

电工电子技术系列教材

电气控制

殷瑞祥 樊利民 编

DianQi KongZhi

华南理工大学出版社

电工电子技术系列教材

电 气 控 制

殷瑞祥 樊利民 编

华南理工大学出版社

·广州·

内 容 简 介

电工电子技术是非电子、电气类专业的理论性、实践性都比较强的技术基础课程。本书为“电工电子技术系列教材”之二,主要介绍电机及电气控制技术。全书共6章,另有1个附录。主要内容包括:磁路与变压器,异步电动机,直流电动机,控制电机,继电器接触器控制系统,可编程控制器,西门子 STEP7 Micro/WIN 可编程控制器编程软件的使用方法等。

本书着重阐述基本概念、基本原理和实际应用。例题和习题除围绕上述重点外,还注意思考性、启发性,使读者能增强分析问题和解决问题的能力。

本书兼顾了深度和广度,适合作为非电子、电气类各专业本专科、各种成人教育的教材,对于相关工程技术人员也是一本实用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电气控制/殷瑞祥,樊利民编. —广州:华南理工大学出版社,2004.2

(电工电子技术系列教材)

ISBN 7-5623-2047-0

I. 电… II. ①殷…②樊… III. 电气控制—高等学校—教材 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 126662 号

总发行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼,邮编 510640)

发行部电话:020-87113487 87111048(传真)

E-mail: scut202@scut.edu.cn http://www.scutpress.com

责任编辑:詹志青

印刷者:南海市彩印制本厂

开本:787×960 1/16 印张:12.5 字数:266 千

版次:2004 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

印数:1~5 000 册

定 价:21.00 元

版权所有 盗版必究

“电工电子技术系列教材”编委会

主任：殷瑞祥

编委（以姓氏拼音为序）：

樊利民 罗昭智

丘晓华 张琳

朱宁西

前 言

随着科学技术的发展,电工电子技术在各行各业中的应用越来越广泛,电工电子技术基础已经成为大学生不可缺少的基本知识构架之一。在我国高等学校专业培养方案中,非电子、电气类专业传统上以开设电工学课程来实现电工电子技术基础教学。但是,电工电子技术的发展使课程内容越来越庞杂,不利于教和学。

根据电工电子技术基础的学科涵盖范畴,我们在教学改革的基础上,采用模块化教学的思想,将电工学课程从单一课程扩展为电工电子技术系列课程:电路基础、电气控制、模拟电子技术和数字电子技术。本系列教材正是针对非电子、电气类专业电工电子技术基础系列课程编写的。与传统电工学教材相比,系列教材删减了陈旧繁杂的内容,补充了反映科学技术发展的新内容,《电路基础》把重点放在分析方法的阐述,《电气控制》增加了可编程控制器的应用,《模拟电子技术》、《数字电子技术》突出了集成电路的应用。

电工电子技术系列教材共分4册,本书为第2册,主要介绍电机及电气控制技术。全书共6章,第1章磁路与变压器,介绍磁路的基本概念、变压器和铁心线圈的基本原理与分析;第2章异步电动机,介绍异步电动机的原理、分析与使用;第3章直流电动机,介绍直流电动机的机械特性及启动、调速;第4章控制电机,介绍步进电动机、伺服电动机、测速发电机和自整角机的原理与应用;第5章继电器接触器控制系统,介绍传统的电气控制方法与技术;第6章可编程序控制器,介绍可编程序控制器的原理与应用,附录给出了西门子STEP7 Micro/WIN可编程序控制器编程软件的详细使用方法。

在编写过程中,我们认真总结了多年的教学经验,学习参考了国内外同类和相关的教材和著作,以培养学生分析问题和解决问题的能力、提高学生素质为目标,注重基本概念、基本原理、基本方法的论述,使学生既能掌握好基础知识,又能得到启发、开阔视野。文字叙述力求简明扼要,便于自学。

