的实际及新的教学大纲。在内容上既包括元件又包括线路,既包括经典的控制电机又反映近年发展和流行的元件和线路。既讲原理又讲应用,既讲静特性又讲动特性;既注意科学性、严密性,又避免深奥的数学论证;既强调物理概念,又提供实用的计算公式和电子线路。本书可作为高等学校、自动化、机械工程及自动化、飞行器设计与工程等专业的教材,又可供科研人员、工程技术人员和高级技工参考和使用。

本书第一版由梅晓榕、兰朴森、柏桂珍编著,姚纪文教授主审,1993年由哈尔滨工业大学出版社出版,一直被哈尔滨工业大学等多所高等学校采用,曾获黑龙江省优秀教材二等奖。

这是本书的第三版,由科学出版社出版,这一版对原书进行了大幅度的修改和补充,篇幅减少而内容增加。这次删除了“晶闸管变流器”一章和“自整角机”一节,增加了“液压元件”、“陀螺传感器与超声波电动机”、“微传感器与微执行器”三章,还增加了“异步电动机的电气控制”、“开关磁阻电动机”、“由位移传感器的脉冲信号求转速”等内容。大部分章节做了重新编写和补充。

第三版由梅晓榕、柏桂珍、张卯瑞编著,梅晓榕教授任主编,姚纪文、庄显义教授主审。参加编写工作的还有马广程、赵守智、宁永臣、王述一、张敏。

编写中参考了很多优秀的教材与著作。我们向参考文献中的各位作者表示真诚的谢意。

书中不当之处敬请读者批评指正。

作 者

2005年1月于哈尔滨工业大学

目 录

前言

绪论	1
0.1 控制元件的作用和分类	1
0.2 本书的主要内容	2
0.3 电磁学的基本概念与定律	3
0.3.1 磁场	3
0.3.2 磁路定律	4
0.3.3 电磁感应定律	6
0.3.4 电磁力与电磁转矩	7
0.3.5 圆柱面磁场间的力矩	8
0.4 运动控制系统的执行元件	9

第一篇 电动机及其控制

第1章 直流电动机及其控制	10
1.1 直流电机及其基本结构	10
1.1.1 磁极和定子铁心	11
1.1.2 电枢绕组和电枢铁心	12
1.1.3 换向器和电刷装置	12
1.2 电机中的磁性材料	14
1.2.1 铁磁物质	14
1.2.2 永磁材料的磁化特性	15
1.2.3 永磁材料的工作点	17
1.2.4 常用的永磁材料	19
1.2.5 永磁电机的磁路结构	20
1.3 直流电机工作原理	21
1.3.1 电磁力定律和电磁感应定律	21
1.3.2 直流电动机的工作原理	22
1.4 电机磁场、电枢反应与换向	25
1.5 直流电动机的特性与控制方法	28
1.5.1 直流电动机的基本关系式	29

1.5.2 直流电动机的静态特性与控制方法	33
1.5.3 直流发电机	41
1.5.4 直流电动机的工作状态	43
1.5.5 直流电动机的动态特性	46
1.6 直流伺服电动机	50
1.6.1 低惯量型直流伺服电动机	51
1.6.2 宽调速直流伺服电动机	53
1.7 直流力矩电动机	54
1.7.1 概述	54
1.7.2 直流力矩电动机	55
1.8 有限转角直流力矩电动机	57
1.9 直流电动机的选择	58
1.9.1 直流电动机的型号与额定值	58
1.9.2 电机运行曲线	59
1.9.3 电机的黏滞阻尼	59
1.9.4 电机参数的选择	60
1.10 例题	63
习题	66
第2章 变压器	69
2.1 变压器的用途和结构	69
2.1.1 变压器的用途	69
2.1.2 变压器的基本结构	69
2.2 变压器的理论基础	70
2.2.1 变压器的工作原理	70
2.2.2 变压器的空载运行	71
2.2.3 变压器的负载运行	73
2.3 等值电路和副边的折算值	76
2.3.1 等值电路	76
2.3.2 副边折算值与变压器相量图	77
习题	78
第3章 异步电动机及其控制	80
3.1 异步电动机的结构特点和工作原理	80
3.1.1 异步电动机的分类及应用	80
3.1.2 异步电动机的结构特点	80
3.1.3 异步电动机的工作原理	82

