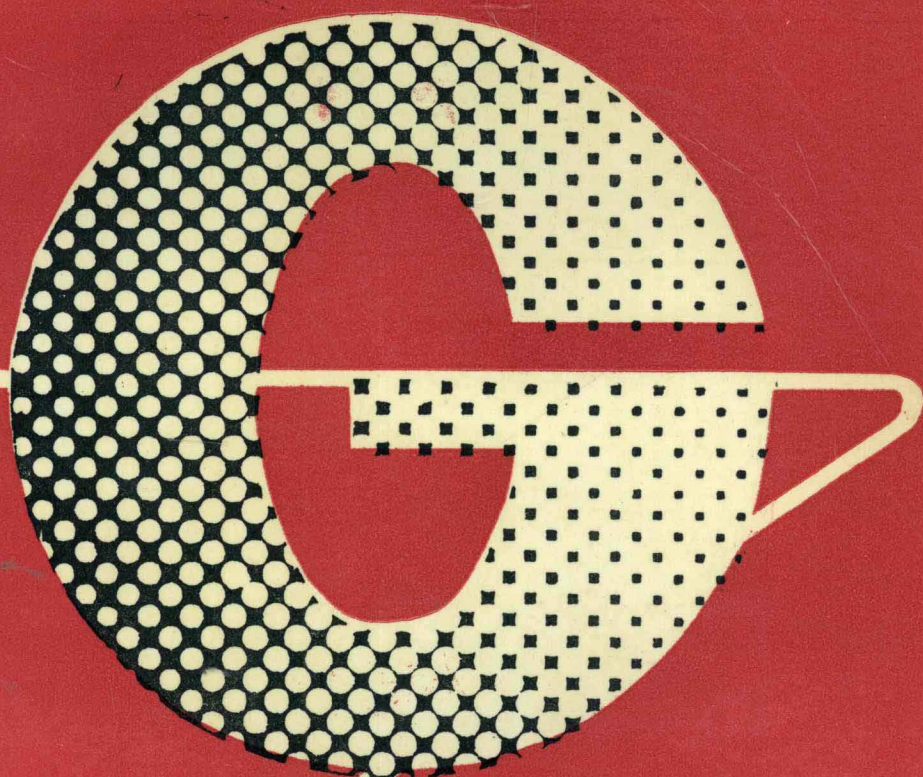


普通高等专科学校教育机电类规划教材

焊接电工



哈尔滨工业大学威海分校

周玉生 主编

机械工业出版社

前 言

本书是为加强、丰富焊接专业学生电工知识,便于学生学习“弧焊电源”和“电弧焊”课程而编写的辅助性教材。本课程是作为上述两门课程的先导课。

本书主要内容包括磁路及变压器、晶闸管整流电路、直流电机及其调速电路、常用控制电器(低压电器)及新型元件共五章。该内容就是为学习弧焊电源和电弧焊设备的需要,并结合焊接的特点,补充了原《电工学》中未涉及的内容。

第一章介绍了磁路的基本概念、特点、定律、简单磁路计算及变压器的基本原理;第二章介绍了晶闸管整流电路及其触发电路;第三章介绍了直流电机的性能、特点、应用及其调速电路;第四章主要介绍了焊接设备中常用的控制电器的基本原理、作用及典型控制电路;第五章简要介绍了现代半导体功率器件的特点及其在焊接中的应用。

本书由哈尔滨工业大学威海分校周玉生主编,承德石油高等专科学校武华为副主编。参编人员有华东船舶工业学院于治水,哈尔滨理工大学工业技术学院张淑丽、王丽凤。沈阳工业高等专科学校王宾为主审。

在审稿过程中,全国高等工业专科机械类专业协会热加工分会的部分同志,对本书的编写提出了宝贵意见。另外,哈尔滨工业大学威海分校的张鸿、陈军等同志对本书的编写给予了大力支持,在此一并表示谢意。

