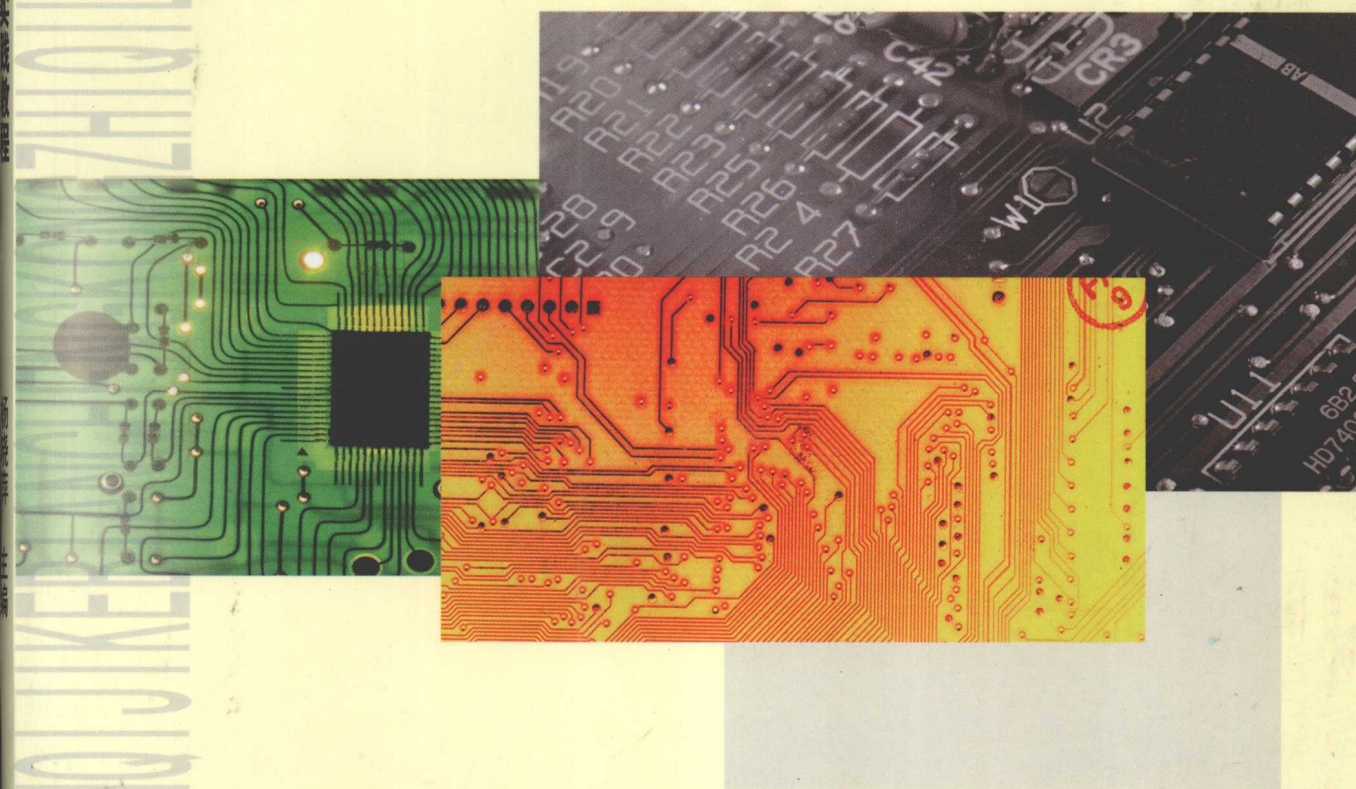
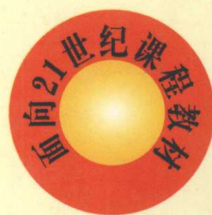


电机 电器及可编程控制器 理论与实践教程



杨晓萍 主编

吉林人民出版社



TM301.2
2

面向 21 世纪课程教材

电机 电器及可编程控制器 理论与实践教程

杨晓萍 主编

吉林人民出版社

电机 电器及可编程控制器理论与实践教程

主 编:杨晓萍

责任编辑:包兰英

封面设计:张 晓

吉林人民出版社出版 发行

(中国·长春市人民大街 7548 号 邮政编码:130022)

印 刷:北京市朝教印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:15.25 字数:390 千字

标准书号:ISBN 7-206-02778-4/G·1048

版 次:2005 年 7 月第 2 版 印 次:2005 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1 000 册 定 价:38.10 元

如发现印装质量问题,影响阅读,请与印刷厂联系调换。

内 容 提 要

本教材简单介绍了磁路的基本知识, 交流铁心线圈的电磁关系, 变压器的原理及使用, 系统介绍了三相异步电动机构造、原理和特性, 三相异步电动机的使用原理, 低压电器的原理及符号, 三相异步电动机的基本控制环节和保护环节, 三相异步电动机的常用控制原则。还介绍了 PLC 的工作原理, 并以松下 FP1-C56 为背景机, 介绍了 PLC 的基本操作, PLC 的基本指令和高级指令, 编程方法, 控制系统设计方法, 列举了 PLC 的典型应用控制系统实例, 使读者对工业控制技术有一个基本了解。

