绪　论

§0－1　自动控制元件的定义和分类

随着科学技术的飞速发展，自动控制系统在各种领域中的应用越来越多。尽管它们功能和结构不同，但基本组成均包括信号指令机构、控制器、放大器、执行机构、检测装置和被控对象等几部分，图 0－1(a)为自动控制系统基本组成方块图。

自控系统各部分功能是：信号指令机构发出指令信号，检测装置检测被控量（形成输出信号），控制器对误差信号（指令信号与输出信号之差）进行处理（校正）以满足一定的控制品质，放大器将处理后的误差信号放大以驱动执行机构，使被控对象的被控量（如位移、速度、力等）跟随指令信号而变化。

在计算机日益普及的情况下，采用计算机作为控制器的核心部分可方便地完成控制器的功能，使控制更加灵活。图 0－1(b)为计算机控制系统基本组成方块图。由于计算机不能直接对模拟信号进行运算，因此在计算机控制系统中要加入相应的信号变换部件，如图中数／模转换器(A/D)、模／数转换器(D/A)等。

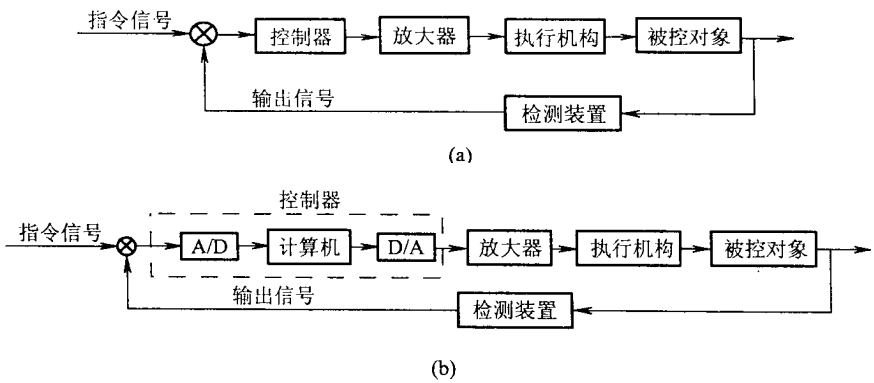


图 0－1　控制系统基本组成方块图

(a) 自动控制系统　(b) 计算机控制系统

从以上各部分在系统中的功能和作用可知，任何一个自动控制系统都包括大量的检测、放大、执行和校正几大部分，执行这些部分功能的元件统称为自动控制元件。

自动控制元件有很多类型，通常它们可以从能量转换的形式进行分类。因为自然界有多种形式的能量（如机械能、电能、磁能、化学能、原子能等），其中一部分元件是在磁场参与下进

需要全本请访问 www.ertongbook.com

行机械能与电能之间或电能与电能之间转换。它们是利用电和磁的原理进行工作的元件。我们把这类元件统称为电磁元件。电磁元件在自动控制系统中应用得最多，是自动控制元件中最重要的部分。本课程将对典型的电磁元件进行介绍。

为了学习方便，可以按各种分类原则对电磁元件进行分类。

一、按作用分

(1) 功率元件：进行机—电能量转换的元件。如力矩电机、三相异步电动机等。

(2) 信号元件：进行机—电信号转换的元件（如将角位移转换成电信号，将转速转换成电压信号）。严格地说，信号也是一种能量，只不过是一种极微弱的能量。如测速发电机、自整角机、旋转变压器等。

二、按电流分

(1) 直流元件：如直流继电器、直流电动机等。
(2) 交流元件：如交流电磁铁、两相伺服电动机等。
(3) 脉冲元件：如步进电机等。

三、按功用分

(1) 电机：各类交、直流电机等。
(2) 电器：各类电磁铁、继电器、电磁阀等。
(3) 电磁传感器：微动同步器等。
本教材是按先直流后交流的顺序编写的。

§0-2 自动控制元件在现代科学技术及自动控制技术中的作用

自动控制系统特别是计算机自动控制系统已成为现代科学技术、军事工程和现代工业等领域不可缺少的部分。因而使自动控制元件在大型飞机、导弹、人造卫星，汽车、机床、机器人、家用电器等各种控制系统中得到广泛的应用。随着生产和科学技术的发展，它们在国民经济各个领域的应用越来越广泛，所起的作用也越来越重要。据统计，例如每新增加 10^7 kW 的发电能力，不计各种大小发电机、电动机，只是高压断路器就需 10 万台之多，而其它高压电器如隔离开关、熔断器、避雷器、互感器等数量将为断路器的几倍。至于低压电器和自动化元件的数量则更为巨大。又如年产 3×10^8 kg 合成氨的工厂使用低压电器元件为 300 多种、400 多件。

在现代大型飞机上装有 400 多种不同型号的电机和电器，例如，作为动力装置的各种电动机、发电机均应用在电源、发动机和武器等系统中；作为信号变换的各种控制电机应用在各种自动控制系统中。它们在自动控制系统中起着检测、放大、控制、执行和调节等功能。

下面结合具体实例说明电磁元件在自动控制系统中的重要作用。

1. 飞机电传操纵系统

飞机的姿态和轨迹是由飞机的控制系统进行控制的。

飞机控制系统经历了机械式（气压式）、自动驾驶仪、电动自动驾驶仪、数字式飞行控制系统等几个发展阶段。当前飞行控制系统先进性的重要标志就是电传操纵以及数字化程度。因为电传操纵系统比机械操纵系统质量轻、安装方便、可靠性高、并易于采用计算机。

