

21 SHIJI DIANGONGXUE XILIE JIAOCAI
21世纪电工学系列教材

DIANJI 电机与控制

Dianji Yu Kongzhi

主 编 张继和



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

21 世纪电工学系列教材

电机与控制

主 编 张继和

主 审 李 文

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 提 要

本书主要内容有：磁路与变压器、电机的工作原理和基本使用方法、继电接触器控制电路、可程序控制器控制技术和供配电基础知识。全书编写注重基础，加强应用。

本书共有 6 章，第 1 章介绍磁路的概念和变压器的工作原理，第 2 章介绍三相异步电动机和单相异步电动机的工作原理，第 3 章介绍直流电机和控制电机的工作原理，第 4 章介绍继电接触器控制系统，第 5 章介绍可程序控制器，第 6 章介绍供配电基础知识。

本书可作为普通高等学校本科非电专业的电工技术课程教材，也可作为高等职业学校、电视大学和成人教育教学参考书，同时可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

电机与控制 / 张继和主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2008.12

(21 世纪电工学系列教材)

ISBN 978-7-5643-0101-9

I. 电… II. 张… III. 电机—控制系统—高等学校—教材 IV. TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 162081 号

21 世纪电工学系列教材

电 机 与 控 制

主 编 张继和

*

责任编辑 黄淑文

封面设计 翼虎书装

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 9.375

字数: 231 千字 印数: 1—5 000 册

2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0101-9

定价: 16.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

近年来,许多非电类专业技术与电工电子技术的结合日益紧密,社会对复合型应用人才的需求增加。普通高等学校本科非电专业的电工与电子技术课程教学要求也随之提高,因此有必要按照新的人才培养目标编写电工与电子技术教材。

本书是在原来《电机控制与供电基础》的基础上修订而成的。在本次修订过程中,对传统的内容作了精选和更新,对基本概念、基本原理和基本方法作了尽可能详细的阐述,以便读者掌握典型电路的基本分析方法。同时,电机与控制是一门具有工程特点和实践性很强的技术基础课,因此在介绍变压器和各种电机工作原理时尽量与实际使用情况相联系。目前,可编程序控制器逐步取代继电器控制电路,但在实际应用中继电器控制电路和可编程序控制器并存。因此,对两类控制电路都进行介绍。继电器控制电路和可编程序控制器以三相异步电动机的基本控制电路为主要内容,旨在提高读者分析和解决实际问题的能力。通过实例、例题和习题,使读者加深对理论知识的理解,掌握典型电路的分析和设计。

本书由大连交通大学张继和教授主编。邵力耕副教授编写第1章和第6章,孙艳霞副教授编写第2章和第3章,付维胜副教授编写第4章和第5章。大连交通大学李文教授负责主审。

本书在编写过程中得到兄弟院校老师和西南交通大学出版社黄淑文编辑的帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不足,敬请广大读者批评指正。

E-mail:shaolg@djtu.edu.cn

编 者

2008年6月

目 录

第 1 章 磁路与变压器	1
1.1 磁路	1
1.1.1 磁场的基本物理量	1
1.1.2 磁性材料	2
1.1.3 磁路的基本定律	5
*1.1.4 直流磁路的计算	8
1.2 交流铁芯线圈电路	10
1.2.1 交流磁通与外电压的关系	10
1.2.2 功率损耗	11
1.3 变压器	12
1.3.1 变压器的结构及工作原理	12
1.3.2 变压器的主要功能及外特性	14
1.3.3 三相变压器和特种变压器	19
1.4 电磁铁	23
习 题	24
第 2 章 交流电动机	27
2.1 三相异步电动机的结构	27
2.1.1 三相异步电动机的定子	28
2.1.2 三相异步电动机的转子	29
2.2 三相异步电动机的工作原理	30
2.2.1 三相异步电动机的旋转磁场	31
2.2.2 三相异步电动机的转动原理	34
2.2.3 三相异步电动机的转速与转差率	35
2.3 三相异步电动机的电磁转矩	36
2.3.1 三相异步电动机的定子电路	36
2.3.2 三相异步电动机的转子电路	37
2.3.3 三相异步电动机的电磁转矩	38
2.4 三相异步电动机的机械特性	38
2.4.1 额定转矩 M_N	39
2.4.2 最大转矩 $M_{\max}$	40
2.4.3 启动转矩 M_{st}	41
2.5 三相异步电动机的启动、调速和制动	42
2.5.1 三相异步电动机的启动	42
2.5.2 三相异步电动机的调速	46