由于编者水平所限,加之时间紧迫,本书一定存在不当之处,诚请读者批评指正。

编 者
1996.7.5

本书用电工符号

接触器——KM

电流、中间继电器——KA

电压继电器——KV

时间继电器——KT

热继电器——KR

电位器——RP

电抗器——L

电源——E

变压器——T

控制变压器——TC

脉冲变压器——TI

光耦合器——IC

整流器（桥）——UR

分流器——RS

分压器——RV

电磁阀——YV

逆变器——UI

压敏电阻器——RV

晶闸管——VT

二极管——VD

晶体管、三极管——V

单结晶体管——VU

稳压管——VS

可关断晶闸管——GTO

大功率晶体管——GTR

场效应晶体管（MOSFET）——VF

绝缘栅门极型晶体管（IGBT）——VI

发光二极管——VL

限位开关——SQ

微动开关——SM

脚踏开关——SF

接近开关——SP

刀开关——QK

目 录

前言

本书用电工符号

绪论 1

- 一、电工技术在焊接技术领域的作用 1
- 二、焊接电工的主要内容 1
- 三、本书的任务、要求和学习方法 2

第一章 磁路及变压器 3

第一节 磁路的基本概念 3

- 一、磁场的基本物理量 3
- 二、磁性材料的磁性能 5

第二节 磁路基本定律 8

- 一、磁路欧姆定律 8
- 二、磁路基尔霍夫定律 8
- 三、磁路与电路的比较 9

第三节 磁路计算 10

- 一、已知磁通求磁动势 10
- 二、已知磁动势求磁通 13

第四节 交流铁心线圈电路 13

- 一、电压与磁通的关系 14
- 二、铁心线圈的电流波形与功率损耗 15
- 三、等效电路及相量图 18

第五节 变压器 19

- 一、基本结构 20
- 二、工作原理 20
- 三、等效电路及相量图 24
- 四、外特性 26
- 五、额定值 27

第六节 三相变压器及特殊变压器 27

- 一、三相变压器 27
- 二、自耦变压器 27
- 三、仪用互感器 29
- 四、电源变压器 30
- 五、脉冲变压器 31

第二章 晶闸管整流电路 33

第一节 晶闸管 33

一、晶闸管的结构及工作原理 33

二、晶闸管的伏安特性 35

三、晶闸管的主要参数 35

第二节 单相晶闸管整流电路 36

一、单相半波晶闸管整流电路 36

二、单相桥式半控整流电路 38

三、单相桥式可控整流电路其他接法及特点 41

第三节 三相可控整流电路 43

一、三相半波可控整流电路 43

二、三相桥式全控整流电路 47

三、三相桥式半控整流电路 52

第四节 晶闸管的触发电路 55

一、概述 55

二、单结晶体管触发电路 56

三、晶体管集成触发电路 60

第五节 晶闸管的保护和串并联 63

一、晶闸管的保护 63

二、晶闸管的相互串联与并联 66

第三章 直流电机及调速电路 68

第一节 直流电机的构造和分类 68

一、定子部分的构造 68

二、转子部分的构造 69

三、直流电机的分类 70

第二节 直流电机的工作原理 71

一、直流发电机的工作原理 71

二、直流电动机的工作原理 72

第三节 直流电机的电动势与电磁转矩 73

一、电枢电动势 73

二、电磁转矩 73

第四节 并励电动机的机械特性 73

第五节 并励电动机的起动与反转 75

一、并励电动机的起动 75

二、并励电动机的反转 76

第六节 并励电动机调速	76	一、三相异步电动机正反转限位 控制电路	113
一、改变电动机磁通调速	76	二、典型焊接控制电路	114
二、改变电枢电压调速	76	三、非接触引弧控制电路	116
第七节 直流伺服电动机	77	四、顺序控制电路	117
第八节 直流电动机调速电路	78	第五章 新型元件	119
一、晶闸管调速电路	78	第一节 可关断晶闸管 GTO	119
二、晶体管调速电路	80	一、可关断晶闸管的特点	119
第四章 常用低压控制电器	84	二、门极控制电路	119
第一节 常用开关及按钮	84	第二节 大功率晶体管 GTR	121
一、刀开关	84	一、GTR 的基本结构	121
二、转换开关	87	二、GTR 的特性	122
三、按钮	89	三、GTR 的基极驱动电路	123
第二节 交流接触器	91	四、二次击穿与安全工作区	125
一、交流接触器的结构及工作原理	91	第三节 功率场效应晶体管	
二、交流接触器的型号、主要技术参数 及选择	93	功率 MOSFET	126
第三节 继电器	94	一、功率 MOSFET 的基本结构及特点	126
一、中间继电器	94	二、功率 MOSFET 的基本特性	126
二、电流继电器	96	三、主要参数	127
三、电压继电器	97	四、栅极驱动电路	128
四、时间继电器	98	五、安全工作区 (SOA)	129
五、热继电器	101	六、功率 MOSFET 的分类	129
六、固体继电器	104	第四节 绝缘栅门极晶体管 IGBT	130
第四节 行程开关与接近开关	106	一、IGBT 的基本结构及特点	130
一、行程开关	107	二、IGBT 的基本特性	131
二、接近开关	108	三、IGBT 的栅极驱动电路	132
第五节 电磁气阀及压力开关	112	四、IGBT 与 GTO、GTR、MOSFET 的 比较	133
一、电磁气阀	112	参考文献	134
二、压力开关	112		
第六节 典型控制电路	113		

绪 论

一、电工技术在焊接技术领域的作用

电弧焊是利用电弧的能量来加热、熔化工件（电极），从而形成永久性连接的一种焊接工艺。电弧的能量是来自电能，即任何一种电弧焊方法都需要一个提供能量的电源。另外，在焊接过程中，焊接程序的自动化、焊接辅助设备的驱动以及焊接质量的监控等也都需要借助电工技术（电力电子技术）。

回顾电弧焊发展的历史可以发现，电工技术的每一个进步都促进了焊接的发展；每一种新型元件的问世也都将带来焊接技术的一场革命。可以说，没有现代电工技术也就没有今天的焊接。

早在 1801 年，俄国人彼得洛夫就已发现电弧导电现象。但是因为当时电力工业不够发达，不能提供维持电弧稳定燃烧的足够功率的电源，因而电弧焊并未得到应用。电弧焊真正用于工业生产是在电力工业有了相当发展的 19 世纪末。

大家知道，直流弧焊电源比交流电源具有很多优点。最早的直流弧焊电源就是直流弧焊发电机，它是将电能或热能转变为机械能，然后再把机械能转变为电能，因此，耗能大、噪声大、体积大、效率低。本世纪 40 年代，硒整流元件的应用，出现了硒片制成的弧焊整流器。这种弧焊电源与弧焊发电机相比，在噪声、体积及功耗上都有所降低。随着半导体技术的发展，到了 60 年代，由于大容量硅整流元件的问世，硅弧焊整流器应运而生。它与前两种弧焊电源相比，在节能、降噪声、动特性等方面具有较突出的优点，曾一度作为主要的直流弧焊电源；但该种电源也存在某些动特性指标不够理想、过载能力差等问题。60 年代中期，晶闸管在工业上的应用为制造性能更优良的焊接设备提供了有利条件。由于晶闸管具有良好的可控性，因而对弧焊电源外特性形状的控制、焊接工艺参数的调节等都可通过改变晶闸管的导通角来实现。所以，现在晶闸管弧焊电源已成为一种主要的弧焊电源。

70 年代以来，可关断晶闸管（GTO）、大功率晶体管（GTR）、功率场效应晶体管（MOSFET）、绝缘栅门极晶体管（IGBT）及其模块的相继问世，为制造性能更优良、更先进的焊接设备提供了更有利的条件。

另外，绝大多数焊接设备都离不开变压器，它可为电弧焊输送电能；为焊接辅助设备、控制设备提供必要的电压。绝大多数焊接设备都离不开电器控制器件，如继电器、熔断器、开关等，否则就无法实现现代化的焊接。