本书适用于高等工科院校非电类、电类本科的“电机、电器及可编程控制器”课程教学及课程设计, 也可供电气工程技术人员学习参考。

前 言

《电机、电器及可编程控制器理论与实践教程》是原吉林工业大学“九·五”规划立项教材。本教材根据《电工学》教学体系改革的需要,将可编程控制器内容纳入其体系,使各知识模块之间的衔接更加紧密。

本教材具有以下特色:

1. 内容模块化。不同层次的知识相对独立,教学时教师可根据学生的专业特点、学生也能根据自己的志趣选择不同的知识模块学习。
2. 增加实践训练内容,有利于采用开放式教学模式。
3. 习题多样化。教材中编入了实践训练题、理论分析题、综合设计题,适当压缩理论计算题。
4. 建立合理的课程体系。将电机、电器及可编程序控制器融合在一起,有利于知识的理解和运用。

本教材简单介绍了磁路的基本知识,交流铁心线圈的电磁关系,变压器的原理及使用,三相异步电动机构造、原理和特性,三相异步电动机的使用原理,低压电器的原理及符号,三相异步电动机的基本控制环节和保护环节,三相异步电动机的常用控制原则。还介绍了PLC的工作原理,并以松下FP1-C56为背景机,介绍了PLC的基本操作,PLC的基本指令和高级指令,编程方法,控制系统设计方法,列举了PLC的典型应用控制系统实例。

本书适用于高等工科院校非电类、电类本科的“电机、电器及可编程控制器”课程教学及课程设计,也可供电气工程技术人員学习参考。

全书共七章。第一章、第二章、第五章(除第一节)、第六章由吉林大学杨晓萍编写;第三章的第一、二节由吉林大学王芳荣编写;第三章的第三、四节及全部附录由吉林大学郎淑芬编写;第四章的第一、二、三、四节由吉林大学张淑琴编写;第四章的五、六节由吉林大学王幼林编写;第五章的第一节和第七章的第一节由吉林大学王鼎编写;第七章的第二节由吉林大学雷治林编写。全书由杨晓萍担任主编。

吉林大学于枫教授认真审阅了全部书稿并提出了许多宝贵意见,王桂琴副教授对本书的内容选取提出了许多建设性意见。在本书编写过程中,得到了吉林大学教务处、信息学院领导的大力支持,同时也得到了《电工学》课程全体老师的多方面帮助。在此一并表示衷心感谢。

本书出版得到了吉林大学教材基金的资助,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中不妥和错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2001年3月

目 录

前 言

第一章 磁路与变压器	1
第一节 磁路的基本概念和磁性材料.....	1
第二节 全电流定律和磁路的欧姆定律.....	5
第三节 交流铁心线圈.....	8
第四节 电磁铁.....	10
第五节 变压器.....	12
小 结.....	20
习 题.....	20
第二章 三相异步电动机	23
第一节 电动机的分类和选择.....	24
第二节 三相异步电动机的转动原理和基本构造.....	26
第三节 三相异步电动机的工作原理.....	29
第四节 三相异步电动机的电磁转矩与机械特性.....	33
第五节 三相异步电动机的起动、反转、制动和调速.....	38
第六节 三相异步电动机的运行特性和额定值.....	44
小 结.....	49
习 题.....	50
第三章 三相异步电动机的继电器-接触器控制	52
第一节 常用低压控制电器.....	53
第二节 电动机的基本控制环节和保护环节.....	58
第三节 电动机的基本控制原则.....	63
第四节 电气原理图的分析与设计方法.....	70
小 结.....	71
习 题.....	72
第四章 可编程控制器的组成及原理	75
第一节 可编程控制器概述.....	75
第二节 可编程控制器的组成.....	76
第三节 可编程控制器的工作原理.....	79
第四节 可编程控制器的特点和应用场合.....	81
第五节 FP1 松下可编程控制器介绍.....	83
第六节 FP 编程器 II.....	93
第五章 FP1 松下可编程控制器的基本指令	105
第一节 编程语言 概述.....	105

第二节	基本顺序指令	107
第三节	使用 FP 编程器 II 的程序编辑及程序运行操作	119
第四节	基本功能指令	127
第五节	控制指令	132
第六节	比较指令	137
第七节	常用控制环节的基本指令程序	142
第六章	FP1 松下可编程控制器的高级指令	152
第一节	高级指令概述	152
第二节	数据传输指令	153
第三节	BIN (二进制) 算术运算指令	162
第四节	数据比较指令	169
第五节	逻辑运算指令	173
第六节	数据转换指令	175
第七节	移位指令	181
第八节	位操作指令和进位标志位操作指令	187
第九节	高级指令应用程序举例	189
第七章	可编程控制器控制系统的设计与应用	196
第一节	可编程控制器控制系统的设计方法	196
第二节	可编程控制器应用举例	201
附 录		219
附录一	FP1 特殊内部继电器一览表	219
附录二	FP1 特殊数据寄存器一览表	221
附录三	FP 编程器 II OP 功能表	224
附录四	FP1 系统寄存器表	225
附录五	非键盘指令及代码表	227
附录六	基本指令操作数表	228
附录七	高级指令操作数表	229
附录八	常用电机、控制电器图形符号与文字代号	234
参考文献		235

