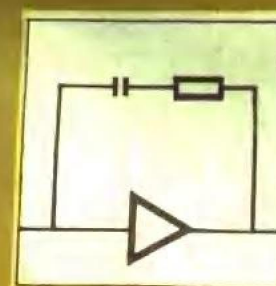
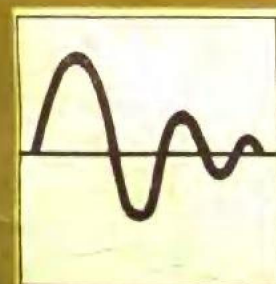
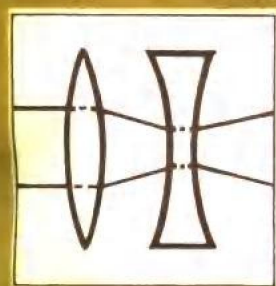
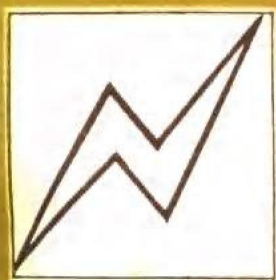


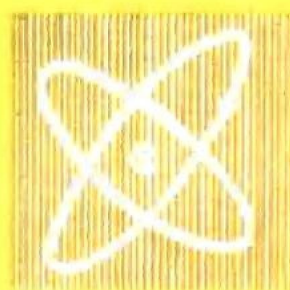
高等学校试用教材



电磁铁与 自动电磁元件

福州大学张冠生
河北工学院陆俭国

主编



机械工业出版社

高等学校试用教材

电磁铁与自动电磁元件

福州大学张冠生 主编
河北工学院陆俭国

CP10/36



机械工业出版社

电磁铁与自动电磁元件

福州大学 张冠生 主编
河北工学院 陆俭国

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

北京市顺义县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $29 \frac{3}{4}$ · 字数 732 千字
1982 年 1 月北京第一版 · 1982 年 1 月北京第一次印刷
印数 0,001—8,500 · 定价 3.05 元

*

统一书号: 15033 · 5086

前 言

本书是根据 1978 年 4 月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会精神和同年 6 月在泰安召开的电器专业教材会议制订的《电磁铁与自动电磁元件》大纲进行编写的。

本书为高等院校电器专业教材，也可作有关专业教学参考书，还可供从事电器及自动化元件制造和应用方面的工程技术人员参考。

以电磁原理工作的自动化电器元件，种类甚多，应用非常广泛。电磁铁、电磁继电器、电磁离合器、电磁传感器和磁放大器是自动控制系统必不可少的元件，在实现四个现代化中起着重要作用。对电器专业的学生以及电器工作者来说，掌握电磁铁和其他自动电磁元件的基本理论、特性分析和设计计算是十分必要和有益的。

本书分两大篇：第一篇为电磁铁，它叙述电磁铁的基本理论、结构参数、特性分析和设计计算方法。为了保证基本内容和反映现代新技术，一方面对电磁铁的基本理论和工程实用计算方法作了较详尽的介绍，另一方面对电磁铁应用电子计算机进行最佳设计和电磁场的数值计算方法辟专章介绍；第二篇为自动电磁元件，叙述用途非常广泛的电磁继电器、电磁离合器、电磁传感器和磁放大器，着重介绍它们的工作原理、基本参数、结构特性、设计计算、应用举例以及发展方向。

本书由福州大学张冠生教授和河北工学院陆俭国同志主编，沈阳机电学院任跃先副教授主审。参加本书编写的有福州大学张冠生教授（第一、二、三、四章）；河北工学院陆俭国同志（绪论、第八、九、十章）、颜威利同志（第五、六、七章）和邹道元同志（第十一章），上海铁道学院丁明道同志参加了第一、二、三、四章的编写。

书稿写成后于 1980 年 1 月在福州召开的教材审稿会上讨论通过，参加审稿单位有沈阳机电学院，华中工学院，西安交通大学，哈尔滨工业大学，河北工学院，福州大学，上海电器科学研究所以及上海无线电八厂等。编者对与会代表的支持和帮助表示衷心的感谢。