本系列教材的编写大纲是在华南理工大学电工教研室全体教师集体讨论的基础上制定的。参加本册编写的有殷瑞祥(第1章)、樊利民(第2、3、4、

5、6章),殷瑞祥教授修改统稿。

华南理工大学电工教研室张琳副教授对本书的编写提出了许多建设性意见,并审阅了部分初稿。

由于我们水平有限,书中难免存在缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编 者

2003年10月于广州

目 录

1 磁路与变压器	1
1.1 磁路的基本知识	1
1.1.1 磁路的基本物理量	1
1.1.2 磁场的基本定律	3
1.1.3 铁磁材料的磁性能	4
1.1.4 铁磁材料的种类和用途	5
1.1.5 电磁感应	7
1.2 铁心线圈	9
1.2.1 直流铁心线圈	9
1.2.2 交流铁心线圈	9
1.3 电磁铁	14
1.3.1 直流电磁铁	14
1.3.2 交流电磁铁	15
1.3.3 电磁铁的工作时间	16
1.4 单相变压器	16
1.4.1 变压器的基本结构	16
1.4.2 变压器的工作原理	17
1.4.3 变压器的损耗和效率	20
1.5 三相电力变压器	21
1.5.1 三相电力变压器的结构	21
1.5.2 变压器的额定值	23
1.5.3 变压器的运行和维护	26
1.6 仪用互感器	27
1.6.1 电流互感器	27
1.6.2 电压互感器	28
1.7 特殊变压器	30
1.7.1 自耦变压器	30
1.7.2 钳形电流表	31
习题 1	32
2 异步电动机	35

2.1	三相异步电动机的结构和工作原理	35
2.1.1	三相异步电动机的结构	35
2.1.2	旋转磁场	38
2.1.3	三相异步电动机的工作原理	41
2.2	三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	43
2.2.1	三相异步电动机的电磁转矩	43
2.2.2	三相异步电动机的机械特性	47
2.3	三相异步电动机的使用	48
2.3.1	三相异步电动机的铭牌数据	48
2.3.2	三相异步电动机的起动和反转	51
2.3.3	三相异步电动机的调速	56
2.4	单相异步电动机	59
2.4.1	电容分相式异步电动机	59
2.4.2	罩极式异步电动机	61
	习题 2	61
3	直流电动机	65
3.1	直流电动机的结构、基本工作原理、电磁转矩和电枢电动势	65
3.1.1	直流电动机的结构	65
3.1.2	直流电动机的基本工作原理	67
3.1.3	直流电动机的电磁转矩和电枢电动势	67
3.2	他励电动机	68
3.2.1	他励电动机的机械特性	68
3.2.2	他励电动机的起动与反转	69
3.2.3	他励电动机的调速	71
3.3	并励电动机	73
3.4	串励电动机	74
3.5	复励电动机	75
	习题 3	76
4	控制电机	78
4.1	步进电动机	78
4.1.1	单三拍工作方式	79
4.1.2	六拍工作方式	80
4.1.3	双三拍工作方式	80
4.1.4	典型应用	81
4.2	伺服电动机	82

4.2.1 交流伺服电动机	82
4.2.2 直流伺服电动机	85
4.2.3 力矩电动机	87
4.3 测速发电机	88
4.3.1 交流测速发电机	88
4.3.2 直流测速发电机	90
4.4 自整角机	92
4.4.1 控制式自整角机	92
4.4.2 力矩式自整角机	95
习题4	97
5 继电器接触器控制系统	98
5.1 常用低压电器	98
5.1.1 刀开关	98
5.1.2 按钮和行程开关	99
5.1.3 熔断器	101
5.1.4 自动空气断路器	103
5.1.5 交流接触器	104
5.1.6 继电器	105
5.2 三相异步电动机继电器接触控制电路	109
5.2.1 直接起动的控制电路	109
5.2.2 正反转控制电路	112
5.2.3 顺序控制电路	114
5.2.4 时间控制电路	115
5.2.5 行程控制电路	116
习题5	118
6 可编程序控制器	122
6.1 可编程序控制器概述	122
6.1.1 可编程序控制器的一般概念	122
6.1.2 可编程序控制器的基本组成和工作原理	124
6.2 可编程序控制器的编程语言和基本指令	126
6.2.1 可编程序控制器的编程语言	126
6.2.2 可编程序控制器的编程器	128
6.2.3 常用PLC的编程元件和基本指令	128
6.3 基本控制程序	149
6.3.1 起动、保持和停止电路	149