第一章 磁路与变压器

学习目标

- ◇ 了解铁磁材料的磁性能。能描述磁化曲线和磁滞回线。能区分软磁材料和硬磁材料。
- ◇ 理解磁路欧姆定律的内容。能使用公式 $\sum_{K=1}^n H_K l_K = \sum I$ 计算简单的磁路。
- ◇ 理解交流铁心线圈中外施电压 U 与产生的主磁通 Φ_m 之间的关系, 利用这种关系对交流铁心线圈进行分析计算。
- ◇ 了解铁心的铁损包括磁滞损失和涡流损失。了解铁心线圈等效电阻是铜损等效电阻和铁损等效电阻之和。
- ◇ 了解电磁铁的工作原理。能计算电磁铁的电磁吸力。
- ◇ 了解变压器的工作原理。理解变压器的电压变换、电流变换和阻抗变换功能。能描述变压器输入回路、输出回路的近似电压平衡关系: $U_1 \approx E_1$, $U_2 \approx E_2$; 能描述磁动势平衡关系: $i_1 N_1 + i_2 N_2 \approx 0$ 。
- ◇ 了解变压器绕组规定极性的意义及简单测定方法。
- ◇ 了解实验室调压器的结构特点、工作原理及使用方法。
- ◇ 了解三相变压器高低压绕组不同联接方式下的电压变换关系。

概述

在很多电工设备中, 例如电磁仪表、继电接触器、变压器、电动机等都是利用磁场来实现能量转换的, 这其中不仅有电路问题, 同时还有磁路的问题。只有同时掌握了电路和磁路的基本理论, 才能对各种电工设备作全面的分析。

本章介绍磁路的基本知识, 简述交流铁心线圈内部的基本电磁关系, 为分析交流电动机、变压器以及其它电磁设备的性能打下基础。作为应用实例, 简要介绍电磁铁。着重介绍变压器的工作原理及其实际应用。

第一节 磁路的基本概念和磁性材料

一、磁路的基本概念

能够集中磁力线(磁场)的回路, 称为磁路。在变压器、电动机及电工仪表中, 常采用磁性材料作为铁心, 形成磁路, 其原因是磁性材料有很好的导磁性能, 能把分散的磁场集中, 使磁力线的绝大多数通过铁心形成磁路。

磁感应强度又称为磁通密度, 用符号 B 表示, 单位特斯拉(T)。它是代表磁场中

某点磁场的强弱和方向的物理量。其强弱等于通过垂直于磁场方向的单位截面积的磁力线数，其方向与该点磁力线的方向一致。

磁通，用符号 Φ 表示，单位韦伯 (Wb)。它代表磁场中穿过某一截面的磁力线总数。如果磁场是均匀的，则垂直于磁场方向的某一截面 S 的磁通

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

磁场强度，用符号 H 表示，单位安培/米 (A/m)。它是代表磁场中与铁磁材料无关的磁场大小和方向的物理量，它定义为磁场中某点的磁感应强度与铁磁材料磁导率 μ 之比，即

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1-2)$$

磁导率，用符号 μ 表示，单位亨/米 (A/m)。它是代表物质导磁能力的物理量。不同的物质，其导磁能力不同，所以磁导率也不同。通过实验测得真空的磁导率

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

空气、木材、铜、铝等物质的导磁能力很差，它们的磁导率近似等于真空的磁导率 μ_0 ，这一类物质称为非磁性物质。还有一类物质，例如硅钢、铸钢、坡莫合金等的导磁能力很强，它们的磁导率 $\mu \gg \mu_0$ ，称它们为铁磁性物质。磁性物质的磁导率不仅很高，而且不为常数。为便于将不同物质的导磁能力与真空中的导磁能力进行比较，常采用相对磁导率的概念。

相对磁导率等于任意一种材料的磁导率 μ 与真空的磁导率 μ_0 之比，用符号 μ_r 表示，即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1-3)$$

显然， μ_r 无量纲。所有非磁性材料的磁导率均接近真空磁导率 μ_0 ，即它们的 $\mu_r \approx 1$ ；而所有铁磁性物质的磁导率则比 μ_0 高出很多，即它们的 $\mu_r \gg 1$ 。

我们知道，自然界存在有良好的电绝缘材料，但尚未发现对磁通绝缘的材料，空气的磁导率可以看作是最低的了，却仍能通磁，因此磁路中没有断路现象，只有漏磁现象。

二、铁磁材料的磁性能

在变压器、电动机及电磁仪表等电气设备中，都是用铁磁性材料制成铁心，其上装线圈。采用这种铁心，可以在线圈匝数、励磁电流一定的情况下，获得较强的磁场。现在，我们简要介绍铁磁材料的磁特性、分类、损耗等特性。

1. 高导磁性

铁磁材料具有强烈磁化（呈现磁性）的特性。这是因为铁磁材料不同于其它类物质，有其内部的特殊性。我们知道，在物质的分子中由于电子环绕原子核运动和本身自转动而形成分子电流，分子电流产生磁场，每个分子相当于一个基本小磁铁。由于铁磁材料的分子间有一种特殊的作用而使每一区域内的分子磁铁都排列整齐，因而显示磁性，这些小区域称为磁畴。在没有外磁场的作用时，各个磁畴排列混乱，磁场互相抵消，对外不显示磁性，如图 1-1 (a) 所示。但在外磁场作用下（例如在铁心线圈