2.5.3 三相异步电动机的制动	48
2.6 三相异步电动机的铭牌数据与选用	50
2.6.1 三相异步电动机的铭牌数据	50
2.6.2 三相异步电动机的选用	53
2.7 单相异步电动机	55
2.7.1 电容分相式异步电动机	55
2.7.2 罩极式异步电动机	57
2.7.3 三相异步电动机的单相运行	57
*2.8 同步电机简介	58
2.8.1 三相同步发电机	58
2.8.2 三相同步电动机	59
习 题	62
第3章 直流电动机与控制电机	65
3.1 直流电动机	65
3.1.1 直流电动机的构造与分类	65
3.1.2 直流电动机的工作原理	67
3.1.3 直流电动机的机械特性	68
3.1.4 直流电动机的调速	71
3.1.5 直流电动机的使用	74
3.2 控制电机	75
3.2.1 步进电动机	76
3.2.2 伺服电动机	79
习 题	81
第4章 继电接触器控制系统	83
4.1 常用低压电器	83
4.1.1 按钮	83
4.1.2 组合开关	84
4.1.3 熔断器	84
4.1.4 自动空气断路器	85
4.1.5 接触器	86
4.1.6 继电器	87
4.1.7 热继电器	88
4.2 三相异步电动机的基本控制线路	89
4.2.1 三相异步电动机直接启动控制线路	89
4.2.2 电气控制原理图的画法	90
4.2.3 点动与长动（连续）控制线路	92
4.2.4 三相异步电动机正、反转控制线路	93
4.3 行程控制	95
4.3.1 行程开关	95
4.3.2 限位控制	95

4.3.3 自动往复控制	96
4.4 时间控制	97
4.4.1 时间继电器	97
4.4.2 三相异步电动机 Y- Δ 启动控制线路	98
4.5 速度控制	99
4.5.1 速度继电器	100
4.5.2 三相异步电动机反接制动控制线路	100
习 题	101
第 5 章 可编程控制器	104
5.1 PLC 的结构及工作原理	104
5.1.1 PLC 的结构	104
5.1.2 PLC 的工作原理	107
5.1.3 PLC 的工作过程	108
5.2 PLC 程序编程语言和指令系统	109
5.2.1 梯形图	109
5.2.2 PLC 的内部继电器	109
5.2.3 PLC 的指令	114
5.3 PLC 的基本编程	116
5.3.1 计数范围的扩展	116
5.3.2 定时时间的扩展	117
5.3.3 应用程序段	118
5.4 PLC 的应用	121
5.4.1 电动机的顺次启动	121
5.4.2 油循环控制系统	122
5.4.3 送料车控制系统	125
习 题	126
第 6 章 供电与配电	130
6.1 供配电系统概述	130
6.1.1 电力系统的组成	130
6.1.2 电力系统电压	131
6.2 变电所及其主接线	133
6.2.1 变电所的类型	133
6.2.2 变配电所主接线	134
6.3 低压供配电线路的接线方式	136
6.3.1 放射式接线	136
6.3.2 树干式接线	137
6.3.3 环形接线	137
部分习题答案	139
参考文献	141

第 1 章

磁路与变压器

在生产中和工程上广泛应用的电气设备，如电机、变压器、继电器、电磁阀等，都是依靠电磁的相互作用而工作的。它们的工作原理既涉及电路问题又涉及磁路问题。为了了解各种常用电气设备、电磁元件的原理和性能，需要掌握有关磁路的基本理论和分析方法。