可以说，新型弧焊电源（如弧焊逆变器）的制造、焊接过程自动化控制、焊接质量监控以及焊接机器人的应用，无一不是得益于电力电子技术的发展。因此，随着科学技术的发展，电工技术在焊接技术领域将扮演越来越重要的角色。

二、焊接电工的主要内容

如上所述，电力电子技术在焊接领域的作用是不容置疑的。但是，随着科学技术的发展，焊接专业目前所使用的电工学教材已不能满足焊接专业，尤其是“弧焊电源”、“电弧焊”课程学习的需要。早在 80 年代初，我国焊接领域的专家们就已提出对焊接专业学生所谓“充

电”问题，即结合“弧焊电源”、“电弧焊”课程的需要补充一些电工知识。由于种种原因，至今这一问题仍未获得很好地解决。而今电力电子技术在焊接技术中的应用日益广泛，在焊接领域的作用也越来越重要，因此对焊接专业技术人员及时“充电”已势在必行。

编写此书的目的就在于弥补焊接专业电工学知识之不足，并从焊接专业需要出发补充必要的电工学知识及新技术、新元件的应用知识。

考虑到原有《电工学》的内容及“弧焊电源”、“电弧焊”课程的需要，本书由磁路及变压器、晶闸管整流电路、直流电机及其调速电路、常用低压控制电器、新型元件共五章组成。

磁路及变压器一章主要是针对弧焊电源中的弧焊变压器、磁放大器而设，目的是为学习上述内容提供必要的基础。晶闸管整流电路是变流技术中应用较广泛的技术，掌握了这项技术，不但有利于晶闸管式弧焊整流器、脉冲弧焊电源等电弧焊设备的学习，也为电力电子技术的深造打下良好基础。直流电机及其调速电路是近代拖动电路中应用较广泛的一种技术，在电弧焊设备尤其是自动焊过程中应用非常广泛。常用低压控制电器不仅在焊接设备中，而且在各种工业设备中都是不可少的控制器件。掌握它的基本原理、特点和应用，不但有利于掌握各种焊接设备，也有利于熟悉其他工业设备的操作。现在，电力元件、电子技术日新月异，新型元件、新技术不断涌现。而每一种新元件的问世都是新时代的标志，它必将以其更优异的性能取代以往的传统元件；每一种新技术的应用都将促进焊接生产的新发展。因此，焊接工作者及时掌握新型元件、新技术的应用，必将为焊接技术的发展做出更大贡献。

三、本书的任务、要求和学习方法

本书的任务是为“弧焊电源”及“电弧焊”课程服务，为学生掌握学习“弧焊电源”和“电弧焊”课程打下必要的电工学基础知识。

要求通过本书的学习，能掌握磁路的基本概念、特性、定律和简单的磁路计算；掌握变压器的基本原理和功能；能够分析、设计、调试一般晶闸管整流电路（包括触发电路）；掌握直流电机的性能、特点、调速方法及其在焊接设备中的应用；掌握常用低压电器的基本原理、性能、特点及其应用；了解常用新型元件的功能、特点及其应用。

本课程应在学完《电工学》之后，学《弧焊电源》教材之前开设此课。学习本课程应辅之必要的实验课，以深化对教学内容的理解和掌握。

第一章 磁路及变压器

在“电工学”课程中，着重分析了电路问题，但在工程上广泛应用的许多电器设备如变压器、电机、电器等都是依靠电与磁相互作用而工作的，它们的原理往往既涉及电路问题又涉及磁路问题。为了了解各种常用电器设备、电磁元件的原理和性能，还需要进一步掌握有关磁路的基本理论和分析方法。

本章以物理电磁学为基础，先介绍与磁路有关的基本知识、基本定律及磁路的计算方法；然后介绍交流铁心线圈电路的基本电磁关系、等效电路及相量图，为分析变压器、电机、电器的性能打下必要的理论基础；最后介绍变压器的基本结构、工作原理、等效电路、相量图以及外特性和主要额定值，并对生产和科学实验中普遍应用的几种特殊变压器作简要介绍。

第一节 磁路的基本概念

通常，电机、电器内部的磁场都是利用通有电流的线圈产生的。为了用较小的励磁电流，产生较强的磁场，从而获得较大的感应电动势或电磁力，同时也为了使通电线圈所产生的磁场能局限在一定范围内，实际上常把线圈绕在用铁磁材料做成一定形状的铁心上，通电线圈在铁心内产生闭合磁通 Φ ，这就构成了磁路。图 1-1a、b、c 分别是变压器、直流电机和交流接触器的磁路。磁路问题，实质上就是局限在一定路径内的磁场问题，因此在物理学中有关磁场的知识是分析磁路的基础。

一、磁场的基本物理量

1. 磁感应强度

磁感应强度 B 是表示磁场内某点的磁场强弱和方向的物理量。它是一个矢量，其大小可用通过垂直于磁场方向的单位面积内磁力线数目来表示，方向与该点磁力线的方向一致。如果磁场内各点的磁感应强度的大小相等、方向相同，这样的磁场则称为均匀磁场。