中的励磁电流所产生磁场的作用下), 磁畴就顺外磁场方向转向, 从而显示出磁性来。随着外磁场的增强 (线圈励磁电流的增大), 磁畴逐渐转到与外磁场相同的方向上, 如图 1-1 (b) 所示。这样便产生了一个很强的与外磁场同方向的磁化磁场, 而使铁磁材料的磁感应强度大大增强, 所以它具有很高的磁导率。

非铁磁材料没有磁畴的结构, 所以不具有磁化的特性。

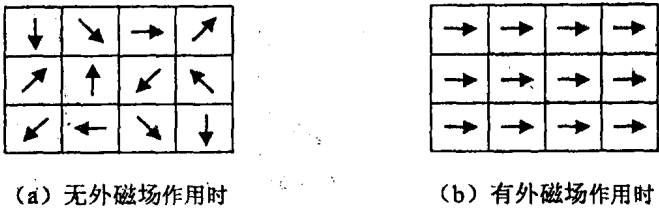


图 1-1 铁磁材料的磁化

2. 磁化曲线和磁饱和性

不同的磁性材料, 其导磁特性也不相同。通常用磁化曲线来表征它们的磁特性。磁化曲线是用来描述磁化过程中磁性材料的磁感应强度 B 随磁场强度 H 变化的曲线, 即 $B=f(H)$ 曲线。一般采用实验方法测出各材料的磁化曲线, 以供计算磁路时选用。图 1-2 所示为一条磁化曲线, 从图中看出, 曲线可分为四段: oa 段的曲线变化缓慢, 这是由于磁畴有惯性, H 增加时 B 不能立即很快上升; ab 段曲线较陡, 近似成直线, 表示磁畴方向在不太大的外磁场作用下就能转向外磁场方向, 所以 B 随 H 增加很多; bc 段曲线变化缓慢, 说明大部分磁畴都已转向外磁场方向, B 的增加缓慢下来; c 点以后的曲线变得几乎平坦, 表明磁畴已全部转向外磁场, 即使外磁场 H 继续增加, 磁感应强度 B 增加得也很少, 即已达到饱和状态。

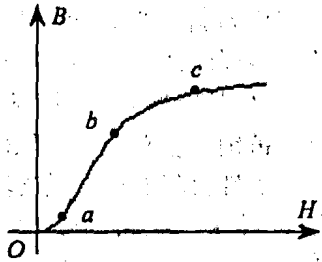


图 1-2 磁材料的磁化曲线

由铁磁材料的磁化曲线可知, B 与 H 不成正比, 即铁磁材料的磁导率 μ 不是常数, 随 H 的变化而变化; 但非铁磁材料的磁导率 μ 是常数, 通常有 $\mu \approx \mu_0$ 。

3. 磁滞性和磁滞损耗

磁滞是铁磁材料的重要性质之一。上面讨论的磁化曲线是铁磁物质在初始时由 B 为零, H 从零逐渐增加得到的, 如图 1-3 之 oa 段。如果由点 a 开始减小 H 值, 这时的 $B-H$ 关系并非按原曲线 ao 退回, 而是沿着在它上面的另一曲线 ab 变化, 如图 1-3 所示。当 $H=0$ 时, B 并不为零, 而等于 B_r , 即它仍保留一定的磁性, B_r 称为剩磁。为了消除剩磁, 必须外加反向磁场。当反向外加磁场 $H=H_C$ 时, $B=0$; H_C 称为矫顽力。再增大反向磁场, 则铁磁物质沿 cd 曲线反向磁化。到达 d 点后如果再减小反向磁场一直到 H 为正, 则曲线将沿 $defa$ 变动, 完成一个循环。由此可见, B 的变化总是滞后于 H 的变化, 这称为磁滞现象, 简称磁滞。图 1-3 中的闭合磁化曲线称磁滞回线。

当交变磁通穿过铁心时, 铁心便被反复磁化, 这种过程要消耗磁场能量, 使铁心

发热。这种反复磁化过程中的能量损耗称为磁滞损耗。可以证明磁滞损耗正比于磁滞回线所包围的面积。

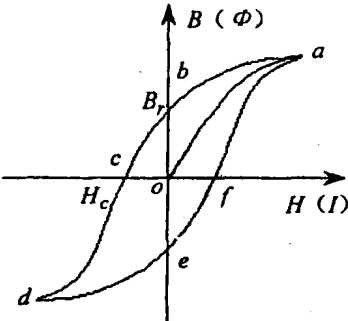


图 1-3 磁滞回线

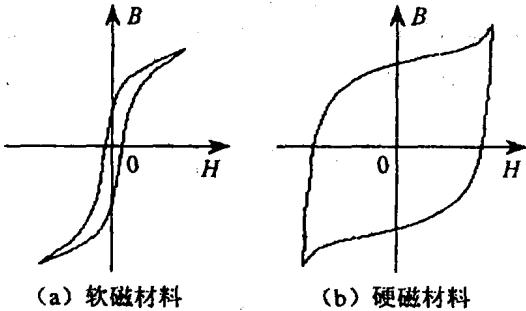


图 1-4 不同材料的磁滞回线

磁性材料根据它的磁滞回线的宽窄可分为软磁材料和硬磁材料两种。软磁材料的特点是磁滞回线较窄，如图 1-4 (a) 所示，磁导率高，具有较小的矫顽力 H_C ，剩磁 B_r 也略小，故其磁滞现象不很显著。适宜做交流铁磁器件的铁心。常用的软磁性材料有：硅钢、铸钢、坡莫合金、软磁铁氧体等。