磁路问题是局限在一定路径内的磁场问题，因此有关磁场的各种基本物理量都适用于磁路。本章首先对磁性材料的性能进行讨论，然后介绍与磁路有关的基本概念、定律及基本计算。

变压器是一种典型的电磁设备，它在电网输配电、工业控制中都得到了广泛应用。在电子技术中，除用作电源变压器外，变压器还用来耦合电路、传递信号及实现阻抗匹配等。

1.1 磁 路

1.1.1 磁场的基本物理量

1. 磁感应强度

磁感应强度 B 是表示磁场中某点的磁场强弱和方向的物理量，是一个矢量。它的方向与励磁电流的方向符合右手螺旋定则，大小用单位正电荷以单位速度沿垂直于磁场方向运动时所受的机械力表示，即

$$B = \frac{F}{qv}$$

在国际单位制中，磁感应强度 B 的单位为特斯拉 (T)。

2. 磁 通

磁通 Φ 是表示穿过某一截面 S 的磁感应强度通量，或者说是穿过该截面的磁力线总和。其数学表达式为

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \quad (1.1.1)$$

对于均匀磁场，如果磁场方向与所取截面垂直，那么

$$\Phi = BS \quad (1.1.2)$$

在国际单位制中，磁通 Φ 的单位为韦伯 (Wb)。如果用磁力线来描述磁场，磁力线的疏密就反映磁感应强度的大小 (磁力线越密，磁感应强度越大)，通过某一面积的磁力线总数就反映通过该面积的磁通大小。由于磁通的连续性，故磁力线应该是闭合的空间曲线。

3. 磁导率

磁导率 μ 是用来表示物质导磁性能强弱的物理量。在国际单位制中，其单位为亨利/米 (H/m)。由实验测出，真空的磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

某种物质的磁导率 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

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.1.3)$$

物质按照磁导率的大小，可分为磁性材料和非磁性材料两大类。

4. 磁场强度

由于物质导磁性能的不同，对磁场的影响也不同。为了计算方便，引入磁场强度 H 这一物理量，它与磁感应强度 B 的关系为

$$B = \mu H \quad (1.1.4)$$

在国际单位制中，磁场强度 H 的单位为安/米 (A/m)。

1.1.2 磁性材料

铁、钴和镍以及这些金属的合金具有很高的磁导率，可以对其周围的磁场产生较大的影响，这类物质属于磁性材料。一旦有外界磁场，磁性材料就会显示较强的磁性，即磁性材料被磁化了。非磁性材料的磁导率与真空的磁导率近似相等，它们对磁场强弱的影响很小。

1. 磁性材料的磁性能

(1) 磁导性高

磁性材料的磁导率很高，相对磁导率 μ_r 可达数百至数万，这是因为磁性材料内有自发磁化形成的“磁畴”结构。无外磁场作用时，这些磁畴的磁场互相抵消而对外不显磁性，但在外磁场的作用下，它们转动成较规则的排列状态，形成与外磁场同方向的磁化磁场，从而加强了原来的磁场。当外磁场消失后，大部分磁畴排列又恢复到杂乱状态，对外不显磁性。

(2) 磁饱和性

磁性材料在磁化过程中，磁感应强度 B 随外加磁场的磁场强度 H 变化的曲线称为磁化曲线，如图 1.1.1 所示。从 B - H 磁化曲线可以看出，当有磁性材料存在时， B 与 H 不成正比，是非线性的。磁性材料的磁导率 μ 不是常数，它随磁场强度 H 而变化。因为磁通 Φ 与 B 成正比，而产生磁通的励磁电流 I 与 H 成正比，所以在有磁性材料的情况下， Φ 与 I 不成正比。

