

882023



电磁元件

庄心复 主编



航空工业出版社

电 磁 元 件

庄 心 复 主 编

航 空 工 业 出 版 社

1 9 8 9

内 容 简 介

本书主要介绍自动控制系统中常用的基于电磁原理的各类电器以及电机的原理、构造和特性,其中包括电磁铁、继电器、直流电机、变压器、感应电机、自整角机、旋转变压器、同步电机和步进电机等。在内容上先从基本原理和共同问题出发再到各元件的构造和性能,并兼顾了航空、地面和民用各个领域,还适当介绍了当前该学科领域中的一些新成果。

本书可供高等学校自动控制、仪表或导航专业作教材,也可供从事上述专业的工程技术人员参考。

电 磁 元 件

庄 心 复 主 编

航空工业出版社出版发行

(北京市和平里小关东里14号)

——邮政编码: 100013——

全国各地新华书店经售

南京航空学院印刷厂印刷

1989年4月第一版

1989年4月第一次印刷

开本: 787×1092毫米 1/16

印张: 16.25

印数: 1-1300册

字数: 404千字

ISBN 7-80046-120-3/TP·008

定价: 3.40元

前 言

本书是为自动控制系非电机、电器专业学生学习《电磁元件》课程而编写的教材。主要包括电磁基础知识,各类电磁电器和控制电机。电磁元件种类繁多、应用极为广泛。本书重视电磁基本知识的阐述,引导学生用电磁基础理论分析各类电机和电器的工作原理、特性及应用。在内容选择上考虑了控制系统发展对电磁元件的要求,还适当介绍了电磁元件的发展趋向。全书力求阐述清楚、易懂、简明扼要。

本书共分十六章,前三章电磁电器,后十三章控制电机。内容包括电磁铁、继电器、直流电机、变压器、感应电机、自整角机、旋转变压器、同步电机和步进电机等。并对新型控制电机,如感应同步器、低速同步电动机等也作了介绍。本课程的参考学时数为60,按70学时编写。为了适应不同学时数或教学中精简内容的需要,有些节、段可以作为选学内容,用“*”号表示。

本书是在总结多年教学实践经验的基础上编写的,先后有郭继高等多位老师对本门课程教材的建设作出过贡献。本书由庄心复主编,参加本书编写的有:曲民兴(第一、二、三章);刘迪吉(第十四、十五、十六章);张稼丰(第十三章),其余由庄心复编写。本书由北京理工大学葛伟亮副教授和西北工业大学吴斌副教授审稿。由于编者水平有限,难免有不当之处,欢迎读者批评指正。

编 者

1988年8月

目 录

绪论	(1)
第一章 磁路及其计算	(3)
1.1 概述	(3)
1.2 磁路参数及其定律	(9)
*1.3 磁性材料的 $B-H$ 关系	(11)
1.4 气隙磁导计算	(14)
1.5 直流磁路计算	(20)
1.6 永磁磁路	(28)
1.7 交流磁路	(33)
小结	(37)
思考题和习题	(38)
第二章 电磁铁	(39)
2.1 概述	(39)
2.2 电磁铁的吸力及吸力特性	(42)
2.3 直流电磁铁的时间特性	(50)
小结	(54)
思考题	(54)
第三章 继电器	(55)
3.1 概述	(55)
3.2 继电器的触点	(56)
*3.3 介绍几种继电器	(61)
小结	(68)
思考题	(68)
第四章 直流电机的一般问题	(70)
4.1 直流电机的基本原理及结构	(70)
4.2 直流电机的电枢绕组	(73)
4.3 直流电机的磁场	(76)
4.4 直流电机的换向	(79)
小结	(79)
思考题	(80)
第五章 直流调速发电机	(81)
5.1 直流发电机的分类	(81)

5.2	直流发电机的基本电磁关系	(82)
5.3	他励直流发电机的运行特性	(83)
5.4	直流测速发电机及其特性	(85)
5.5	直流测速发电机的误差及其减小的方法	(86)
5.6	直流测速发电机的应用	(88)
5.7	直流测速发电机的性能指标和使用	(90)
	小结	(92)
	思考题	(93)
第六章	直流伺服电动机	(94)
6.1	直流电机的可逆性原理	(94)
6.2	直流电动机的基本方程及功率平衡	(95)
6.3	直流电动机的运行特性	(96)
6.4	直流电动机的使用	(100)
6.5	直流伺服电动机的控制方法	(103)
6.6	直流伺服电动机的特性	(104)
6.7	直流伺服电动机在过渡过程中的工作状态	(106)
6.8	直流伺服电动机的过渡过程	(108)
6.9	直流伺服电动机的额定值	(111)
6.10	直流力矩电动机	(112)
6.11	低惯量直流伺服电动机	(113)
	小结	(116)
	思考题和习题	(117)
第七章	变压器	(119)
7.1	概述	(119)
7.2	单相变压器的空载运行	(120)
7.3	单相变压器的负载运行	(123)
7.4	变压器负载运行时的等值电路和矢量图	(124)
7.5	变压器的额定值和性能指标	(126)
7.6	变压器的参数测定	(127)
7.7	特殊变压器	(128)
	小结	(131)
	思考题和习题	(132)
第八章	交流电机的基本问题	(133)
8.1	同步发电机的基本原理	(133)
8.2	感应电机的基本原理	(133)
8.3	三相交流电的旋转磁场	(134)
8.4	交流绕组、电势和磁势	(136)
8.5	三相交流绕组的构造	(141)
8.6	两相交流绕组	(142)