3.1.4 旋转磁场·····	83
3.2 交流绕组磁场的分析·····	87
3.2.1 单相绕组的脉振磁场·····	87
3.2.2 两相和多相绕组的圆形旋转磁场·····	92
3.2.3 两相绕组的非圆形旋转磁场·····	94
3.3 异步电动机的主要特性·····	95
3.3.1 基本方程·····	95
3.3.2 等效电路图·····	98
3.3.3 圆形旋转磁场时的电磁转矩表达式·····	99
3.4 三相异步电动机·····	100
3.4.1 三相异步电动机的基本知识·····	100
3.4.2 三相异步电动机的调速·····	104
3.4.3 异步电动机的电气控制·····	113
3.5 两相电动机·····	115
3.5.1 两相电动机的分类·····	115
3.5.2 圆形旋转磁场时两相电机的机械特性·····	115
3.5.3 非圆形旋转磁场的机械特性·····	116
3.5.4 两相伺服电动机的控制方法与特性·····	119
3.5.5 两相伺服电动机的动态特性·····	122
3.5.6 两相伺服电动机与直流伺服电动机性能比较·····	124
3.6 单相异步电动机·····	125
3.6.1 工作原理·····	125
3.6.2 启动方法和基本类型·····	126
3.7 单相串励电动机·····	128
3.7.1 单相串励电动机的基本结构和工作原理·····	128
3.7.2 单相串励电动机的特性·····	129
3.7.3 单相串励电动机的应用·····	129
3.7.4 交直流两用串励电动机·····	129
3.8 电动机应用实例·····	129
习题·····	132
第4章 小功率同步电动机·····	133
4.1 同步电动机的构造和分类·····	133
4.2 永磁式同步电动机·····	133
4.3 磁阻同步电动机·····	137
4.4 磁滞同步电动机·····	139

4.5 电磁减速式同步电动机	143
习题	145
第5章 步进电动机与其控制	146
5.1 概述	146
5.2 磁阻式步进电动机的工作原理	147
5.2.1 磁阻式步进电动机的结构特点	147
5.2.2 磁阻式步进电动机的工作原理	149
5.3 磁阻式步进电动机的静态特性	154
5.3.1 单相通电	154
5.3.2 多相通电	158
5.4 磁阻式步进电动机的运行特性	160
5.4.1 单步运行状态	160
5.4.2 连续运行状态	164
5.5 永磁式和混合式步进电动机	172
5.5.1 永磁式步进电动机	172
5.5.2 混合式步进电动机	173
5.6 步进电动机的驱动器	175
5.6.1 引言	175
5.6.2 功放输出级电路	176
5.7 步进电动机的选择	183
习题	184
第6章 无刷直流电动机与交流伺服电动机	185
6.1 无刷直流电动机的结构	185
6.2 位置传感器	186
6.3 无刷直流电动机的工作原理	187
6.3.1 霍尔电机工作原理	187
6.3.2 通电状态与磁状态角	190
6.3.3 转矩波动	191
6.3.4 单向转动的电机与可逆转的电机	191
6.3.5 动态方程	191
6.4 交流伺服电动机	192
6.4.1 矩形波电流驱动的交流伺服电动机	192
6.4.2 正弦波电流驱动的交流伺服电动机	193
6.4.3 交流伺服电动机的选用	195
6.4.4 全数字式交流伺服系统	195

6.5 无位置传感器的无刷直流电动机	196
6.6 直流无刷电动机的应用	197
6.7 开关磁阻电动机	197
第7章 直线电动机	199
7.1 直线直流电动机	199
7.1.1 工作原理	199
7.1.2 直线直流电动机的静、动态特性	200
7.2 直线感应电动机	202
7.2.1 工作原理	202
7.2.2 结构形式	202
7.2.3 特性与控制方式	203
7.2.4 用途和特点	204
7.3 直线步进电动机	205
7.3.1 结构和工作原理	205
7.3.2 平面电动机	207

