



普通高校“十三五”规划教材

自动控制元件

(第二版)

ZIDONG KONGZHI YUANJIAN

刘陵顺 王 昉
王 晶 李 岩 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高校“十三五”规划教材

自动控制元件 (第二版)

刘陵顺 王 昉 王 晶 李 岩 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书在第一版教材的基础上修订而成,主要阐述了自动控制系统中常用的控制元件的结构特点、工作原理、工作特性以及典型应用等内容,包括直流电磁铁、直流伺服电动机、直流测速发电机、旋转变压器、自整角机、交流伺服电动机、交流测速发电机、同步电动机、无刷直流电动机、步进电动机、直线电动机以及常用传感器等。

本书可作为电气工程、自动化、控制工程等专业的本科教材,也可作为其他相关专业的教学用书或参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制元件 / 刘陵顺等编著. -- 2 版. -- 北京:
北京航空航天大学出版社, 2016. 2

ISBN 978-7-5124-2046-5

I. ①自… II. ①刘… III. ①自动控制—控制元件—
高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 009378 号

版权所有,侵权必究。

自动控制元件(第二版)

刘陵顺 王 昉 王 晶 李 岩 编著

责任编辑 金友泉

*

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)82328026

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

北京泽宇印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:17.25 字数:368 千字

2016 年 3 月第 2 版 2016 年 3 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-2046-5 定价:40.00 元

前 言

本书从基本结构、工作原理、运行特性以及典型应用四个方面介绍了自动控制系统中几种典型的控制元件。本书共分12章,包括磁路计算、直流电磁铁、直流测速发电机、直流伺服电动机、旋转变压器、自整角机、交流伺服电动机及交流测速发电机、同步电动机、无刷直流电动机、步进电动机、直线电动机以及常用传感器等。在内容编排上主要是以基本的电磁关系为主线,既考虑不同元件的共性,又注重分析它们的特殊性。

本书在2009年出版的《自动控制元件》的基础上修订而成。修编内容更加注重实用性和先进性,如第3章增加了直流测速发电机的绕组判别方法,第5章和第6章分别增加了旋转变压器和自整角机的数字化角度测量方法,第7章增加了数字化交流伺服系统介绍以及交直流伺服电机的性能比较,第9章和第10章分别增加了无刷直流电动机的DSP控制系统和基于单片机的步进电机控制技术等。另外考虑到自动控制等专业的先行课是“电路”而不是“电工技术”,因此,本书选编了基本磁路的计算以及直流电磁铁等章节;同时,本书也对自动控制系统中常用的传感器进行了详尽地介绍,使教材的内容更加全面、实用。

本书可以作为电气工程、自动化以及控制工程等专业的本科教材使用,也可作为其他相关专业的教学用书或参考书。

本书由刘陵顺教授、王昉讲师、王晶副教授、李岩教授共同完成修编工作,张凯、李建海、王亭等同志也参与了部分内容的编写工作,全书由李岩教授主审。

海军航空工程学院兵器科学与工程系的刘爱东教授对本书的部分内容提出了宝贵的意见和建议,同时在本教材的编写过程中,参阅并引用了一些国内优秀教材和文献的相关内容,在此编者表示诚挚的谢意!

本书教学课件,可通过电子邮箱 lingshunliu@sohu.com 索取。

由于本书作者水平有限以及编写经验不足,书中不妥和错误之处恳请广大读者批评指正。

编 者

2015年12月

目 录

绪 论	1
第 1 章 磁路基本知识	4
1.1 磁场的基本物理量	4
1.2 磁性材料的特性	6
1.3 磁路及其基本定律	9
1.3.1 磁路基本定律	9
1.3.2 磁路的计算	10
小 结	12
思考题与习题	12
第 2 章 直流磁系统及其应用	13
2.1 直流电磁铁	13
2.1.1 概 述	13
2.1.2 分类和工作原理	13
2.2 极化继电器的结构与原理	17
2.2.1 电磁式继电器	17
2.2.2 极化继电器的工作原理	17
2.2.3 极化继电器的结构	18
2.3 极化继电器的分析方法	21
2.3.1 差动式磁系统	21
2.3.2 桥式磁系统	22
2.3.3 一组工作气隙的衔铁工作吸力	24
2.4 接触器	26
小 结	28
思考题与习题	28
第 3 章 直流测速发电机	29
3.1 概 述	29
3.2 直流发电机的工作原理和主要结构	29
3.2.1 直流发电机的工作原理	29
3.2.2 直流电机的主要结构	31