硬磁性材料的特点是磁滞回线较宽，如图 1-4 (b) 所示，具有较大的矫顽力 H_C ，剩磁 B_r 也大，磁滞现象比较显著。它适宜制做成永久磁铁。目前常用的硬磁材料有：碳钢、铝镍钴合金、硬磁铁氧体等。

磁性材料在交变磁化过程中，会消耗一部分能量，即磁滞损耗。磁滞损耗转化为热量，使铁心温度升高，故工程上选择软磁硅钢片制作变压器和电动机的铁心，这种材料磁滞损耗小，可以减小设备的功耗。

4. 涡流和涡流损耗

交流磁通通过铁心时，在铁心内会产生感应电动势，如果铁心是导体，其中便会出现旋涡式的电流，称为电涡流，或简称涡流，如图 1-5 (a) 所示，它在垂直于磁通方向的平面内环流着。涡流将引起铁心发热，此即为涡流损失。

为了减小涡流损失，希望增大铁心电阻，为此主要采用两种方法：(1) 铁心采用彼此绝缘的硅钢片叠成，如图 1-5 (b) 所示。注意硅钢片要顺磁场的方向排列，这样穿过每片硅钢片的磁通是总磁通的 $1/n$ (n 是叠放的硅钢片数)，它感应的电动势也是原

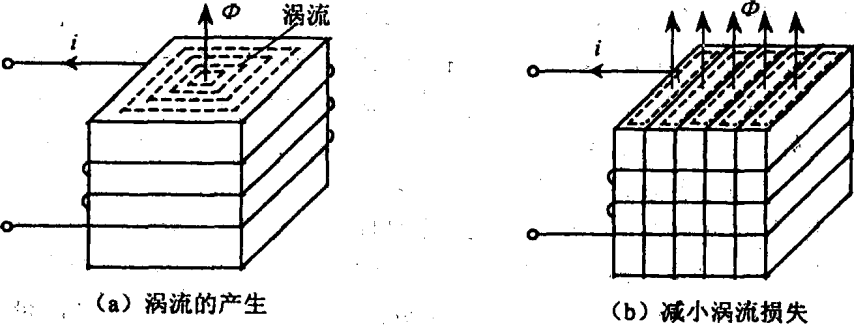


图 1-5 涡流及涡流损失

来的 $1/n$ ，而磁路的长度大约仅减小为原来的 $1/2$ ，因此涡流会显著减小。工业上常用的硅钢片其厚度为 0.5mm 和 0.35mm 两种。(2) 采用电阻率高的铁心。例如铁氧体、硅钢等。

涡流在电机、电器、变压器等电磁器件中消耗能量、引起发热，是有害的。但在有些场合，例如感应加热装置、涡流探伤仪等仪器设备中，又是以涡流效应为基础的。

磁滞损耗和涡流损耗合称为铁心损耗，简称铁损。它们使铁心发热，对设备是有害的。

复 习 题

1. 制作永久磁铁应使用硬磁材料还是软磁材料？
2. 制作变压器和电动机中的铁心应使用硬磁材料还是软磁材料？为什么？
3. 变压器铁心为什么使用硅钢片而不使用整块硅钢？为什么？

第二节 全电流定律和磁路的欧姆定律

分析和计算磁路时要用到全电流定律和磁路的欧姆定律。下面我们来讨论一下这两个定律的内容，并围绕这两个定律讲述分析磁路的基本知识。

一、全电流定律

该定律内容为：在磁路中，沿任一闭合路径，磁场强度矢量的线积分，等于与该闭合路径交链的电流的代数和。用公式表示为

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I \quad (1-4)$$

当电流的方向与闭合路径的积分方向符合右手螺旋定则时，电流为正，反之为负。

将此定律应用于图 1-6 所示的环形磁路，设环形铁心线圈是密绕的，且绕得很均匀。若取其中中心线为积分回路，则中心线上各点的磁场强度矢量的大小相等，其方向与 $d\vec{l}$ 的方向一致，故

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint H dl = H \oint dl = Hl = \sum I$$

即

$$Hl = IN$$

其中 l 是中心线长度，即 $l = 2\pi r$ ， N 是线圈匝数。

在磁路计算中，通过适当选取积分路线，一般可使 $\vec{H}$ 的方向与 $d\vec{l}$ 的方向一致，这时式 (1-4) 可写为

$$\oint H dl = \sum I \quad (1-5)$$

如果沿积分路线可分为 n 段，每段中 $\vec{H}$ 的大小不变，则式 (1-5) 可写为

$$\sum_{K=1}^n H_K l_K = \sum I \quad (1-6)$$

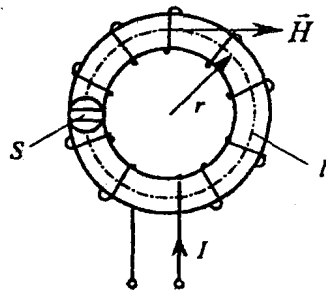


图 1-6 环形铁心线圈

式中, $\sum I$ 可理解为产生磁通的磁动势, $H_K l_K$ 为第 K 段磁路的磁压降。式 (1-6) 表示: 沿磁回路一周磁压降的代数和等于磁动势的代数和。这样, 全电流定律可以看成是磁路的克希荷夫第二定律。