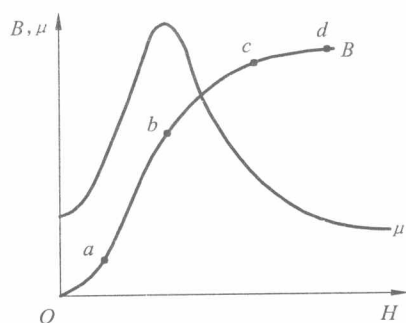


图 1.1.1 B 、 μ 与 H 的关系

从磁化曲线可以看出，当外磁场由零逐渐增大时，开始由于外磁场较弱，对磁畴作用不大，磁化磁场增长缓慢，所以磁感应强度 B 随磁场强度 H 增加较慢 (Oa 段)。随着外磁场强度的增强，磁畴所产生的磁化磁场几乎与 H 成比例地增强，因此 B 与 H 的增长也近于正比例关系 (ab 段)。此时磁化效果最显著，但是它的稳定性较差， H 稍有波动， B 就有较大的变化。当外加磁场强度继续增大时，可用磁畴越来越少，磁感应强度 B 的增长减慢 (bc 段)，并逐渐趋于饱和 (cd 段)。

图 1.1.2 给出了几种常用磁性材料的磁化曲线。

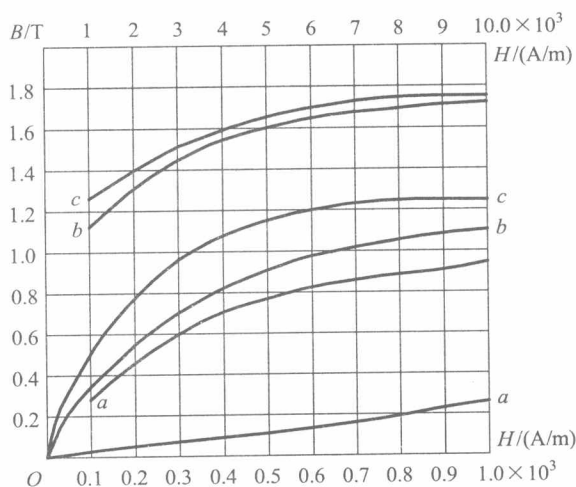


图 1.1.2 磁化曲线

a —铸铁； b —铸钢； c —硅钢片

(3) 磁滞性

实际工作时，磁性材料往往长期工作在交变磁场中。将一块未被磁化的磁性材料放在幅度为 $+H_s \sim -H_s$ 的磁场内反复交变磁化，外磁场的磁场强度 H 和磁性材料中的磁感应强度 B 的关系如图 1.1.3 所示。当磁场强度 H 从零增加到 H_s 时，磁感应强度 B 相应增大到正的最大值 B_s 。当磁场强度从 H_s 处开始减小时，磁感应强度 B 并不沿原来曲线 Oa 往回降，而是沿着比它高的曲线 ab 段缓慢下降。在 H 等于零时， B 并不等于零，仍保留一定的剩磁 B_r 。

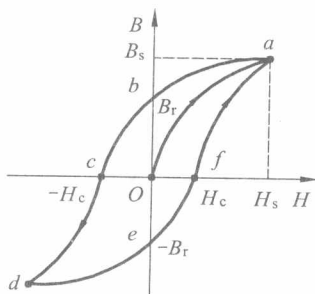


图 1.1.3 磁滞回线

如果磁场强度继续向反方向增加，使磁性材料反向磁化达到饱和，如曲线上的 bd 段，然后再反方向减小磁场强度到零，出现反向剩磁 $-B_r$ ，再沿正方向增加磁场强度直到 H_s ，则磁感应强度又增加到正的最大值。这样，在交变磁场作用下，形成了一个封闭的磁化曲线，它反映了磁感应强度 B 的变化滞后于磁场强度 H 的变化，因而称为磁滞回线。

为了消除剩磁，即使 $B=0$ ，需要在反方向上外加磁场 H_c ，称 H_c 为矫顽力，它表示磁性材料反抗退磁的能力。

2. 磁性材料的分类

磁性材料按照磁性能及用途通常分为硬磁材料、软磁材料和矩磁材料三大类。

(1) 硬磁材料

硬磁材料的特点：它经过深度饱和磁化后，具有较大的剩磁 B_r 、较高的矫顽力 H_c 和较大的磁滞回线面积，如图 1.1.4 (a) 所示。这样的特性可确保磁性能够长期保持恒定，不易消失。属于这类材料的有铝镍钴、硬磁铁氧体、稀土钴等。