飞机电传操纵系统的主要组成有：杆力传感器（运动传感器），计算机、伺服作动器（电动舵机等）和飞机运动参数检测装置（速率陀螺、加速度计等），如图 0－2(a) 所示。飞机电传操纵系统有俯仰、横滚和方向三套系统，图 0－2(b)为飞机俯仰操纵系统结构原理图。

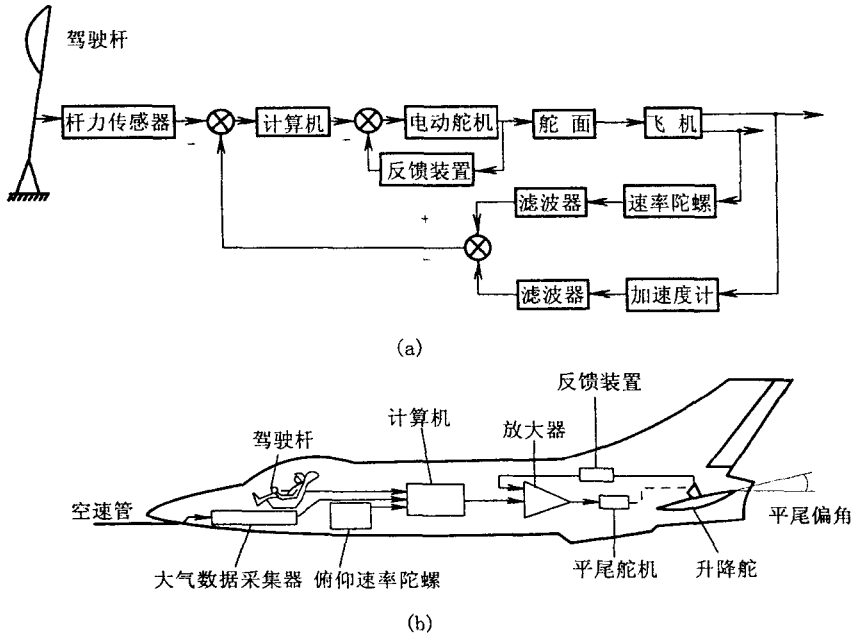


图 0－2　飞机电传操纵系统

(a) 简化原理方块图 (b) 俯仰电传操纵系统结构原理图

目前，数字式电传操纵系统已在军机和民机中得到广泛的应用，如美国的 F－16 C/D、俄国的苏－27、法国的‘幻影’和英国的‘狂风’等。

2. 导弹制导系统

导弹的制导系统是以导弹为控制对象的闭环系统，它主要由导引系统、控制系统和弹体组成，如图 0－3 所示。

导引系统一般由测量装置、导引指令装置组成，其功能是测量导弹相对理想弹道或目标的

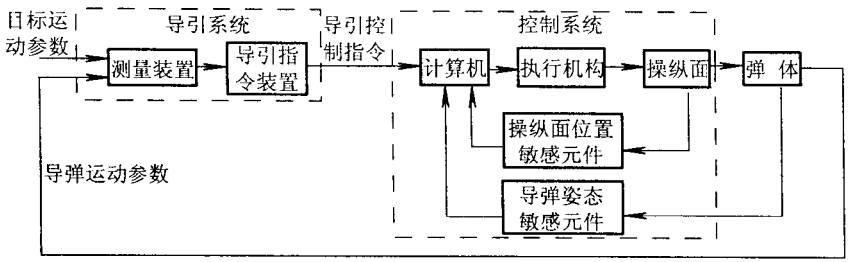


图 0－3　导弹制导系统基本组成方块图

运动偏差，以形成预定的导引控制指令。

导弹控制系统又称自动驾驶仪，和飞机控制系统一样，一般由敏感元件、计算机和执行机构（电动舵机等）组成。其主要功能是保证导弹在导引控制指令作用下沿着要求的弹道飞行，保证导弹的姿态稳定及不受各种干扰的影响。

3．数控机床

数控机床一般由数控系统、包含伺服电动机和检测反馈装置的伺服系统、机床本体（包括主传动系统、强电控制柜）和各类辅助装置组成。图 0－4 是数控机床组成示意图。

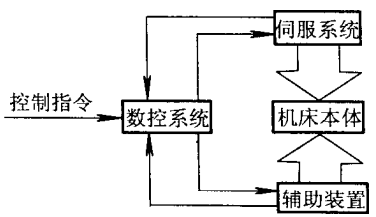


图 0－4　数控机床的组成示意图

数控系统是机床实现自动加工的核心。主要有操作系统、主控制系统、可编程控制器、各类输入输出接口等组成。其控制方式又可分为数据运算处理控制和时序逻辑控制两大类，其中主控制器内的插补运算模块就是根据所读入的零件程序，通过译码、编译等信息处理后，进行相应的刀具轨迹插补运算，并通过与各坐标伺服系统的位置、速度反馈信号比较，从而控制机床各个坐标轴的位移。而时序逻辑控制通常主要由可编程控制器 PLC 来完成，它根据机床加工过程中的各个动作要求进行协调，按各检测信号进行逻辑判别，从而控制机床各个部件有条不紊地按序工作。

伺服系统是数控系统与机床本体之间的电传动联系环节。它主要由伺服电动机（直、交流电动机、步进电动机等）、驱动控制系统及位置检测反馈装置（位置检测元件有编码器、旋转变压器和感应同步器等）组成。伺服电动机是系统的执行元件，驱动控制系统则是伺服电动机的动力源。数控系统发出的指令信号与位置检测反馈信号比较后作位移指令，再经驱动控制系统功率器放大后，驱动电动机运转，从而通过机械传动装置拖动工作台或刀架运动。

