

SCHAUM'S  
ouTlines

全美经典 学习指导系列

# 电机与机电学

[美] S. A. 纳萨尔 著

綦慧 译

涵盖全部课程基础

280余道精选习题及其详解

迅速提高解题能力

大大节省学习时间

最佳的自学、自测参考书



科学出版社

麦格劳-希尔教育出版集团

全美经典学习指导系列

# 电机与机电学

[美]S.A.纳萨尔 著

蔡慧译

科学出版社

麦格劳-希尔教育出版集团

2002

## 内 容 简 介

本书为全美经典学习指导系列丛书之一。

本书可作为大学工科基础课教学参考书。全书共有8章,主要介绍了电机和电动机的基本理论,内容涵盖了磁路、功率变压器、机电系统、直流电机、多相感应电动机、同步电机、单相电动机和永磁机、电动机的电气控制等。每章的结构相同,先介绍基本理论,然后给出了习题的详细求解过程,最后列出了一些补充习题,所有习题都附有答案。

本书可作为大专院校电气类、电子信息类、计算机类和其他有关专业学生的辅导教材,也可供有关工程技术人员参考。

**Syed A. Nasar: Schaum's Outlines Electric Machines and Electromechanics, Second Edition**  
**ISBN: 0-07-045994-0**

Copyright © 1998, 1981 by the McGraw-Hill Companies, Inc.

Authorized translation from the English language edition published by McGraw-Hill Companies, Inc.

All rights reserved.

本书中文简体字版由科学出版社和美国麦格劳-希尔教育出版集团合作出版,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

**图字:01-2001-1760号**

### 图书在版编目(CIP)数据

电机与机电学/[美]纳萨尔(Nasar S.A.)著;蔡慧译. —北京:科学出版社,2002  
(全美经典学习指导系列)

ISBN 7-03-009048-9

I. 电… II. ①纳…②蔡… III. 电机学—高等学校—教学参考资料 IV. TM3

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第074084号

**科学出版社 出版**

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**万源印刷厂 印刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2002年1月第一版 开本:A4(890×1240)

2002年1月第一次印刷 印张:9 3/4

印数:1—5 000 字数:274 000

**定价:17.00元**

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

## 前 言

在大多数工程类学校中，电机和机电学是大学电气工程专业的必修课程。本书的目的就在于为此课程提供辅助教材，它也可作为本课程的复习资料，或用作自学者的入门教材。在每一章中均对有关的主题内容加以简短的回顾，并对关键公式加以总结。在某些情况下，对公式的推导过程以例题的形式进行阐述。

本书所覆盖的主题范围相当广泛。本书从简单的直流磁路研究开始，以直流和交流电机电气控制的相关章节结束，覆盖了整个课程研究范围的 400 多道例题，有助于读者更好地理解和分析。

在第二版中保留了第一版的题目。第 2 章详细阐述了变压器等值电路的变换，增加了一节仪用变压器的内容，并增加了一节节能交流电动机的内容。在修订中主要对第 7 章的内容加以调整，删除了线性感应电动机、电磁泵和单极电机的相关章节，该章的研究重点在于小型电动机，所以增加了单相感应电动机的起动、永磁电动机和磁滞电动机的相关章节。在第 8 章中，功率半导体器件的内容完全保留。最后在每一章中都增添了新的习题。

S. A. 纳萨尔

*S. A. Nasir*

# 目 录

## 前 言

<b>第1章 磁路</b> .....	<b>1</b>
1.1 引言和基本概念 .....	1
1.2 磁导率和饱和 .....	2
1.3 磁路定律 .....	3
1.4 交流作用和损耗 .....	3
1.5 叠压系数 .....	4
1.6 边缘效应 .....	4
1.7 磁场中的能量储存 .....	4
1.8 电感计算 .....	4
1.9 带有永久磁铁的磁路 .....	5
习题解答 .....	7
补充习题 .....	15
<b>第2章 功率变压器</b> .....	<b>17</b>
2.1 变压器运行和法拉第定律 .....	17
2.2 变压器的电动势方程 .....	18
2.3 变压器的损耗 .....	18
2.4 非理想变压器的等值电路 .....	18
2.5 变压器试验 .....	19
2.6 变压器的连接 .....	20
2.7 自耦变压器 .....	22
2.8 仪用变压器 .....	22
习题解答 .....	23
补充习题 .....	30
<b>第3章 机电系统</b> .....	<b>33</b>
3.1 机电能量转换 .....	33
3.2 力和力矩方程 .....	34
3.3 机电动力学 .....	35
3.4 机电模拟 .....	37
习题解答 .....	37
补充习题 .....	45
<b>第4章 直流电机</b> .....	<b>49</b>
4.1 工作原理 .....	49
4.2 换向器的作用 .....	50
4.3 电枢绕组及物理特征 .....	50
4.4 电动势方程 .....	51
4.5 转矩方程 .....	52
4.6 转速方程 .....	52
4.7 电机分类 .....	52
4.8 气隙磁场和电枢反应 .....	52