6.3.2	双向控制电路	150
6.3.3	定时器、计数器的应用	151
6.4	可编程序控制器应用举例	154
6.4.1	送料小车自动控制系统	154
6.4.2	异步电动机顺序控制电路	155
6.4.3	智力竞赛抢答器	156
	习题 6	157
附录 A	Siemens STEP7 - Micro/WIN 编程软件的使用说明	162
A.1	STEP7 - Micro/WIN 简介	162
A.2	STEP7 - Micro/WIN 的操作界面	162
A.2.1	菜单	163
A.2.2	工具栏	163
A.2.3	程序编辑窗口	163
A.2.4	状态图窗口	164
A.2.5	数据块窗口	165
A.2.6	符号表窗口	166
A.2.7	状态栏	166
A.3	使用 STEP7 - Micro/WIN 的菜单	167
A.3.1	程序菜单 Project	167
A.3.2	编辑菜单 Edit	172
A.3.3	视图菜单 View	175
A.3.4	CPU 菜单	177
A.3.5	调试菜单 Debug	181
A.3.6	设置菜单 Setup	183
A.3.7	窗口菜单命令 Window	185
A.3.8	帮助菜单 Help	186
A.4	使用 STEP7 - Micro/WIN 的一般步骤	187
	参考文献	190

1 磁路与变压器

在电路基础课程中讨论了直流电路和交流电路。实际上电路中存在大量的电感元件,如电磁铁、变压器、电机等。它们的线圈中都有铁心,线圈通电后铁心就构成磁路,磁路又影响电路。因此,电工技术不仅有电路问题,同时也有磁路问题,只有同时掌握了电路和磁路的基本理论,才能对电感元件做全面的分析。

1.1 磁路的基本知识

由物理学的知识可知,电流产生磁场,通电导体周围存在着磁场。在电磁铁、变压器、电机等电气设备中,为了用较小的电流产生较大的磁场,通常把线圈绕在由铁磁材料制成的铁心上。当电流通过线圈时,产生的磁通绝大部分也通过铁心,通过铁心的磁通称为主磁通,用字母 Φ 表示;小部分沿铁心以外空间闭合的磁通,称为漏磁通,用 Φ_s 表示。由于漏磁通很小,在工程中常略去不计。

主磁通通过的闭合路径称为磁路。用以产生磁场的电流称为励磁电流。图 1-1-1 所示为几种电气设备的磁路。图 1-1-1a 所示是电磁铁的磁路,磁路中有很短的空气隙;图 1-1-1b 所示是变压器的一种磁路,它由同一种铁磁材料组成,且各段截面积基本相等,这种磁路称为均匀磁路;图 1-1-1c 所示是直流电机磁路,磁路中也有空气隙,且磁路的铁磁材料不一定相同。

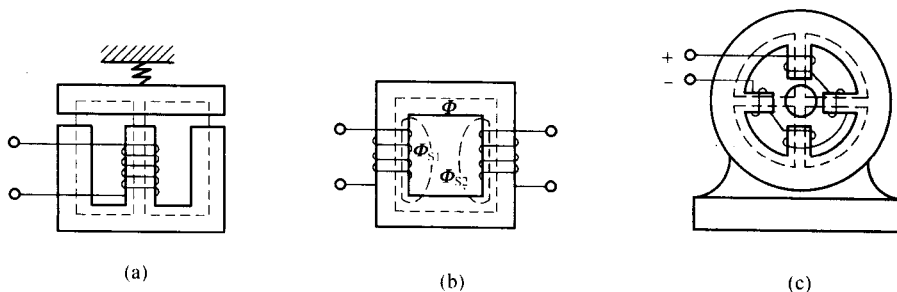


图 1-1-1 几种电气设备的磁路

1.1.1 磁路的基本物理量

磁路问题是局限在一定路径内的磁场问题,因而在物理课程中所学过的各个表征

磁场的物理量在磁路中也是适用的。

1. 磁感应强度 B

磁感应强度是表示磁场内某点磁场强弱及方向的物理量。如图 1-1-1b 所示的变压器磁路中,当线圈中通有励磁电流时,在铁心内就产生磁场,磁场的大小与线圈的匝数和电流的大小有关,用通过垂直于磁场方向的单位面积磁力线数目表示磁感应强度。磁场的方向与励磁电流的方向有关,可用右手螺旋定则表示。磁感应强度的单位是 T(特斯拉,简称特)。