小结·····	(146)
思考题·····	(146)
第九章 三相感应电动机·····	(148)
9.1 概述·····	(148)
9.2 感应电动机的工作状态和转差率·····	(149)
9.3 三相感应电动机的运行分析·····	(150)
9.4 感应电动机的功率和转矩·····	(156)
9.5 感应电动机的起动·····	(164)
9.6 感应电动机的调速·····	(167)
小结·····	(172)
思考题和习题·····	(173)
第十章 单相感应电动机·····	(174)
10.1 单相感应电动机的工作原理·····	(174)
10.2 单相感应电动机的起动·····	(175)
10.3 单相感应电动机的调速·····	(177)
小结·····	(179)
思考题·····	(180)
第十一章 交流伺服电动机·····	(181)
11.1 概述·····	(181)
11.2 交流伺服电动机的结构和控制方法·····	(181)
11.3 幅值控制时交流伺服电动机的特性·····	(183)
11.4 电容伺服电动机的移相·····	(184)
11.5 电容伺服电动机的特性·····	(187)
11.6 交流伺服电动机的主要性能指标·····	(189)
11.7 交流与直流伺服电动机的比较·····	(192)
小结·····	(193)
思考题·····	(193)
第十二章 交流异步测速发电机·····	(194)
12.1 概述·····	(194)
12.2 交流异步测速发电机的基本结构和工作原理·····	(194)
12.3 交流异步测速发电机主要技术指标及误差分析·····	(196)
*12.4 交流异步测速发电机使用中的一些问题·····	(199)
12.5 交流伺服测速机组·····	(202)
小结·····	(203)
思考题·····	(203)
第十三章 自整角机·····	(204)
13.1 自整角机的基本类型和结构·····	(204)
13.2 控制式自整角机的工作原理·····	(205)
13.3 力矩式自整角机的工作原理·····	(208)

13.4 差动式自整角机的工作原理.....	(210)
*13.5 霍尔效应自整角机的工作原理.....	(211)
小结.....	(213)
思考题.....	(213)
第十四章 旋转变压器	(214)
14.1 概述.....	(214)
14.2 正余弦旋转变压器.....	(215)
14.3 线性旋转变压器.....	(217)
14.4 旋转变压器的应用.....	(218)
14.5 感应同步器.....	(221)
小结.....	(225)
思考题.....	(226)
第十五章 同步电机	(227)
15.1 同步电机的基本原理.....	(227)
15.2 永磁式同步电动机.....	(230)
15.3 反应式同步电动机.....	(230)
15.4 低速同步电动机.....	(231)
15.5 磁滞电动机.....	(234)
*15.6 自整步同步电动机.....	(236)
小结.....	(239)
思考题.....	(240)
第十六章 步进电动机	(241)
16.1 反应式步进电动机的工作原理.....	(241)
16.2 反应式步进电动机的基本特性.....	(243)
16.3 永磁式步进电动机的工作原理.....	(246)
16.4 永磁感应子式步进电动机的工作原理.....	(247)
*16.5 位置闭环控制步进电动机.....	(249)
小结.....	(249)
思考题.....	(250)
参考文献	(251)

绪 论

随着我国国民经济现代化的飞速发展、科学技术的不断进步,自动检测、自动控制系统在现代化工业和国防事业中所起的作用越来越重要。从洲际导弹的发射、飞机的自动驾驶到机器人的操纵等都需要有精度高、反应快的自动控制系统来实现。目前,随着计算机科学的飞速发展,一些控制系统都已实现计算机化,使功能更强、体积更小。但无论是经典的还是实现了计算机化和数字化的自动检测、自动控制系统,也都离不开大量的检测、放大、执行元件。这些统称为自动化元件。

自动化元件的种类很多。从物理性质来分,有电磁、电子、机械、气动、液压等多种元件。基于电磁原理而工作的元件称为电磁元件。其中有电磁电器如电磁铁、继电器、接触器;控制微电机如交直流执行电动机、交直流测速发电机、自整角机、旋转变压器等。电磁元件用电能来工作,因此与采用其它能源的元件相比,有它独特的优点,目前在品种上、产量上都得到越来越迅速的发展。