4.9 电抗电动势和换向 .....	53
4.10 并网发电机中电压上升时的饱和效应 .....	55
4.11 损耗和效率 .....	56
4.12 电动机和发电机特性 .....	56
4.13 直流电动机动态特性 .....	56
习题解答 .....	57
补充习题 .....	65
<b>第5章 多相感应电动机 .....</b>	<b>68</b>
5.1 概述 .....	68
5.2 电枢绕组的磁动势 .....	68
5.3 旋转磁场的形成 .....	70
5.4 转差; 电机等效电路 .....	70
5.5 等效电路计算 .....	72
5.6 能量-效率感应电动机 .....	73
5.7 根据试验数据得到的近似等效电路参数 .....	74
习题解答 .....	75
补充习题 .....	82
<b>第6章 同步电机 .....</b>	<b>85</b>
6.1 类型和结构特点 .....	85
6.2 发电机和电动机运行; 电动势方程 .....	85
6.3 发电机空载、短路和电压调节特性 .....	87
6.4 隐极式电机的功率角特性 .....	88
6.5 隐极式电动机的特性 .....	89
6.6 凸极式同步电机 .....	89
6.7 同步电机的过渡过程 .....	90
习题解答 .....	92
补充习题 .....	103
<b>第7章 单相电动机和永磁电机 .....</b>	<b>106</b>
7.1 小型交流电动机 .....	106
7.2 单相感应电动机分析 .....	106
7.3 单相感应电动机的起动 .....	106
7.4 永磁电机 .....	108
7.5 磁滞电动机 .....	112
习题解答 .....	113
补充习题 .....	118
<b>第8章 电动机的电气控制 .....</b>	<b>120</b>
8.1 概述 .....	120
8.2 功率固态元件 .....	120
8.3 波形的有效值和平均值 .....	124
8.4 直流电动机控制 .....	124
8.5 交流电动机的控制 .....	128
8.6 SCR 换向 .....	131
习题解答 .....	132
补充习题 .....	142
<b>附录 .....</b>	<b>145</b>

### 1.1 引言和基本概念

电机和电动机械均是由耦合的电路和磁路组成。磁路是指磁通的路径,正如电路是电流的路径一样。电流和永磁体均可提供磁通。在电机中,载流导体与磁场(由导体中的电流或永磁体产生)的相互作用将导致电机的能量转换。

如图1-1所示,将一个长度为  $l$  的导体置于一对磁极之间,设导体中流过电流  $I$ ,导体与磁通线的相对位置在图上标出。实验表明此时该导体将受到力  $F$  的作用,力的大小为

$$F = BIl \quad (1.1)$$

此处,  $B$  是沿磁力线方向的磁通密度  $\mathbf{B}$  的大小,其国际单位为特斯拉(T)(此后还将对其等效单位加以简介)。式(1.1)表明  $B$  可定义为单位电流的作用力<sup>①</sup>。式(1.1)就是安培定律的一种描述;当导体相对于磁力线为任意方向时,存在着更为一般的描述:

$$\mathbf{F} = I\mathbf{L} \times \mathbf{B} \quad (1.2)$$

其中  $\mathbf{L}$  是在电流方向上数值  $l$  的矢量描述;且作用力垂直于导体和磁场(图1-2)。描述力或力矩产生的安培定律[式(1.1)或式(1.2)]为电机的运转奠定了分析基础。