2. 磁通 Φ

在均匀磁场中,磁通 Φ 等于磁感应强度 B 与垂直于磁场方向的面积 A 的乘积,即

$$\Phi = B \cdot A \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{A} \quad (1-1-1)$$

故 B 又称为磁通密度。如果是非均匀磁场,为计算方便起见,可取 B 的平均值。磁通 Φ 的单位是 Wb(韦伯,简称韦)。1Wb=1V·s(伏·秒)。由式(1-1-1)可以看到

$$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$$

3. 磁导率 μ

磁导率 μ 是表示物质导磁性能的物理量。它的单位是 H/m(亨/米)。

实验证明,自然界中大多数物质,如各种气体、非金属材料、铜、铝、高镍不锈钢等金属对磁场的影响都很小,且与真空极为接近,这类物质称为非磁性物质。由实验测出真空的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。铁、钴、镍、钇、镨及其合金,它们的导磁性能远比真空好,这类物质称为铁磁物质。非磁性物质也称为非铁磁物质。

在说明物质的磁性能时,往往不直接采用磁导率 μ ,而用 μ 与真空磁导率 μ_0 的比值 μ_r 表示, μ_r 称为相对磁导率,即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \text{或} \quad \mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (1-1-2)$$

非铁磁物质的 μ_r 近似为 1,铁磁物质的 μ_r 远大于 1,其值从几百到几万。铁的 μ_r 在 200 以上,硅钢片的 μ_r 可达 10 000 以上。在制造电机、变压器等电气设备时,把线圈套在铁磁物质上,目的是用同样的电流、同样匝数的线圈,得到很大的磁感应强度。

应当指出,真空的磁导率 μ_0 是一个常数,而铁磁物质的磁导率 μ 不是常数,当励磁电流改变时, μ 也改变,这一点将会在下面继续讨论。

4. 磁场强度 H

由于铁磁物质的磁导率 μ 不是常数,磁场的计算就比较复杂,为了简化计算,引入磁场强度这一辅助物理量。磁场强度只与产生磁场的电流以及这些电流的分布情况有关,而与磁介质的磁导率无关。磁场强度的单位是 A/m。

磁场强度 H 的大小与磁感应强度 B 的大小关系是

$$H = \frac{B}{\mu} \quad \text{或} \quad B = \mu \cdot H \quad (1-1-3)$$

1.1.2 磁场的基本定律

1. 全电流定律

全电流定律是计算磁场的基本定律,在磁场中沿任何闭合回线,磁场强度的矢量的线积分等于穿过该闭合回线所包围的面积电流的代数和,即

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I$$

这里,计算电流代数和时,与绕行方向符合右手螺旋定则的电流取正号,反之取负号。

在电工技术中,常常遇到如图 1-1-1b 所示的情况,即闭合回线上各点的磁场强度 \mathbf{H} 相等且其方向与闭合回线的切线方向一致,则全电流定律可简化为

$$H \cdot l = \sum I$$

由于电流 I 和闭合回线绕行方向符合右手螺旋定则,线圈有 N 匝,即电流穿过回线 N 次,因此

$$\sum I = N \cdot I = F_m$$

所以

$$H \cdot l = N \cdot I = F_m \quad (1-1-4)$$

式中, F_m 称为磁动势,单位是 A(安)。

2. 磁路的欧姆定律

电路中,电阻 R 与导线长度 l 、导线截面积 A 及导线的电阻率 ρ (或电导率 γ) 有关

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{l}{\gamma \cdot A}$$

在电阻两端加电动势 E 将产生电流 I ,由欧姆定律确定:

$$I = \frac{E}{R}$$

在磁路中,定义一个对应的物理量磁阻 R_m ,它对磁通起阻碍作用,磁阻与磁路的平均长度 l 、磁路截面 A 及磁路材料的磁导率有关:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot A}$$

给磁路加磁动势 F_m 后,产生磁通 Φ ,磁路的磁动势、磁通及磁阻三者之间的关系可用磁路的欧姆定律表示:

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} = \frac{N \cdot I}{R_m} \quad (1-1-5)$$

一段磁路的磁位差等于其磁阻与磁通的乘积,即

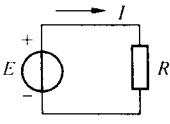
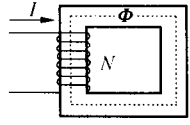
$$U_m = R_m \Phi$$

磁位差的单位与磁动势 F_m 的单位相同,为 A(安)。

电路与磁路的对照关系见表 1-1-1。

应当指出,一般情况下各种导体的电阻 R 是一个常数,所以我们常用电路的欧姆定律计算。而在磁路方面,非铁磁材料的 μ_0 是常数,而铁磁材料的 μ 不是一个常数,因而磁阻 R_m 也不是一个常数,随励磁电流 I 的改变而改变,因而通常不能用磁路的欧姆定律直接计算。

表 1-1-1 电路与磁路对照表

电 路	磁 路
	
电流 I 电动势 E 电阻 $R = l/(\gamma A)$ 电导率 γ 电位差 (电压) $U = RI$ 电路欧姆定律 $E = RI$	磁通 Φ 磁动势 F_m 磁阻 $R_m = l/(\mu A)$ 磁导率 μ 磁位差 $U_m = R_m \Phi$ 磁路欧姆定律 $F_m = \Phi R_m$

1.1.3 铁磁材料的磁性能

1. 高导磁性

铁磁材料的磁导率很高, μ_r 可达 $10^2 \sim 10^4$ 。由铁磁材料组成的磁路磁阻很小,根据式(1-1-5),在线圈中通入较小的电流 I ,磁路即可产生较大的磁通 Φ ,因而铁磁材料是制造电磁铁、变压器、电机等的主要材料。

2. 磁饱和性

铁磁材料的磁饱和性表现在磁感应强度 B 不会随磁场强度 H 的增强而无限增强,当磁场强度 H 增大到一定值后,磁感应强度不能继续增强,这就是铁磁材料的饱和性。

由式(1-1-4)可以看出,当磁路确定以后,匝数 N 、磁路平均长度 l 确定,则 H 正比于 I 。在环形铁心上绕上 N 匝线圈、通入电流 I ,实验电路如图 1-1-2a 所示,增加线圈的电流 I ,磁路中的磁场强度 H 也成正比地增加,而磁感应强度 B 与磁场强度 H 的关系如图 1-1-2b 的磁化曲线所示。

磁化曲线由原点开始,这时励磁电流 I 由 0 开始增大,即磁场强度 H 也由 0 开始增大,从 O 到 a 点这个区间 ΔH 不大而 ΔB 很大,说明磁导率高;在 a 点以后, H 增大,

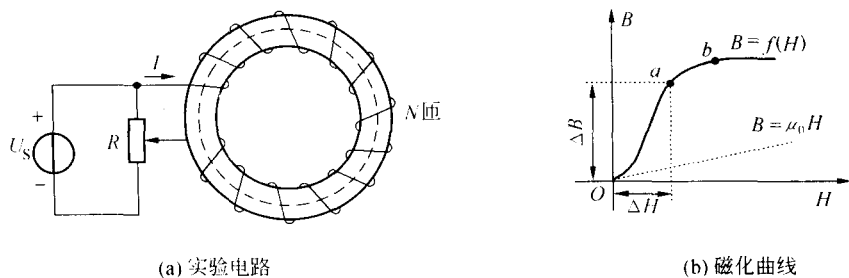


图 1-1-2 磁化曲线实验电路和磁化曲线

B 增大很小,趋向饱和;在 b 点以后, H 增加, B 几乎不再增加,说明磁路也达到饱和。由此可见, B 和 H 的关系是非线性的, μ 不是常数,但在未饱和段 Oa ,粗略分析计算时,磁化曲线可近似看做直线, μ 为常数。