在我国法定单位制中，磁感应强度的单位是特斯拉 (T)。在电磁制中，它的单位是高斯 (Gs)。两种单位的换算关系为

$$1\text{T} = 10^4\text{Gs}$$

2. 磁通

要描述磁场某个范围内的情况，就要用磁通这个物理量。

磁通 Φ 是垂直穿过某一面面积 S 的磁力线的总数。由物理学可知，不论磁路形状如何，磁力线总是闭合的，所以磁通是连续的。

在均匀磁场中，磁感应强度 B 与垂直于磁场方向的面积 S 的乘积，称为通过该面积的磁通 Φ ，即

$$\Phi = BS \quad (1-1)$$

由式 (1-1) 可见，磁感应强度在数值上可以看成是在与磁场方向相垂直的单位面积所通过的磁通，故又称为磁通密度。

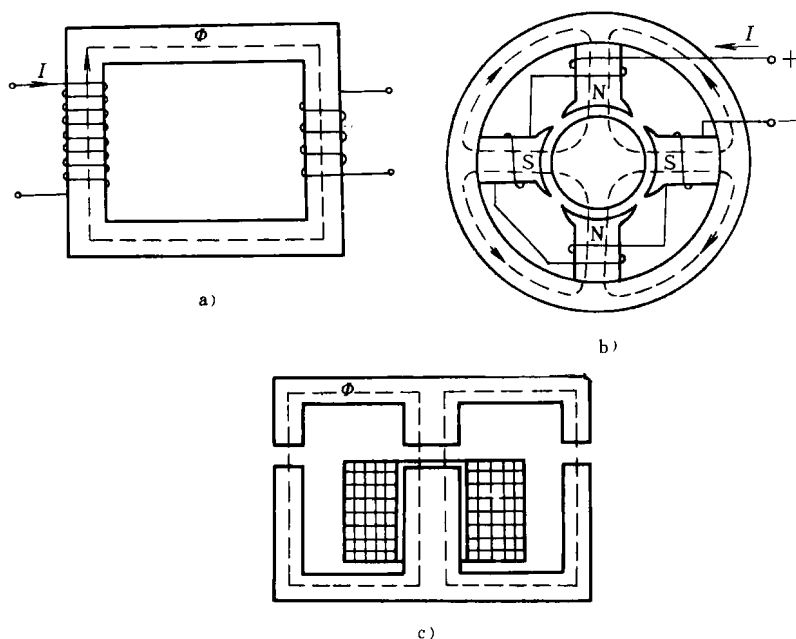


图 1-1 磁路

a) 变压器 b) 直流电机 c) 交流接触器

磁通的单位是韦〔伯〕, 符号为 Wb 。以前在工程上有时用电磁制单位, 称为麦克斯韦 (Mx)。两种单位的换算关系为

$$1\text{Wb} = 10^8\text{Mx}$$

3. 磁场强度

因为磁感应强度 $\mathbf{B}$ 与磁场内的介质有关, 为了排除磁介质的影响, 引入磁场强度矢量 $\mathbf{H}$, 它的大小仅与产生该磁场的电流的大小及载流导体的分布情况有关, 其关系由全电流定律 (或称: 安培环路定律) 来确定。

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \Sigma I \quad (1-2)$$

即磁场强度矢量沿任一闭合路径的线积分等于穿过该闭合路径电流的代数和。电流的正、负号是这样规定的: 若电流方向与积分回路的循行方向符合右螺旋定则, 则电流为正, 否则为负。

今以环形线圈 (图 1-2) 为例, 其中介质是均匀的, 应用式 (1-2) 来计算线圈内部各点的磁场强度。取磁力线作为闭合回路, 且以其方向作为回路的循行方向。于是

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \mathbf{H}_x l_x = \mathbf{H}_x 2\pi x$$

$$\Sigma I = IN$$

所以

$$\mathbf{H}_x 2\pi x = IN$$

即

$$\mathbf{H}_x = \frac{IN}{2\pi x} = \frac{IN}{l_x} \quad (1-3)$$

式中 N ——线圈的匝数；

l_x ——半径为 x 的圆周长， $l_x = 2\pi x$ ；

H_x ——半径 x 处的磁场强度。

磁场强度的单位是安每米 (A/m)。在过去用的电磁制单位中，它的单位是奥斯特 (Oe)。两种单位的换算关系为

$$1\text{A/m} = 4\pi \times 10^{-3}\text{Oe}$$

4. 磁导率

磁导率 μ 是用来表示物质导磁性能的物理量，它于磁场强度的乘积等于磁感应强度，即

$$B = \mu H \quad (1-4)$$

因此在图 1-2 中，线圈内部半径为 x 处各点的磁感应强度可以从式 (1-3) 得出，即

$$B_x = \mu H_x = \mu \frac{IN}{l_x} \quad (1-5)$$

由式 (1-3) 和式 (1-5) 可知，磁场内某一点的磁场强度 H 只与电流 I 、线圈匝数 N 及该点的几何位置有关，而与磁导率 μ 无关；而磁感应强度是与磁导率 μ 有关的。当线圈内的介质不同时，则磁导率 μ 不同，在同样电流值下，同一点的磁感应强度的大小就不同，线圈内的磁通也就不同。

磁导率 μ 的单位为亨每米 (H/m)。

真空中的磁导率为 μ_0 ，由实验测得

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$$

为了便于比较各种物质的导磁能力，通常把某种材料的磁导率 μ 与 μ_0 之比称为该物质的相对磁导率，用 μ_r 表示，即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1-6)$$

自然界的所有物质按磁导率的大小，大体上可分成磁性材料和非磁性材料两大类。

非磁性材料的磁导率与真空相近，都是常数，故

$\mu \approx 1$ 。因此，当磁场介质是非磁性材料时， $B = \mu_0 H$ ， B 与 H 成正比，即它们之间存在线性关系，见图 1-3。又因 $B = \Phi/S$ 和 $H = IN/l$ ，所以磁通 Φ 与产生此磁通的电流 I 也成正比，它们之间也有线性关系。