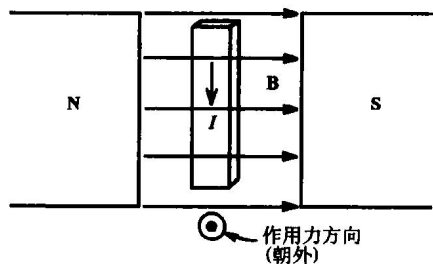


图 1-1

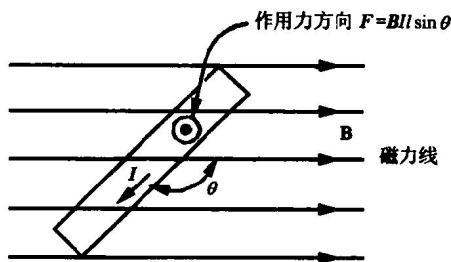


图 1-2

$\mathbf{B}$  穿过某一给定(开放或闭合)表面的通量称为通过该平面的磁通,记为  $\phi$ ,即

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS \quad (1.3)$$

其中  $\mathbf{n}$  是该表面基本单元  $dS$  外法线方向的单位矢量(图1-3)。如果  $\mathbf{B}$  的大小均匀且与该平面正交,则对于区域  $A$ ,由式(1.3)可得

$$\phi = BA \quad (1.4)$$

因此

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (1.5)$$

磁通的国际单位是韦伯(Wb)。式(1.5)表明  $B$  或  $\mathbf{B}$  的单位可表述为  $\text{Wb}/\text{m}^2$ ,即  $1\text{T} = 1\text{Wb}/\text{m}^2$ 。

安培环路定律描述了电流和磁场之间的相互关系,其中一种表述方式为

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = I \quad (1.6a)$$

其中  $\mathbf{H}$  为电流  $I$  所形成的磁场强度(单位符号为  $\text{A}/\text{m}$ )。根据式(1.6a),沿一闭合路径的  $\mathbf{H}$  线积分等于该路径所环绕的电流。若电流穿过该闭合路径  $N$  次(如图1-4)则式(1.6a)变为

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = NI \equiv \mathcal{F} \quad (1.6b)$$

<sup>①</sup> 疑有误,  $B$  的大小常见定义为“通过单位电流的单位长度导体上的作用力”。

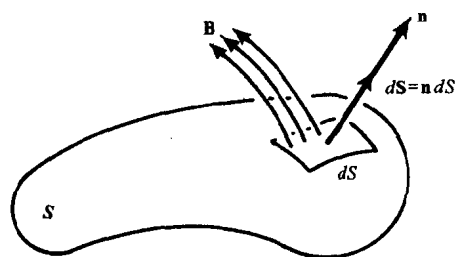


图 1-3

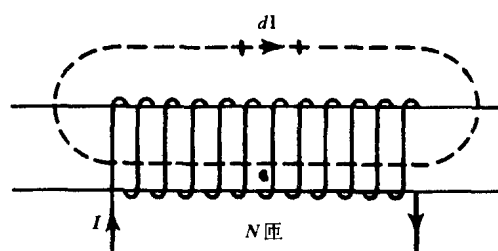


图 1-4

其中  $\mathcal{F}$  (或  $NI$ ) 称为磁动势。严格地讲,  $\mathcal{F}$  的单位与电流相同, 即为安培。然而在本书中仍遵循惯例, 引用  $\mathcal{F}$  的单位为安匝 (At), 即将匝数  $N$  看作是无量纲的单位。

磁通、磁通密度、磁动势和磁导率 (见 1.2 节) 是评价磁路性能的基本量。磁通  $\phi$  和磁动势  $\mathcal{F}$  之间的相互关系为

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} \quad (1.7)$$

其中  $\mathcal{R}$  是磁路的磁阻。

### 1.2 磁导率和饱和

在各向同性的材料介质中, 由移动的电荷 (电流) 决定的  $\mathbf{H}$  和同时依赖于介质特性的  $\mathbf{B}$  之间满足下式描述的关系:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.8)$$

其中  $\mu$  为介质的磁导率, 计量单位为亨利/米 (H/m) (关于亨利, 见 1.8 节)。而在真空中, 式 (1.8) 则表示为

$$B = \mu_0 H \quad (1.9)$$

其中  $\mu_0$  是真空磁导率, 取值为  $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。