硬磁材料主要用来制造各种用途的永久磁铁，如用于制造精密仪器、仪表、永磁电机、微电机、力矩电机、传感器、扬声器等。

(2) 软磁材料

软磁材料的特点：磁滞回线窄而长，回线面积小，即剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都很小，如图 1.1.4 (b) 所示。软磁材料具有很高的磁导率，易磁化也易于去磁。软磁材料的品种很多，如电磁纯铁、铸钢、硅钢片、铁镍合金及软磁铁氧体等。

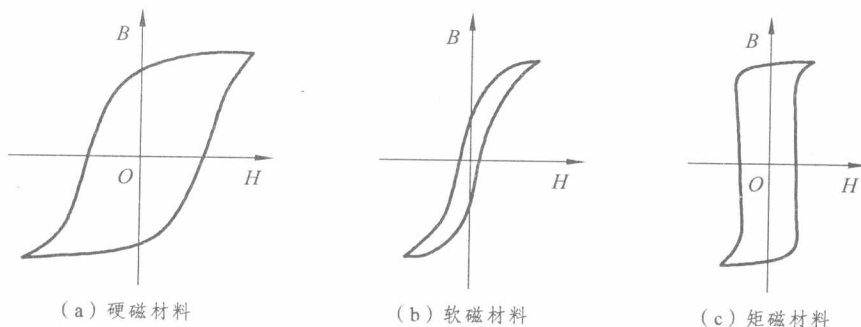


图 1.1.4 不同磁性材料的磁滞曲线

软磁材料主要用来做各种电磁铁和铁芯，即通过励磁取得较强的磁场，用来转换能量或传递信息。一般电磁纯铁用作直流磁路的电磁元件，各种牌号的硅钢片经常用作各种电机、电器的铁芯。

(3) 矩磁材料

磁滞回线接近矩形的磁性材料称为矩磁材料，如图 1.1.4 (c) 所示。这种材料在两个方向上磁化后，剩磁都很大，接近饱和磁感应强度 B_s ，而且很稳定。但它的矫顽力较小，易于迅速翻转，即很小的外磁场作用就能使它磁化达到饱和。由于矫顽力小，所以消除剩磁并不需要很强的外磁场，只要反向磁场一超过矫顽力，磁化方向就立即翻转。

由于矩磁材料有两个非常分明的磁化状态，可以记为 $+B_r$ 和 $-B_r$ ，可用来代表二进制数“1”和“0”，即可以存储这两个信息，所以矩磁材料在计算机和自动控制中被广泛用作记忆元件、开关元件和逻辑元件。属于这类材料的有镁锰铁氧体和某些铁镍合金等。

1.1.3 磁路的基本定律

在磁场中，具有磁通通路的回路称为磁路。研究磁路的目的，是为了用较小的电流、较少的材料建立较强的符合要求的磁场。在电机、变压器及各种电磁元件中，都用强磁性材料做成一定形状的铁芯。铁芯的磁导率比周围空气或其他物质的磁导率高得多，因此磁通的绝大部分经过铁芯而形成一个闭合通路。图 1.1.5 是四极直流电动机和交流接触器的磁路示意图。

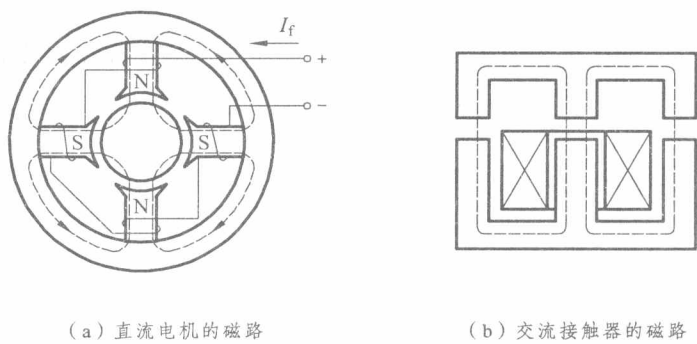


图 1.1.5 典型磁路举例

1. 安培环路定律

任何磁场都是由电流产生的，安培环路定律就是用来描述励磁电流与磁场之间关系的。在磁场中，沿任何闭合回线的磁场强度 H 的线积分，等于通过该闭合线内各电流的代数和，用数学式表示为

