

PLC 及 I/O 设备应用教程

(松下 FP1 系列)

杨晓萍 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



PLC 及 I/O 设备应用教程 (松下 FP1 系列)

杨晓萍 主编



机械工业出版社

本书从理论与实践教学相结合的角度,以松下 FP1-C56 系列 PLC 为背景,注重支持边学边练的教学或自学方式,将 PLC 及其相关内容有机地融合在一起,有利于知识的学习、掌握和运用。

本书主要内容分为上、下两篇。上篇主要介绍电磁铁和三相异步电动机的工作原理,三相异步电动机的简单继电器-接触器控制;下篇详细讨论 PLC 的基本操作、基本指令和高级指令、编程方法、PLC 控制系统设计方法,列举了典型控制系统实例,使读者对工业控制技术有一个基本了解。

本书适用于高等院校工科电类、非电类本科的 PLC 课程教学及课程设计,并可作为电气工程技术人員系统学习 PLC 编程的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

PLC 及 I/O 设备应用教程(松下 FP1 系列)/杨晓萍主编. —北京:机械工业出版社,2009.9

ISBN 978-7-111-27870-2

I. P… II. 杨… III. 可编程序控制器-教材 IV. TM571.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 128824 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:罗莉 责任编辑:吕潇 版式设计:霍永明

责任校对:陈延翔 封面设计:赵颖喆 责任印制:洪汉军

三河市国英印务有限公司印刷

2009 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·14.75 印张·363 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-27870-2

定价:33.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379212

封面无防伪标均为盗版

前 言

“电机 电器及可编程序控制器理论与实践教程”是吉林大学（合校前的吉林工业大学）“九五”规划立项教材。本书根据《电工学》教学体系改革的需要，将可编程序控制器（PLC）的内容纳入其体系，使各知识模块之间的衔接更加紧密。

本书具有以下特色：

- 建立合理的课程体系。将电机、电器及 PLC 融合在一起，有利于知识的理解和运用。
- 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。
- 增加实践训练内容，有利于采用开放式教学模式。
- 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。

本书简单介绍了磁路的基本知识，交流铁心线圈的电磁关系，三相异步电动机的构造、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以及三相异步电动机的常用控制原则。此外还介绍了 PLC 的工作原理，并以松下 FP1-C56 为背景机型，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。

本书适用于高等院校工科电类、非电类本科的可编程序控制器课程教学及课程设计，并可作为电气工程技术人员系统学习 PLC 编程的参考用书。

全书共八章。第一章由王芳荣编写；第二章的第一、二、三、四节由陈万忠编写；第二章的第五、六节由刘斌编写；第三章由雷志林编写；第四～七章及全部附录由杨晓萍编写；第八章由冀群心编写。全书由杨晓萍担任主编。

在本书编写过程中，得到了吉林大学教务处、通信工程学院领导的大力支持，在此表示衷心感谢。本书编写得到了吉林大学教材基金的资助，在此表示感谢。另外，要特别感谢机械工业出版社，以及罗莉、吕潇编辑对本书的大力支持和提出的修改建议，使本书得以出版和完善。

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
2009 年 6 月

目 录

前言

上篇 常用的 I/O 设备

第一章 磁路与电磁铁	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	4
第三节 交流铁心线圈	7
第四节 电磁铁	9
本章习题	10
第二章 三相异步电动机	12
第一节 电动机的分类和选择	12
第二节 三相异步电动机的转动原理和基本构造	15
第三节 三相异步电动机的工作原理	17
第四节 三相异步电动机的电磁转矩与机械特性	20
第五节 三相异步电动机的启动、反转、制动和调速	24
第六节 三相异步电动机的运行特性和额定值	30
本章习题	33
第三章 三相异步电动机的继电器-接触器控制	35
第一节 常用低压控制电器	35
第二节 电动机的基本控制环节和保护环节	41
第三节 电动机的基本控制原则	45
第四节 电气原理图的分析与设计方法	51
本章习题	53

下篇 可编程序控制器

第四章 可编程序控制器的组成及原理	56
第一节 可编程序控制器的组成	56
第二节 可编程序控制器的工作原理	59
第三节 松下 FP1 系列可编程序控制器介绍	61
第四节 FP 编程器 II	70
本章习题	79
第五章 松下 FP1 系列可编程序控制器的基本指令	80
第一节 编程语言概述	80
第二节 基本顺序指令	82