下面我们就飞机自动驾驶仪中舵机部分的控制系统来说明电磁元件在系统中的作用和地位。

飞机在自动驾驶飞行中需要自动控制副翼、方向舵和升降舵来保持其飞行状态、高度和方向,其中每个舵面都有一套控制系统。现以某种电动驾驶仪为例(图0-1)。飞机的飞行姿态由陀螺仪给出,通过与控制信号综合解算以后给出控制电机的信号,此信号经过放大后供电给磁滞电动机使之转动。磁滞电动机的输出经减速器和离合器带动舵面向所需要的方向偏转,同时还带动位置检测的电位器,输出反馈信号,当到达预定位置时就控制电机停止转动。为了使系统能平稳运转,系统中加入了交流测速发电机作为阻尼元件,以改善系统的动态性能,测速机的信号也反馈到放大器的输入端。联接磁滞电动机与舵面的离合器是通过电磁铁的吸合来合拢的,电磁铁也可通过给定信号来控制。

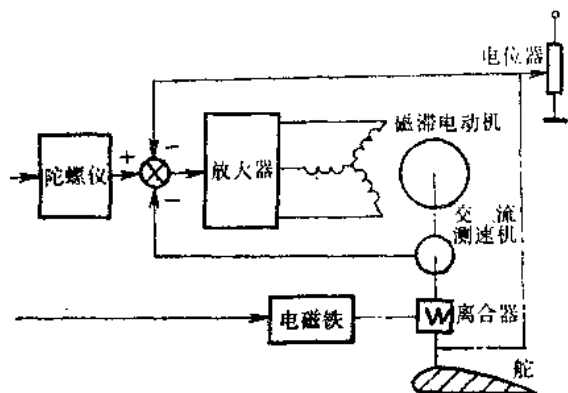


图 0-1 飞机自动驾驶仪舵机控制系统

系统中所用的陀螺仪本身也是一个自动控制系统,其中有驱动陀螺高速旋转的陀螺电机,为产生陀螺的进动运动而提供力矩的直流力矩电机等。

现再以典型自动控制系统的结构为例,来说明其中所用的电磁元件的分类和功能。图0-2是一种控制物体位置的

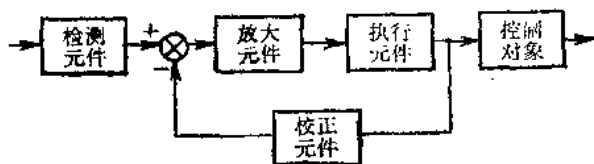


图 0-2 伺服系统的示意方框图

伺服系统的方框图，其中各个环节和可能应用的电磁元件如下：

检测元件的作用是把被测量的物理量（如位移、转角等）转换成电信号。常用的电磁元件有自整角机、旋转变压器和感应同步器等。

放大元件的作用是把转换来的电信号进行电压放大和功率放大，以达到能驱动执行元件的程度。常用的电磁元件有继电器、接触器以及磁放大器和电机放大机等。由于半导体器件的飞速发展，磁放大器和电机放大机已逐渐被各种半导体或集成电路放大器所取代，故本书不再列入。

执行元件的作用是把已放大的电信号转换为机械位移以带动控制对象。常用的电磁元件有电磁铁、执行电动机、力矩电动机、磁滞电动机和步进电动机等。

校正元件的作用是通过反馈以改进系统的品质，保证系统工作的稳定性。常用的电磁元件为交、直流测速发电机。

自动控制系统用的电磁元件是在常规电磁元件的基础上发展起来的。从基本原理上来说，它们并无本质区别。但是，两者的主要要求不同，前者着重于效率等能量转换的经济指标，而后者则要求高精度、高灵敏度和高可靠性。

本书是作为自动控制系的非电机、电器类专业的一门必修的技术基础课的教材，除了介绍各类电磁元件的工作原理、构造、特性及其应用以外，还着重讨论电磁基础理论知识，为新型电磁元件的应用开发打下基础。考虑到加宽知识面以有较为广泛的适应性，在课程中适当增加了磁路及其计算以及交流绕组及交流异步机的内容。为了反映一些新型电磁元件及机电一体化的发展，编入了感应同步器和无刷电机以及低速同步机等内容。

电磁元件种类繁多，应用广泛。但是，它们的基本原理都是建立在基本的电磁规律基础上，它们既有共性，又有个性。一种电磁元件与另一种电磁元件之间在电磁关系上和基本特性有很多相似之处，但又各自有其独特之处。在学习过程中应将各种电磁元件联系起来学习、思考，既注意它们的共同规律，又注意各自的特殊性。

本课程是一门技术基础课，它不仅涉及到电磁现象，还涉及到力学、机械学和热学现象，可以说是数学、物理、电工、机械、材料等有关知识的综合应用。因此，在学习方法上要有别于基础课。一方面要将其原理弄清，另一方面要注意其内在联系，学会综合分析。本课程又有很强的工程实践性，在学习上要重视实验环节，独立完成各项实验。

第一章 磁路及其计算

1.1 概 述

电磁元件和装置是借电磁原理而工作的,从能量变换的角度来看,它们的工作过程可用图 1-1 所示框图表示。它们或将电能转换为机械能(量),如电磁铁、电动机、电磁离合器等;或将机械能转变为电能(量),如发电机、电感传感器等等;或用以传递与储存电能,如变压器、电抗器等。磁场乃实现能量转换、传递和储存的媒介。这样,磁场就成了分析计算电磁元件的基础。工程上多将磁场简化成“路”即磁路来计算。