而磁性材料主要是指铁、钴、镍及其合金，其 μ 值很高，从几百到几万。这种高导磁性能被广泛应用于电器设备和电磁元件的导磁系统。

二、磁性材料的磁性能

1. 高导磁性

磁性材料的磁导率很高，在外磁场的作用下，会产生很强的附加磁场，使得磁性物质内的磁感应强度大为增强，这种现象，叫做磁性物质的磁化。

众所周知，电荷运动时，周围会产生磁场，在物质的分子结构中，电子不仅围绕原子核

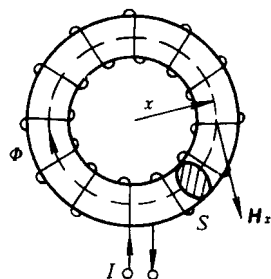


图 1-2 环形线圈

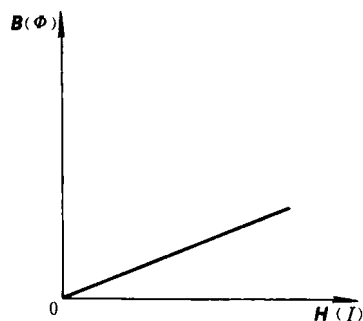


图 1-3 非磁性材料的 B 与 H 成正比关系

旋转，电子本身还有自转，这两种运动都会产生磁场。另一方面，磁性物质内部分子之间有一种相互作用力，使得若干个原子的磁场具有相同的方向，组成一个小磁体，称为磁畴。在没有外磁场作用时，各个磁畴排列混乱，磁场互相抵消，对外不显磁性，见图 1-4a。

若将磁性材料放到外磁场中，例如载流线圈产生的磁场，则磁畴将在外磁场的作用下，顺着外磁场的方向转动。如果外磁场足够强，则所有磁畴都会顺着外磁场方向整齐排列，其磁场互相迭加（即为附加磁场），对外显示出磁性。见图 1-4b，这就是磁性材料的磁化现象。

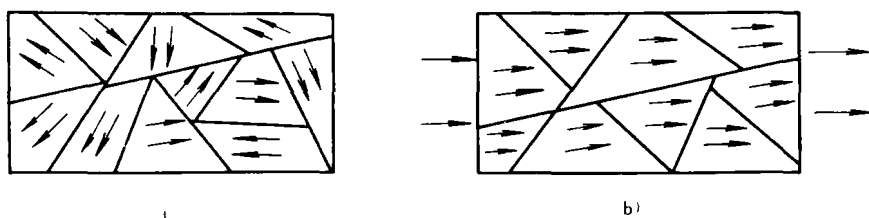


图 1-4 磁性物质的磁化

工程上利用磁性材料的高导磁性，在电机变压器及其他许多电工设备的线圈中放入高导磁性铁心，于是在线圈中通入不大的励磁电流，便产生足够强的磁场。

2. 磁饱和性

在磁性物质的磁化过程中，当励磁电流增大到一定值时，几乎所有的磁畴都与外磁场的方向一致，如果再增大励磁电流，也不会使磁性材料的磁性继续增强，即出现磁饱和现象。

材料的磁化特性可用磁化曲线 $B=f(H)$ 表示，见图 1-5。磁感应强度 B 表示铁心中磁场的强弱程度，磁场强度 H 则代表励磁电流的大小。由图可见，磁性材料^{*}的磁化曲线可分成三段，其中 Oa 段大致上呈直线，即 H 增大时， B 几乎是线性地增大；在 ab 段， B 的增大变缓； b 点以后， B 增加得很少，达到了磁饱和。

因为磁性材料的 B 与 H 的关系是非线性的，由 $B=\mu H$ 的关系式可见，其磁导率 μ 不是常数，它的数值将随磁场强度 H 的变化而变化，见图 1-5 的 $\mu=f(H)$ 曲线。

各种磁性材料的磁化曲线可通过实验方法测得，它在磁路计算上极为重要。图 1-6 绘出了几种常用磁性材料的磁化曲线，以供参考。

3. 磁滞性

当励磁电流的大小和方向都随时间变化时，铁心将受到交变磁化。在电流交变的一个周期中，磁感应强度 B 随磁场 H 的变化关系见图 1-7。

当励磁电流减小到零时，铁心中的磁场强度 $H=0$ ，但铁心中的磁性并未完全消失，其磁感应强度 $B=B_r$ ，称为剩磁感应强度，简称剩磁。即磁感应强度 B 的变化滞后于磁场 H 的变化，磁性材料的这种特性称为磁滞性。若要去掉剩磁，则需要反方向使铁心磁化，这就要改变励磁电流的方向。使 $B=0$ 的反向磁场强度 H_c ，称为矫顽磁力。图 1-7 所示的磁化曲线称为磁滞回线。

磁性材料按其磁滞回线形状不同，可分成两类：一类叫软磁材料，这类材料的剩磁 (B_r) 及矫顽磁力 (H_c) 均较小，磁滞回线狭窄，见图 1-8a，但它的磁导率较高。因此，这类材料

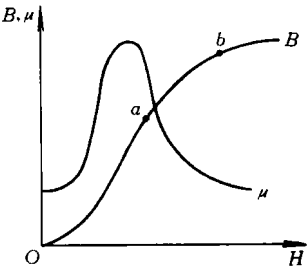


图 1-5 磁性材料 $B-H$ 、 $\mu-H$ 曲线

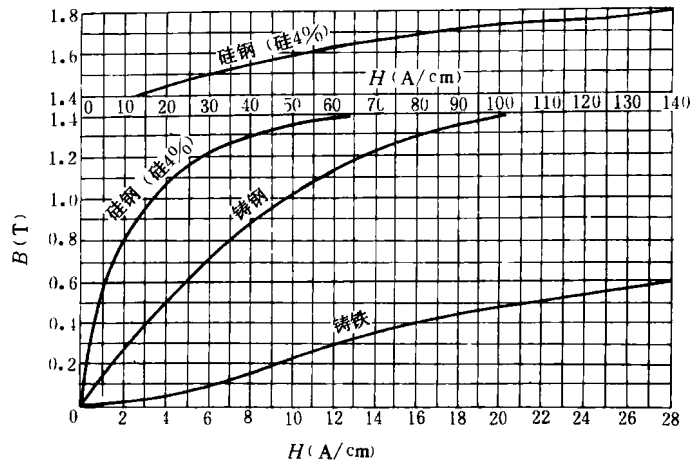


图 1-6 磁化曲线

适用于制做交变磁场中的各种电机、电器的铁心。属于这类材料的有纯铁、铸铁、铸钢、硅钢、铁氧体及坡莫合金等。另一类叫硬磁材料，如钴钢、铁镍铝钴合金等。与软磁材料相反，这类材料的剩磁 (B_r) 或矫顽磁力 (H_c) 较大，磁滞回线较宽，见图 1-8b。它们被磁化后，其剩磁不易消失，适宜做永久磁铁。两类磁性材料的 B_r 、 H_c 数据列于表 1-1 中。