二、磁路的欧姆定律

对于由一种铁心材料构成的磁路, 由式 (1-6) 可得到

$$Hl = IN \quad (1-7)$$

根据公式 (1-1) 和 (1-2), 可将式 (1-7) 变化为

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

于是

$$\Phi = \frac{IN}{l/\mu S} = \frac{F}{R_m} \quad (1-8)$$

式中的 $F = IN$, 叫做磁动势, 它是产生磁通的原因; $R_m = l/\mu S$ 叫做磁阻, 它表示了磁路对磁通的阻碍作用。

公式 (1-8) 所表达的是: 由励磁电流 (磁动势) 在磁路中产生的磁通量 Φ , 其大小和磁动势 F 成正比, 和磁路的磁阻成反比。这就是磁路的欧姆定律。

下面我们来分析磁阻公式:

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 表明: 磁路的平均长度 l 愈长, 磁阻愈大; 铁心横截面积 S 愈大, 磁阻愈小。这与电路中的电阻公式类似, 是容易理解的。

由于铁磁物质的磁导率 μ 不是常数, 磁阻 R_m 难以算出确定值, 因此, 磁路欧姆定律一般仅用于磁路的定性分析。而磁路的定量计算要用全电流定律辅以物质的磁化曲线来进行。图 1-7 给出了铸铁、铸钢和硅钢三种常用铁磁材料的磁化曲线。

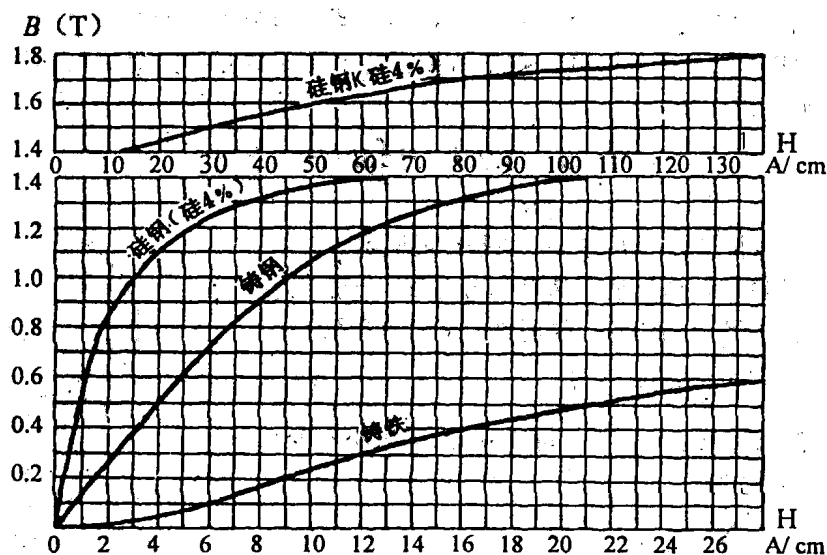


图 1-7 常用铁磁物质的磁化曲线

三、磁路的计算

磁路的计算分为两种类型。一种是已知磁路中的磁通或磁感应强度求磁路的磁动势，如例 1-1。另一种，是由已知的磁动势求磁路中的磁通或磁感应强度。由于磁路的非线性，后一类问题无法直接求解，一般多采用试探法：假定磁通为某一数值，求出相应的磁动势，与已知的磁动势比较，根据其差额，再重新假定一个磁通值，如此反复，即可求出磁通或磁感应强度了。

【例 1-1】已知图 1-8 所示线圈的铁心由铸钢制成。其中 Π 形铁心的横截面积 $S_1 = 20 \text{ cm}^2$ ，平均长度 $l_1 = 45 \text{ cm}$ ，衔铁横截面积 $S_2 = 25 \text{ cm}^2$ ，平均长度 $l_2 = 15 \text{ cm}$ ， $l_3 = 2 \text{ cm}$ ，空气隙厚度 $\delta = 0.1 \text{ cm}$ 。现要产生 $\Phi = 2.8 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ 的磁通量，若励磁电流为直流，求所需的磁动势 F 。

解：第一步：根据磁通值求出各段磁路中的磁感应强度。

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{2.8 \times 10^{-3} \text{ Wb}}{20 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1.4 \text{ T}$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{2.8 \times 10^{-3} \text{ Wb}}{25 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1.12 \text{ T}$$

$$B_0 = B_1 = 1.4 \text{ T}$$

第二步：根据 B_1 、 B_2 ，查铸钢的磁化曲线（见图 1-7），找出相应的磁场强度值 H_1 、 H_2 ，得

$$H_1 = 2.1 \times 10^3 \text{ A/m}$$

$$H_2 = 1.1 \times 10^3 \text{ A/m}$$

空气隙的磁场强度 H_0 可直接算出

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{1.4 \text{ T}}{4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}} = 11.14 \times 10^5 \text{ A/m}$$