第二篇 测量元件

第8章 测量元件概述	208
8.1 测量元件的组成、作用和分类	208
8.2 测量元件的特性	210
8.2.1 静特性	210
8.2.2 动态特性	213
第9章 旋转变压器与感应同步器	215
9.1 旋转变压器	215
9.1.1 概述	215
9.1.2 旋转变压器的结构	215
9.1.3 正余弦旋转变压器的工作原理	216
9.1.4 线性旋转变压器	221
9.1.5 旋转变压器的应用	222
9.2 多极旋转变压器	224
9.3 感应同步器	227
9.3.1 感应同步器的结构	227
9.3.2 感应同步器的工作原理	230
9.3.3 感应同步器的信号处理方式	234
9.3.4 鉴相型数字编码装置	236

9.3.5 鉴幅型数显表	240
习题	243
第 10 章 测速元件及测速方法	244
10.1 直流测速发电机	244
10.1.1 直流测速发电机的结构	244
10.1.2 基本关系式与输出特性	244
10.1.3 输出特性的误差分析	246
10.2 异步测速发电机	251
10.3 由位移传感器的脉冲信号求转速	253
第 11 章 编码器与光栅	255
11.1 编码器	255
11.1.1 增量码盘	255
11.1.2 绝对值码盘	258
11.1.3 混合式码盘	261
11.2 光栅	261
11.2.1 概述	261
11.2.2 直线光栅的工作原理	262
11.2.3 位移-数字转换原理	264
第 12 章 阻容感传感器	265
12.1 电阻式传感器	265
12.1.1 电位器	265
12.1.2 应变式电阻传感器	267
12.2 电感式传感器	269
12.2.1 概述	269
12.2.2 变压器式传感器	270
12.3 电容式传感器	274
第 13 章 热电式传感器	283
13.1 热电偶	283
13.1.1 工作原理和结构	283
13.1.2 自由端温度的处理与补偿	287
13.2 热电阻	289
13.3 热敏电阻	290
13.4 晶体管、集成电路型温度传感器	292

第三篇 功率放大元件

第 14 章 功率放大器概述	293
14.1 电力电子器件简述	293
14.2 功率放大器的类型和要求	294
14.3 线性功率放大器	295
14.3.1 线性功率放大器的优缺点	295
14.3.2 分立组件的线性功率放大器的基本结构	296
14.3.3 分立组件的线性功率放大器典型电路	296
14.3.4 功率放大器设计和使用中的几个问题	298
14.3.5 电流源型线性功率放大器	303
14.3.6 集成功率放大器	303
第 15 章 脉宽调制型(PWM)功率放大器	308
15.1 概述	308
15.2 晶体管的运行区域	308
15.3 晶体管电路的开关过程	310
15.3.1 纯电阻负载	311
15.3.2 电阻-电感负载	312
15.3.3 有续流回路的电阻-电感负载	314
15.4 PWM 功率放大器输出级的工作原理	315
15.4.1 双极性输出	316
15.4.2 单极性输出	319
15.4.3 有限单极性输出	322
15.5 PWM 放大器的特性	323
15.6 PWM 功率放大器设计和使用中的几个问题	328
15.7 脉宽调制器的典型电路	332
15.8 PWM 电路的电源及泵升电压	335
15.9 正弦波脉宽调制(SPWM)电路原理	337

第四篇 其他元件

第 16 章 液压元件	339
16.1 概述	339
16.2 叶片式液压马达	341
16.3 轴向柱塞式液压马达	342
16.4 径向柱塞式液压马达	342

16.5	电液伺服阀·····	343
16.6	阀控液压马达的传递函数·····	345
第 17 章	陀螺传感器与超声波电动机 ·····	347
17.1	陀螺传感器·····	347
17.2	超声波电动机·····	348
第 18 章	微传感器与微执行器 ·····	350
18.1	微机电元件的应用·····	350
18.2	微机电器件的加工技术与工艺·····	350
18.3	微传感器·····	352
18.4	微执行器·····	355
参考文献	·····	358

