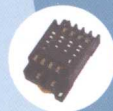


高等学校通用教材

自动控制元件

ZIDONGKONGZHIYUANJIAN

刘陵顺◎主编



北京航空航天大学出版社

TP211/13

2009

高等学校通用教材

自动控制元件

刘陵顺 主编

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书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、工作特性及其典型应用等。其中包括直流电磁铁、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、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内容。

本书可作为自动控制、自动化及空间工程等专业的教材,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/刘陵顺主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2009.6

ISBN 978-7-81124-581-3

I. 自… II. 刘… III. 自动控制—控制元件 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 055412 号

自动控制元件

刘陵顺 主编

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(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn>, E-mail: bhpressell@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787 mm×960 mm 1/16 印张:15 字数:336 千字

2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978-7-81124-581-3 定价:24.00 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各种典型的控制元件。全书共分 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。考虑到自动控制及自动化等专业的先行课是“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和更加实用。

本书可以作为自动控制、自动化以及空间工程等专业的本科教材使用,也适合其他相关专业的教学用书或参考书。

本书由刘陵顺负责统筹和规划,并完成了绪论和第 8、10、11 章的编写。第 1、2 章由李建海编写,第 3、4 章由王冬梅编写,第 5、6 章由王晶编写,第 7 章由王昉编写,第 9、12 章由张凯编写,全文由李岩主审。在编写过程中,姜忠山、鲁芳、姜静等同志提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。有关课件可以通过电子邮箱 Email:LingShunLiu@sohu.com 索取。

本书的编写得到了海军航空工程学院控制工程系领导和训练部教务处领导的支持和帮助,在此表示感谢!

在本书的编写过程中,参阅了一些国内优秀的教材和文献,并引用了一些参考文献中的有关内容,在此表示诚挚的谢意!如有遗漏,深表歉意并敬请谅解!

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

2008 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	8
1.3.1 磁路基本定律	8
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	16
2.2.1 电磁式继电器	16
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 差动式磁路系统	21
2.3.2 桥式磁路系统	22
2.3.3 一组工作气隙的衔铁工作吸力	24
2.4 接触器	25
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	30
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 直流测速发电机的形式	34
3.3.2 输出特性	34
3.3.3 直流测速发电机的误差及减小误差的方法	35
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指标	39
3.4.2 直流测速发电机的应用	40
小 结	40
思考题与习题	41
第4章 直流伺服电动机	42
4.1 概 述	42
4.2 直流电动机的基本原理	42
4.2.1 直流电动机的基本工作原理	42
4.2.2 电磁转矩和电枢电动势	43
4.2.3 直流电动机的基本关系式	44
4.2.4 直流电动机的使用	45
4.3 直流伺服电动机的控制及运行特性	48
4.3.1 结构和分类	48
4.3.2 控制方法	48
4.3.3 静态特性	49
4.3.4 动态特性	52
4.4 直流力矩电动机	54
4.4.1 结构特点	55
4.4.2 直流力矩电动机转矩大、转速低的原因	55
4.4.3 直流力矩电动机性能特点	57
4.5 低惯量直流伺服电动机	58
4.5.1 空心杯形电枢直流伺服电动机	58
4.5.2 盘式电枢直流伺服电动机	59
4.5.3 无槽直流伺服电动机	60
4.6 直流伺服电动机的应用	60

小 结	62
思考题与习题	62
第 5 章 旋转变压器	63
5.1 变压器的工作原理	63
5.1.1 变压器的结构	63
5.1.2 变压器的运行	64
5.1.3 变压器的额定值	69
5.2 正、余弦旋转变压器	70
5.2.1 正、余弦旋转变压器的结构特点	70
5.2.2 正、余弦旋转变压器的工作原理	71
5.2.3 输出特性的补偿	75
5.3 线性旋转变压器	77
5.4 旋转变压器的应用	78
5.4.1 比例旋转变压器	79
5.4.2 旋转变压器作为解算元件	79
小 结	80
思考题与习题	81
第 6 章 自整角机	82
6.1 自整角机的类型和结构	82
6.1.1 自整角机的分类	82
6.1.2 自整角机的结构	82
6.2 控制式自整角机的工作原理	84
6.2.1 控制自整角机的工作原理	84
6.2.2 控制自整角机的比电压	88
6.3 力矩式自整角机的工作原理	89
6.3.1 力矩式自整角机的工作原理	89
6.3.2 力矩式自整角机的失调角和协调位置	91
6.4 差动式自整角机	92
6.4.1 差动式自整角机的结构	92
6.4.2 差动式自整角机的运行原理	92
6.5 自整角机的应用	95
6.5.1 作为位置指示器	95
6.5.2 舰艇上火炮的自动瞄准	96