3.2.3 直流电机的电枢感应电动势	33
3.3 直流测速发电机	34
3.3.1 直流测速发电机的类型	34
3.3.2 输出特性	35
3.3.3 直流测速发电机的误差及减小误差的方法	36
3.4 直流测速发电机的应用	39
3.4.1 直流测速发电机的性能标准	39
3.4.2 直流测速发电机的选择与接线	40
3.4.3 直流测速发电机的应用举例	40
3.4.4 直流测速发电机的发展趋势	42
小 结	42
思考题与习题	43
第4章 直流伺服电动机	44
4.1 概 述	44
4.2 直流电动机的基本原理	44
4.2.1 直流电动机的基本工作原理	44
4.2.2 电磁转矩和电枢电动势	45
4.2.3 直流电动机的基本关系式	46
4.2.4 直流电动机的使用	47
4.3 直流伺服电动机的控制及运行特性	50
4.3.1 结构和分类	50
4.3.2 控制方法	50
4.3.3 静态特性	51
4.3.4 动态特性	54
4.4 直流力矩电动机	57
4.4.1 结构特点	57
4.4.2 直流力矩电动机转矩大、转速低的原因	58
4.4.3 直流力矩电动机性能特点	59
4.5 低惯量直流伺服电动机	60
4.5.1 空心杯形电枢直流伺服电动机	60
4.5.2 盘式电枢直流伺服电动机	61
4.5.3 无槽直流伺服电动机	62
4.6 直流伺服电动机的应用	63
小 结	64
思考题与习题	65

第 5 章 旋转变压器	66
5.1 概 述	66
5.2 变压器的工作原理	66
5.2.1 变压器的结构	66
5.2.2 变压器的运行	67
5.2.3 变压器的额定值	73
5.3 正余弦旋转变压器	73
5.3.1 正余弦旋转变压器的结构特点	73
5.3.2 正余弦旋转变压器的工作原理	75
5.3.3 输出特性的补偿	79
5.4 线性旋转变压器	81
5.5 旋转变压器的应用	83
5.5.1 旋转变压器的误差指标	83
5.5.2 比例旋转变压器	83
5.5.3 旋转变压器作为解算元件	84
5.5.4 数字化角度测量	85
小 结	91
思考题与习题	92
第 6 章 自整角机	93
6.1 概 述	93
6.2 自整角机的结构	93
6.3 控制式自整角机的工作原理	95
6.3.1 控制式自整角机的工作原理	95
6.3.2 控制式自整角机的比电压	100
6.4 力矩式自整角机的工作原理	101
6.4.1 力矩式自整角机的工作原理	101
6.4.2 力矩式自整角机的失调角和协调位置	104
6.5 差动式自整角机	104
6.5.1 差动式自整角机的结构	104
6.5.2 差动式自整角机的运行原理	105
6.6 自整角机的技术指标及使用	107
6.6.1 自整角机的技术指标	107
6.6.2 自整角机的使用要求	108
6.7 自整角机的典型应用	109