在编写过程中，天津机床电器厂罗绍宇同志，上海无线电八厂王力人同志和上海第三机床电器厂叶祥发同志提供了不少宝贵资料，在此表示衷心的感谢。

由于本书编写匆促，加以编者水平所限，书中不当和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

一九八〇年四月

目 录

绪论	1	§ 4-5 直动式交流电磁铁设计举例	114
第一篇 电磁铁			
第一章 电磁铁的一般问题	4	第五章 电磁铁的最佳化设计	131
§ 1-1 铁磁材料分类及其磁性能	4	§ 5-1 最佳准则	131
§ 1-2 磁化的物理过程、磁化曲线及其表达式	9	§ 5-2 电磁铁特性的数学表达式	132
§ 1-3 电磁铁中磁场和磁路的基本关系式	12	§ 5-3 最佳化设计方法	139
§ 1-4 电磁铁的吸力特性和负载特性	17	§ 5-4 螺管式电磁铁的最佳化设计	149
§ 1-5 电磁铁的功能转换分析	19	§ 5-5 拍合式电磁铁的最佳化设计	159
§ 1-6 电磁铁的技术经济指标	22	第六章 磁场的数值计算方法	165
第二章 电磁铁的结构分析	27	§ 6-1 磁场和吸力的数值计算	165
§ 2-1 直流电磁铁的铁心结构及其类型分析	27	§ 6-2 用有限元素法计算交流电磁铁吸力特性的程序	176
§ 2-2 交流电磁铁的铁心结构及其类型分析	30	§ 6-3 交流电磁铁最佳化设计步骤	198
§ 2-3 电磁铁的结构因数及其在选型上的作用	35	§ 6-4 用正交设计法选择交流电磁铁的最佳参数	200
§ 2-4 电磁铁线圈的初步设计	38	第七章 电磁铁的动特性	207
§ 2-5 相似法计算磁系统介绍	48	§ 7-1 电磁铁动态过程的方程式	207
第三章 直流电磁铁的初步设计	55	§ 7-2 用模拟式计算机计算电磁铁的动特性	209
§ 3-1 电磁铁的主要设计参数和工作参数以及电磁铁的工作制	55	§ 7-3 具有加速和延缓动作线路的电磁铁动特性计算	215
§ 3-2 直流电磁铁的设计程序与设计步骤	58	§ 7-4 用数字式计算机计算电磁铁的动特性	224
§ 3-3 电磁铁的初步计算	59	§ 7-5 按给定动特性设计直流电磁铁	227
§ 3-4 电磁铁的验算	66	第二篇 自动电磁元件	
§ 3-5 拍合式电磁铁设计举例	67	第八章 电磁继电器	240
§ 3-6 螺管式电磁铁设计举例	70	§ 8-1 概述	240
第四章 交流电磁铁的初步设计	90	§ 8-2 继电器一般问题	244
§ 4-1 交流电磁铁的工作特点	90	§ 8-3 自动控制用小型电磁继电器	277
§ 4-2 交流电磁铁的特性配合问题	92	§ 8-4 舌簧继电器	298
§ 4-3 分磁环的设计与计算	94	§ 8-5 极化继电器	308
§ 4-4 直动式交流电磁铁设计	104	§ 8-6 磁保持继电器	314
		第九章 电磁离合器	317
		§ 9-1 概述	317
		§ 9-2 摩擦片式电磁离合器的典型结构	322
		§ 9-3 摩擦片式电磁离合器的设计	326

§ 9-4 摩擦片式电磁离合器的控制线路·····	331	§ 11-1 带铁心电路的理论分析·····	382
§ 9-5 磁粉离合器·····	334	§ 11-2 扼流磁放大器·····	389
第十章 电磁传感器·····	342	§ 11-3 自饱和磁放大器·····	405
§ 10-1 概述·····	342	§ 11-4 快速作用磁放大器·····	413
§ 10-2 电感式传感器·····	343	§ 11-5 特殊用途的磁放大器·····	418
§ 10-3 电涡流式传感器·····	361	§ 11-6 磁放大器设计·····	433
§ 10-4 感应同步器·····	371	附录图 1~4·····	467
第十一章 磁放大器·····	382	参考书目·····	468

绪 论

自动控制在国防、尖端技术及国民经济各部门中起着十分重要的作用。所谓自动控制就是指应用控制装置自动地有目的地控制或操纵机器设备或过程,使之具有一定的状态和性能。被控制的机器设备或物体称为控制对象,而所用的控制装置常称为控制器,控制装置(控制器)和控制对象两者就组成了一个自动控制系统。

在自动控制系统中需要用很多自动化元件,它们在自动控制系统中起着检测、放大、控制、保护、执行、调节等作用。例如,用传感器对有关参数进行监视和检测;用电磁铁操纵机械装置或开闭阀门;用离合器对从动轴的输出转矩、转速、转向进行调节;用继电器实现控制、保护等作用;用微电机及特殊电机实现检测、放大、执行、调节等作用;用磁放大器、磁继电器、磁性逻辑元件对信号进行放大、控制以及逻辑运算等等。

一个自动控制系统是否能正常而可靠地工作,在很大程度上取决于该系统所用自动化元件的工作是否可靠。随着系统的大型化,一个系统中所用的元件数越来越多,只要其中一个元件工作不正常,就会使整个系统工作发生故障。例如一个容量为一万门的自动电话交换机约装有五万至七万个继电器,约有五十万对以上的触点参加工作。如这台交换机中的每对触点在十年内有一次失误的话就会使交换机每天平均发生一百多次故障。由此可见,自动化元件在自动控制系统中起着十分重要的作用。

自动化元件有电子元件、气动元件、液动元件以及自动电磁元件等。本课程主要阐述自动电磁元件,即利用电磁原理进行工作的自动化元件,它主要包括各种电磁铁、电磁离合器、电磁继电器、电磁传感器和磁放大器等。它们的分类如下:

一、电磁铁——它的种类很多,主要可分为以下几种:

(一) 牵引电磁铁——主要用来牵引机械装置、开启或关闭各种阀门,以执行自动控制任务。

(二) 制动电磁铁——主要用来对电动机进行制动以达到准确停车的目的。

(三) 起重电磁铁——可用它作为起重装置来吊运钢锭、钢材、铁砂等铁磁性材料。

(四) 自动电器的电磁系统——如电磁继电器和接触器的电磁系统、自动开关的电磁脱扣器及操作电磁铁等。

(五) 其它用途的电磁铁——如磨床的电磁吸盘及电磁振动器等。

二、电磁离合器——按作用原理可分为以下几类:

(一) 摩擦片式离合器;

(二) 牙嵌离合器;

(三) 转差式离合器;

(四) 磁粉离合器。

三、电磁继电器——可按各种特征进行分类如下:

(一) 按控制电流(线圈电流)的种类可分为直流继电器;交流继电器。

(二) 按线圈电流方向与吸动关系可分为非极化继电器(继电器吸动与否和线圈电流方

向无关)；极化继电器(继电器吸动与否和线圈电流方向有关)。

四、电磁传感器(按电磁原理工作的传感器)——主要有以下几种：

- (一) 电感式传感器；
- (二) 电涡流式传感器；
- (三) 感应同步器。

五、磁放大器——按其工作原理可分为以下几类：

- (一) 扼流磁放大器；
- (二) 自饱和磁放大器；
- (三) 快速磁放大器；
- (四) 特殊用途的磁放大器——如磁继电器、磁性逻辑元件、直流互感器等。

科学技术的不断发展和自动控制系统自动化程度的不断提高，对自动化元件提出了越来越高的要求，同时在自动化元件的设计和制造中新技术的引进促进了自动化元件的发展，使其品种不断增多，性能更趋完善。例如在电磁继电器方面，由于电子技术的迅速发展，特别是七十年代以来大规模集成电路的普遍应用，要求继电器大大提高灵敏度以适于用集成电路直接驱动，同时还要求继电器缩小外形尺寸(特别是降低高度)以适于在印刷线路板上安装，这样就促进了高灵敏继电器及扁式继电器的发展。此外，电子技术引进到电磁继电器中大大推动了继电器的变革，出现和发展了固体继电器和混合式继电器。固体继电器是一种能象电磁继电器那样执行开断与接通电路功能的全固体器件。其输入和输出间的隔离耦合技术目前应用较广的仍是变压器耦合，由于光电技术的发展，采用光耦合的隔离方式也日益增多。固体继电器与电磁继电器相比具有速度快、灵敏度高、无触点回跳现象、耐振耐冲击、可靠性高等优点，因而在要求体积小、转换速度快、要求可靠性高的场合如飞机、导弹等的控制系统中应用越来越广。但它也存在着输入和输出隔离困难、成本昂贵、易受温度和辐射的影响、通态电阻大、难以实现多组转换等缺点。因此在某些情况下它是不能代替电磁继电器的。应该说，固体继电器是继电器中的一个新的门类，它的发展不仅扩大了继电器的应用范围，而且促使继电器向更高的水平发展。固体继电器和电磁继电器彼此相互促进，互为补充，两者都将在其最合适的领域里获得广泛应用。由于电磁继电器和固体继电器各有利弊，近些年来研究和设计了把两者组合起来共同完成继电器功能的混合式继电器。它的基本形式大多是将固体放大器(或激励器)置于电磁继电器前级而构成。当前应用较多的是将激励器及线圈反向高压保护电路一起做成固体电路小片装于 TO-5 型电磁继电器的外罩内而组成 TO-5 混合式继电器。混合式继电器不仅大大提高了继电器的灵敏度(从毫瓦级提高到微瓦级)，使继电器可直接由标准的 TTL 电路控制，而且还保持了电磁继电器的某些固有特点，即高的输入与输出间的绝缘、低的接触电阻、触点电流可较大、过载能力高以及能方便的实现多组转换等。因此混合式继电器在与集成电路配套使用以及在电源不充裕的场合获得了大量的应用。

当前，自动电磁元件的发展方向及概况为电磁铁在向缩小体积、节约材料、减轻重量、降低耗电量、提高寿命及提高可靠性等方面发展，并在研究用电子计算机计算电磁铁的磁场、吸力、温升、动特性以及根据给定的要求进行最佳化设计。在六十年代出现了湿式阀用电磁铁，它与干式电磁铁不同，可以让油进入其内部，使电磁阀的所有运动部件都在液压油中工作。由于它具有不易漏油、换向可靠、寿命长、动作快等优点，所以它在液压系统中得到了

日益广泛的应用。近些年来还出现了感应斥力式快速机构，它已被应用在直流快速开关以及选相合闸开关等要求快速动作的操作机构中。电磁离合器在向体积小、寿命高、动作快等方面发展。目前快速动作的电磁离合器已被用在仿型机床的进给系统中以及在数控机床中被用来代替液压马达作为执行元件。近十几年来磁粉离合器得到很大发展，已广泛应用于很多部门的自动控制系统中。现在国外已制成了转矩从 0.01 至 150000 牛·米的磁粉离合器系列。电磁继电器在向小型化（缩小外形尺寸，特别是缩小高度尺寸以适应印刷线路板间隔的日益减小）、提高灵敏度以直接驱动集成电路、完善和加强可靠性保证措施以提高继电器可靠性、发展固体继电器及混合式继电器等方面发展。目前继电器在品种及性能上都有很大的发展，出现了很多体积小、灵敏度高、寿命高、动作快以及耐振耐冲击性能好的新品种。电磁传感器在向灵敏度高、精度高、线性度好、工作可靠等方面发展。随着自动控制系统的不断发展，需要检测的参数日渐增多，因而传感器不但性能在不断提高，而且品种也不断增加。磁放大器在向体积小、重量轻、提高软磁材料性能（导磁率高、矫顽磁力小、饱和磁感应强度高）、提高工作电源频率（采用 400~500 赫中频以及 1000 赫以上的高频电源）、降低灵敏限以放大低电平微小直流信号等方面发展。近十几年来出现了半导体磁放大器，它是一种把半导体元件和磁放大器结合起来互相取长补短的组合装置。磁放大器的理论研究近些年来也在不断深入。模拟计算机及数字计算机已被应用到磁放大器的理论研究及设计计算等领域，促使磁放大器进一步向前发展。

总的看来，随着科学技术的发展，以及自动控制系统对元件要求的不断提高，自动电磁元件一定会在理论研究，新品种研制及性能指标进一步完善等各方面不断向前发展。

第一篇 电 磁 铁

第一章 电磁铁的一般问题

§ 1-1 铁磁材料分类及其磁性能

组成物质的分子或原子中的任一电子，都同时参与两种运动——环绕原子核的轨道运动和它本身的自旋运动，并因这两种运动而产生磁效应。如把分子看作一个整体，则其各电子对外的磁效应，就可用等效的圆电流（即所谓分子电流）所产生的分子磁矩 m 表示。现在，让物质处于外磁场 B_0 的作用下。这时，分子或原子中的任一电子，都将受到洛伦兹力的作用，并因之产生一个轴线与外磁场方向重合的旋转运动，即电子的进动。同样，电子的进动也相当于一个圆电流，它所产生的附加磁矩 Δm 的方向，总是与外磁场 B_0 的方向相反的（图 1-1）。

不同的物质具有不同的原子结构，因此，其分子磁矩和附加磁矩的大小以及它们互相间的作用也各相迥异。这样，不同物质在外磁场作用下表现出来的磁性能也就大不相同了。

通常，物质磁性的强弱是以磁极化强度 J 表示。它等于单位体积内各单元磁矩的向量和，并与物质内部宏观的磁场强度成正比，用公式来表示，即

$$\left. \begin{aligned} J &= \frac{\sum m}{\Delta V} \\ J &= \kappa H \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 ΔV ——单元体积；