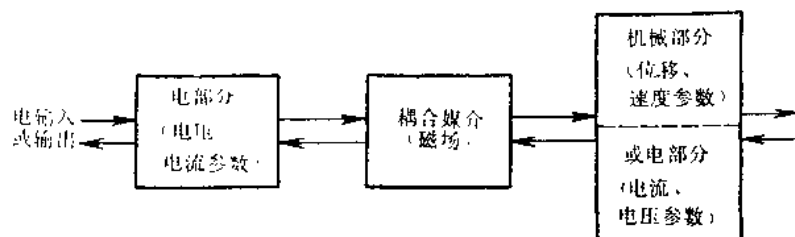


图1-1 电磁元件工作过程框图

一、磁场与磁路

磁场是存在于一定空间内的特殊形态的物质,它由电流(有规则运动的电荷)所建立,并使置于其中的载流导体受到电磁力的作用。静止导体中的恒定电流所产生的磁场称为恒定磁场。永久磁铁产生的磁场,可以理解为是由永久磁铁中的分子电流建立的,因而它也属于恒定磁场。

人们根据载流导体(从本质上讲是运动电荷)在磁场中所受电磁力的特征如数值、方向随时间的变化规律等等,确定磁场的性质。在一般情况下,同一载流导体在磁场中各个点上受力大小和方向不相同,也就是说各点磁场的强弱不同。通有电流 I 的线形导体上的 dl 微元段在磁场中受的力 df (图1-2)可表示为

$$df = I[dl \times B]$$

这里定义了磁场的一个基本物理量——磁感应强度 B ,它是一个向量,其大小等于磁场作用于载有单位电流的单位长度上的、最大可能的磁场力,方向如图 1-2 所示。磁感应强度的单位,在国际单位(SI)制中为特斯拉,简称特;在电磁单位(CGSM)制中为高斯,简称高。两者之间的关系为

$$1 \text{ 特} = 10^4 \text{ 高}$$

磁场的另一个基本物理量是磁场强度 H ,它也是一个向量。磁感应强度与磁场强度之间

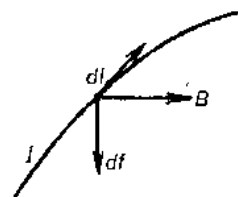


图 1-2 载流导体元在磁场中受力

存在下列关系

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1-1)$$

式中 μ 为介质的磁导率。在 SI 制单位中磁场强度的单位为安/米；在 CGSM 制单位中磁场强度的单位为奥斯特，简称奥。两者的关系为

$$1 \text{ 安/米} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ 奥}$$

磁导率的单位可由式 (1-1) 推出，在 SI 制单位中 μ 的单位为

$$\frac{B \text{ 的单位}}{H \text{ 的单位}} = \frac{\text{特}}{\text{安/米}} = \frac{\text{伏} \cdot \text{秒/米}^2}{\text{安/米}} = \text{亨/米}$$

工程上，根据物质的磁性差异，将物质分为铁磁物质和非铁磁物质。非铁磁物质如空气、铜、铝、胶木等等，其磁导率在工程计算中均认为与真空的磁导率相同。真空的磁导率为

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ 亨/米}$$

铁磁物质如铁、钴、镍及其合金等的磁导率远大于 μ_0 ，为其数十、数千乃至数万倍。通常将此倍数称为相对磁导率记为 μ_r ，即 $\mu = \mu_r \mu_0$ 。

在恒定磁场中，其规律遵循高斯定理（也称磁通连续性定理）和安培环路定理（也称全电流定理）。

高斯定理揭示了磁感应强度的基本性质，可表示为

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (1-2)$$

即在磁场中任意一个封闭曲面内，磁感应强度向量的面积分恒等于零。

安培环路定理揭示了磁场与产生该磁场的宏观电流之间的关系，可表示为

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I \quad (1-3)$$

即磁场中磁场强度矢量沿任一封闭回线的线积分等于穿过此回线界定之曲面的电流代数和。其中电流的正负视其方向与所选回线方向是否符合右手螺旋法则而定，例如图 1-3 所示情况

$$\sum I = I_1 - I_2$$

磁感应强度向量在面积 s （图 1-4）上的积分称为该面积的磁通 ϕ ，即

$$\phi = \iint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (1-4)$$

或

$$\phi = \iint_s B \cos \alpha \, dS \quad (1-5)$$

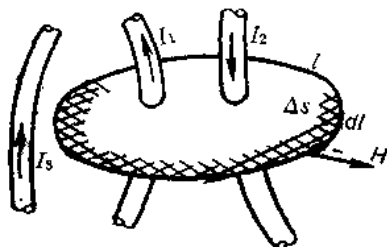


图 1-3 安培环路定理

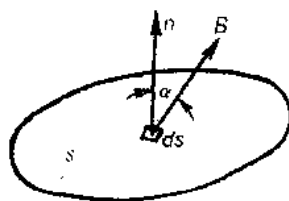


图 1-4 面积 s 的磁通

图中 $\mathbf{n}$ 为 $d\mathbf{s}$ 的法线方向。磁通是一个标量，但它有正方向（类同于电路中电流的正方向），用以表示是从 s 面积的哪一侧穿到哪一侧。如果磁感应强度在 s 面积上均匀分布，且方向均与 s 垂直，则