第三节	使用 FP 编程器 II 的程序编辑及程序运行操作	93
第四节	基本功能指令	101
第五节	控制指令	106
第六节	比较指令	111
第七节	常用控制环节的基本指令程序	116
本章习题		124
第六章	松下 FP1 系列可编程序控制器的高级指令	126
第一节	高级指令概述	126
第二节	数据传输指令	127
第三节	二进制算术运算指令	136
第四节	数据比较指令	143
第五节	逻辑运算指令	147
第六节	数据转换指令	148
第七节	移位指令	154
第八节	位操作指令和进位标志位操作指令	159
第九节	高级指令应用程序举例	161
本章习题		167
第七章	顺序控制梯形图的编程方式及步进指令	168
第一节	梯形图程序的典型设计法	168
第二节	顺序控制中的顺序流程图绘制	173
第三节	顺序控制梯形图的编程方式	178
第四节	步进过程指令及其编程方式	181
第五节	使用步进指令的编程举例	186
本章习题		194
第八章	可编程序控制器控制系统的设计与应用	196
第一节	可编程序控制器控制系统的设计方法	196
第二节	可编程序控制器应用实例	200
本章习题		214
附录		216
附录 A	FP1 特殊内部继电器一览表	216
附录 B	FP1 特殊数据寄存器一览表	217
附录 C	FP 编程器 II OP 功能表	220
附录 D	FP1 系统寄存器表	220
附录 E	非键盘指令及代码表	222
附录 F	基本指令操作数表	223
附录 G	高级指令操作数表	224
附录 H	常用电动机、控制电器图形符号与文字符号	229
参考文献		230

上篇 常用的 I/O 设备

可编程序控制器 (PLC) 的开关量输入信号大多来自于按钮、选择开关、限位开关、继电器等输入设备, 输出量经常控制接触器、电磁铁、电磁阀、调速装置等执行器。本篇简要介绍上述电磁装置的工作原理及其组成的三相异步电动机控制系统。

第一章 磁路与电磁铁

【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 $\sum_{k=1}^n H_k l_k = \Sigma I$ 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。了解铁心线圈的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。

【概述】

在很多电工设备中, 例如电磁仪表、继电器接触器、变压器、电动机等都是利用磁场来实现能量转换的, 这其中不仅有电路的问题, 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, 为分析交流电动机及其他电磁设备的性能打下基础。作为应用实例, 简要介绍电磁铁。

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, 单位为特斯拉 (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，单位为韦伯 (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 的磁通为

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

磁场强度，用符号 H 表示，单位为安培/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，单位为亨/米 (H/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为

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

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 μ 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他类物质，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 1-1a 所示。但在外磁场作用下（例如在铁心

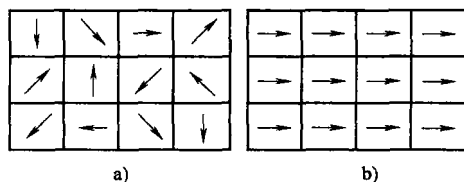


图 1-1 铁磁材料的磁化

a) 无外磁场作用时 b) 有外磁场作用时

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, 磁畴逐渐转到与外磁场相同的方向上, 如图 1-1b 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。

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。一般采用实验的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。

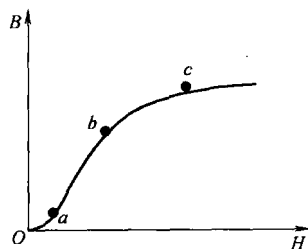


图 1-2 铁磁材料的磁化曲线

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, 而是随 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, 随着 H 从零逐渐增加得到的, 如图 1-3 所示曲线的 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为磁滞回线。

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。

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 1-4a 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。常用的软磁材料有硅钢、铸钢、坡莫合金、软磁铁氧体等。硬磁材料的特点是磁滞回线较宽, 如图 1-4b 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。它适宜制作成永久磁铁。目前常用的硬磁材料有碳钢、铝镍钴合金、硬磁铁氧体等。