6.7.1 作为位置指示器	109
6.7.2 舰艇上火炮的自动瞄准	110
6.7.3 数字化测角	110
6.8 粗精组合技术	117
小 结	120
思考题与习题	120
第7章 两相交流电机	124
7.1 两相交流伺服电动机的结构和工作原理	124
7.1.1 概 述	124
7.1.2 交流伺服电动机的结构特点	125
7.1.3 交流伺服电动机的工作原理	126
7.2 两相绕组的旋转磁场	128
7.2.1 圆形旋转磁场的产生	128
7.2.2 旋转磁场的转向和转速	130
7.3 圆形旋转磁场作用下的运行分析	132
7.3.1 转速和转差率	132
7.3.2 磁动势平衡方程	133
7.3.3 电压平衡方程	133
7.3.4 产生圆形旋转磁场时的定子绕组电压	135
7.3.5 交流伺服电动机的电磁功率和电磁转矩	137
7.3.6 交流伺服电动机的机械特性	138
7.4 椭圆形旋转磁场作用下的运行分析	139
7.4.1 椭圆型旋转磁场的形成	140
7.4.2 椭圆形旋转磁场的分解	141
7.4.3 椭圆形旋转磁场作用下的机械特性	142
7.5 两相电动机的控制方法及特性	144
7.5.1 幅值控制	144
7.5.2 相位控制	147
7.5.3 幅相控制	147
7.6 交、直流伺服电动机的性能比较	150
7.7 两相伺服电动机的应用	152
7.7.1 主要性能指标	152
7.7.2 交流伺服电动机的应用	154
7.7.3 数字化交流伺服系统	154
7.8 交流异步测速发电机	156

7.8.1 基本结构与工作原理	157
7.8.2 主要误差分析	158
小 结	162
思考题与习题	163
第 8 章 微型同步电动机	165
8.1 概 论	165
8.2 永磁式同步电动机	165
8.3 反应式同步电动机	167
8.3.1 反应式同步电动机结构特点	167
8.3.2 反应式同步电动机的工作原理	168
8.4 磁滞式同步电动机	169
8.5 微型同步电动机的特点与应用	172
小 结	173
思考题与习题	173
第 9 章 无刷直流电动机	174
9.1 无刷直流电动机的基本组成及工作原理	174
9.1.1 基本组成	174
9.1.2 工作原理	179
9.2 无刷直流电机的运行特性	182
9.2.1 基本方程	182
9.2.2 工作特性	184
9.3 无刷直流电动机的电枢反应	185
9.4 无刷直流电机的正反转	186
9.5 基于 DSP 的无刷直流电动机控制系统	189
9.6 无刷直流电动机的应用	191
小 结	192
思考题与习题	192
第 10 章 步进电动机	193
10.1 概 述	193
10.2 反应式步进电动机的结构及工作原理	194
10.2.1 反应式步进电动机的结构	194
10.2.2 反应式步进电动机的工作原理	194
10.2.3 反应式步进电动机的步距角	196

10.3	反应式步进电动机的静态特性	199
10.4	反应式步进电动机的动态特性	201
10.4.1	单步运行状态	201
10.4.2	步进电动机的连续运行状态	204
10.5	步进电动机的驱动电源	207
10.6	步进电动机的单片机控制	209
10.7	步进电动机的应用	212
10.7.1	步进电动机的主要技术数据	212
10.7.2	使用步进电动机应注意的几个问题	213
10.7.3	步进电动机的应用	214
10.8	开关磁阻电动机	214
10.8.1	开关磁阻电动机的工作原理	214
10.8.2	开关磁阻电动机的电感特性和基本方程式	215
小 结		217
思考题与习题		218
第 11 章	直线电动机	219
11.1	概 述	219
11.2	直线感应电动机	220
11.2.1	直线感应电动机的基本结构	220
11.2.2	直线感应电动机的基本工作原理	222
11.3	直线直流电动机	223
11.3.1	永磁式直线直流电动机	223
11.3.2	电磁式直线直流电动机	224
11.4	直线同步电动机	224
11.5	直线步进电动机	225
11.6	直线电动机应用举例	227
小 结		229
思考题与习题		230
第 12 章	传感器	231
12.1	传感器概论	231
12.1.1	传感器定义	231
12.1.2	传感器的分类	231
12.1.3	传感器技术的现状与发展	232
12.2	霍耳传感器	233