$$\phi = Bs$$

所以磁感应强度有时也称磁通密度。磁通的单位在 SI 制中为韦伯 (= 伏·秒)，在 CGSM 制中为麦克斯韦，分别简称为韦、麦。两者的关系为

$$1 \text{ 韦} = 10^8 \text{ 麦}$$

应用磁通的概念，则高斯定理可叙述为：在磁场中穿过一个封闭曲面的总磁通恒为零，或说穿进一个封闭曲面的磁通恒等于穿出该曲面的磁通。这说明磁通总是连续的，不能在任何地方发生间断。这连续的概念与电路中的电流连续的概念是相似的。因为磁通是连续的，我们就可以从整个磁场中分割出一个“管子”来，它每一个截面上的磁通均相同，而管壁上没有磁通穿过（图 1-5），这样的管子称为磁通管。整个磁场可分割为许多个磁通管，每个磁通管都将是封闭的。

通常用磁感应线或磁通线来形象地表示磁场。所谓磁感应线是人们绘于磁场中的一族曲线，曲线上每一点的切线方向都与该点磁感应强度向量 $\mathbf{B}$ 的方向相同。图 1-6、图 1-7 分别为螺管线圈和条形永久磁铁通过其对称轴线的平面上磁场分布的图形。显然，磁感应线是无头无尾的封闭曲线。这样，磁通管可视为由一束磁感应线构成。如果沿着磁通管中的磁感应线路径取磁场强度的线积分，则由于积分路径各点的 $\mathbf{H}$ 其方向与路径一致（磁感应线每点的切线方向都代表该点 $\mathbf{B}$ 的方向，也就是 $\mathbf{H}$ 的方

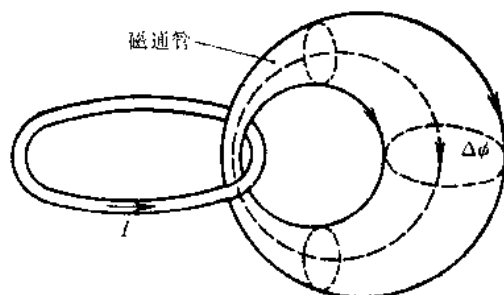


图 1-5 磁通管与电流互链

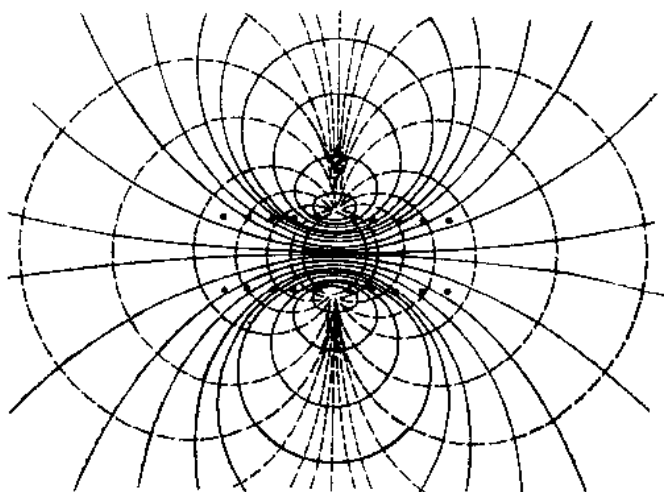


图 1-6 螺管线圈的磁场

实线——磁感应线 虚线——等磁位线

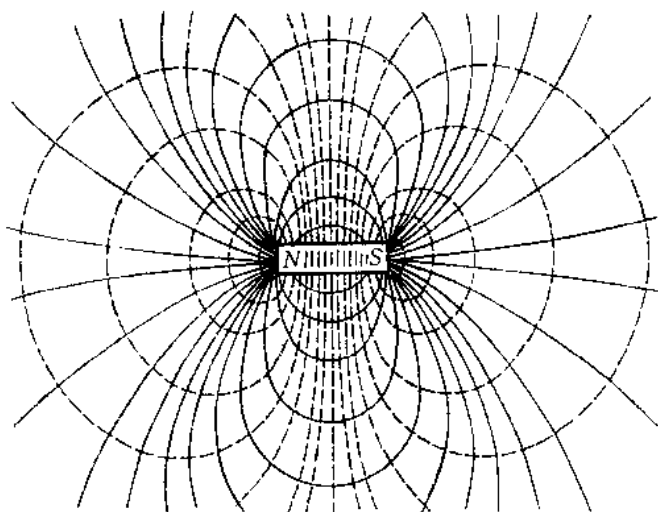


图 1-7 条形永久磁铁的磁场

实线——磁感应线 虚线——等磁位线

向)，积分值不会等于零。按安培环路定理可以知道磁通管一定包围着电流。由于电流也是连续的，因此在磁场中电流回路与磁通管好象链条的两个环节，总是互相交链着的（图1-5）。电流必链磁通，磁通必链电流，两者正方向间呈右手螺旋关系。从另一个角度来说，就是磁感应线总是绕着它的激发者——电流的。这是应用高斯定理和安培环路定理揭示的磁场的重要规律之一。