绪 论

0.1 控制元件的作用和分类

自动控制是现代工程中非常重要的技术。从机械位移、转速的控制到工业过程中温度、压力、流量、物位的控制，从现代飞机的航向控制到太空飞船和卫星的姿态控制，从电动假肢的控制到机器人的控制，自动控制技术的应用无处不在。而所有这些形形色色的控制系统，又都是由一些具有典型功能的元件和电子线路组成的，本书将介绍自动控制系统中这些常用的元件及线路。

我们以图 0-1 所示导弹发射架控制系统示意方框图为例，说明控制系统的组成。该系统的控制对象是导弹发射架，被控制的量是导弹发射架的转角位置，参考输入信号是电压信号，它代表导弹发射架应当转动的角位移，即期望位置。精密电位器的转轴和发射架的轴相连接，它的输出电压代表发射架的实际位置，这个电压反馈到输入端，又称为反馈信号。反馈信号和参考输入信号一起加到放大器的输入端。如果发射架的实际位置和期望位置不一致，参考输入信号和反馈信号之间就有一个差值，这个差值反映了实际位置偏离期望位置的程度，称为偏差信号。放大器将偏差信号放大，放大后的信号仍不足以拖动电动机转动，所以又经过功率放大器放大。功放输出的电压加到直流电动机的电枢绕组上，使电机转动，带动导弹发射架转动，转动方向要使偏差电压减小到零。当导弹发射架转动到期望位置时，偏差信号为零，电机电枢绕组两端电压也变为零，电机停止转动并使发射架保持在期望位置。当参考输入信号改变时，发射架将随着信号转动。整个系统是角位移跟踪系统，又称为伺服系统。为了提高系统的跟踪性能，实际系统中还要加入串联补偿装置和反馈补偿装置。

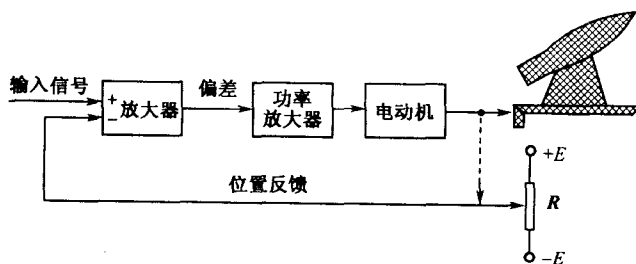


图 0-1 导弹发射架控制系统

控制系统中的控制元件虽然是各种各样的,但根据它们在控制系统中的功能和作用可以分为以下四大类:

- 1) 执行元件。其功能是驱动控制对象,控制或改变被控量(输出量)。
- 2) 测量元件。其功能是将被测量检测出来并转换成另一种容易处理和使用的量(如电压)。测量元件一般称为传感器,在过程控制中又称为变送器。
- 3) 放大元件。其功能是将微弱信号放大。放大元件又可分为前置放大元件和功率放大元件。功率放大元件的输出信号具有较大的功率,可以直接驱动执行元件。
- 4) 补偿元件(校正元件)。为了确保系统稳定并使系统达到规定的精度等性能指标,控制系统的设计者往往还要在系统中增加一些元件,这些元件称为补偿元件。补偿元件的作用是改善系统的性能,使系统能正常可靠地工作并达到规定的性能指标。