κ ——磁化率，亦称磁化系数，它表征物质的磁化能力。

考虑到 J 和 H 在某些场合是不连续的，而磁感应强度 B 则恒为连续的，故工程上更常采用磁感应强度的概念。

在物理学中

$$\left. \begin{aligned} B &= \mu H \\ B &= H + 4\pi J \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中 μ ——磁导率，亦称磁导系数，它也表征物质的磁化能力。

比较式 (1-1) 和式 (1-2)，可知

$$\mu = 1 + 4\pi\kappa \quad (1-3)$$

以上三个公式就是说明物质磁性状态的基本方程式。所有各种物质均可根据 μ 的大小或

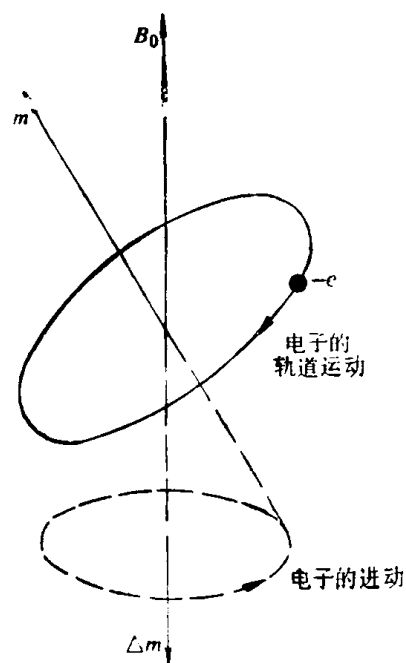


图1-1 电子在外磁场 B_0 作用下的进动和附加磁矩 Δm

κ 的大小和符号而区分为三类:

(一) 逆磁性物质	$\mu < 1$	$\kappa < 0$
(二) 顺磁性物质	$\mu > 1$	$\kappa > 0$
(三) 强磁性物质	$\mu \gg 1$	$\kappa \gg 0$

对逆磁性物质来说, 其各分子的分子磁矩均为零。只有在外磁场作用下, 才有与外磁场方向相反的附加磁矩产生。因此, 这类物质的 $\kappa < 0$, 而 $\mu < 1$ 。对顺磁性物质来说, 虽然它的每一个分子都能产生一定的分子磁矩, 而且还比附加磁矩大得多, 但就任一单元体积而论, 由于其中各分子磁矩的排列是杂乱无章的, 它们的向量和为零, 所以这类物质对外并不呈现磁性。若一旦给顺磁物质加上外磁场, 则其各分子产生的分子磁矩, 便在外磁场作用下排列整齐, 加之分子磁矩的取向又与外磁场的方向比较一致, 所以能起到增强磁场的效果。因此, 顺磁性物质的 $\kappa > 0$, 而 $\mu > 1$ 。逆磁性物质和顺磁性物质的上述效应, 习惯上被称为逆磁效应和顺磁效应。

属于逆磁性物质的有: 氢和惰性气体、许多有机化合物、石墨以及某些金属 (例如铋、镓、铟、铜、银、金、汞等)。逆磁效应实际上表现很弱, 即便是逆磁性最强的铋, 其磁导率也与 1 相差无几 ($\mu = 0.99983$)。属于顺磁性物质的有: 许多气体、金属和它们的盐类 (例如铝、铂、铁盐、钴盐、镍盐、碱土金属以及稀土金属的盐类等)。顺磁性物质的磁导率虽大于 1, 但与 1 相差也不多。

强磁性物质的特点是其顺磁效应特别强, 所以其磁导率远大于 1, 甚至可达数十万乃至百万之巨。属于强磁性物质的有: 铁、钴、镍和它们的合金, 钆以及铁和镍的某些氧化物, 铜、锰和铬的合金等。由于强磁性物质中用得最多的是铁和它的氧化物以及它的合金, 所以习惯上把强磁性物质称为铁磁性物质。

为什么铁磁性物质的顺磁效应格外强呢? 这是很难用分子电流的磁效应来解释的。例如, 铁原子与铬原子具有相同的磁矩, 但前者是典型的强磁性物质, 而后者却是普通的顺磁性物质, 铜、锰、铬三者都不是强磁性物质, 但它们的合金却是铁磁材料。这些事实都说明一个问题, 即铁磁材料所呈现的铁磁性并不决定于其分子或原子的性质, 而是决定于它们的固体结构。事实上, 所有的铁磁材料都毫无例外地是结晶状的固体。

原来铁磁性物质中存在着许许多多的小区域, 它们会自发地磁化到饱和状态。在没有外磁场的时候, 这些自发地磁化了的区域——磁畴虽然每一个都有一定的取向, 但从宏观的角度来看, 它们却由于排列得很不规则而对外不显示磁性。一旦这些磁畴处于外磁场的作用下, 它们便整个地转向, 排列十分整齐, 使得铁磁性物质强烈地磁化, 直到饱和为止。如果把非常细的铁粉撒到磨光后已去磁的铁磁性物质的单晶表面上, 就可以通过粉的分布观察到磁畴的界限 (图 1-2)。

应当指出, 铁磁材料单晶的磁化强度是各向异性的。以铁的单晶而论, 沿侧面 (100 方向) 很容易磁化, 沿平面的对角线 (110 方向) 磁化就要难一些, 而沿立体对角线 (111 方向) 则很难磁化 (图 1-3)。磁畴的自发磁化总是要沿着单晶体几个侧面中一个面的方向进行。不同的铁磁性物质的单晶结构不同, 因而磁化难易的方向也互异。这种磁化的各向异性也是铁磁材料的一种特性, 它是相邻原子间存在着的磁的互相作用的结果。

对于任何铁磁性物质来说, 都各有其特有的一定温度。如果铁磁性物质的温度高于这个温度, 则其中的磁畴就会消失, 而铁磁性物质也变成了一般的顺磁性物质。为了纪念发现铁