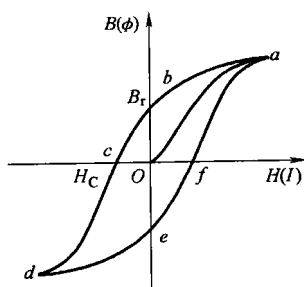


图 1-3 磁滞回线

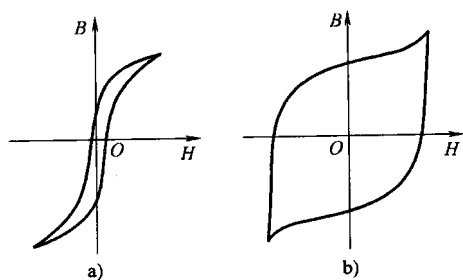


图 1-4 不同材料的磁滞回线

a) 软磁材料 b) 硬磁材料

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，在铁心内要产生感应电动势，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 1-5a 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 1-5b 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。涡流在电动机、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**，总体上对设备是有害的。

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？

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。下面我们来讨论这两个定律的

内容，并围绕这两个定律讲述和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

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

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，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 $Hl = \sum I$

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

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

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

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

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基尔霍夫第二定律。

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

$$Hl = \sum I \quad (1-7)$$

根据式 (1-1) 和式 (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。

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：

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

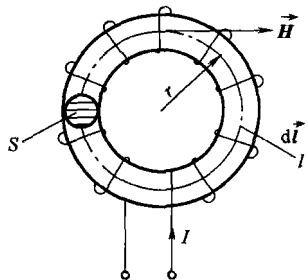


图 1-6 环形铁心线圈

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。

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。

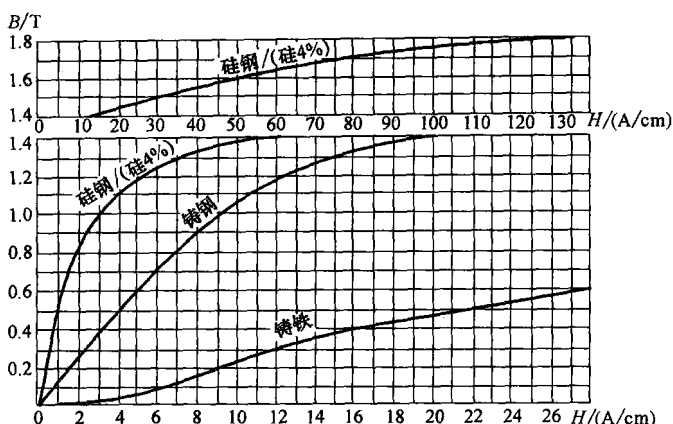


图 1-7 常用铁磁物质的磁化曲线

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。

【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 。

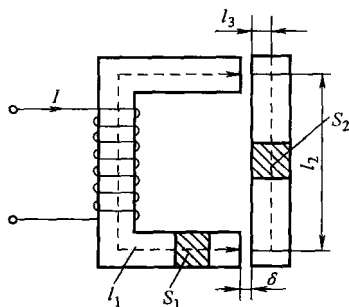


图 1-8 例 1-1 图

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 $\frac{0.2}{45 + 15 + 4 + 0.2} \times 100\% = 0.31\%$ ，但是它的磁压降却占了磁动势的 $\frac{2.228}{3.382} \times 100\% = 65.9\%$ ，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。

复 习 题

1. 如图 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 1-9 所示为一硅钢片叠成的磁路，设其占空比 $\ominus K = 0.9$ ，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 。

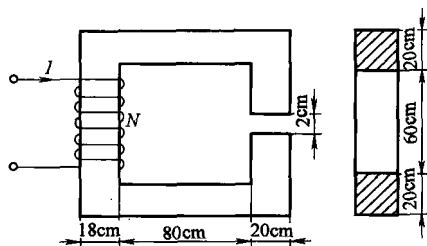


图 1-9 题 2 图

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、交流电动机和交流电器的理论基础。

一、交流铁心线圈的物理过程

图 1-10 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，称为主磁通 Φ ；其余少部分磁通穿过部分铁心经空气（或其他非铁磁性物质）而闭合，称为漏磁通 Φ_σ ，如图 1-10 所示。漏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。

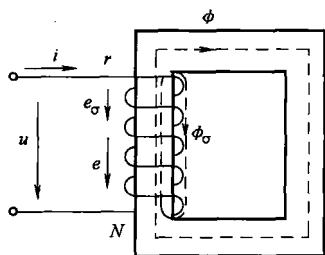


图 1-10 交流铁心线圈

$\ominus$ 占空比是指有效截面积和实际截面积的比值。

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) 和式 (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。