现在再来研究与磁场安培环路定理相联系的磁场强度的线积分。定义磁场强度沿一条路径 l 的线积分为该路径上的磁压，记为 $\mathcal{U}$ ，即

$$\mathcal{U} = \int_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-6)$$

磁场中任意两点之间可联成许多路径，如图1-8所示，在 P 点和 Q 点之间画了 l_1 、 l_2 、 l_3 三条路径，其中 l_1 和 l_2 路径未穿过电流所围面积 s 。沿 l_1 、 l_2 所构成的封闭曲线做一次线积分，按式(1-3)应有

$$\int_{l_1} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} - \int_{l_2} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

得

$$\mathcal{U}_{l_1} = \mathcal{U}_{l_2}$$

若沿 l_1 、 l_3 所构成的封闭曲线做一次线积分，则有

$$\int_{l_1} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} - \int_{l_3} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I$$

可见，若路径不穿过电流所围面积 s 时，其磁压是相同的，或说其磁压仅是两点坐标位置的函数。如果选定一点(例如 Q)为参考点，则可定义从任意一点出发，不穿过电流回路面 s 的任一路径到参考点的磁压为该点的磁位。磁场中磁位相等的点连成面(或线)称为等磁位面(线)，等磁位面(线)总是与磁感应线互相垂直的(图1-6、图1-7)。

如果将图1-5中的磁通管分成若干段，每一段 $\mathbf{H}$ 的线积分即为各段对应的磁压。这样，由式(1-3)描述的安培环路定理便可表示为

$$\sum \mathcal{U}_i = \sum I \quad (1-7)$$

由于电流是磁场的激发者，通常将磁通管所链的电流称为其磁通势，简称磁势。这样，利用磁压和磁势的概念，安培环路定理就可表达为：沿着磁场中任意一个磁通管其总磁压等于它的总磁势。磁压和磁势的单位均为安。

通常又将磁通所经过的闭合回路叫做磁路。每个磁通管都可看成是一个磁路，整个磁场就是由这许许多多的“磁路”并联而成。工程中为了获得较大的磁通并将磁通“引导”到所需要的地方，通常都采用铁磁材料制造零件，图1-9为其一例。这些铁磁材料制成的零件统

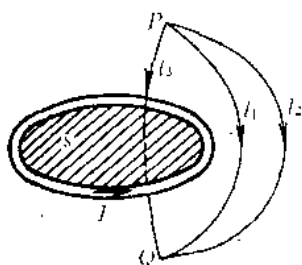


图1-8 $\mathbf{H}$ 的线积分

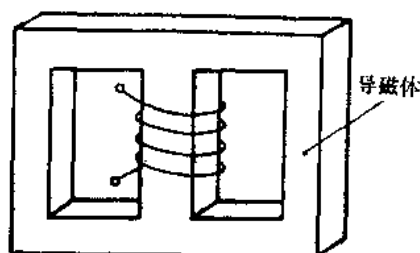


图1-9 铁磁材料制成的零件

称导磁体。由于铁磁材料的磁导率远大于空气等非铁磁材料，所以在有铁磁材料的磁场中，导磁体中的磁通远大于无导磁体的地方，大部分甚至绝大部分磁通均以导磁体构成的路径为通路（图1-10）。这样，磁路就有了一个“特定”的含意了。磁通通过导磁体形成闭合通路类似于电流沿导线形成通路。应用磁路的概念，可以把空间分布的磁场问题简化为“路”来计算。

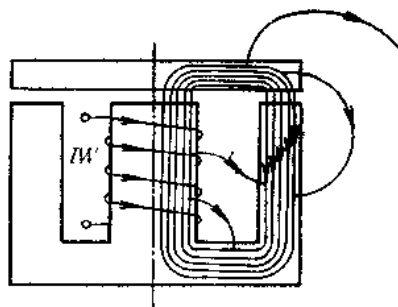


图 1-10 磁路

不过需要指出，磁路的理论没有电路的理论精确，导体和绝缘体的导电率之比具有 10^{16} 的数量级，电流实际上只是沿着导体通过；而导磁体的磁导率与空气等非铁磁材料的磁导率之比等于 $10^3 \sim 10^5$ ，实际上并不存在“磁绝缘体”，磁通仍然在各个方向都散布着。我们把按照人们安排的路径（即沿导磁体）而闭合的磁通称为主磁通，而将不经过或不全经过导磁体而闭合的磁通称为漏磁通^①。