第三步：计算各段磁路的磁压降

$$H_1 l_1 = 2.1 \times 10^3 \text{ A/m} \times 0.45 \text{ m} = 0.945 \times 10^3 \text{ A}$$

$$H_2 l_2 = 1.1 \times 10^3 \text{ A/m} \times 0.15 \text{ m} = 0.165 \times 10^3 \text{ A}$$

$$2H_2 l_3 = 2 \times 1.1 \times 10^3 \text{ A/m} \times 0.02 \text{ m} = 0.044 \times 10^3 \text{ A}$$

$$2H_0 \delta = 2 \times 11.14 \times 10^5 \text{ A/m} \times 0.001 \text{ m} = 2.228 \times 10^3 \text{ A}$$

第四步：求出总的磁动势

$$\begin{aligned} F = IN = \sum Hl &= H_1 l_1 + H_2 l_2 + 2H_0 \delta + 2H_2 l_3 \\ &= (0.945 + 0.165 + 2.228 + 0.044) \times 10^3 = 3.382 \times 10^3 \text{ A} \end{aligned}$$

从此题的计算看出，空气隙虽然只占磁路总平均长度的 $\frac{0.2}{45 + 15 + 4 + 0.2} = 0.31\%$ ，但是它的磁压降却占了磁动势的 $\frac{2.228}{3.382} = 65.9\%$ ，即磁动势主要用来克服空气隙的磁阻。所以磁路进行粗略计算时，有时可以根据空气隙的磁压降来估算磁动势。

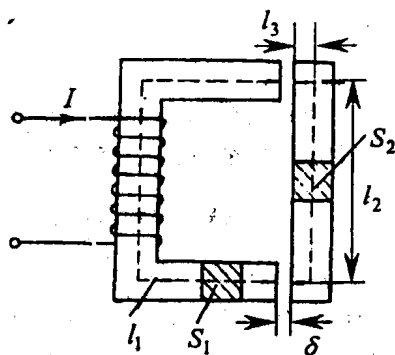


图 1-8 例 1-1 图

复 习 题

1. 图 1-6 所示的环形铁心线圈, 已知其铁心的平均长度为 $l = 20 \text{ cm}$, 截面积 $S = 4 \text{ cm}^2$, 磁路由铸钢制成。现欲产生 $\Phi_m = 3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ 的磁通量, 求直流励磁的磁动势 $IN = ?$
2. 图 1-2-1 示出一硅钢片叠成的磁路, 设其占空系数* $K = 0.9$, 现欲产生 $\Phi_m = 5 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ 的磁通量, 试求所需的磁动势 IN (图中所标尺寸的单位是厘米)。

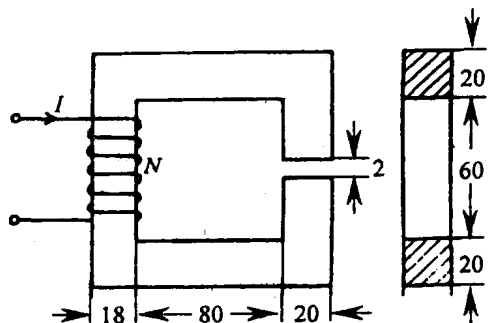


图 1-2-1

第三节 交流铁心线圈

当铁心线圈的励磁电流为交流时, 就是交流铁心线圈。交流铁心线圈的电磁关系理论是分析变压器、交流电机和交流电器的理论基础。

一、交流铁心线圈的物理过程

图 1-9 所示为一个在闭合铁心上绕有交流励磁线圈的磁路。设线圈的匝数为 N , 电阻为 R 。当正弦电压 u 作用于线圈时, 在线圈中产生交变电流 i 和交变磁通。大部分的磁通穿过全部铁心而闭合, 叫主磁通 Φ ; 其余少部分磁通穿过部分铁心经空气 (或其它非铁磁性物质) 而闭合, 叫漏磁通 Φ_σ , 如图 1-9 所示。磁通由于穿过较长的非铁磁性物质, 磁阻很大, 因而它比主磁通小得多, 在分析计算时其影响可以忽略不计。

二、电磁关系

交变磁通 Φ 和 Φ_σ 在线圈中都会产生感应电动势, 分别用 e 和 e_σ 表示, 根据电磁感应定律, 感应电动势分别为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-10)$$

$$e_\sigma = -N \frac{d\Phi_\sigma}{dt} = -L_\sigma \frac{di}{dt} \quad (1-11)$$

比较式 (1-10) 和 (1-11) 可见, e 和 e_σ 的表达式不同。漏磁电动势 e_σ 可表示为漏磁电感 L_σ 上的电压, 因为 L_σ 为线性电感。而主磁电动势 e 则没有这种关系, 原因在于磁性材料为非线性。