假定磁通 Φ 是时间的正弦函数，即

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

则

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\omega N \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f N \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$= E_m \sin(\omega t - 90^\circ) = \sqrt{2} E \sin(\omega t - 90^\circ)$$

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

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

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】 荧光灯的镇流器是个交流铁心线圈，测得某荧光灯镇流器的线圈电压是 192V，线圈匝数为 1000，求主磁通 Φ_m 。

解：根据式 (1-15) 并考虑到荧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

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

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 $I^2 R_{\text{Cu}}$ ，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} 。从能量的观点考虑，线圈中的电阻应该是两部分之和，即

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

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

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, 线圈匝数增加;
 - (2) 电源电压大小不变, 频率减小;
 - (3) 电源电压大小不变, 铁心截面积减小;
 - (4) 电源电压大小不变, 铁心中气隙增加;
 - (5) 电源电压增大, 其他不变。

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 1-11 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。

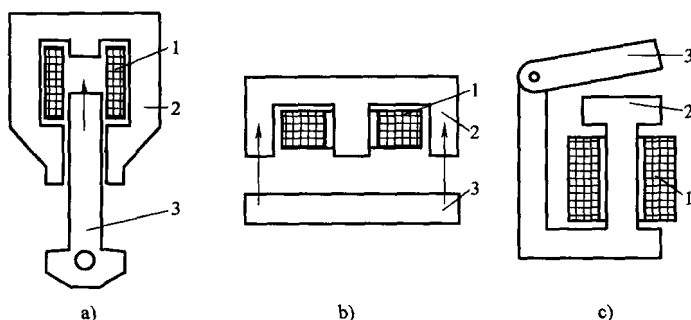


图 1-11 几种常见的电磁铁类

a) 螺管抽吸式 b) 单 E 直动式 c) 拍合式

1—线圈 2—铁心 3—衔铁

铁心线圈通电后会产生磁性, 能够吸引衔铁或其他铁磁性的机械零件、工件; 电流消失时, 磁性也随着消失, 衔铁等即被释放。

吸力是电磁铁的主要参数之一。计算电磁吸力的公式为

$$F = \frac{10^7}{8\pi} B_0^2 S_0 \quad (1-16)$$

式中 B_0 、 S_0 分别是气隙 (或螺管抽吸式电磁铁衔铁端面) 的磁感应强度和截面积, B_0 的单位是 T, S_0 的单位是 m^2 , F 的单位是 N。由式 (1-16) 可知, 吸力的大小是和气隙处磁感应强度的二次方成正比的, 为了增大吸力, 应尽可能增大该处的磁感应强度。

当线圈中通直流电流时,称为直流电磁铁。其电流产生的磁通和磁感应强度不变,因此电磁吸力也恒定,可由式(1-16)计算出。

当线圈中通交流电时,称交流电磁铁。交流电磁铁由于磁感应强度周期交变,其吸力因而也是周期性变化的。设

$$B_0 = B_m \sin \omega t$$

$$\begin{aligned} \text{则吸力为} \quad f &= \frac{10^7}{8\pi} B_m^2 S_0 \sin^2 \omega t = \frac{10^7}{8\pi} B_m^2 S_0 \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) \\ &= F_m \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) = \frac{1}{2} F_m - \frac{1}{2} F_m \cos 2\omega t \end{aligned} \quad (1-17)$$

$$\text{式中} \quad F_m = \frac{10^7}{8\pi} B_m^2 S_0 \quad (1-18)$$

式(1-18)为吸力的最大值。吸力随时间变化的情况如图1-12所示。可见,交流电磁铁的吸力以两倍于电源的频率在零与最大值 F_m 之间脉动。

脉动的吸力与反力弹簧的共同作用使得衔铁颤动,引起噪声;而对有触点的电器来说,触点间的时通时断,不仅造成机械磨损,而且会出现火花,使触点烧蚀损坏。解决的办法是把磁铁端面分裂开来并嵌入一个分磁环(又称短路环),如图1-13所示。分磁环一般是紫铜的,具有很好的导电性能。分磁环中的感应电流有阻碍磁通变化的作用,使穿过分磁环的磁通 Φ_2 落后于 Φ_1 一个相位角,从而磁极各部分的吸力不会同时为零,总的吸力就没有经过零的时刻了。这样,只要反力弹簧的作用力不大于吸力的最小值,电磁铁就会一直保持吸合状态。