辅助装置主要由各类电气控制的刀具自动交换机、回转工作台、液压控制系统等组成，以完成不同的加工工艺。

从以上实例不难看出，无论哪种自动控制系统，电磁元件均是系统重要的组成部分。如检

测装置中的各种传感器，敏感元件、角速度陀螺、加速度计、测速发电机等，执行机构中的各种伺服电动机，步进电动机等。它们在系统中起到不可缺少的重要作用。随着科学技术的飞速发展，它们在各种自动控制系统中的作用将越来越重要。

§0-3 本书的特点

本书作为电气工程及自动化专业本科生必修技术基础课的教材。本书主要对各类典型电磁元件的基本原理、简单结构、工作特性以及典型应用等予以介绍。在学习中必须搞清它们的电磁关系，掌握主要理论和基本规律。

本书在编写体系上遵循从电磁基本理论出发，着重将应用在航空航天自动控制系统中的各类电磁元件有机地结合在一起，使其成为一个完整的体系。本书系统性和理论性较强，根据电磁元件的机理和性能对其电磁现象和机械现象进行综合分析和理论研究，所以学习时要特别注意对数学、物理、电路、电子技术基础等基本理论的综合应用，注意掌握分析问题和解决问题的方法。

在对各类电磁元件的编写内容上遵循从普遍到特殊，从共性到个性，以便于学生对其内容的理解和学习。另外加强了它们在航空航天自动控制系统中应用的内容，还补充当前科研中的一些应用新成果，尽可能与目前国内外技术及发展水平接轨，以使学生尽量接触电磁元件在实际系统的具体应用，增加科技新水平的信息量。

本书对各类电磁元件的论述中有很强的工程实践性，因此在学习中不但要较好地掌握其基本理论，而且对其它结构、材料、工艺和应用等方面也要给予充分的重视。还要掌握实验等各种实践环节，加强动手能力。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

直流磁路及其计算

大家知道，电磁元件的基本结构均是在铁磁材料构成的磁路上绕有线圈。其工作原理多是基于利用电磁感应原理进行工作的。为了更好地理解这类元件的工作原理及特性，在这一章的开始部分，首先对铁磁物质的基本特性、磁路的基本物理量和基本定律进行简单的介绍，然后再对电磁元件的磁路及其计算进行详细的论述。

§1-1 铁磁物质特性

一、基本物理量

1. 磁感应强度 *B*

电流产生磁场。位于磁场中的载流导体受到力的作用，可以说明磁场的存在。磁感应强度 B 是表征磁场强度强弱及方向的一个物理量。

磁感应强度 B 的国标单位是 T.

磁场中，不同地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，即某处并垂直于该处单位面积上的磁力线数反映磁感应强度的数值。

图 1-1 为几种形状不同的导体，通人电流后产生磁力线的情况。

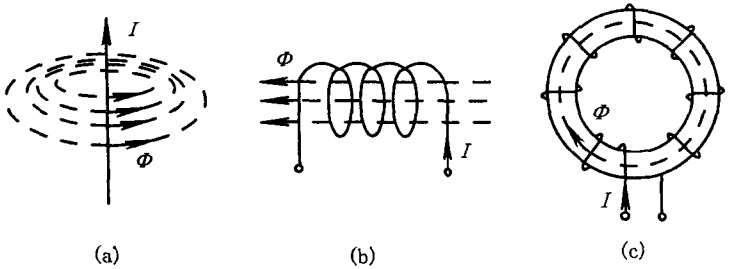


图 1-1 磁力线图

(a) 直导线 (b) 螺线管 (c)环形线圈

磁力线的方向与电流方向满足右手螺旋定则。磁力线上任意点的切线方向就是该点磁感

应强度 B 的方向。垂直于磁力线的单位面积上磁力线数可用来反映磁感应强度的数值。

2. 磁通量 Φ

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

$$\Phi = \int_S \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \tag{1-1}$$

磁通的单位为 Wb。

若截面 S 与磁感应强度 B 垂直且 B 是各点均匀的，则上式又可写成

$$\Phi = BS \quad (\mathrm{T \cdot m^2})$$

或

$$B = \Phi/S \quad (\mathrm{Wb/m^2}) \tag{1-2}$$

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。

3. 磁场强度 H

磁场强度也是用来表示磁场中各点磁力大小和方向的一个物理量，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。

磁场强度与磁感应强度之间关系为

$$H = \frac{B}{\mu} \tag{1-3}$$

磁场强度 H 的单位是 A/m，μ 为磁导率。

4. 磁导率 μ

磁导率 μ 是用于衡量物质导磁能力的物理量。物质按导磁性能的不同分为铁磁物质（铁、钴、镍及其合金）和非导磁物质（铁磁物质以外的其它物质，如铜、铝、橡胶等各种绝缘材料及空气等）两类。非铁磁物质的磁导率 μ 与真空的磁导率 μ_0 相差很小，工程上通常认为二者相同。

铁磁物质的磁导率 μ 要比真空的 μ_0 大很多倍（几百～几万倍不等），因此工程上用铁磁物质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。

磁导率的单位是 H/m。

真空（及非铁磁物质）的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)。

二、磁性材料的主要特性

1. 高导磁性

磁性材料(铁、钴、镍及其合金)的磁导率 μ 是非磁性材料磁导率（$\approx \mu_0$）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物质为什么具有被磁化的特性。大家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