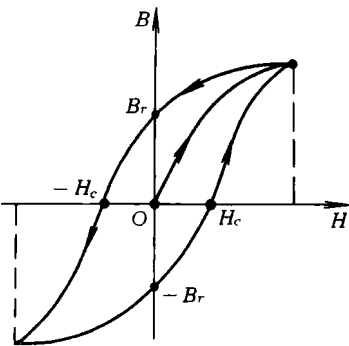


图 1-7 磁滞回线

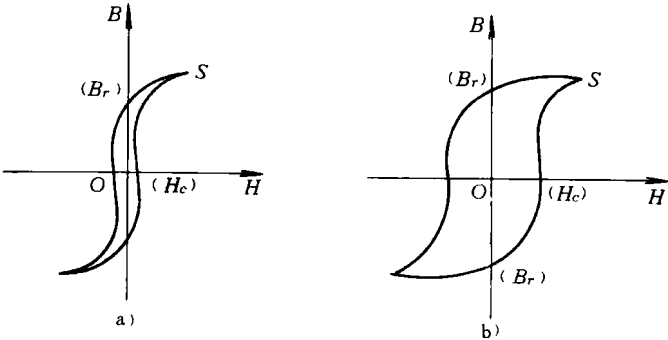


图 1-8 不同种类磁性材料的磁滞回线
a) 软磁材料 b) 硬磁材料

表 1-1 几种常用磁性材料的磁性能

材料名称	μ_r	B_r/T	$H_c/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$
铸 铁	200~400	0 475~0 500	400~1040
硅钢片	7000~10000	0 800~1 200	32~64
镍锌铁氧体	10~1000	—	—
锰锌铁氧体	300~5000	—	—
坡莫合金	20000~200000	1 100~1 400	4~24
钴 钢	—	0 750~0 950	7200~20000
铁镍铝钴合金	—	1 100~1 350	47000~52000

第二节 磁路基本定律

磁路的分析和计算如同电路一样，可以通过一些基本定律表示。磁路的基本定律是由描述磁场性质的磁通连续性原理和全电流定律导出的，其中最基本的是磁路欧姆定律。

一、磁路欧姆定律

图 1-9 为一分支磁路，磁路由单一磁性材料构成，其截面积为 S ，平均长度为 l 。因平均长度相对截面积来说尺寸大得多，则可以认为在截面积内磁通是均匀的。所以磁感应强度可按式 (1-1) 计算，即 $B = \frac{\Phi}{S}$ 。

利用全电流定律，取其中心线为积分回路，则中心线上各点的磁场强度大小相同，其方向又与 l 的方向一致，由式 (1-2) 可得

$$Hl = \Sigma I = IN$$

再由式 (1-4) 和式 (1-1) 可得

$$IN = Hl = \frac{B}{\mu}l = \frac{\Phi}{\mu S}l$$

或

$$\Phi = \frac{IN}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{F}{R_m} \quad (1-7)$$

式中 F ——磁动势， $F = IN$ ，即由此产生磁通；

R_m ——磁阻， $R_m = l/\mu S$ ，是表示磁路对磁通具有阻碍作用的物理量。

式 (1-7) 在形式上与电路的欧姆定律相似，所以称为磁路的欧姆定律。

由于磁性材料的磁导率 μ 不是常数，其磁阻也不是常量，因此在磁场强度 H 未知前，就很难利用这个公式直接计算磁通，但它对理解磁路的基本概念及定性分析磁路各量关系有很大帮助。由公式 $R_m = \frac{l}{\mu S}$ 可定性地知道，磁导率 μ 大的材料磁阻小，截面积小的材料磁阻大。磁阻的概念对分析磁路问题是十分重要的。

二、磁路基尔霍夫定律

电气设备中经常遇到一些具有分支的磁路，见图 1-10。当线圈通有电流 I ，则产生的磁通 Φ_1 在 A 节点处分为两条并联支路，其磁通分别为 Φ_2 和 Φ_3 。

由磁通的连续性原理可知，穿入任一闭合面的磁通必然等于穿出该闭合面的磁通。例如对节点 A 处的闭合面而言，流入该节点的磁通 Φ_1 必然等于流出该节点的磁通 Φ_2 与 Φ_3 之和，即

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

或

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

推广来说，如果把流入节点的磁通取正，反之取负，则在磁路的节点处，磁通的代数和恒等于零。即

$$\Sigma \Phi = 0 \quad (1-8)$$

这一关系和电路中的基尔霍夫电流定律相对应，因此称为基尔霍夫磁通定律。

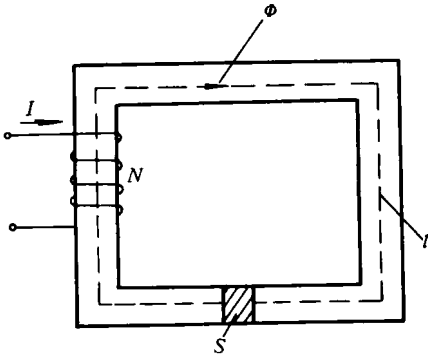


图 1-9 无分支磁路

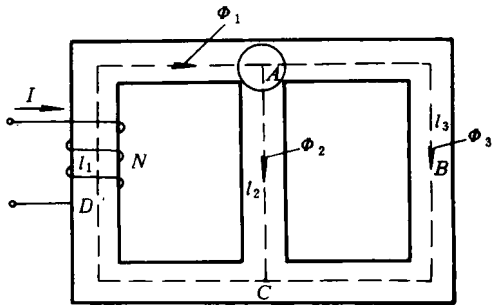


图 1-10 有分支磁路

取任一闭合磁路，如图 1-10 中 ABCDA 磁路，根据全电流定律有

$$\oint_l Hdl = \int_{l_1} Hdl + \int_{l_3} Hdl = H_1l_1 + H_3l_3 = IN$$

式中 H_1 ——CDA 段的磁场强度， l_1 为该段的平均长度；

H_3 ——ABC 段的磁场强度， l_3 为该段的平均长度；

H_1l_1 、 H_3l_3 ——分别称为 CDA、ABC 段的磁压降。

推广到任一闭合磁路，则得

$$\sum IN = \sum HI \tag{1-9}$$

在磁路的任一闭合回路中，磁压降的代数和等于磁动势的代数和。其中，磁通的方向与回路的绕行方向一致时， HI 取正号，反之取负号；电流的方向与回路的绕行方向符合右手螺旋关系时， IN 取正号，反之取负号。