磁材料这一性质的物理学家 P. Curie, 这个温度被称为居里点。铁的居里点为 770°C , 钴的居里点为 1120°C , 镍的居里点为 358°C 等等。

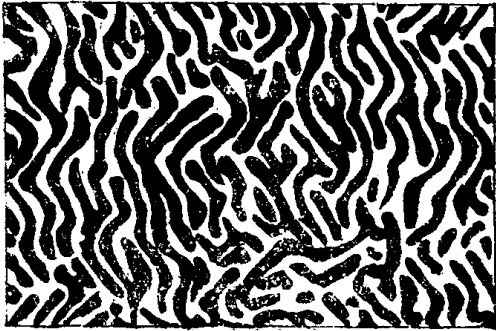


图1-2 铁磁性物质的磁畴

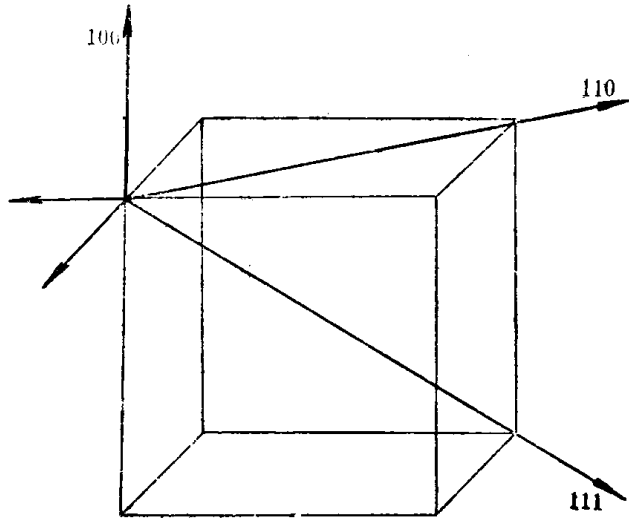


图1-3 铁单晶沿不同方向的磁化

当把铁磁材料置于外磁场的作用下时, 若使磁场强度 H 从零开始增大到某一定值 H_1 , 磁感应强度 B 就沿曲线 oa 变化 (图 1-4)。这段曲线, 通常被称为起始磁化曲线。当磁场强度在 $+H_1$ 和 $-H_1$ 之间往复变化时, 磁感应强度 B 就沿 $abcdefa$ 这么一个回线往复变化 (图 1-4), 是即磁滞回线。对应于磁滞回线上的 b 、 e 两点的磁感应强度值 B_r , 是磁场强度由 $\pm H_1$ 变化到零时, 因磁感应强度不再循原来的路径、而是循着新的路径变化所导致的异于零的数值, 所以被称为剩余磁感应强度。由于磁场强度必须沿相反的方向变化到对应于磁滞回线上的 c 、 f 两点的 H_c , 方能使磁感应强度变化到零, 所以 H_c 被称为矫顽磁力。磁感应强度的变化落后于磁场强度变化的这种特性, 是铁磁材料的固有特性之一, 它习惯上被称为磁滞现象。

磁滞现象的产生也可以用磁畴的观点来说明, 即在磁化过程中, 铁磁材料内的磁畴要受到某种阻碍它们改变方向的“摩擦”作用。因此, 在去掉外加磁场以后, 这些磁畴的取向便在某种程度上被保留下来了。于是就呈现了磁滞现象。

既然各种铁磁材料的磁畴各不相同, 其磁滞回线也必然互有差异。习惯上是按矫顽磁力的大小来区分铁磁材料, 凡属矫顽磁力小者, 如软铁、硅钢等等, 称为软磁材料; 而矫顽磁力大者, 如碳钢、钨钢、钴钢等等,

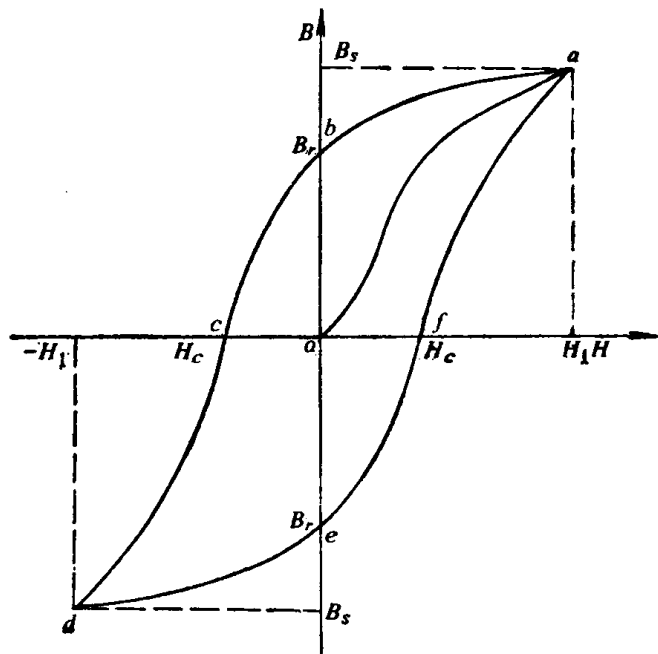


图1-4 磁滞回线

则称为硬磁材料。

在磁化过程中，磁畴的旋转要克服其边界的互相间的“摩擦”做功，所以有能量损耗。这种损耗就是所谓磁滞损耗。除此之外，在交变磁场的作用下，金属物体中会产生感应电动势，并因之出现被称为涡流的电流。涡流也会使物体发热，产生能量损耗，即为涡流损耗。磁滞损耗与交变磁场频率的一次方以及磁感应强度最大值的平方成正比；涡流损耗则与此两者的平方均成正比。磁滞损耗与涡流损耗统称为铁损，它是铁磁材料的又一种固有特性。