物质不同于其它物质，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，见图 1－2(a)。当有励磁电流（或外磁场）的作用时，磁性物质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，而使磁性物质内的磁感应强度大大增加，这就是说磁性物质被强烈地磁化了。

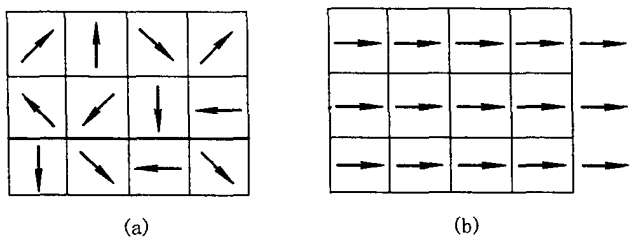


图 1－2　磁性物质的磁化

(a) 无外磁场作用磁畴排列混乱 (b) 有外磁场作用磁畴排列整齐

2. 磁饱和性

铁磁材料的另一个磁特性可由磁化曲线或 $B-H$ 曲线来表示。例如，若一个没有磁化的铁磁物质制成的闭合环状铁心，将线圈均匀地缠绕在这一铁心上，如图 1－3(a) 所示，那么当改变通人线圈内的电流 I 时，可以得到一条磁化曲线，如图 1－3(b)所示。

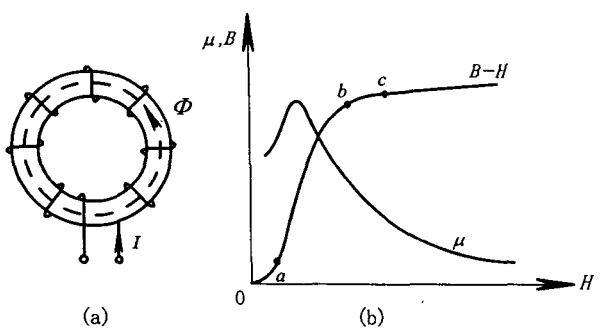


图 1－3　磁化曲线

(a) 闭合环状铁心及线圈　(b) 铁心的磁化曲线

随着通入线圈内电流 I 的增加，磁路内磁通增大，磁感应强度就增强。在开始阶段，B 随 H 的增加较慢，超过 a 点后再增大线圈电流则磁感应强度迅速增长，超过 b 点之后增长减慢，逐渐趋于饱和。$B-H$ 曲线上的 b 点称为膝点，c 点称为饱和点　当磁路内磁感应强度 B 的数值超过 c 点所对应的数值后，励磁电流 $I(H)$ 继续增大，B 值增加不多，这种情况称铁磁物质

达到饱和。这是因为磁性物质由于磁化所产生的磁化磁场不会随着外磁场的增强而无限地增强。当外磁场（或励磁电流）增大到一定值时，全部磁畴的磁场方向都转向与外磁场的方向一致。这时磁化磁场的磁感应强度即达到饱和值。在实际应用中，显然应当避免磁路内的 B 值在饱和点以上，因为超过 c 点后为获得 B 值的稍许增加需要增加极大的电流，这样做是很不经济的。同时也应当注意磁路内的磁密 B 值不应过低，B 值过低，为获得一定的磁通量，磁路的截面 S 必须增大许多，这也是不经济的。通常将磁路内的磁密选择在 $B-H$ 曲线膝部或稍高一些。

铁磁材料的 $B-H$ 曲线不是直线，即 B 和 H 的比值 μ 不是常数，μ 随 H 改变的情况如图 1-3(b)所示。在磁化的起始阶段 μ 数值较小，随着 H 的增加，μ 值迅速增加达到最大值，H 再继续增加后，B 值接近饱和，而 μ 值反而下降，所以铁磁物质的 μ 值不是常数，其值的大小与磁场强度及铁磁物质的磁状态的情况有关。

3. 磁滞性

当图 1-3(a）所示铁心线圈内的电流大小及方向改变时，磁场强度将循环地在 $+H_m$ 和 $-H_m$ 之间变化，这时将得到一个对称原点的闭合磁化曲线，如图 1-4 所示，该曲线称为铁磁物质的磁滞回线。

铁磁物质反复磁化时，磁化过程的上升段 $a\rightarrow b$ 或 $(d\rightarrow e$ 与下降段 $b\rightarrow c$ 或 $(e\rightarrow f)$ 不重合，即 H 减为零时，B 减小到 B_r。B_r 称为剩磁，只有反向去磁的磁场强度达到 $-H_c$ 时剩磁才会消失。在反复的磁化过程中，B 的变化落后于 H，这种现象称为磁滞现象，由此测试出的闭合磁化曲线称为磁滞回线。

若增大 H_m 或减小 H_m 可以得到不同的磁滞回线。为了便于磁路计算，实际工程中应用“平均磁化曲线”进行磁路计算。平均磁化曲线是由不同 H_m 值的磁滞回线顶点相连的一条曲线。每种磁性材料的平均磁化曲线是确定的，可在电工手册中查到。

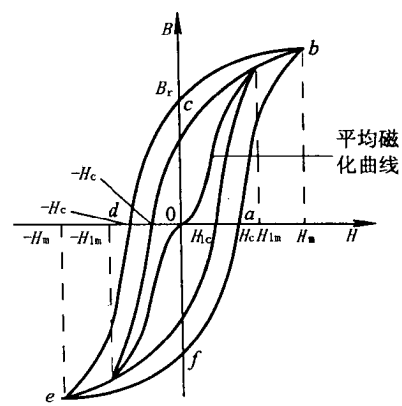


图 1-4 磁滞回线

铁磁材料按其磁滞回线的形状分为两类，一类称为软磁材料，它的磁滞回线包围的面积较小。软磁材料的磁导率高，易于磁化，剩磁也易消失，如图 1-5(a)所示。这类铁磁物质包括电工软铁、硅钢片、铁镍合金（坡莫合金）等。软磁材料多用于交流磁路，硅钢片主要用于制作电机、变压器的铁心，铁镍合金多用于电子设备中的脉冲变压器铁心，电工软铁用于直流磁路。