小 结	96
思考题与习题	96
第 7 章 两相交流电机	99
7.1 两相伺服电动机的结构和工作原理	99
7.1.1 概 述	99
7.1.2 两相伺服电动机的结构特点	100
7.1.3 两相伺服电动机的工作原理	101
7.2 两相绕组的旋转磁场	103
7.2.1 圆形旋转磁场的产生	103
7.2.2 旋转磁场的转向和转速	105
7.3 圆形旋转磁场作用下的运行分析	107
7.3.1 转速和转差率	107
7.3.2 磁动势平衡方程	108
7.3.3 电压平衡方程	108
7.3.4 产生圆形旋转磁场时的定子绕组电压	110
7.3.5 两相伺服电动机的电磁功率和电磁转矩	112
7.3.6 两相伺服电动机的机械特性	113
7.4 椭圆形旋转磁场作用下的运行分析	114
7.4.1 椭圆形旋转磁场的形成	115
7.4.2 椭圆形旋转磁场的分解	117
7.4.3 椭圆形旋转磁场作用下的机械特性	118
7.5 两相伺服电动机的控制方法及特性	119
7.5.1 幅值控制	120
7.5.2 相位控制	122
7.2.3 幅相控制	122
7.6 两相伺服电动机的应用	126
7.6.1 主要性能指标	126
7.6.2 两相伺服电动机的应用范围	128
7.7 交流异步测速发电机	129
7.7.1 基本结构与工作原理	129
7.7.2 主要误差分析	130
小 结	134
思考题与习题	135

第 8 章 微型同步电动机	137
8.1 概 论	137
8.2 永磁式同步电动机	137
8.3 反应式同步电动机	139
8.3.1 反应式同步电动机结构特点	139
8.3.2 反应式微型同步电动机的工作原理	140
8.4 磁滞式同步电动机	141
8.5 微型同步电动机的特点与应用	144
小 结	144
思考题与习题	145
第 9 章 无刷直流电动机	146
9.1 概 述	146
9.2 无刷直流电动机的基本组成及工作原理	146
9.2.1 基本组成	146
9.2.2 工作原理	150
9.3 无刷直流电动机的运行特性	153
9.3.1 基本方程	153
9.3.2 工作特性	155
9.4 无刷直流电动机的电枢反应	156
9.5 无刷直流电动机的正反转	157
9.6 无刷直流电动机的应用	159
9.6.1 飞控系统	160
9.6.2 电动环境控制系统	160
9.6.3 电刹车系统	160
9.6.4 燃油系统	160
小 结	161
思考题与习题	161
第 10 章 步进电动机	162
10.1 概 述	162
10.2 反应式步进电动机的结构及工作原理	163
10.2.1 反应式步进电动机的结构	163
10.2.2 反应式步进电动机的工作原理	163