铁磁材料还有一种固有特性，即其磁导率 μ 不是一个常数，而是随着磁场强度 H 改变的变数。在磁化曲线的起始段—— oa 段内，当磁场强度 H 增大时，磁感应强度 B 的增大很缓慢。与此相应，磁导率亦为一不很大的数值 μ_0 ，它称为起始磁导率。在磁化曲线的 ab 段，磁场强度的些微变化会引起磁感应强度发生很大的变化。因此，在这一段内，磁导率迅速增大，并在 b 点达到其最大值 μ_m ，后者称为最大磁导率。在此之后，磁场强度的增大，只能使磁感应强度略微增大一点。这就是所谓磁饱和现象，对应于此的磁感应强度称为饱和磁感应强度，且以 B_s 表示。在磁化曲线的 bc 段，磁导率迅速减小，并在磁饱和以后减小到一个相当小的数值。铁磁材料的 $B = f(H)$ 曲线和 $\mu = f(H)$ 曲线示于图 1-5。

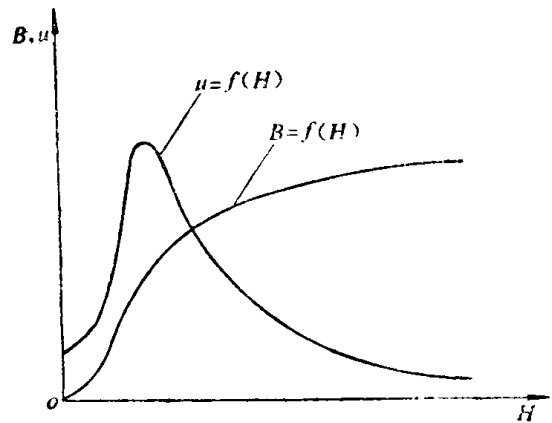


图1-5 铁磁材料的 $B = f(H)$ 和 $\mu = f(H)$ 曲线

综上所述，表征铁磁材料特性的参数计有：饱和磁感应强度 B_s 、剩余磁感应强度 B_r 、矫顽磁力 H_c 、磁导率 μ 、起始磁导率 μ_0 、最大磁导率 μ_m 、磁滞损耗 P_h 和涡流损耗 P_f 以及居里点等九项。

根据特性参数的不同，铁磁材料分为两大类：

一、软磁材料

软磁材料的特点是磁导率大，矫顽磁力小，磁滞损耗小，它适用于旋转电机、变压器、各种电器的电磁机构以及其他要求磁感应强度大而能量损耗小的电工装置。属于软磁材料一类的有：

(一) 钢铁——它包括电解铁、羰基铁、工程纯铁和一般工程用铁等，其特点是电阻率小，所以多用作直流磁路中的导磁体。

钢铁类铁磁材料的 μ_0 值在 $250\mu_0$ 至 $20000\mu_0$ 之间， μ_m 值在 $7000\mu_0$ 至 $143000\mu_0$ 之间，矫顽磁力在 1.2 安/米至 64 安/米之间。

(二) 硅钢——硅钢含有 $0.8\sim 4\%$ 的硅元素，它通常被加工成薄板状。硅钢的最大磁导率一般不小于 $3500\sim 4500\mu_0$ ，矫顽磁力不大于 $64\sim 96$ 安/米。硅钢片在交变磁场中的功率损耗与其含硅量、厚度、磁场的磁感应强度以及频率等有关。在工频交变磁场中，每公斤硅钢的功率损耗为 $0.5\sim 13.4$ 瓦；在 400 赫的交变磁场中，每公斤硅钢的功率损耗为 $7\sim 19$ 瓦。

硅元素在硅钢中的作用在于：第一，促进碳化铁的分解，使钢还原为铁，以增大磁导率。

○ μ_0 ——真空中的磁导率，在国际单位制中，其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米。

减小矫顽磁力和降低磁滞损耗；第二，增大电阻率，降低涡流损耗，并减小电阻温度系数；第三，降低磁性老化，实际上，当硅的含量达到 1.5% 以上时，磁性老化现象已经消失；第四，如果把硅的含量控制在 4% 以下，还能改善硅钢的工艺性能。

含硅量低的硅钢一般用于旋转电机，含硅量高的硅钢则多用于变压器和仪用互感器。低压电器中的电磁铁通常采用低硅钢制造。

硅钢板有热轧和冷轧的两种，后者因含杂质少、磁性能好和损耗低，在无线电工程上也常被采用。但应注意，冷轧硅钢片的轧制方向就是其最易磁化方向，所以这种材料的各向异性特别显著。

(三) 高导磁率合金——常用者有所谓坡莫合金，它是含镍 36~80%、其它金属元素 2~10%、其余为铁的一种铁镍合金。最典型的是含镍 78.5%、余为铁的产品。经特殊热处理后，坡莫合金的 μ_r 可达 $(1\sim 2)\times 10^4\mu_0$ ， μ_m 可达 $(1\sim 2)\times 10^5\mu_0$ ，而 H_c 仅 2 安/米左右。含镍 79%、钼 5% 的所谓超导磁合金，其 μ_m 甚至高达 $10\times 10^5\mu_0$ 。坡莫合金的缺点是电阻率较小，且又不能承受机械应力。为增大坡莫合金的电阻率，有时在其组成成分中加入一些铜、铬、钼等元素。

坡莫合金主要用于制造自动控制设备和电讯设备中的变压器、继电器和磁放大器，以及其他在弱磁场下需要特高磁导率的电磁元件，作为它们的铁心。

(四) 高频软磁材料——这类材料的特点是具有接近于半导体材料的电阻率，因而在高频下的功率损耗很小。典型的高频软磁材料有铁的氧化物 (Fe_2O_3) 与其他金属氧化物 (MnO 、 MgO 、 CoO 、 ZnO 、 NiO 等) 的粉末按陶瓷工艺方法加工出来的合金，它们习惯上被称为铁氧磁物。其中用得较多的有镍锌铁氧磁物和锰锌铁氧磁物。