12.2.1 霍耳元件·····	233
12.2.2 集成霍耳器件·····	235
12.2.3 霍耳传感器的应用实例·····	236
12.3 加速度计·····	240
12.3.1 概 述·····	240
12.3.2 加速度计的基本模型·····	241
12.3.3 主要类型·····	241
12.3.4 典型加速度计·····	241
12.4 陀螺仪·····	243
12.4.1 概 述·····	243
12.4.2 陀螺仪基本结构、原理和特性 ·····	243
12.4.3 分 类·····	246
12.4.4 典型陀螺仪的结构和工作原理·····	247
12.4.5 陀螺仪主要技术要求·····	249
12.5 数字式传感器·····	251
12.5.1 绝对编码式数字传感器·····	251
12.5.2 计数式数字传感器·····	252
12.5.3 绝对编码器式角位移数字传感器·····	252
12.5.4 增量编码器式角位移数字传感器·····	256
12.6 智能传感器·····	258
12.6.1 智能传感器的功能·····	258
12.6.2 智能传感器的特点·····	259
12.6.3 智能式传感器的构成·····	260
小 结·····	261
思考题与习题·····	262
参考文献·····	263

绪 论

1. 自动控制元件的功能和分类

随着科学技术的高速发展,自动控制系统已经成为数控机床、自动化仪表和仪器、机器人控制、计算机外设、家用电器等设备以及飞机自动驾驶仪、雷达天线定位、激光和红外线技术、导弹制导、火炮控制、舰艇驾驶控制等军事设备领域不可或缺的部分,尽管它们的功能和结构不同,但都是由信号指令、控制器、放大器、执行机构、检测装置和被控对象构成的,如图 0.1 所示。

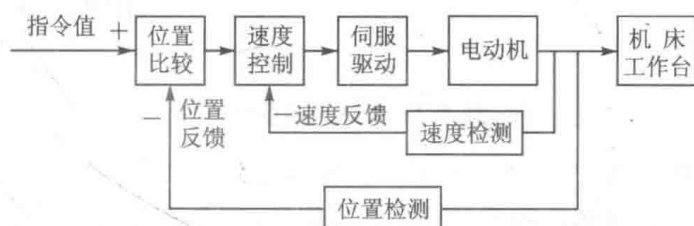


图 0.1 全闭环位置伺服控制系统

图 0.1 为全闭环位置伺服控制系统。该系统由数控装置给出加工所要求的位移指令值,在机床工作台上装有直线位置传感器进行实际位置检测,在伺服电动机轴上还装有速度传感器完成实际速度检测。该系统的位置比较电路要进行位置指令值和实际位置反馈值之间的偏差运算,根据偏差情况计算出所需速度;而所需速度还要和实际速度检测值进行比较,用一系列综合运算结果实时地通过伺服驱动器去推动伺服电动机旋转,实现工作台的精确移动。

任何自动控制系统都是由不同种类和功用的控制元件构成的。现以雷达天线系统(见图 0.2)为例来说明一下控制元件的种类和用途。

指挥仪输入给自整角发送机一个转角 α ,若自整角接收机被驱动的转角为 β ,两者间存在一个角差 $\theta(\theta=\alpha-\beta)$,将使自整角接收机的输出绕组产生与该角差成正比的输出电压 U_1 ,经前置放大器放大后变为直流电压 $U_2=K_1(\alpha-\beta)$, K_1 为前置放大器的系数;另外直流测速发电机的输出电压为 $U_3=K_2 d\beta/dt$, K_2 为直流测速发电机的输出斜率。这样直流放大器的输入电压为 $\Delta U=U_2-U_3$,该电压作为控制电压加到伺服电动机的控制绕组中,带动自整角接收机转动,使 β 增大,直到 $\beta=\alpha$ 时,伺服电动机输入电压 $U_2=0$,这时电动机应停转。