10.2.3 反应式步进电动机的步距角	165
10.3 反应式步进电动机的静态特性	167
10.4 反应式步进电动机的动态特性	170
10.4.1 单步运行状态	170
10.4.2 步进电动机的连续运行状态	173
10.5 步进电动机的驱动电源	176
10.6 步进电动机的应用	178
10.6.1 步进电动机的主要技术数据	178
10.6.2 使用步进电动机应注意的几个问题	180
10.6.3 步进电动机的应用	180
10.7 开关磁阻电动机	181
10.7.1 开关磁阻电动机的工作原理	181
10.7.2 开关磁阻电动机的电感特性	182
10.7.3 基本方程式	183
小 结	184
思考题与习题	184
第 11 章 直线电动机	186
11.1 概 述	186
11.2 直线感应电动机	187
11.2.1 直线感应电动机的基本结构	187
11.2.2 直线感应电动机的基本工作原理	189
11.3 直线直流电动机	190
11.3.1 永磁式直线直流电动机	190
11.3.2 电磁式直线直流电动机	191
11.4 直线同步电动机	192
11.5 直线步进电动机	192
11.6 直线电动机应用举例	194
11.6.1 高速列车	194
11.6.2 电磁炮	194
11.6.3 高速切削与精密加工	195
小 结	195
思考题与习题	196

第 12 章 传感器	197
12.1 传感器概论	197
12.1.1 传感器定义	197
12.1.2 传感器的分类	197
12.1.3 传感器技术的现状与发展	198
12.2 霍耳传感器	199
12.2.1 霍耳元件	199
12.2.2 集成霍耳器件	201
12.2.3 霍耳传感器的应用实例	202
12.3 加速度计	205
12.3.1 概 述	205
12.3.2 加速度计的基本模型	206
12.3.3 主要类型	207
12.3.4 典型加速度计	207
12.4 陀螺仪	209
12.4.1 概 述	209
12.4.2 陀螺仪基本结构、工作原理和特性	210
12.4.3 分 类	212
12.4.4 典型陀螺仪的结构和工作原理	214
12.4.5 陀螺仪的主要技术要求	216
12.5 数字型传感器	217
12.5.1 绝对编码型数字传感器	217
12.5.2 计数型数字传感器	218
12.5.3 绝对编码器型角位移数字传感器	218
12.5.4 增量编码器型角位移数字传感器	222
12.6 智能传感器	224
12.6.1 智能传感器的功能	224
12.6.2 智能传感器的特点	225
12.6.3 智能式传感器的构成	226
12.6.4 智能传感器的集成化	226
小 结	227
思考题与习题	227
参考文献	228

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。

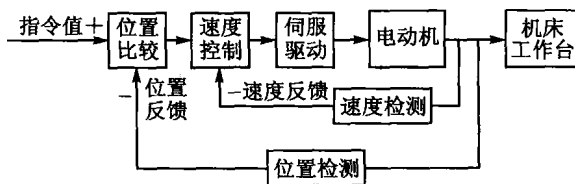


图 0-1 全闭环位置伺服控制系统

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。

指挥仪输入平台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 ,则两者存在一个角差 θ ,即 $\theta = \alpha - \beta$ 。这一角差 θ 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 $U_2 = K_1(\alpha - \beta)$,其中 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 $U_3 = K_2 \frac{d\beta}{dt}$,其中 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 $\Delta U = U_2 - U_3$,直流放大器输出的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

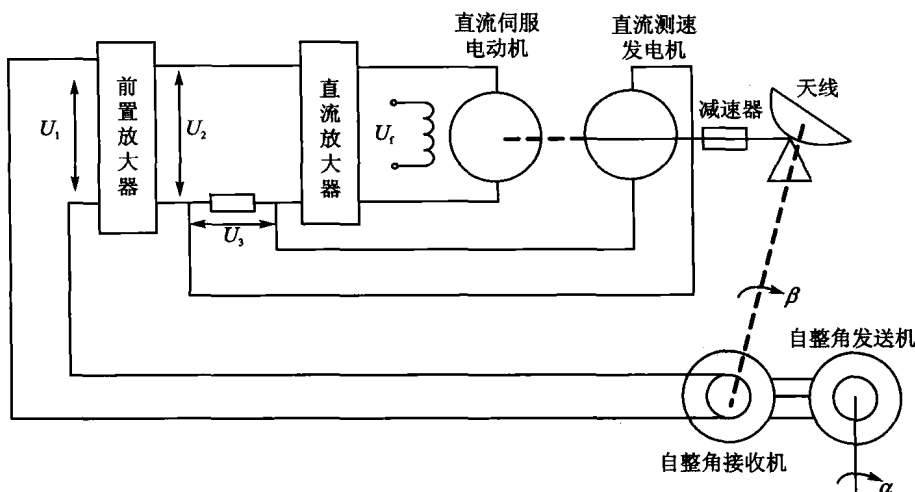


图 0-2 雷达天线系统

速发电机产生与 $n = \frac{d\beta}{dt}$ 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作用。