在图 0-1 的系统中,执行元件是直流电动机,测量元件是精密电位器,前置放大元件是放大器,功率放大元件是直流功率放大器,补偿元件在图中没有画出。

如果用方框表示系统中各元件的功能,用框图外边的箭头代表元件的输入和输出信号,可以得到如图 0-2 所示的典型控制系统的功能框图。

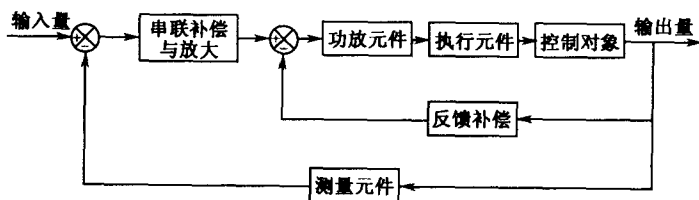


图 0-2 典型控制系统的功能框图

0.2 本书的主要内容

本书介绍控制系统中常见的执行元件、测量元件、功率放大元件及有关线路。有的元件,如测速发电机,既可用作测量元件,也可用作反馈补偿元件。大部分串联补偿装置及一些反馈补偿装置是由电子线路组成,或是由计算机实现的,本书不做介绍。

为了满足自动控制系统(主要是机械伺服系统)对控制元件的要求,在普通电机的基础上产生和发展了被称为控制电机的装置,它们在控制系统中用作执行元件和测量元件。用作执行元件的控制电机包括各种直流伺服电动机、交流伺服

电动机、步进电动机、力矩电动机和小功率同步电动机等。用作测量元件的控制电机包括旋转变压器、感应同步器、交流和直流测速发电机等。控制电机是主要的控制元件，也是本书的主要内容。

执行元件中将详细讨论各种电动机和液压元件。测量元件除了控制电机以外，还包括编码器、阻容感传感器、热电式传感器。本书介绍的功率放大元件包括线性功率放大器、脉冲宽度调制型放大器。最后介绍陀螺传感器、超声波电动机、微传感器与微执行器等特种元件和新型元件。

0.3 电磁学的基本概念与定律

控制电机是本书的主要内容，而各类电机的工作原理都是以电磁学基本定律为基础。这里介绍电磁学的基本概念和定律。书中所给出的各公式除特殊说明外，各物理量的单位均为国际单位制。

0.3.1 磁场

表示磁场强弱的物理量是磁通密度（简称磁密，或称磁感应强度），一般记为 B 。它是一个矢量，在真空中符合叠加原理。电流元 Idl 在 P 点产生的磁密 dB 的大小为

$$dB = \frac{\mu_r \mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl \sin \alpha}{r^2} \quad (0-1)$$

式中， r 是电流元 Idl 所在点到 P 点的距离， α 为 Idl 与 r 之间小于 180° 的夹角， μ_0 是真空磁导率， μ_r 是相对磁导率。

磁场中各点的磁密可以用磁力线的疏密来表示。磁力线是闭合的，围绕着产生它的电流，方向与电流方向之间满足右手螺旋关系。

穿过某一截面 S 的磁通 Φ 为

$$\Phi = \int_S B \cos \theta dS \quad (0-2)$$

式中 θ 为 dS 的法线方向与该点处的磁密向量之间的夹角。

对于磁场中面积为定值的任一平面，有

$$\Phi = \Phi_m \cos \theta \quad (0-3)$$

由于磁力线是闭合的，所以通过任一闭合面的磁通一定等于零，称为磁通连续性原理。

磁场强度向量 H 与 B 的关系是

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H \quad (0-4)$$

式中, $\mu = \mu_r \mu_0$ 称为磁场中物质的磁导率。在工程中,除了铁磁物质外,其余物质的磁导率均认为等于真空中的磁导率 μ_0 。铁磁物质的磁导率 μ 不仅比 μ_0 大得多,而且与磁场强度和磁状态的历史有关,它不是一个常数。

安培环路定律(全电流定律)的内容是:在磁场中,沿任一闭合路径 l 磁场强度向量 H 的线积分,等于该闭合回路所包围的各电流的代数和,即

$$\oint_l H dl = \sum I \quad (0-5)$$

当电流的参考方向与闭合回路的方向符合右手螺旋关系时,电流为正,反之为负。

磁通所通过的区域称为磁路。在实际的电机磁路中,常将磁路分成若干段,每一段磁路的磁场强度 H 是常数,于是式(0-5)变成

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \cdots + H_n l_n = NI \quad (0-6)$$

$$\sum_{i=1}^n H_i l_i = NI \quad (0-7)$$

式中, H_i 为第 i 段磁路的磁场强度, l_i 为第 i 段磁路的平均长度, $H_i l_i$ 为第 i 段磁路的磁压降, N 为磁通回路所包围的导体总数,即线圈的匝数, I 为每一导体中的电流。