为了改善自动控制系统的品质,在系统中还采用直流测速发电机的校正作用。直流测速发电机产生与 $n=d\beta/dt$ 成正比的电压信号,反馈到直流放大器中,对系统的振荡起到阻尼功能。

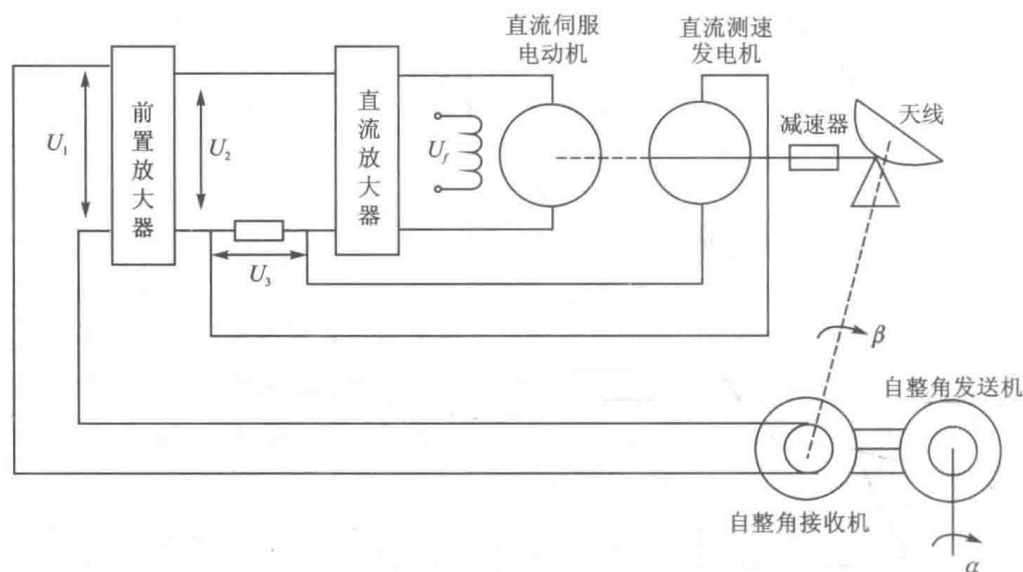


图 0.2 雷达天线系统

在上面的控制系统中,各元件按基本功能可分为:

检测元件——把被测的物理量转换为电信号,如自整角机对。

放大元件——把电信号进行电压和功率放大,以达到执行元件的要求,如功率放大器。

执行元件——把经过放大的控制信号转换为机械信号以带动控制对象,如交流伺服电动机。

校正元件——改善系统的性能,使系统稳定工作并达到规定的精度指标,如直流测速发电机。

在实际系统中控制元件的种类很多,若按电流分类,可分为直流、交流和脉冲三种。直流控制元件有直流伺服电动机、直流测速发电机等;交流控制元件如交流伺服电动机、交流测速发电机、微型同步电动机等;脉冲元件如步进电动机。按功用分类,自动控制元件又可分为电机、电器(继电器、电磁铁)和传感器等。

各种控制元件的用途和功能尽管不同,但它们基本上可分为测量(信号)元件和执行(功率)元件两大类。作为测量(信号)元件的有交、直流测速发电机、自整角机、旋转变压器以及各种传感器;作为执行(功率)元件的有交流和直流伺服电动机、步进电动机等。

2. 本书特点

本书作为自动控制、电气工程自动化等专业的技术基础课教材,主要介绍各种常用控制元件的基本结构、工作原理、工作特性和典型应用。各种控制元件的工作原理是建立在基本的电磁理论基础上的,涉及的基础理论和实际知识面广,在掌握基本理论的同时,还要注意培养一定的实验操作技能。

-
- ① 抓主要矛盾,有条件地略去一些次要因素;
 - ② 抓住重点,弄清基本电磁关系,掌握主要理论、基本原理和主要特性;
 - ③ 要有良好的学习方法,运用对比或比较的方法,分析各种控制元件的共性和特点,加深对原理和性能的理解;
 - ④ 理论联系实际,重视科学实验和工程实践,提高动手能力。