磁滞回线宽，具有较高剩磁的铁磁材料称为硬磁材料，其磁滞回线如图 1-5(b)所示。这类材料一经磁化即能保持较强的恒定磁性，又称为永磁材料。属于永磁材料的有合金钢、铝镍钴合金、稀土合金等，主要用于扬声器、磁电系仪表、永磁发电机等电器以产生恒定磁场。

4. 磁滞损耗和涡流损耗

(1) 磁滞损耗　铁磁物质在交变磁化过程中，由于磁滞现象而发生能量损耗，称为磁滞损耗。这种损耗的能量转变为热能而使铁磁材料发热。交变磁化一个循环时，磁滞损耗的大小与磁滞回线的面积成正比。

对常用电工钢片，当交变磁化的 $B_m = (1 \sim 1.6)\mathrm{Wb/m}$ 时，磁滞损耗的经验计算公式为

$$P_b = K_h f B_m^2 \qquad (1-4)$$

(2) 涡流损耗　铁磁物质在反复磁化时，铁心中的磁通要发生变化，因而在垂直于磁力线方向的铁心截面上产生感应的闭合电流，该电流称为涡流。

交变磁化时，涡流损耗的经验计算公式为

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 \qquad (1-5)$$

式(1-4)、(1-5)中的系数 $K_h K_e$ 与使用的材料有关，系数 $K_h K_e$ 可在电工手册中查出。

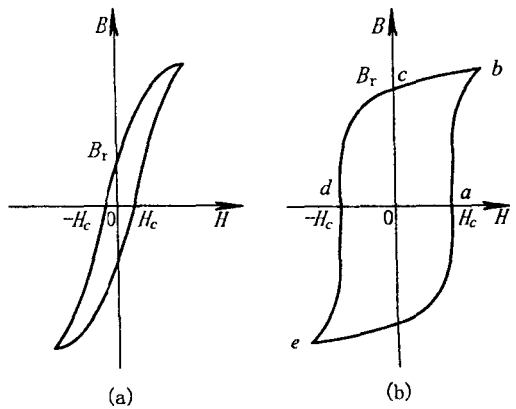


图 1-5　铁磁材料的磁滞曲线

(a) 软磁材料　(b) 硬磁材料

磁滞损耗和涡流损耗合称为铁损耗。由上述公式可以看出，铁损耗的多少与铁磁物质的成分、铁心中的最大磁密 B_m、磁通交变的频率 f 等诸多因素有关。

为了减少铁损耗除应使用磁滞回线面积小的铁磁材料外，在电磁元件中，如电机、变压器应用 0.15 mm～0.5 mm 硅钢片或 0.1 mm 厚的微晶、非晶等铁磁材料叠制铁心，并在钢片的表面涂有绝缘漆以减小涡流回路的尺寸，增加回路电阻，降低铁损耗。

§1-2　磁路及其基本定律

一、磁路

在电工技术中，利用磁性物质的高导磁性，制成一定形状的导磁的路径，可以认为磁通将主要集中在这个路径内闭合，这个路径是磁通的主要路径。而周围空间磁通很少，它们在铁心外通过空气隙闭合，这是磁通的次要路径。这两种路径即凡是磁通经过的路径统称为磁路。通过主要路径的磁通称为主磁通，用 Φ_δ 或 Φ 表示。通过次要路径的磁通称为漏磁通，用 Φ_σ 表示。图 1-6 示出了三种典型电磁元件的磁系统。图(a)为拍合式电磁铁，图(b)为直流电机，图(c)为变压器。它们的磁路一般都包括一定形状的铁磁材料和气隙两部分。我们把这种主要由铁磁材料和线圈以及气隙等所组成的整体称为磁系统。

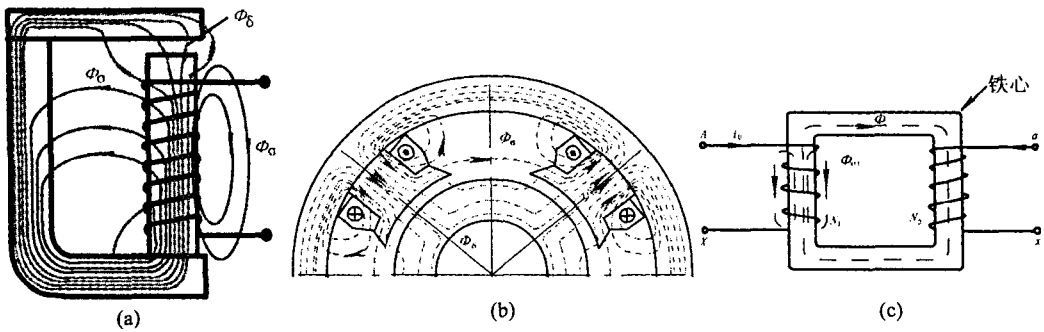


图 1－6　典型电磁元件的磁系统

(a) 拍合式电磁铁　(b) 直流电机　(c) 变压器

二、磁路基本定律

磁路的基本定律是与磁场的基本定律相对应，磁路的基本定律都可直接从磁场的基本定律转化而得到。

1. 基尔霍夫第一定律

基尔霍夫第一定律是与磁场的磁通连续定律（高斯定律）相对应。

磁通连续定律是磁场的一个基本性质，即在磁场中任何闭合面上的磁通代数和恒等于零，或者说进入闭合面的磁通等于离开闭合面的磁通，其表达式为

$$\oint_S \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = 0 \qquad \text{或 } \Sigma\Phi = 0$$