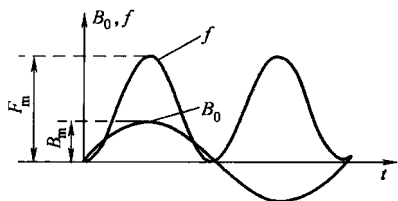


图 1-12 交流电磁铁的吸力

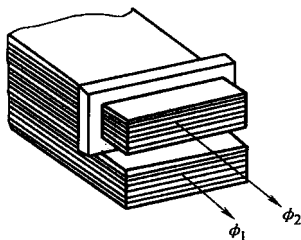


图 1-13 分磁环

使用交流电磁铁时要特别注意防止衔铁因被卡住而吸合不上的情况。这时气隙大,线圈的感抗很小,电流就会比吸合状态时大得多,长期大电流工作,线圈会被烧坏。

复 习 题

1. 交流电磁铁通电后,若衔铁长期被卡住而不能吸合,会引起什么后果?为什么?
2. 交流电磁铁吸合前后线圈电流会如何变化?磁通、吸力会如何变化?
3. 如何消除交流电磁铁的衔铁颤动?

本 章 习 题

- 1-1 在图1-14所示的铁心线圈中通直流电, $N=1000$ 匝,磁路平均长度 $l=30\text{cm}$,截面积 $S=10\text{cm}^2$,材料为铸钢,工作点上相对磁导率 $\mu_r=1137$ 。欲在铁心中建立磁通 $\Phi=0.001\text{Wb}$,应通入多大的励磁电流 I ?

- 1-2 若上题磁路中有 $\delta = 0.2\text{mm}$ 的空气隙, 则应通入多大的励磁电流 I ?
- 1-3 若将题 1-1 中铁心改用硅钢片叠成, 占空比 $K = 0.9$, 线圈中通入 50Hz 交流电, 产生磁通 $\Phi_m = 0.9 \times 10^{-3}\text{Wb}$, 忽略漏磁通, 在工作点上硅钢片的相对磁导率 $\mu_r = 2274$, 线圈电阻 $r = 100\Omega$, 应加多大的交流电压? 产生的最大励磁电流是多大?
- 1-4 若题 1-3 中铁心有 0.2mm 的空气隙, 则结果如何?
- 1-5 若图 1-15 所示的电磁铁是一交流电磁铁, 励磁线圈的额定电压为 $U_1 = 220\text{V}$, 匝数 $N = 10^4$, 铁心截面积 $S_1 = S_2 = 1\text{cm}^2$, 试求最大电磁吸力。
- 1-6 有一磁铁, 如图 1-16 所示, 铁心和衔铁均由铸钢制成, 铁心上绕有 1000 匝线圈, 铁心和衔铁的截面积相同, $S = 2\text{cm}^2$ 。铁心与衔铁的总平均长度 $l = 30\text{cm}$, 空气隙总长度 $l_0 = 0.1\text{cm}$ 。现欲产生 60N 的吸力, 试问线圈中应通入多大的电流? 吸合后吸力又是多少?
- 1-7 一个接在市电上的铁心线圈, 测得其磁通 $\Phi_m = 2 \times 10^{-4}\text{Wb}$, 该铁心上还绕有另一线圈, 其匝数 $N = 100$, 试求该线圈开路时的电压。

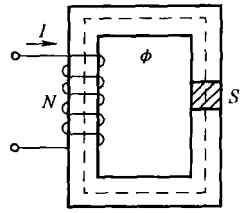


图 1-14 习题 1-1 图

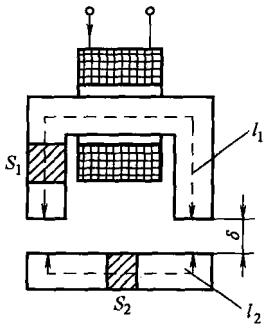


图 1-15 习题 1-5 图

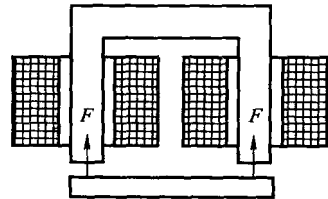


图 1-16 习题 1-6 图