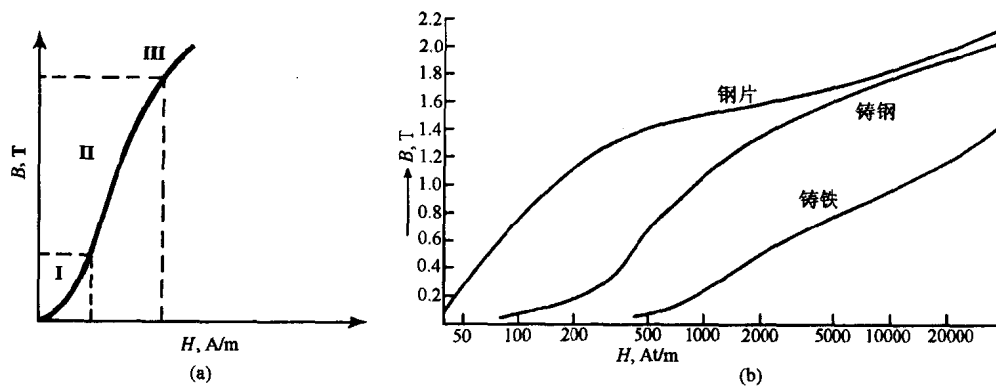


图 1-5

电机的铁心材料通常是铁磁体。B 相对于 H 的变化是非线性的, 如图 1-5(a) 中的典型饱和曲线所示。很明显, 在区域 I、II 和 III 中曲线的斜率依赖于磁通密度, 从而我们可以得到多种磁导率的概念。将式 (1.8) 重写为

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H \quad (1.10)$$

其中  $\mu$  是磁导率,  $\mu_r = \mu / \mu_0$  被称为相对磁导率 (属于无量纲量)。  $\mu$  和  $\mu_r$  沿 B-H 曲线随着 H 的变化而变化。下面计算相对磁导率, 即常数  $\mu_0$  被提取公因子。B-H 曲线的斜率被称为微分磁导率:

$$\mu_d \equiv \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \quad (1.11)$$

定义初始磁导率为

$$\mu_i \equiv \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H} \quad (1.12)$$



区域 I 中(相对)磁导率等于初始磁导率,近似为常数。在这三个区域内,曲线上某一点的  $B$  相对于  $H$  的比值被称为平均磁导率:

$$\mu_a \equiv \frac{1}{\mu_0} \frac{B}{H} \quad (1.13)$$

不同的铁磁材料具有不同的饱和曲线,如图 1-5(b)所示。

### 1.3 磁路定律

在某些方面,磁路与直流阻性电路类似,其相似性可由表 1-1 表述。

表中  $l$  表示长度,  $A$  表示电路中电流或磁路中磁通穿过的路径横截面积。然而在磁路中  $l$  是磁通路径的平均长度。由于  $\phi$  类似于  $I$ ,  $\mathcal{R}$  类似于  $R$ , 串联或并联的电阻定律同样适用于磁阻。电阻  $R$  和磁阻  $\mathcal{R}$  的基本区别在于前者与能量损耗有关(其变化率是  $I^2 R$ ), 后者则不是;而且磁通会经过漏磁路(图 1-6), 而电路电流通常不会。

表 1-1 直流电路和磁路的相似点比较

电 路	磁 路
欧姆定律, $I = V/R$	$\phi = \mathcal{F}/\mathcal{R}$
电 阻, $R = l/\sigma A$	磁 阻, $\mathcal{R} = l/\mu A$
电 流, $I$	磁 通, $\phi$
电 压, $V$	磁 通 势, $\mathcal{F}$
电 导 率, $\sigma$	磁 导 率, $\mu$
电 导, $G$	磁 导, $\rho$

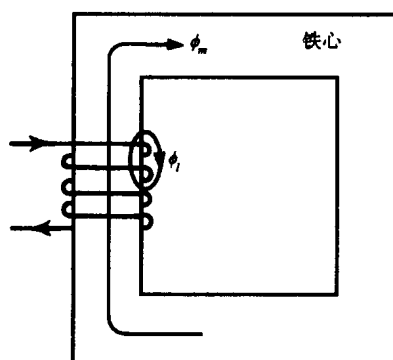


图 1-6 漏磁通  $\phi_l$  的路径

### 1.4 交流作用和损耗

如果磁动势是交流量,图 1-5 的  $B-H$  曲线将变为图 1-7 中的对称磁滞回环。环内面积正比于每周的能量损耗(以热量的形式);该能量损耗被称为磁滞损耗。