第 1 章 磁路基本知识

将线圈绕在磁性材料上,由此构成的磁路是电磁元件的基本结构,其工作原理多是基于电磁感应原理。为了更好地掌握此类元件的工作原理及特性,本章首先对磁路的基本物理量、磁性材料的基本特性和磁路基本定律进行简单介绍,之后讲述电磁元件的磁路及其计算。

1.1 磁场的基本物理量

磁路问题就是局限于一定路径内的磁场问题,磁场的各个物理量也适用于磁路。磁场的特性主要由以下几个物理量来表示。

1. 磁感应强度

磁感应强度 B 是表征磁场内某点磁场强弱及方向的一个物理量,是一个矢量。由电流产生的磁场和磁感应强度与电流之间的方向关系可用右手螺旋定则确定,其大小可用 $B = \frac{F}{Il}$ 来衡量。

在磁场中,不同点的磁感应强度是不同的。为了形象地描绘出磁场中各处磁感应强度及方向的分布情况,可用该处磁力线的多少来表示,即用垂直于某处单位面积上的磁力线数来反映磁感应强度的数值。如果磁场内各点磁感应强度大小相等、方向相同,这样的磁场称为均匀磁场。

在国际单位制中,磁感应强度的单位是特斯拉(T)。

2. 磁 通

通过某一截面 S 的磁力线的总数称为磁通量 Φ ,简称磁通。其定义为

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

若截面 S 与磁感应强度 B 垂直且 B 是各点均匀的,则式(1-1)又可写成

$$\Phi = BS (\text{T} \cdot \text{m}^2) \text{ 或 } B = \Phi/S (\text{Wb}/\text{m}^2) \quad (1-2)$$

式(1-2)表明,磁感应强度在数值上可以由与磁场方向垂直的单位面积所通过的磁力线数决定。因此,磁感应强度 B 又称为磁通密度,简称磁密。

在国际单位制中,磁通的单位为韦伯(Wb)。

3. 磁场强度

磁场强度也是用来表示磁场中各点磁力大小和方向的物理量,与磁感应强度不同的是它的大小与磁场中磁介质的性质无关,仅与产生磁场的电流大小和载流导体

的形状有关。

安培环路定理表明磁场强度 H 与励磁电流 I 之间的关系,其表示式为

$$\int_l H \cdot dl = \sum I \quad (1-3)$$

当线圈有 N 匝时,则式(1-3)变为

$$\int_l H \cdot dl = \sum IN \quad (1-4)$$

这就是说,磁场强度 H 沿某一闭合路径 l 的线积分,等于路径 l 所包围的电流 I 的代数和。当电流的参考方向与闭合路径规定的方向符合右手螺旋定则时,电流 I 取正号;反之取负号。

以图 1.1 所示的环形线圈为例,其中媒质是均匀的,应用安培环路定理计算线圈内部各点的磁场强度。取磁通作为闭合回线,且以其方向作为回线的围绕方向,则有

$$\int_l H \cdot dl = H_x l_x = H_x \times 2\pi x, \quad \sum I = NI, \quad H_x \times 2\pi x = NI$$

$$\text{则} \quad H_x = \frac{NI}{2\pi x} = \frac{NI}{l_x} \quad (1-5)$$

式中: N ——线圈匝数;

$l_x = 2\pi x$ 是半径为 x 的圆周长;

H_x ——半径 x 处的磁场强度;

NI ——线圈匝数与电流的乘积。

线圈匝数与电流的乘积 NI 称为磁通势,用字母 F 表示,则有

$$F = NI \quad (1-6)$$

磁通由磁通势产生,磁通势的单位是安匝。

4. 磁导率

磁导率 μ 是用于衡量物质导磁能力的物理量。磁场强度与磁感应强度之间关系为

$$B = \mu H \quad (1-7)$$

在国际单位制中,磁导率的单位是亨/米(H/m)。

由实验测出,真空的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m),因为这是一个常数,所以将其他物质的磁导率和它比较是很方便的。