式中规定，进入闭合面的磁通取负号，离开闭合面的磁通取正号，如图 1－7(a)所示。

将这个原理应用到图 1－7(b)中的封闭曲面 A 处，则有

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

而这里的封闭曲面 A 就是一段有分支磁路，如果把分支处看成磁路的一个节点，则汇聚在该节点上磁通的代数和必恒等于零。推广一般，即磁场的磁通连续定律可相应为磁路基尔霍夫第一定律，则汇聚在任一节点上磁通的代数和恒等于零，即

$$\Sigma\Phi_i = 0$$

式中 i 为支路数。

2. 欧姆定律和基尔霍夫第二定律

欧姆定律和基尔霍夫第二定律是与磁场的安培环路定理相对应。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

$$\oint_l \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \Sigma I \qquad (1-6)$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com

当线圈有 N 匝时，则式(1－6)变为

$$\oint_l \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \Sigma IN \tag{1-7}$$

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。

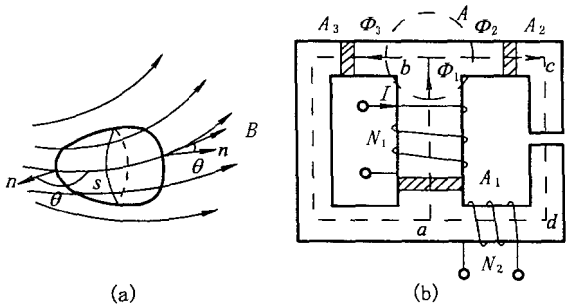


图 1－7　磁通连续定律应用举例

当磁路各点的磁场强度 H 方向与路径 l 的方向一致时，则磁场强度 H 沿指定路径 l_{ab} 的线积分，即由 a 至的 b 线积分定义为磁场中 a 与 b 间的磁压降 U_{ab} 为

$$U_{ab} = \int_a^b H \cdot \mathrm{d}l$$

在均匀磁场中，则有

$$U_{ab} = Hl_{ab}$$

如果磁路是由不同截面的几段组成，则上式可写成磁路的形式。

$$\sum_{i=1}^{n} H_i l_i = \sum_{i=1}^{n} \Phi_i R_i = \sum_{i=1}^{n} \Phi_i / \Lambda_i = \sum_{i=1}^{n} U_i = \Sigma IN$$

式中：$R_i = l_i/\mu_i S_i$——第 i 段磁路的磁阻（1/H）；

$\Lambda_i = 1/R_i$——第 i 段磁路的磁导(H) 或(Wb/A)；

U_i——第 i 段磁路的磁压降(V)；

ΣIN——磁路的磁动势（安匝）。

而表达式

$$\Phi_i R_i = \Phi_i / \Lambda_i = U_i \tag{1-8}$$

是安培环路定律在无分支磁路中以 Φ,U 等表示的形式，也称为磁路的欧姆定律。而表达式

$$\Sigma U_i = \Sigma IN \tag{1-9}$$

即为磁路基尔霍夫第二定律。它表示在闭合磁路中，沿某一环线方向磁压降的代数和等于磁动势的代数和。

必须指出，每段磁路磁压降 U_i 有 Hl 或 $\Phi R = \Phi/\Lambda$ 两种表达形式。在磁路计算中，对于导

磁体的磁压降均采用 Hl 的形式，即要利用铁磁材料的磁化曲线由 B 值查到对应的 H 值，再乘以导磁体中的磁路长度 l，这是非线性的计算方法。对于气隙的磁压降则采用 ΦR 的形式，因为气隙的磁导率 μ_0 是常数，故当气隙长度不变时，其磁阻值是不变的，具有线性性质。

因此，对于有气隙的磁路，式(1-9)可以表示为

$$\Sigma IN = \sum_{i=1}^{n} H_{mi} l_{mi} + \sum_{j=1}^{m} \Phi_{\delta j} / \Lambda_{\delta j} = U_m + U_\delta \qquad (1-10)$$

式中：H_{mi}——第 i 段导磁体中的磁场强度（A/m）；

l_{mi}——第 i 段导磁体的长度（m）；

$\Phi_{\delta j}$——第 j 段气隙中的磁通（Wb）；

$\Lambda_{\delta j} = 1/R_{\delta j}$——第 j 段气隙的磁导（Wb/A）；

U_m——导磁体的总磁压降（V）；

U_δ——气隙的总磁压降（V）。

式中各项正负号规定如下：先规定各回路环线的方向，如果回路中各段磁通 Φ(或 H)的正方向与规定环线方向一致，则该段的磁压降为正；当线圈磁动势的正方向与环线方向一致时，则该线圈的磁动势为正，而磁动势正方向和线圈电流正方向应符合右手螺旋关系。