$$\oint H \cdot dl = \sum_{k=1}^n I_k \tag{1.1.5}$$

其中电流的正、负是这样确定的：任意选定闭合回线的绕行方向，凡是和该闭合回线绕行方

向之间符合右手螺旋定则的电流作为正，反之为负。

图 1.1.6 所示是一个环形铁芯线圈，应用式 (1.1.5) 计算线圈内部各点的磁场强度。取磁力线作为闭合回路，并选顺时针绕行。于是

$$\oint H \cdot dl = H_x l_x = 2\pi x H_x$$

$$\sum_{k=1}^N I_k = NI$$

所以

$$2\pi x H_x = NI$$

$$H_x = \frac{NI}{2\pi x} = \frac{NI}{l_x} \quad (1.1.6)$$

式中：\$N\$ 是线圈匝数；\$l_x = 2\pi x\$ 是半径为 \$x\$ 的圆周长；\$H_x\$ 是半径 \$x\$ 处的磁场强度。

式 (1.1.6) 中电流与线圈匝数的乘积 \$NI\$ 称为磁动势，用 \$F\$ 表示，即

$$F = NI$$

它是产生磁通的源，单位是安培 (A)。

2. 磁路欧姆定律

电路中由于电动势的作用使电流流动，与之对应的是，磁路中由于磁动势的作用具有磁通。电路中有电阻，磁路中存在磁阻。

环形线圈内的磁场可以认为是均匀磁场，则环内的磁感应强度

$$B = \mu H = \mu H_x = \mu \frac{NI}{l_x}$$

而环内的磁通

$$\Phi = BS = NI \frac{\mu S}{l_x}$$

令

$$R_m = \frac{l_x}{\mu S}$$

则

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (1.1.7)$$

这是磁路的欧姆定律，\$R_m\$ 与 \$\Phi\$ 成反比，表现了对磁通的阻碍作用，称为磁阻。根据环形线圈推导的磁路欧姆定律可以推广到一般磁路。

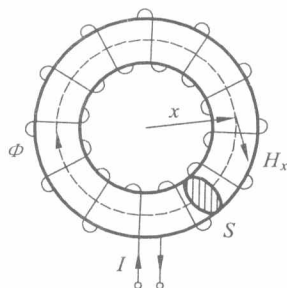


图 1.1.6 环形铁芯线圈

3. 磁路基尔霍夫定律

(1) 磁路的基尔霍夫磁通定律

电气设备中经常遇到一些具有分支的磁路,如图 1.1.7 所示。当线圈通有电流后,产生的磁通设为 Φ_1 , 在结点 A 处分为两条并联支路,其磁通分别为 Φ_2 和 Φ_3 。

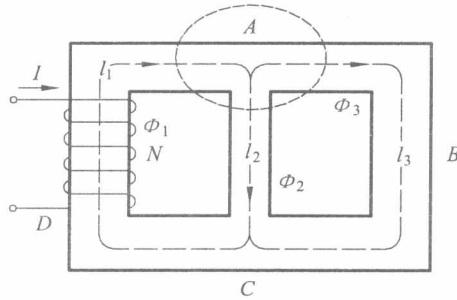


图 1.1.7 分支磁路

由磁通连续性原理可知,磁力线是没有起止的闭合回线。所以,穿入任一闭合面的磁通必然等于穿出该闭合面的磁通。对图 1.1.7 中结点 A 而言,流入该点的磁通 Φ_1 必然等于流出该点的磁通 Φ_2 和 Φ_3 之和,即

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

或

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

推广来说,对于任意结点的总磁通,有

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0 \quad (1.1.8)$$

(2) 磁路的基尔霍夫磁压定律

取任一闭合磁路,如图 1.1.7 中的 $ABCD$ 磁路,根据安培环路定律有

$$\oint H \cdot dl = \int_{l_1} H_1 \cdot dl + \int_{l_3} H_3 \cdot dl = H_1 l_1 + H_3 l_3$$