0.3.2 磁路定律

在电工技术中,为了获得强磁场,常常用铁磁材料做成各种形状的铁心。由于铁磁物质的磁导率比其他物质的磁导率大得多,所以在相同磁场强度 H 时铁磁物质组成的磁路内的磁密 B 要比其他磁路的磁密大得多,因此在有铁心的磁场中,大部分磁通在铁心内通过,形成明显的闭合磁回路。图 0-3 表示几种典型的电工设备中的铁心磁路系统,图中虚线为磁路。其中图 0-3(a)、(c) 所示的磁路可看成是铁心和空气的串联组合,图(b)和图(d)中的磁路是并联组合。工程上把这种主要由铁磁物质所组成的、能使磁通集中通过的指定磁路称为主磁路,常简称为磁路。

与电路相比,漏磁现象远比漏电现象严重。全部在主磁路中闭合的磁通称为主磁通;部分经过主磁路、部分经过主磁路周围的物质而闭合的磁通以及全部不在主磁路中闭合的磁通都称为漏磁通。

磁路定律是由磁通连续性原理和安培环路定律推导出来的。

设无分支磁路由某种铁磁物质构成,其横截面积处处均为 S , 平均长度为 l , 磁导率为 μ 。若平均长度远比横截面的线性尺寸大得多,则可近似地认为磁通在横截面上分布是均匀的,于是有磁通 Φ 为

$$\Phi = BS \quad (0-8)$$

式中, B 是中心线(即平均长度线)上的磁密。在中心线上各处横截面积相等,所以 B 相等, H 也相同。设 W 为绕组的匝数,由安培环路定律知

$$\int \mathbf{H} d\mathbf{l} = Hl = WI \quad (0-9)$$

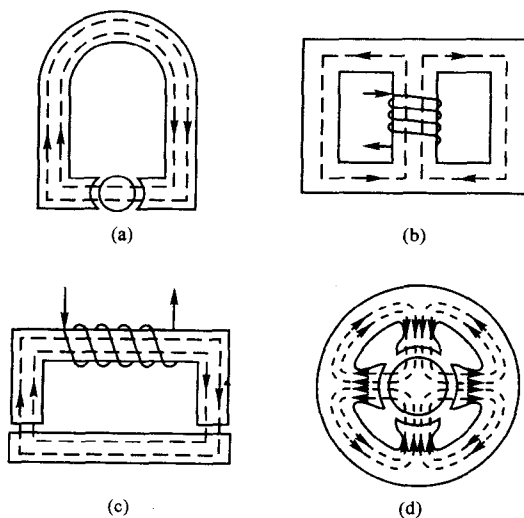


图 0-3 常用电工设备中的铁心磁路图

因为 $B = \mu H$, 由式(0-8)、式(0-9)得

$$\Phi = \frac{WI}{\frac{l}{\mu S}} \quad (0-10)$$

上式与简单回路的欧姆定律 $I = E/R = E/(l/(\gamma S))$ 相似。定义磁势 F_m 为 $F_m = WI$, 磁阻 R_m 为 $R_m = l/(\mu S)$, 则式(0-10)变为

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} \quad (0-11)$$

若令磁导 $G_m = 1/R_m$, 则式(0-11)变为

$$\Phi = G_m F_m \quad (0-12)$$

式(0-11)、(0-12)有时称为磁路的欧姆定律。

定义磁压 U_m 为

$$U_m = \int \mathbf{H} d\mathbf{l} \quad (0-13)$$

则有

$$U_m = WI = F_m = R_m \Phi \quad (0-14)$$

应当指出的是, 在铁磁物质中 μ 不是常数, 它随 H 的大小而变化, 所以磁阻是非线性的, 因此以上的公式只适用于对磁路作定性分析。