若磁路由非铁磁材料组成时,磁化曲线为如图 1-1-2b 的虚线所示的直线,斜率很低,说明 μ_0 很小,且是一个常数。

3. 磁滞性

在图 1-1-2a 中,同时改变电流 I 的大小和方向, H 的大小和方向随着改变,这时环形铁心在交变磁场中反复磁化,由实验得磁滞回线如图 1-1-3 所示。由图可见,当 H 增加到达饱和点后, H 减小 B 也随之减少,但当 $H=0$ 时, B 并未回到 0 值,而是 $B=B_r$, B_r 称为剩磁。若要使 $B=0$,则应使铁磁材料反向磁化,即磁励线圈反向通电,磁场强度为 $-H_c$, $-H_c$ 称为矫顽力。在反复磁化的过程中, B 的变化总是滞后于 H 的变化,称为铁磁材料的磁滞性。磁滞回线的宽窄与铁磁材料有关。

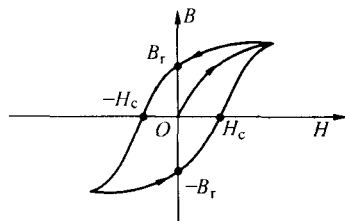


图 1-1-3 磁滞回线

1.1.4 铁磁材料的种类和用途

1. 软磁材料

软磁材料的特点是磁导率高,磁滞特性不明显,矫顽力和剩磁都小,磁滞回线较窄,磁滞损耗小,其磁滞回线如图 1-1-4a 所示。

软磁材料又分为低频和高频两种,低频软磁材料常用于工频交流电路中,有铸钢、硅钢片、坡莫合金等。硅钢片的厚度一般为 $0.3 \sim 1.0 \text{ mm}$ 。硅钢片有冷轧与热轧之分,冷轧性能较好,但价格也较贵,常用于变压器和大型电机的铁心。

高频软磁材料常用于电子电路,主要有软磁铁氧体,它是用几种氧化物的粉末烧结而成的,如锰锌铁氧体、镍锌铁氧体等。半导体收音机的磁棒、中周变压器的铁心,都是用

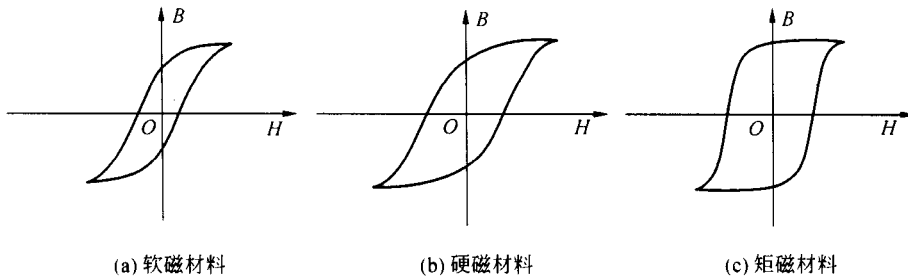


图 1-1-4 几种铁磁材料的磁滞回线

软磁铁氧体制成的。

2. 硬磁材料

硬磁材料的特点是剩磁和矫顽力均较大,磁滞性明显,磁滞回线较宽,如图 1-1-4b 所示。由于这类材料磁化后有很强的剩磁,宜制作永久磁铁。硬磁材料广泛用于各种磁电式测量仪表、扬声器等。常用的有碳钢、钴钢等。新型的硬磁材料钕铁硼合金,有极高的磁感应强度,能使永久磁铁的体积大为减少。

3. 矩磁材料

矩磁材料的特点是只要受较小的外磁场作用就能磁化到饱和,当外磁场去掉,磁性仍保持,磁滞回线几乎成矩形,如图 1-1-4c 所示。计算机的存储磁心就是利用这种原理制造的,矩磁材料的 $+B$ 及 $-B$ 两种状态分别代表二进制数 0 和 1 两个数码,起到记忆的功能。

电工材料中常用的铸铁、铸钢、硅钢片的磁化曲线如图 1-1-5 所示。

例 1-1 有一个环形螺线管如图 1-1-2a 所示,匝数 $N = 1000$ 匝,电流 $I = 4\text{A}$,螺线管外径 $D_1 = 0.3\text{m}$,内径 $D_2 = 0.22\text{m}$,试分别计算以媒质为纸心、铸钢心时的磁场强度和磁通。