磁通总是与电流回路相链的。对于图 1-10 磁路中的线圈来说，与电流回路相链的全部磁通等于与各匝相链的磁通之和。我们把与整个线圈相链的全部磁通称为该线圈的磁通链，简称磁链，记为 ψ ，即

$$\psi = \sum_{k=1}^W \phi_k \quad (1-8)$$

式中 W ——线圈的匝数；

ϕ_k ——与第 k 匝线圈相链的磁通。

由于存在漏磁通，各匝线圈相链的磁通并不相等。如果无漏磁通或可忽略漏磁通，各匝所链磁通相等，设它为 ϕ 则线圈的磁链

$$\psi = W\phi \quad (1-9)$$

*二、磁路分类

电磁元件和装置中的磁路各异。磁路的基本组成部分是线圈和导磁体。线圈用以建立磁势，导磁体则用以建立较大的磁通并将磁通“引导”到需要的地方。有的磁路有工作气隙，有的没有工作气隙。按照其工作气隙的特点可将磁路分为：无工作气隙磁路，有可变工作气隙磁路和不变（或变化很小）工作气隙磁路。

各种变压器、互感器、铁芯电抗器和磁放大器等磁路大多没有气隙，仅由线圈和铁芯（导磁体）构成磁路，如图 1-11 所示。由于没有气隙，所以能量传递效率高、结构紧凑、体积小。

① 各种电磁元件中对主磁通与漏磁通的定义不尽相同，如电磁铁中定义通过主工作气隙的磁通为主磁通，不经过主工作气隙的磁通为漏磁通；变压器中则定义与初级、次级线圈均相链的磁通为主磁通，否则为漏磁通。

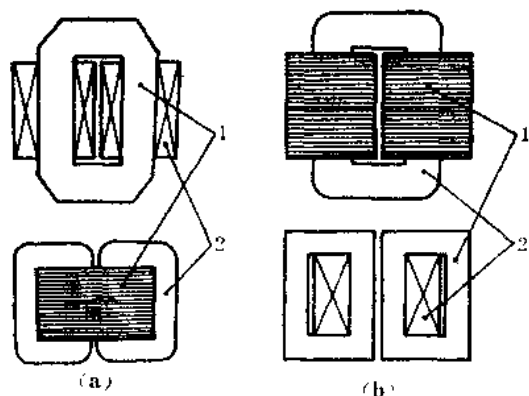


图 1-11 无工作气隙磁路
1—铁芯 2—线圈

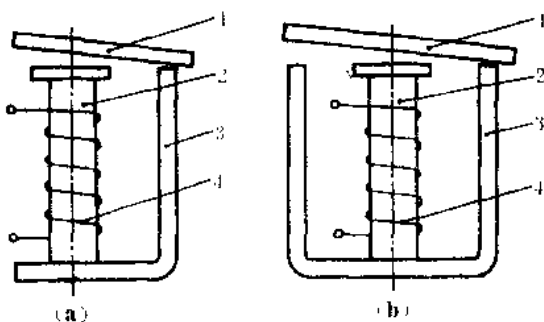


图 1-12 电磁铁
1—衔铁 2—铁芯 3—轭铁 4—线圈

在有可变工作气隙的磁路中，导磁体分为静止部分（常称为轭铁、铁芯）和运动部分（常称为衔铁），并通过衔铁的运动（在电磁吸力的作用下）输出机械功，完成电能到机械能的转换；或者与此相反，输入位移量完成机械参数到电参数的转换。前者如电磁铁（图 1-12）和各种电磁机构，其衔铁在电磁吸力作用下运动而做功。后者如电感传感器（图 1-13），

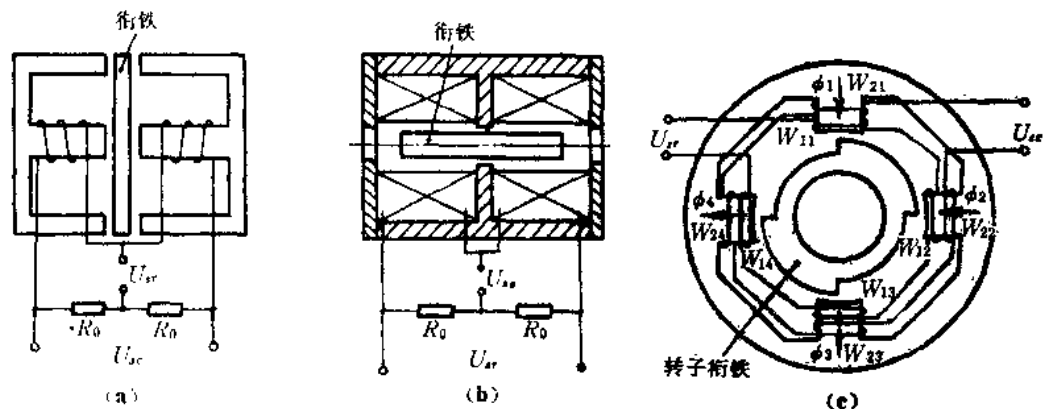


图 1-13 电感传感器

其输入电压 U_{sr} 为交流励磁电压，当衔铁有位移（线位移或角位移）时，引起左右两个气隙或气隙中磁通通过的面积增加或减小，使得对应线圈的磁链增加或减小，在输出端便产生与衔铁位移成比例的电压信号输出。