式中: H_1 为 CDA 段的磁场强度, l_1 为该段的平均长度; H_3 为 ABC 段的磁场强度, l_3 为该段的平均长度。这个磁路的磁动势为

$$NI = H_1 l_1 + H_3 l_3$$

推广到任意闭合磁路,则得

$$\sum NI = \sum HI \quad (1.1.9)$$

式中: 电流 I 的方向与闭合回线的绕行方向符合右手螺旋定则时磁动势 NI 取正号,否则取负号。 HI 称为磁压降,与电路的电压降相对应。

式 (1.1.9) 表明,磁路的磁动势代数和等于磁压降之和。

*1.1.4 直流磁路的计算

用直流电流励磁的磁路称为直流磁路。直流磁路中的磁通（稳态时）是不随时间变化的，不会在直流励磁线圈中产生感应电动势。

在计算直流磁路时，往往预先给定铁芯中的磁通（或磁感应强度），然后按照磁路各段尺寸及材料去求产生预定磁通所需的磁动势。由于磁性材料的磁导率 μ 不是常数，它随励磁电流而变，所以不能直接利用公式计算。

若磁路由几段材料连接（其中一段是空气隙）而成的，已知磁通和各段的材料及尺寸，可按下面的步骤求磁动势：

① 磁路中通过同一磁通，但因各段截面不同，所以磁感应强度也就不同，可分别计算：

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1}, \quad B_2 = \frac{\Phi}{S_2}, \quad \dots$$

② 根据各段磁性材料的磁化曲线 $B = f(H)$ ，查出与上述 B_1 、 B_2 、 $\dots$ 相对应的磁场强度 H_1 、 H_2 、 $\dots$

计算空气隙或其他非磁性材料的磁场强度 H_0 时，可直接应用下式：

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0}{4\pi \times 10^{-7}} \quad (\text{A/m}) \quad (1.1.10)$$

③ 计算各段磁路的磁压降 HL 。

④ 求出总的磁动势

$$F = IN = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots = \sum (HL) \quad (1.1.11)$$

例 1.1.1 计算图 1.1.8 所示的电磁铁磁路，已知 $S_1 = S_2 = 12 \text{ cm}^2$ ， $l_1 = 45 \text{ cm}$ ， $l_2 = 15 \text{ cm}$ ， $\delta = 0.2 \text{ cm}$ ， μ_1 为铸钢， μ_2 为硅钢。试求：① 磁通 $\Phi = 0.0012 \text{ Wb}$ 时，需要加多大的磁动势？② 若空气隙用铸钢填充，产生同样的磁通所需磁动势为多少？

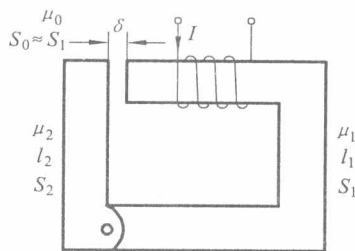


图 1.1.8 电磁铁磁路

解 ① 由于三段磁路的截面相同，所以磁感应强度必然相等，即

$$B_1 = B_2 = B_0 = \frac{\Phi}{S} = \frac{0.0012}{0.0012} = 1 \quad (\text{T})$$

从图 1.1.2 所示磁化曲线上查得

$$H_1 = 700 \text{ (A/m)}, H_2 = 350 \text{ (A/m)}$$

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} = \frac{10^7}{4\pi} \text{ (A/m)}$$

所以总磁动势

$$\begin{aligned} F = IN &= H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_0 \delta = 700 \times 0.45 + 350 \times 0.15 + \frac{10^7}{4\pi} \times 0.002 \\ &= 315 + 52.5 + 1592.4 = 1959.9 \text{ (A)} \end{aligned}$$

② 若空气隙被铸钢填充, 则

$$\begin{aligned} F = IN &= H_1(l_1 + \delta) + H_2 l_2 = 700 \times (0.45 + 0.002) + 350 \times 0.15 \\ &= 316.4 + 52.5 = 368.9 \text{ (A)} \end{aligned}$$