式 (1-9) 中的关系式与电路中的基尔霍夫电压定律相对应，因此称为基尔霍夫磁压定律。

三、磁路与电路的比较

磁路与电路在形式上有许多相似之处，但在理论上又有本质的差异，为了便于比较，将磁路与电路计算的对应关系列于表 1-2 中。

表 1-2 磁路与电路计算的对应关系

磁 路			电 路		
名称	符号	单位	名称	符号	单位
磁通	Φ	Wb	电流	I	A
磁压	$\Phi R_m (HI)$	A	电压	IR	V
磁动势	F	A	电动势	E	V
磁阻	$R_m = \frac{l}{\mu S}$	1/H	电阻	$R = \frac{l}{rs}$	Ω
磁感应强度	$B = \frac{\Phi}{S}$	T	电流密度	$J = \frac{I}{S}$	A/mm ²
基尔霍夫定律	$\sum \Phi = 0$	—	基尔霍夫定律	$\sum I = 0$	—
	$\sum HI = \sum F$	A		$\sum IR = \sum E$	V
欧姆定律	$\Phi = \frac{F}{R_m}$	Wb	欧姆定律	$I = \frac{E}{R}$	A

通过表 1-2 列举磁路和电路的相似之处, 只是为了帮助理解和记忆磁路基本物理量及基本定律, 而绝不能误认为磁路和电路有着相同的物理本质。实际上, 磁路与电路之间有着本质的差别。电路中的电流是带电质点的有规则的运动, 电流通过电阻要消耗能量, 使电阻发热; 而磁通并不是质点的运动, 恒定磁通通过磁阻时并不消耗能量, 因而不存在磁路的焦耳楞次定律。电路开路时电流为零, 但电动势依然存在, 而磁路中有磁动势则必然伴有磁通, 即使磁路中有空气隙存在, 磁通也不为零。此外, 在电路中漏电流极小, 通常下总是忽略; 但在磁路中漏磁通较大, 常常需要考虑, 这是因为电路中有良好的绝缘材料, 而磁路中却没有。

最后需要指出, 线性电路的计算可得到十分精确的结果; 而磁路计算由于要查曲线, 要考虑边缘效应等近似因素, 故不能十分精确, 一般允许比电路有稍大的计算误差。

第三节 磁路计算

磁路计算的目的在于找出磁通与磁动势之间的关系。在进行电机、电器及电磁元件的设计时, 常常要进行磁路计算。磁路计算问题分两种情况: 一种是已知磁通求磁动势; 另一种是已知磁动势求磁通。

一、已知磁通求磁动势

对于恒定磁通无分支磁路, 若已知磁通以及各部分的材料和尺寸, 则计算磁动势的步骤如下:

1) 根据磁路的结构, 将其按材料 (磁导率)、截面积的不同分成若干段, 再分别计算出每段的平均长度和截面积。

2) 由于磁路中通过同一磁通, 可按已知的磁通求磁感应强度

$$B(T) = \frac{\Phi(Wb)}{S(m^2)}$$

3) 根据各段磁路材料的磁化曲线, 确定与各段 B 值相对应的 H 值。对于空气隙或其他非磁性材料可按下式计算

$$H_0(A/m) = \frac{B_0(T)}{\mu_0(H/m)}$$

4) 计算各段磁路的磁压降 $H_1l_1, H_2l_2, H_3l_3,$

...

5) 最后按磁路的基尔霍夫磁压定律求出所需要的磁动势。

$$F = IN = \sum HI$$

例 1-1 如图 1-11 所示的磁路, 其尺寸在图上已标出, 单位为 cm, 励磁线圈为 1000 匝, 为使铁心中的磁通 $\Phi = 7.5 \times 10^{-4} Wb$, 计算铁心材料分别为铸钢和硅钢片时的励磁电流各为多少?

解 按磁路结构把它分成二段, 各段长度、截面积分别为

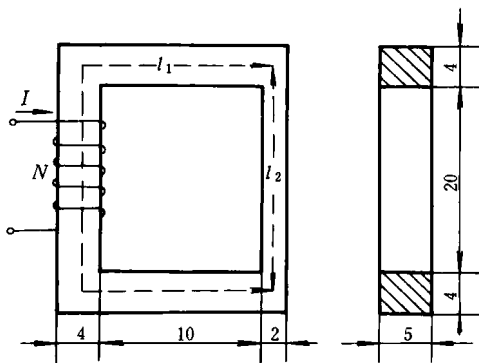


图 1-11 磁路

$$l_1 = 2 \times \left(10 + \frac{4}{2} + \frac{2}{2} \right) \text{cm} + \left(20 + \frac{4}{2} + \frac{4}{2} \right) \text{cm} = 50 \text{cm}$$

$$l_2 = \left(20 + \frac{4}{2} + \frac{4}{2} \right) \text{cm} = 24 \text{cm}$$

$$S_1 = 4 \text{cm} \times 5 \text{cm} = 20 \text{cm}^2$$

$$S_2 = 2 \text{cm} \times 5 \text{cm} = 10 \text{cm}^2$$

各段磁感应强度分别为

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{7.5 \times 10^{-4} \text{Wb}}{20 \text{cm}^2} = 0.375 \text{T}$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{7.5 \times 10^{-4} \text{Wb}}{10 \text{cm}^2} = 0.75 \text{T}$$