任一种物质的磁导率 μ 和真空的磁导率 μ_0 之比值,称为该物质的相对磁导率 μ_r ,即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\mu H}{\mu_0 H} = \frac{B}{B_0} \quad (1-8)$$

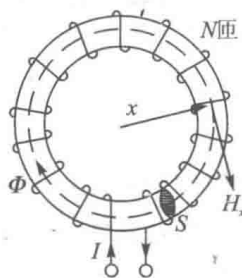


图 1.1 环形线圈

也就是说, μ_r 指磁场媒质是某种物质时某点的磁感应强度 B 与在同样电流值下真空时该点的磁感应强度 B_0 之比所得的值。

物质按导磁性能的不同分为磁性材料(铁、钴、镍及其合金)和非磁性材料(磁性材料以外的其他物质,如铜、铝、橡胶等各种绝缘材料及空气等)两类。非磁性材料的磁导率 μ 与真空的磁导率 μ_0 相差很小,工程上通常认为两者相同。

磁性材料的磁导率 μ 要比真空的 μ_0 大很多倍(几百~几万倍不等),因此工程上用磁性材料做成各种形状的磁路,以便使磁通能集中在选定的空间,以增强磁场。

1.2 磁性材料的特性

磁性材料主要是指铁、钴、镍及其合金,它们具有如下特性。

1. 高导磁性

磁性材料的磁导率 μ 是非磁性材料磁导率的几百~几万倍,这就使它们具有被强烈磁化(呈现磁性)的特性。

下面用磁分子学说解释磁性材料为什么具有被磁化的特性。人们知道在物质的分子中,由于电子环绕原子核运动和本身自转运动而形成分子电流,分子电流也要产生磁场,每个分子相当于一个基本小磁铁。同时,在物质内部还分成许多小区域,这些小区域称为磁畴。由于磁性材料不同于其他物质,其分子间有一种特殊的作用力。在没有励磁电流(或外磁场)的作用时,各个磁畴排列混乱,磁场互相抵消,对外就显示不出磁性来,如图 1.2(a) 所示。当有励磁电流(或外磁场)的作用时,磁性材料每个磁畴内的分子磁铁都会顺外磁场方向转向,显示一定的磁性。

随着励磁电流的增大(或外磁场的增强),磁畴就逐渐转到与外磁场相同的方向上并整齐地排列起来(见图 1.2(b)),这样便产生了一个很强的与外磁场同方向的磁化磁场,而使磁性材料内的磁感应强度大大增加,也就是说磁性材料被强烈地磁化了。

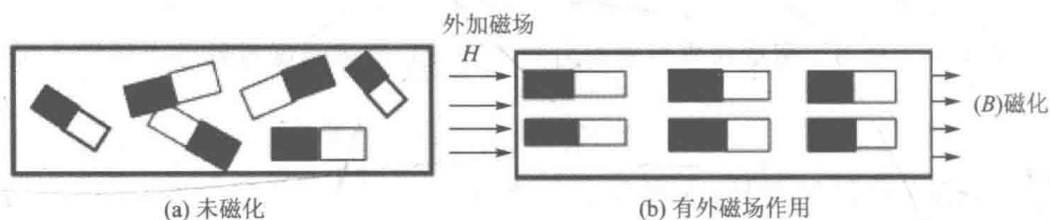


图 1.2 磁性材料的磁化特性

磁性材料的高导磁性被广泛地应用于电工设备中,如电机、变压器及各种铁磁元件的线圈中都放有铁芯。在这种具有铁芯的线圈中通入不太大的励磁电流,便可以产生较大的磁通和磁感应强度。这就解决了既要磁通大,又要励磁电流小的矛盾。利用优质的磁性材料可使同一容量的电机的重量和体积大大减轻和减少。