铁氧磁物通常用于制作各种高频磁性零件。另外，由于它具有矩形磁滞回线，所以也常用作计算机的存储元件。

二、硬磁材料

硬磁材料是指矫顽磁力大、磁滞回线也很大的铁磁材料。常用的硬磁材料有如下的几种：

(一) 碳钢——它是在高温下淬火而得的，其矫顽磁力达 $(4\sim 5)\times 10^3$ 安/米，剩余磁感应强度 B_r 达 0.8~0.9 特。这种材料以性能不稳定故，实际上已不再采用。

(二) 钨钢——钨钢是含钨 5~6%、含碳 0.6~0.8% 的钢。经特殊淬火后，其 H_c 可达 $(5.2\sim 5.6)\times 10^3$ 安/米， B_r 可达 1~1.1 特。

(三) 铬钢——它是含铬 1.3~3.8%、含碳 0.9~1.1 的钢。其 H_c 达 $(4.5\sim 5)\times 10^3$ 安/米， B_r 达 0.9~0.95 特。

(四) 钴钢——钴钢分低级合金 (含钴 9~10% 及铬 8~10%)、中级合金 (含钴 17~20% 及铬 8~10%) 和高级合金 (含钴 40~42% 及铬 2~5%) 三种。其 H_c 达 $(6\sim 16)\times 10^3$ 安/米， B_r 达 0.75~0.85 特。

(五) 高矫顽磁力合金——它包括铁镍铝合金、铝镍硅合金和铝镍钴合金等几种。其 H_c 达 $(20\sim 60)\times 10^3$ 安/米， B_r 达 0.4~1.2 特，单位体积的磁能达 $(2.8\sim 15)\times 10^3$ 焦耳/米³。

(六) 展延性硬质合金——这类材料的特点是除单位体积的磁能较大 (3800~6000 焦耳/米³) 之外，还具有较好的展延性。属于这一类的有铁镍铜合金、钴镍铜合金、铁锰合金和铁钴钒合金等。它们的 H_c 达 $(16\sim 40)\times 10^3$ 安/米， B_r 达 0.5~1.2 特。

硬磁材料一般用于制造永久磁铁。

除上述软磁材料和硬磁材料外，属于铁磁材料的还有一些具有特殊磁性能的材料。例如磁导率能随温度变化的热磁合金，具有恒定磁导率的坡明伐合金，具有高剩余磁感应强度的坡明德合金和具有高磁致伸缩性的合金等等。

以上各种铁磁材料的组成成分、机械性能、电磁参数等，均可在有关手册中查到，故本书不予列入。

§ 1-2 磁化的物理过程、磁化曲线及其表达式

由于磁畴的存在，铁磁材料的磁化过程是很特殊的。如图 1-6 所示，在磁化过程的起始阶段、即 oa 段，磁化是通过磁畴界壁转移而进行，顺磁场方向的磁畴增多，逆磁场方向的磁畴减少。在这个阶段，磁化并不消耗能量，因而过程是可逆的。本阶段的特征是 B 与 H 成正比，磁导率（实际上是磁化率）为常数，且与 H 无关。在 ac 段，磁化是通过磁畴的磁化方向突然作 90° 的转变而进行，所以要消耗一定的能量，同时也是不可逆的。在这个阶段，微弱的磁场变化就能使磁感应强度发生很大的变化，因而磁导率特别大，并在 b 点处达到其最大值 μ_m 。由于磁畴的磁化方向变化是突然性的，磁化曲线的上升并不平滑，而呈现阶梯状（见图 1-6 中圆框内的放大图）。如果用听筒来倾听，可以发现因磁畴突然转向而在线圈中感生电动势产生的“噼啪”声，这就是所谓巴克豪森（Barkhausen）效应。在 ce 段，所有磁畴的磁化方向都要从容易磁化的方向转到与外磁场方向重合的、较难磁化的方向。这当然需要为克服各向异性而消耗能量，同时也需要有很大的外磁场。因此，在此阶段内，磁导率逐渐减小，而且磁化过程是不可逆的。在 e 点以后，所有磁畴的磁化方向都业已同外磁场一致，所以 H 的增大并不能使磁感应强度按比例增大，也即磁导率下降了。这个阶段对应的范围称为饱和区域。整个 $oabcde$ 曲线称为起始磁化曲线。

然而，工程上应用的磁化曲线并不是起始磁化曲线，而是所谓基本磁化曲线（它亦称为

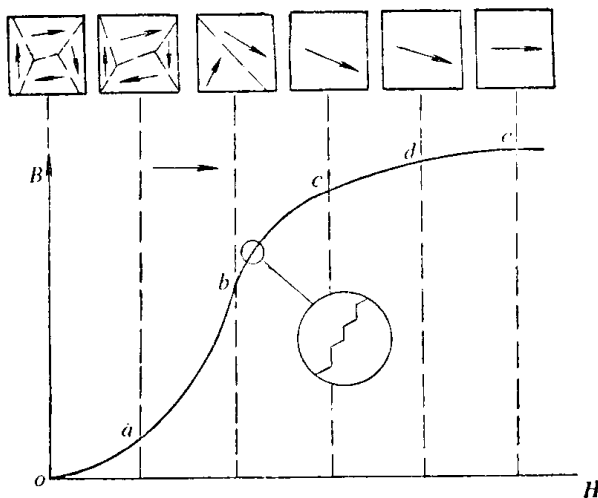


图1-6 铁磁材料磁化物理过程示意图

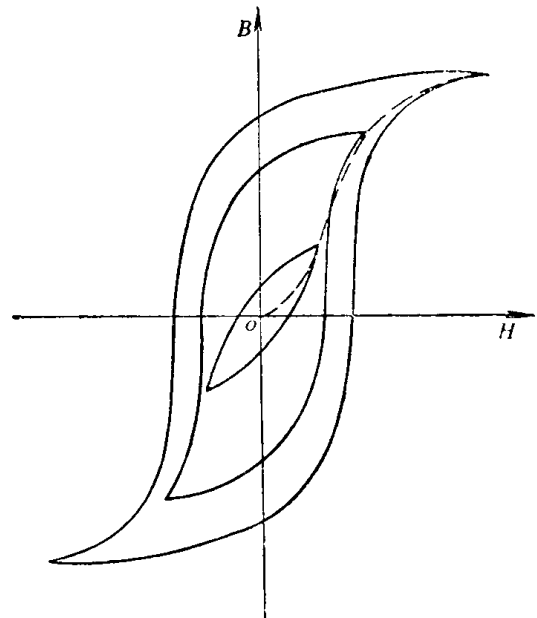


图1-7 铁磁材料的基本磁化曲线

平均磁化曲线或实用磁化曲线)。基本磁化曲线是在改变磁化磁场的极限值、取得一系列磁滞回线后,把这些磁滞回线的顶点连接起来得到的一条曲线(图 1-7 中的虚线)。从数值上来看,起始磁化曲线和基本磁化曲线是很接近的。