当铁心为铸钢时, 查图 1-6 中铸钢的磁化曲线得

$$H_1 = 2.8 \text{A/cm}$$

$$H_2 = 6.5 \text{A/cm}$$

各段磁路的磁压降分别为

$$H_1 l_1 = 2.8 \text{A/cm} \times 50 \text{cm} = 140 \text{A}$$

$$H_2 l_2 = 6.5 \text{A/cm} \times 24 \text{cm} = 156 \text{A}$$

磁动势为

$$F = NI = H_1 l_1 + H_2 l_2 = 140 \text{A} + 156 \text{A} = 296 \text{A}$$

励磁电流为

$$I = \frac{F}{N} = \frac{296}{1000} \text{A} = 0.296 \text{A}$$

当铁心为硅钢片时, 查图 1-6 中硅钢片的磁化曲线得

$$H_1 = 0.6 \text{A/cm}$$

$$H_2 = 1.7 \text{A/cm}$$

各段磁路的磁压降分别为

$$H_1 l_1 = 0.6 \text{A/cm} \times 50 \text{cm} = 30 \text{A}$$

$$H_2 l_2 = 1.7 \text{A/cm} \times 24 \text{cm} = 40.8 \text{A}$$

磁动势为

$$F = NI = H_1 l_1 + H_2 l_2 = 30 \text{A} + 40.8 \text{A} = 70.8 \text{A}$$

励磁电流为

$$I = \frac{F}{N} = \frac{70.8}{1000} \text{A} = 0.0708 \text{A}$$

由例 1-1 可见, 为了得到相同的磁通, 采用磁导率高的硅钢片做铁心, 可以大大减小励磁电流, 这样可以节约线圈的用铜量。

由计算还可以看出, 磁路的截面过小, 会使磁通密度过大, 即磁感应强度 B 升高, 导致铁心饱和, 从而使磁场强度大大增加, 如例 1-1 磁路中的 l_2 段。

例 1-2 如图 1-12 所示磁路的铁心由硅钢片叠成, 各

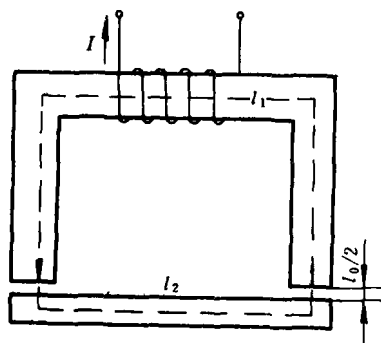


图 1-12 磁路

部分尺寸是 $l_0=0.4\text{cm}$, $l_1=35\text{cm}$, $l_2=15\text{cm}$, $S_0=S_1=12\text{cm}^2$, $S_2=8\text{cm}^2$, 试求:

- ① 当气隙中的磁感应强度 $B_0=0.5\text{T}$ 时所需的磁动势。
- ② 励磁线圈的电流为 0.5A 及 1A 时线圈的匝数。

解

1) 磁路中磁通

$$\Phi = B_0 S_0 = 0.5\text{T} \times 12\text{cm}^2 = 6 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

各段磁路的磁感应强度

$$B_0 = 0.5\text{T}$$

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{6 \times 10^{-4}\text{Wb}}{12\text{cm}^2} = 0.5\text{T}$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{6 \times 10^{-4}\text{Wb}}{8\text{cm}^2} = 0.75\text{T}$$

各段磁路的磁场强度

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0.5}{4\pi \times 10^{-7}}\text{A/m} = 398000\text{A/m} = 3980\text{A/cm}$$

由图 1-6 磁化曲线查得

$$H_1 = 0.8\text{A/cm}$$

$$H_2 = 1.6\text{A/cm}$$

各段磁路的磁压降

$$H_0 l_0 = 3980\text{A/cm} \times 0.4\text{cm} = 1592\text{A}$$

$$H_1 l_1 = 0.8\text{A/cm} \times 35\text{cm} = 28\text{A}$$

$$H_2 l_2 = 1.6\text{A/cm} \times 15\text{cm} = 24\text{A}$$

磁动势

$$F = NI = H_0 l_0 + H_1 l_1 + H_2 l_2 = 1592\text{A} + 28\text{A} + 24\text{A} = 1644\text{A}$$

2) 线圈匝数

当电流 $I=0.5\text{A}$ 时

$$N = \frac{F}{I} = \frac{1644\text{A}}{0.5\text{A}} = 3288(\text{匝})$$

当电流 $I=1\text{A}$ 时

$$N = \frac{F}{I} = \frac{1644\text{A}}{1\text{A}} = 1644(\text{匝})$$

由例 1-2 可见, 当磁路中存在空气隙时, 磁动势几乎全部用来克服它的磁阻, 因此, 磁路中应尽量减少非必要的空气隙。若磁路中必须存在空气隙, 则可根据空气隙的磁压降来估算磁路的磁动势。如本例中 $F \approx H_0 l_0 = 1592\text{A}$ 。

在工程上除了用简单的无分支磁路之外, 也还常用到有分支的磁路 (见图 1-13a)。分支磁路有对称和不对称之分,

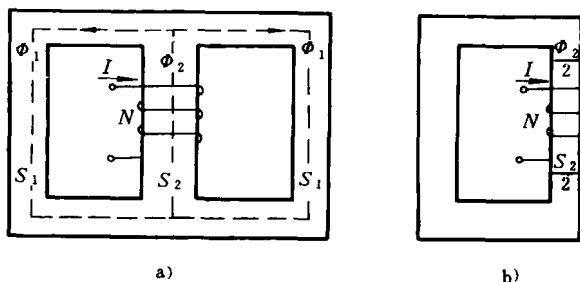


图 1-13 磁路