由上可知，磁路计算中所用到的概念和定律在形式上与电路非常相似，表 1-1 列出电路与磁路的对应关系。

表 1-1　电路与磁路对应表

电　路	磁　路
电动势 E/(V)	磁动势 $F(F=IN)$/(A)
电流 I/(A)	磁通 Φ/(Wb)
电阻 $R(R=\rho l/S)$/(Ω)	磁阻 $R_i(R_i=\frac{l_i}{\mu_i S_i})$(1/H)
电导 $G(G=1/R)$/(1/Ω)	磁导 $\Lambda_i(\Lambda_i=1/R_i)$/(H)
欧姆定律 $U=IR$	磁路欧姆定律 $U_i=\Phi_i R_i$
基尔霍夫第一定律 $\Sigma I=0$	磁路基尔霍夫第一定律 $\Sigma\Phi=0$
基尔霍夫第二定律 $\Sigma E=\Sigma U$	磁路基尔霍夫第二定律 $\Sigma IN=\Sigma U$

考虑到目前磁学中还有电磁单位制的使用，表 1-2 列出国际单位制与电磁单位制的换算关系，以便考查，本书一律采用国际单位制。

表 1－2　磁量的基本单位及换算关系

名　称	国际单位制	电磁单位制	换算关系
磁通 Φ	Wb＝V·S	Ma	$1W/m^2=10^8$ Ma
磁感强度 B	T＝Wb/m^2	Gs＝Ma/cm^2	1A/m＝10^4Gs
磁场强度 H	A/m	1.25 Oe＝A/cm	1A/m＝10^{-2}A/cm ＝1.25×10^{-3}Oe
磁导率 μ	Wb/A·m＝H/m	Ma/A·cm	1Wb/A·m＝ 10^6 Ma/A·cm
空气磁导率 μ_0	1.25×10^{-6} H/m	1.25Ma/A·cm	—
磁压降 U	A	A	—
磁导 Λ	H＝Wb/A	Ma/A	1Wb/A＝10^8Ma/A

三、等效磁路

因为磁路和电路在形式上有其相似之处，所以在分析和计算某一磁系统时常常模仿电路的表示形式将它表示成等效磁路。

下面以图 1－8 所示的拍合式电磁铁为例，画出其等效磁路图。

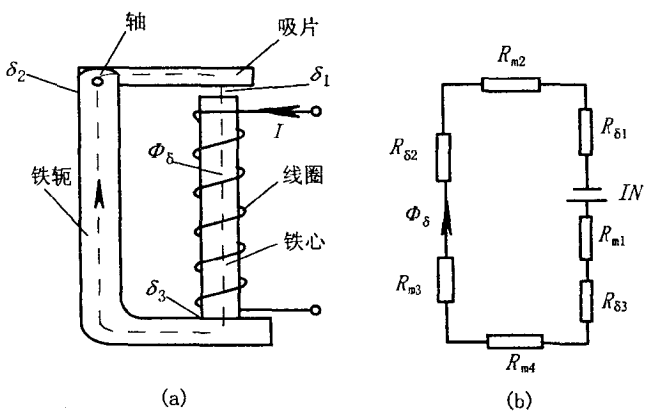


图 1－8　拍合式电磁铁

(a) 磁系统　(b)等效磁路

拍合式电磁铁的磁系统是由插入线圈的铁心、L形的铁轭和能绕轴转动的吸片（也称衔铁）组成。线圈通电后，绝大部分的磁通将通过铁心、铁轭、吸片以及吸片与铁心端面间的空气隙 δ_1（称主工作气隙）而构成闭合磁路，该磁通对吸片产生吸力，被称之为主磁通 Φ_δ，如图 1－8(a) 中虚线所示，其等效磁路图如图 1－8(b)所示。图中 IN 为线圈的磁动势；$R_{\delta1}$ 为主工作气隙的磁阻，$R_{\delta2}$，$R_{\delta3}$ 为非工作气隙的磁阻；R_{m1}，R_{m2}，R_{m3}，R_{m4} 分别为铁心、吸片和铁轭的铁磁阻。图中的符号模仿电路中的符号画出。

[例题] 某一磁系统如图 1－9(a)所示。试根据基尔霍夫定律列出其方程式。

解题步骤：

(1) 画出等效磁路图,见图 1－9(b)。

(2) 确定左边回路环绕方向为顺时针，右边回路环绕方向为逆时针。

(3) 根据电流 I_1 和 I_2 的方向决定磁动势 F_1 和 F_2 的方向，如图 1－9(b) 所示。

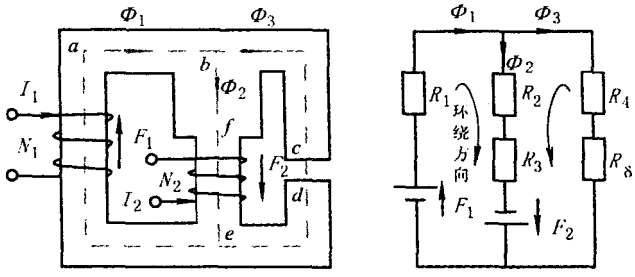


图 1－9 磁系统图

(a) 磁路结构图 (b) 等效磁路图

(4) 决定每支路各段平均长度及各段磁压降及其正、负。

第一段是 eab,磁压降为 H_1l_1 第二段是 bf,磁压降为 H_2l_2 第三段是 fe,磁压降为 H_3l_3；第四段是 $bc+de$，磁压降为 $-H_4l_4$ 第五段是 cd,磁压降为 $-H_5l_5$。