通常,弱电工程中的电磁机构为了要取得线性的放大特性,多工作在磁化曲线的 oa 段;继电器一类电器的电磁机构,要求具有很高的灵敏度,往往是工作于磁化曲线的 ac 段;而旋转电机、变压器以及一般的开关电器的电磁系统和强力电磁铁,为求得很强的磁力,则多工作于磁化曲线的 ce 段。

众所周知,铁磁材料的磁化曲线是非线性的,而且在交变磁场的作用下,还会形成磁滞回线,所以要用数学式准确地描述这类磁化曲线是相当困难的。如果能够给出磁化曲线的数学表达式,则定将为铁磁回路的解析计算带来许多方便。因此,自十九世纪中叶以来,就曾有过许多学者致力于此,并且也提出过各种各样的铁磁材料磁化曲线近似表达式。下面择其主要的介绍一下,以供参考。

一、线性化公式

远在 1839 年,俄罗斯学者 $\Theta. X.$ 楞次就曾提出如下的磁化曲线近似公式

$$B = aH \quad (1-4)$$

显而易见,其近似程度是相当差的。在此之后, M. J. Bethenod、M. Boucherot 和 A. Boyajian 等人又提出了一些分段近似的线性化公式,但它们的近似程度仍然很差,所以很少有实用价值。

二、双曲线形式的公式

十九世纪末,Fröhlich 等提出过若干种双曲线形式的近似公式,如

$$B = \frac{H}{a + bH} \quad (1-5)$$

$$B = \frac{aH}{1 + bH} \quad (1-6)$$

$$B = H + \frac{H}{a + bH} \quad (1-7)$$

$$B = H + \frac{H}{a + bH + c \frac{H}{d + H}} \quad (1-8)$$

1916 年, M. Osnos 和 Niethammer 提出了另一种形式的近似公式

$$B = a - \frac{b}{H} \quad (1-9)$$

在 $B = 0.6 \sim 2$ 特的范围内,这个公式比以上几个公式要准确一些。

上述各公式中的系数,可以自磁化曲线中求得。例如,为求得式 (1-5) 中的系数 a 和 b ,只须自磁化曲线上取两个点 (H_1, B_1) 和 (H_2, B_2) , 便可得

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{H_1 H_2 (B_2 - B_1)}{B_1 B_2 (H_2 - H_1)} \\ b &= \frac{H_2}{B_2 (H_2 - H_1)} - \frac{H_1}{B_1 (H_2 - H_1)} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

同样，由磁化曲线上的两点亦可求得式(1-9)中的系数为

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{H_2 B_2 - H_1 B_1}{H_2 - H_1} \\ b &= \frac{H_1 H_2 (B_2 - B_1)}{H_2 - H_1} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

属于这种类型的公式还有

$$B = H + a \frac{H^2 + bH}{H^2 + cH + d} \quad (1-12)$$

三、双曲线函数形式的公式

F. Ollendorf 于 1928 年提出了适用于较小磁感应强度的近似公式

$$H = a \operatorname{sh} b B \quad (1-13)$$

将上式展开则得

$$H = a \operatorname{sh} b B = cB + \frac{c^3 B^3}{3!} + \frac{c^5 B^5}{5!} + \dots \quad (1-14)$$

Teager 于 1938 年将此式改写为

$$H = \left(\frac{1}{\lambda b} + hb \right) B \quad (1-15)$$

展开以后得

$$H = \frac{1}{\lambda} B - \frac{1}{b\lambda} \cdot \frac{(bB)^3}{3} + \frac{2}{b\lambda} \cdot \frac{(bB)^5}{15} - \dots \quad (1-16)$$

属于这种类型的近似公式还有

$$\Psi = \frac{a \operatorname{sh} b B}{\operatorname{sh} b} \quad (1-17)$$

$$B = a + hbH + cH \quad (1-18)$$

$$B = a \operatorname{arctg}(\operatorname{sh} a H) + bH \quad (1-19)$$

$$B = a \left[1 + e^{-bH} \left(\frac{b}{c} \operatorname{sh} c H + c H \right) \right] + a d e^{-bH} \operatorname{sh} c H + fH \quad (1-20)$$

$$B = a \left[1 - \frac{e^{-bH}}{\operatorname{sh} c} \operatorname{sh}(dH + c) \right] + H \quad (1-21)$$

四、幂级数形式的公式

K. Zickler 在 1895 年提出如下的近似公式

$$H = \frac{B}{a + bB + cB^2 + dB^3} \quad (1-22)$$

其后，M. Joly、J. Biermanus 和 H. Schunck 等又提出

$$H = aB + bB^3 + cB^5 + dB^7 + \dots \quad (1-23)$$

显然，就上式而论，项数越多，准确度越高。一般来说，取两项或三项就够了。取两项时，在膝点以下，计算磁化曲线要比实际磁化曲线略低一些，而在膝点以上则略高一些。如果取三项，且令第二项的系数 b 为负值，其情况恰恰与取两项时相反。

J. Zenneck 于 1921 年提出下列近似公式

$$B = sH - s'H^3 \quad (1-24)$$