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，如直流伺服电动机；

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。直流控制元件如直流伺服电动机、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；脉冲控制元件如步进电动机。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）元件的有交流测速发电机、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）元件的有交流伺服电动机、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、电气自动化等专业的技术基础课，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。学习时应注意以下几点:

- (1) 抓住主要矛盾,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。为了能更好地掌握此类元件的工作原理及特性,本章将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的介绍,之后再对电磁元件的磁路及其计算进行详细的论述。

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。由电流产生磁场,磁感应强度与电流之间的方向关系可用右手螺旋定则来确定,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

$$\Phi = BS \text{ 或 } B = \Phi/S \quad (1-2)$$

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 H 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

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

当线圈有 N 匝时,则式(1-3)变为

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

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,其中介质是均匀的,可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

$$\oint_l H \cdot dl = H_x l_x = H_x \times 2\pi x, \quad \sum I = NI, \quad H_x \times 2\pi x = NI, \text{ 故 } H_x = \frac{NI}{2\pi x} = \frac{NI}{l_x} \quad (1-5)$$

式中: N 为线圈匝数; $l_x = 2\pi x$ 是半径为 x 的圆周长; H_x 为半径 x 处的磁场强度; NI 为线圈匝数与电流的乘积。

线圈匝数与电流的乘积 NI , 称为磁动势, 用字母 F 表示, 则有

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

磁通是由磁动势产生, 磁动势的单位是安匝。

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的关系为

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

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。

任何一种物质的磁导率 μ 和真空的磁导率 μ_0 的比值, 称为该物质的相对磁导率 μ_r , 即

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

也就是说, μ_r 是磁场介质在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 之比所得的倍数。

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(几百至几万倍不等), 因此工程上用磁性材

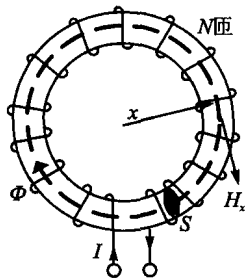


图 1-1 环形线圈

料做成各种形状的磁路,以便使磁通能集中在选定的空间,从而增强磁场。

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至几万倍,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,因而,分子电流也要产生磁场,相当于每个分子是一个基本小磁铁。同时,物质内部还被分成许多小区域,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,磁性材料的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(或外加磁场的增强),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,这就是说磁性材料被强烈地磁化了。

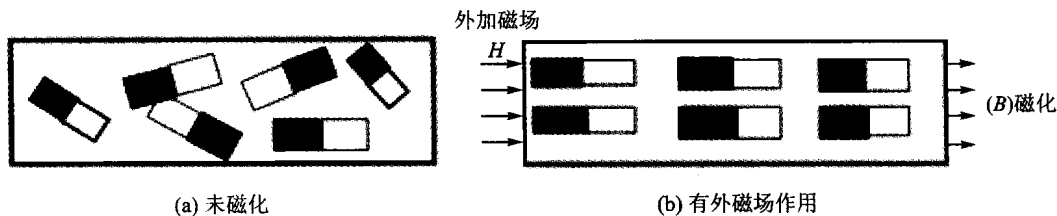


图 1-2 磁性材料的磁化特性

磁性材料的高导磁性被广泛地应用于电工设备中,如电动机、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动机的质量和体积和减少。

非磁性材料没有磁畴的结构,所以不具有磁化的特性。

2. 磁饱和性

磁性材料由磁化所产生的磁化磁场不会随着外磁场的增强而无限的增强。当外磁场增大到一定程度时,磁性材料的全部磁畴的磁场方向都转向与外部磁场方向一致,磁化磁场的磁感应强度将趋向某一定值,即磁化磁场的磁感应强度 B_j 达最大值,如图 1-3 所示。