计算结果说明: 气隙虽小, 但对磁路的影响是非常大的。有些磁路不存在气隙, 如变压器磁路; 有些磁路无法去掉气隙, 如电机磁路, 但要尽量减小气隙的尺寸。

例 1.1.2 如图 1.1.7 所示具有分支的磁路, 已知 $l_1 = l_3 = 60 \text{ cm}$, $S_1 = 20 \text{ cm}^2$, $l_2 = 20 \text{ cm}$, $S_2 = S_3 = 10 \text{ cm}^2$, 材料为铸钢, 若 $\Phi_3 = 5 \times 10^{-4} \text{ Wb}$, 求磁动势。

解 在第三个铁芯中, 有

$$B_3 = \frac{\Phi_3}{S_3} = \frac{5 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-4}} = 0.5 \text{ (T)}$$

查图 1.1.2 所示磁化曲线, 得

$$H_3 = 180 \text{ (A/m)}$$

由磁路基尔霍夫磁压定律, 可得

$$\begin{aligned} H_2 l_2 &= H_3 l_3 \\ H_2 &= \frac{H_3 l_3}{l_2} = \frac{180 \times 0.6}{0.2} = 540 \text{ (A/m)} \end{aligned}$$

查磁化曲线得

$$B_2 = 0.92 \text{ (T)}$$

则

$$\Phi_2 = B_2 S_2 = 0.92 \times 10 \times 10^{-4} = 9.2 \times 10^{-4} \text{ (Wb)}$$

由磁路基尔霍夫磁通定律, 可得

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3 = 9.2 \times 10^{-4} + 5 \times 10^{-4} = 14.2 \times 10^{-4} \text{ (Wb)}$$

于是

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1} = \frac{14.2 \times 10^{-4}}{20 \times 10^{-4}} = 0.71 \text{ (T)}$$

查磁化曲线得

$$H_1 = 300 \text{ (A/m)}$$

所以

$$F = H_1 l_1 + H_2 l_2 = 300 \times 0.6 + 540 \times 0.2 = 288 \text{ (A)}$$

前面讨论的是已知磁通求解磁动势的方法，但有时会遇到已知磁动势求解磁通的问题。这类问题无法参照前面的方法作相反的演算，因为磁路是非线性的，不可能把磁动势按磁路各段分开计算，因此也就无法确定各段的磁场强度，所以求解这类问题一般用试探法。

用试探法计算时，先假定一个磁通值，按前面的方法算出磁动势，与已知磁动势相比较。如果相等，则假设正确；如不相等，重新试算，直到得到正确的磁动势值为止。

1.2 交流铁芯线圈电路

铁芯线圈分为直流和交流两种。直流铁芯线圈外加直流电，产生的磁通是恒定的，在线圈和铁芯中不会产生感应电动势。在一定电压下，线圈中的电流 I 只与线圈本身电阻 R 有关，功率损耗为 $I^2 R$ 。而交流铁芯线圈的电磁关系、电压关系及功率损耗等都比直流铁芯线圈复杂。

1.2.1 交流磁通与外电压的关系

图 1.2.1 所示是交流铁芯线圈电路，外加正弦交流电压 u ，产生的磁场必然是正弦交变磁场。

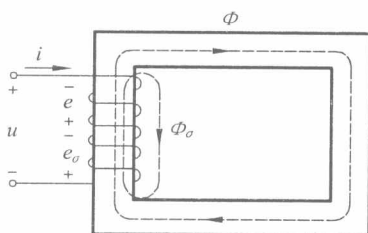


图 1.2.1 交流铁芯线圈电路

磁动势 Ni 产生的磁通绝大部分通过铁芯闭合，这部分磁通称为主磁通或工作磁通 Φ 。另外，还有很少的一部分磁通经过空气或其他非磁性材料闭合，这部分磁通称为漏磁通 Φ_v 。这两个交变磁通在线圈中产生两个感应电动势：主磁感应电动势 e 和漏磁感应电动势 e_v 。其电磁关系可表示如下：