电机的磁路工作气隙在工作过程中大都是不变的。电机的种类繁多，图 1-14 是直流电机的磁路。四个磁极上的励磁线圈通入直流电流，便在工作气隙中建立起磁场，转子、磁极和轭都是导磁体。

磁路按其励磁电源不同有交流磁路和直流磁路之分。线圈用直流电励磁的磁路称为直流磁路，其励磁电压、磁势及其建立的磁通均不随时间而变化。线圈用交

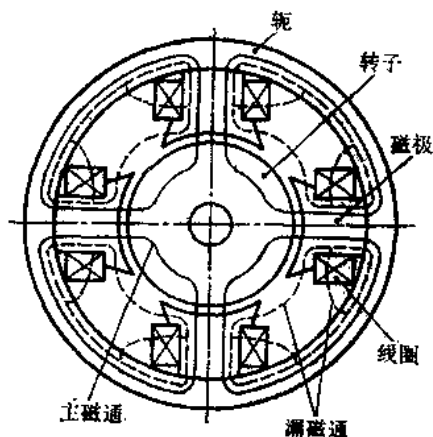


图 1-14 直流电机的磁路

流电励磁的磁路称为交流磁路，如变压器、电感传感器的磁路。在交流磁路中，励磁电压、磁势及其建立的磁通均为时间的函数。

磁路的职能就在于建立各种电磁元件和装置中所需要的磁通。主磁通与线圈磁势之间的函数关系称为磁路的磁化特性。磁路计算的根本任务也就是要建立磁路中主磁通与磁势之间的关系，为各种电磁元件、装置特性计算和分析打下基础。

1.2 磁路参数及其定律

磁路与电路非常相似。磁势产生磁通沿导磁体形成闭合回路，犹如电势产生电流沿导体形成通路。如果认为磁通完全在导磁体中通过，那么导磁体就可看成是一个磁通管，它的总磁压等于它的总磁势（见式 1-7）。这与电路中沿着电流回路其电压降之和等于其总电势相仿。对于一段磁路来说，两端的磁压记为 $\mathcal{U}$ ，如果各截面上磁感应强度 B 均匀分布，则

$$\phi = Bs$$

$$\mathcal{U} = Hl$$

式中 s 、 l 分别为该磁路段的截面积和长度。与电路中电流和电压降的关系相仿，定义

$$\mathcal{R}_c = \frac{\mathcal{U}}{\phi} = \frac{l}{\mu s} \quad (1-10)$$

为该段磁路的磁阻。式中 μ 为该段磁路介质的磁导率。磁阻在形式上与电路中的电阻也是极为相仿的。磁阻的倒数称为磁导，记为 $\mathcal{A}_c$ ，即

$$\mathcal{A}_c = \frac{1}{\mathcal{R}_c} \quad (1-11)$$

$$\mathcal{A}_c = \frac{\phi}{\mathcal{U}} = \mu \frac{s}{l} \quad (1-12)$$

式 (1-10) 或 (1-12) 给出了磁路段上通过的磁通与磁路段上磁压之间的关系，称为磁路的欧姆定律。

磁路中的导磁体（铁磁物质）其磁导率 μ 不是常数，随磁感应强度 B 的变化可在一个很大的范围内变化，所以导磁体的磁阻一般说来是非线性的。空气的磁导率 μ_0 是个常数，气隙的磁阻是线性的，仅是气隙几何形状的函数。磁阻和磁导的单位均可由磁通和磁压的单位导出。磁阻的单位在 SI 单位制中为 1/亨或安/韦，在 CGSM 制中为安/麦；磁导的单位在 SI 制中为亨或韦/安，而在 CGSM 制中为麦/安。

和电路图相似，我们也可以用磁阻（或磁导）、磁势、磁通等磁路参数构成等值磁路图来表示一个具体结构的磁路。作等值磁路图时，只要顺次用对应的磁阻（或磁导）代替各磁路段，在线圈的位置上画上磁势符号即可。图 1-15 为图 1-10 中不计漏磁的等值磁路图。

一般说来，磁路段的截面积不同、通过的磁通不同或磁路段的材料不同时，在等值磁路图中就应当用单独的磁阻表示。如果考虑图 1-10 中的漏磁，等值磁路图中应增加如图 1-15 中的虚线部分来表示漏磁路径。

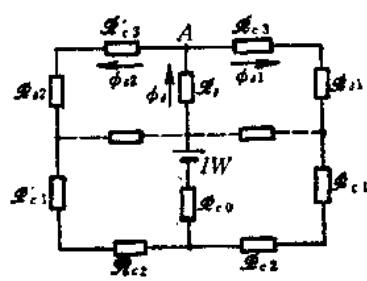


图1-15 示于图 1-10 磁系统的等值磁路