(5) 列出基尔霍夫方程式：

$$-\Phi_1+\Phi_2+\Phi_3=0$$

$$F_1+F_2=I_1N_1+I_2N_2=H_1l_1+H_2l_2+H_3l_3$$

$$F_2=I_2N_2=H_2l_2+H_3l_3-H_4l_4-H_5l_5$$

§1－3 直流磁路的计算

前面已提到，磁路的形式与电路的形式有其相似之处，但它们仍有所不同：

(1) 磁路中铁磁材料的磁导率 μ 不是常数,见图 1－3，使磁路的计算成为非线性的问题。

(2) 气隙磁导率 μ 虽然是常数，但由于长度和面积不易算准，因而磁阻或磁导很难计算，但是它对整个磁路计算的准确性影响却极大。

(3) 磁路中有分布的漏磁通，如图 1－6 所示。漏磁的存在将使图 1－8等的等效磁路复杂，它不再只有一个回路；不能用一个集中磁动势 IN 表示。而且使导磁体内的 Φ,B 和 H 都不是常数，因此考虑漏磁后的磁路计算是相当复杂的。

由于以上三个特点，致使磁路计算是相当复杂的，而且也不容易算得很准确。但在并不需

要十分准确的工程计算中，或在初步估算中，可以忽略漏磁通的计算。

本节的磁路计算是忽略了漏磁通简单磁路的计算。

另外，由于磁路与电路的相似之处，所以磁路的计算可以模仿电路的计算，其计算的步骤是：首先画出等效磁路图，计算出磁路中各气隙磁导，然后再根据基尔霍夫定律对主磁通或磁动势进行计算。

一、气隙磁导的计算

对于有气隙的磁路计算，虽然铁磁体的长度通常比气隙的长度大得多，但由于空气的磁导率远比铁磁物质小得多，故气隙磁导比铁磁导小得多，致使气隙磁压降占整个线圈磁动势的绝大部分。因此气隙磁导的计算对整个磁路的计算十分重要。

气隙磁导取决于构成气隙的极面的几何形状和相对位置。下面推导两种特定形状的气隙磁导计算公式。

1. 平行平面的极面间

平行平面的板面间磁力线见图 1－10。

空气隙中磁场的磁力线，有企图占据可能的最大空间的作用，所以磁通会向外扩张，造成边缘扩散现象。气隙边缘的磁力线不是直线，而是向外凸出，因而增加了气隙的有效面积。对于两个平行的平面磁极，由于边缘扩散作用，其磁力线分布形状如图 1－10所示，气隙愈大，则这种边缘扩散作用愈大。只有当磁极的端面比气隙大很多时（$\delta/a<0.2$及 $\delta/b<0.2$），边缘扩散作用才可以忽略不计，而认为气隙中磁场是均匀磁场，这时气隙磁导可用下式表示

$$\Lambda_\delta = \mu_0 \frac{ab}{\delta} \quad (\mathrm{H}) \tag{1-11}$$

如果气隙较大，需要考虑边缘扩散作用时，可在公式中引入修正系数，于是上式为

$$\Lambda_b = \frac{\mu_0}{\delta}(a + K\delta)(b + K\delta) \quad (\mathrm{H})$$

式中，$K = 0.307/\pi$

2. 互成角度的极面间

互成角度面的板面见图 1－11。

对于互成角度极面间气隙磁导的计算，可以把气隙分成许多厚为 $\mathrm{d}x$、宽为 b 的平行平面磁极并联来看，然后再取内径 r_1 到外径 r_2 的积分，求得

$$\Lambda_b = \mu_0 \int \frac{\mathrm{d}S}{l} = \mu_0 \int_{r_1}^{r_2} \frac{b\mathrm{d}x}{\theta x} = \mu_0 \frac{b}{\theta} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (\mathrm{H}) \tag{1-12}$$

在实际的磁路结构中，磁极形状除上述以外，还有其它多种型式，现将常用气隙磁导计算公式列于表 *1－3* 中。

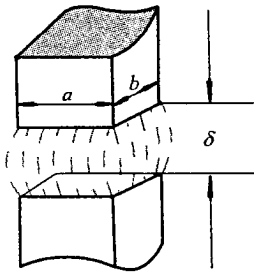


图 1-10　平行平面磁极

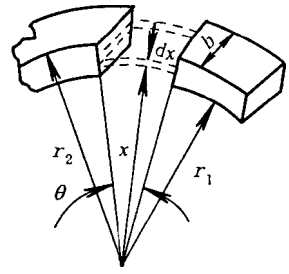
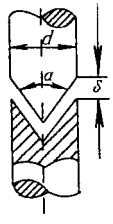
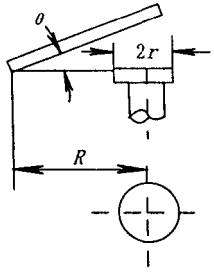
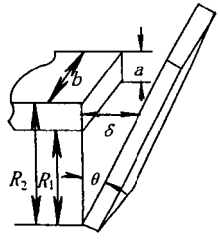


图1-11　互成角度的极面

表 1-3　常用气隙磁导公式

编号	几何图形	磁极形状	磁导 Λ 或单位长度磁导
1		锥形磁极	$\Lambda_\delta = \frac{\mu_0 \pi d}{2\delta \cos\alpha}\left(\delta\sin\alpha - \frac{d}{2\cos\alpha}\right)$
2		圆柱铁心和平板衔铁	$\Lambda_\delta = \mu_0 \frac{2\pi R}{\theta}\left(1-\sqrt{1-\frac{r^2}{R^2}}\right)$ θ 单位用弧度
3		矩形铁心和平板衔铁	$\Lambda_\delta = \frac{\mu_0 b}{\theta}\ln\frac{R_2}{R_1}$ θ 单位用弧度

需要全本请访问 www.ertongbook.com