解 磁路平均长度

$$l = \pi \frac{D_1 + D_2}{2} = \pi \frac{0.3 + 0.22}{2} = 0.816(\text{m})$$

螺线管截面积

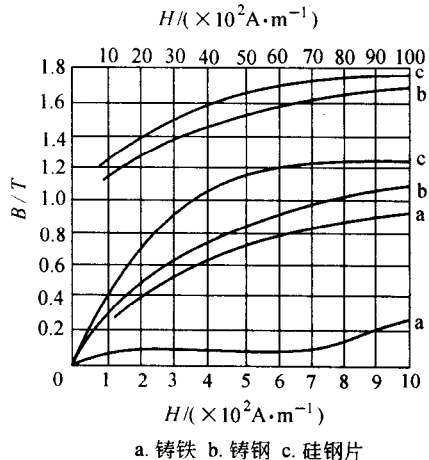


图 1-1-5 铸铁、铸钢、硅钢片的磁化曲线

$$S = \pi \left(\frac{D_1 - D_2}{4} \right)^2 = \frac{\pi}{16} (0.3 + 0.22)^2 = 1.26 \times 10^{-3} (\text{m}^2)$$

磁场强度为

$$H = \frac{N \cdot I}{l} = \frac{4 \times 1000}{0.816} = 4902 (\text{A/m})$$

当媒质为纸心时的磁感应强度、磁通分别为

$$B = \mu_0 H = 4\pi \times 10^{-7} \times 4902 = 6.16 \times 10^{-3} (\text{T})$$

$$\Phi = BA = 6.16 \times 10^{-3} \times 1.26 \times 10^{-3} = 7.76 \times 10^{-6} (\text{Wb})$$

当媒质为铸钢心时,在图 1-1-5 上由 $H=4902 \text{A/m}$ 查出 $B=1.55 \text{T}$,则

$$\Phi = BA = 1.55 \times 10^{-3} \times 1.26 \times 10^{-3} = 1.95 \times 10^{-3} (\text{Wb})$$

例 1-2 有一直流电磁铁的磁路如图 1-1-6 所示。U 形铁心由硅钢片叠成,磁路平均长度 $l_1=0.2 \text{m}$,截面积 $A_1=4 \times 10^{-4} \text{m}^2$ 。衔铁材料为铸钢,磁路平均长度 $l_2=0.08 \text{m}$,截面积 $A_2=5 \times 10^{-4} \text{m}^2$ 。两处气隙共长 $l_0=0.002 \text{m}$,线圈匝数 $N=1000$ 匝。若要使气隙的磁通 $\Phi=5 \times 10^{-4} \text{Wb}$,试求所需的励磁电流 I 。

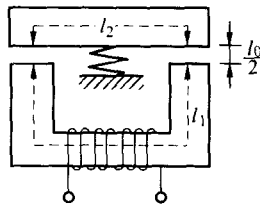


图 1-1-6 电磁铁结构

解 磁路中磁通 Φ 是相同的,但由于 U 形铁心和衔铁的截面不同,因此其磁感应强度 B 也不同,气隙处截面积近似为 U 形铁心截面积。U 形铁心及气隙的磁感应强度为

$$B_1 = \frac{\Phi}{A_1} = \frac{5 \times 10^{-4}}{4 \times 10^{-4}} = 1.25 (\text{T})$$

衔铁处的磁感应强度为

$$B_2 = \frac{\Phi}{A_2} = \frac{5 \times 10^{-4}}{5 \times 10^{-4}} = 1.0 (\text{T})$$

查图 1-1-5 的基本磁化特性曲线得到 U 形铁心、衔铁的磁场强度为

$$H_1 = 1200 \text{A/m}, H_2 = 750 \text{A/m}$$

气隙的磁场强度为

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_1}{\mu_0} = 10^6 (\text{A/m})$$

电磁铁所需的磁动势及励磁电流为

$$F_m = H_1 l_1 + H_0 l_0 + H_2 l_2 = 2048 (\text{A})$$

$$I = \frac{F_m}{N} = \frac{2048}{1000} = 2.048 (\text{A})$$

1.1.5 电磁感应

磁场的特性主要有两个方面:一是磁场对载流导体有作用力,这是电动机的理论基