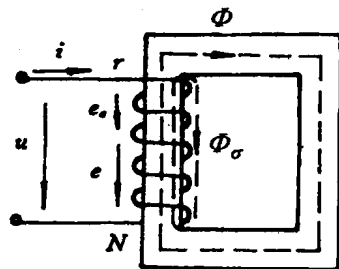


图 1-9 交流铁心线圈

* 占空系数是指有效截面积和实际截面积的比值。

假定磁通 Φ 是时间的正弦函数, 即

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t$$

则

$$\begin{aligned} e &= -N \frac{d\Phi}{dt} = -\omega N \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f N \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= E_m \sin(\omega t - 90^\circ) = \sqrt{2} E \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

式中

$$E_m = 2\pi f N \Phi_m$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N \Phi_m \quad (1-12)$$

根据基尔霍夫电压定律列出铁心线圈电路的电压平衡方程式为

$$u = -e - e_\sigma + R_i \quad (1-13)$$

由于漏磁通 Φ_σ 很小, 即 e_σ 很小, 且线圈电阻 R 也很小, 将它们忽略以后, 式(1-13)变为

$$u \approx -e \quad (1-14)$$

进而得

$$U \approx E = 4.44 f N \Phi_m \quad (1-15)$$

式(1-15)是一个常用的公式, 它表示当线圈匝数 N 及频率 f 一定时, 主磁通 Φ_m 的大小只取决于外施电压的有效值 U 。

【例 1-2】日光灯的镇流器是个交流铁心线圈, 测得某日光灯镇流器的线圈电压是 192 V, 线圈匝数为 1000, 求主磁通 Φ_m 。

解: 根据公式(1-15)并考虑到日光灯都是用在工频电源上, 即 $f = 50 \text{ Hz}$, 从而主磁通可求得为

$$\Phi_m = \frac{U}{4.44 f N} = \frac{192}{4.44 \times 50 \times 1000} \text{ Wb} = 8.65 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

【例 1-3】若上题中镇流器铁心的截面积为 7 cm^2 , 铁心的平均长度为 20 cm , 铁心由硅钢片叠成, 求磁感应强度 B_m 和励磁电流 I 。

解: 铁心中磁感应强度的最大值为

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S} = \frac{8.65 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{7 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1.24 \text{ T}$$

查硅钢片的平均磁化曲线得

$$H_m = 0.6 \times 10^3 \text{ A/m}$$

因此, 铁心中的磁压降为

$$H_m l = 0.6 \times 10^3 \times 20 \times 10^{-2} \text{ A} = 120 \text{ A}$$

根据全电流定律, 可得励磁电流的有效值为

$$I = \frac{H_m l}{\sqrt{2} N} = \frac{120}{\sqrt{2} \times 1000} \text{ A} = 0.085 \text{ A}$$

三、交流铁心线圈中的能量损失

无铁心的线圈加交流电压时, 输入功率只是供给线圈电阻的功率损耗 $I^2 R_{Cu}$, 通

常称为铜损, 写作 P_{Cu} , 它与 I^2 成正比。 R_{Cu} 是线圈铜导线的电阻。

有铁心的线圈加交流电压时, 输入功率除供给铜损外, 还要供给铁心中所产生的涡流损耗和磁滞损耗, 两者合称铁损, 写作 P_{Fe} 。

综上所述, 交流铁心线圈中加入励磁电流后, 线圈本身要产生铜损; 而铁心中要产生铁损, 直接损失了磁场能, 间接损失了电能。这样, 从能量的观点考虑, 线圈中的电阻应该是两部分之和, 即

$$R = R_{Cu} + R_{Fe}$$

式中, R ——线圈等效电阻; R_{Cu} ——铜损等效电阻; R_{Fe} ——铁损等效电阻。

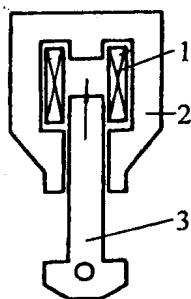
复 习 题

1. 交流铁心线圈误接到直流电源上会产生什么后果?
2. 一个交流铁心线圈, 当其铁心的横截面积变大而磁路的平均长度不变, 励磁电压不变, 试分析其励磁电流是否变化? 怎样变化?
3. 试分析下列情况下交流铁心线圈铁心中的磁感应强度和线圈中的电流将如何变化。
 - (1) 电源电压大小和频率不变, 绕组匝数增加;
 - (2) 电源电压大小不变, 频率减小;
 - (3) 电源电压大小不变, 铁心截面减小;
 - (4) 电源电压大小不变, 铁心中气隙增加;
 - (5) 电源电压增大, 其它不变。

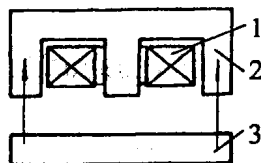
第四节 电磁铁

电磁铁通常是指没有电气触头的电磁器具, 如果附有电气触头, 则叫做电磁继电器或接触器, 但电磁铁仍是这些电器的主要部件。所以研究电磁铁对以电磁吸力为工作基础的电磁器具来说是有普遍意义的。

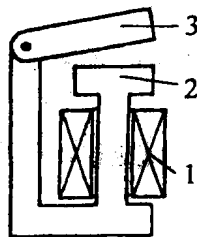
图 1-10 所示为常见电磁铁的几种类型, 从结构上看, 它们主要由线圈 1、铁心 2 和衔铁 3 三部分组成。



(a)螺管抽吸式



(b)单E直动式



(c)拍合式

图 1-10 几种常见的电磁铁类