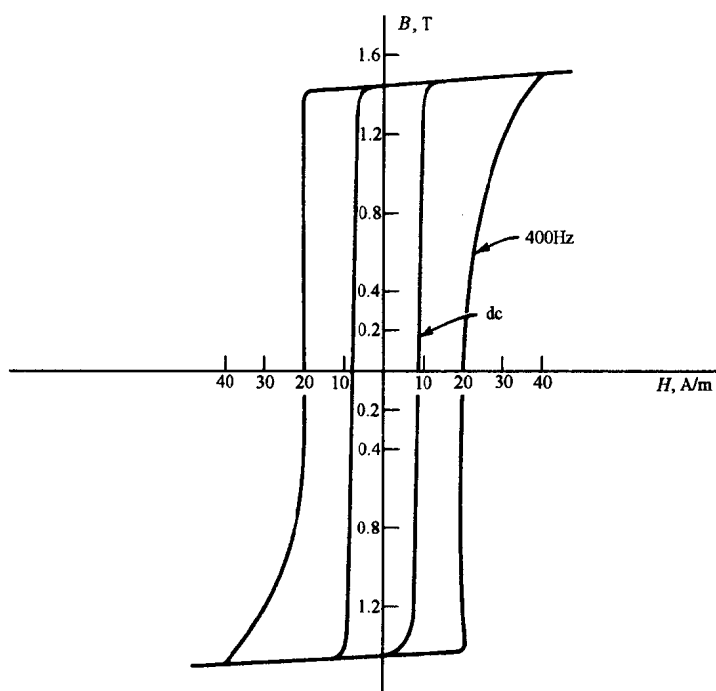


图 1-7 0.002 芯  $\delta$  合金卷绕式铁心的带状磁滞回环

在铁心材料中感应的涡流电流是交流磁路的另一特征。该磁路由流过交变电流的线圈激励产生。由磁滞和涡流电流产生的损耗都被称为铁心损耗或铁损,近似满足

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 t^2 \text{ (W/kg)} \quad (1.14)$$

$$P_h = K_h f B_m^{1.5 \sim 2.5} \text{ (W/kg)} \quad (1.15)$$

在式(1.14)和式(1.15)中,  $B_m$  是最大磁通密度,  $f$  是交流频率,  $K_e$  是依赖于材料电导率和厚度的常系数,  $K_h$  是另一个常系数,  $t$  是叠片厚度(见 1.5 节)。

### 1.5 叠压系数

为了降低涡流损耗,铁心由片间具有非常薄的绝缘层的叠片或薄片叠压而成。叠片沿着与磁通平行的方向排列,如图 1-8(b)所示。涡流损耗近似正比于叠片厚度的平方。大多数电机中的叠片厚度为 0.05~0.5mm。叠压会增大铁心体积。含有磁性材料部分的实际体积与铁心总体积的比值称为叠压系数,见表 1-2。

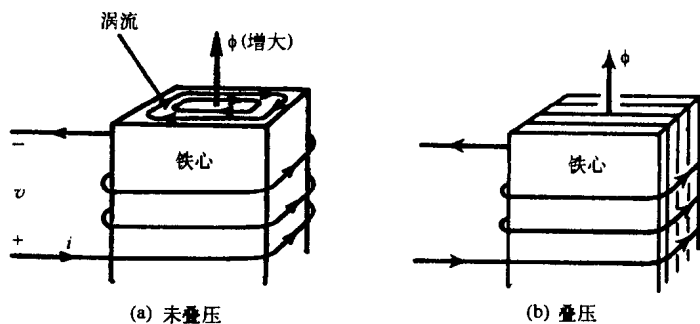


图 1-8

表 1-2

叠片厚度, mm	叠压系数
0.0127	0.50
0.0254	0.75
0.0508	0.85
0.10~0.25	0.90
0.27~0.36	0.95

由于磁滞损耗正比于磁滞回环的面积,所以常用具有狭窄磁滞环的高质量铁磁材料构成电机铁心。卷绕式铁心的损耗也较小。附录 C 给出了某些铁心材料的磁化特性。

### 1.6 边缘效应

如图 1-9 所示,在沿着由空气相隔的磁铁边缘出现的磁力线即为边缘效应。该效应随着气隙面积、气隙长度的增大而增强。

### 1.7 磁场中的能量储存

在给定体积  $v$  的区域内,磁场储存的势能  $W_m$  是如下对体积的积分:

$$W_m = \frac{1}{2} \int_v B \cdot H dv = \frac{1}{2} \mu \int_v H^2 dv = \frac{1}{2\mu} \int_v B^2 dv \quad (1.16)$$

### 1.8 电感计算

电感定义为单位电流产生的全磁链:

$$L \equiv \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} \quad (1.17)$$

电感的单位为亨利(H)。由式(1.17)可知  $1H = 1Wb/A$ 。

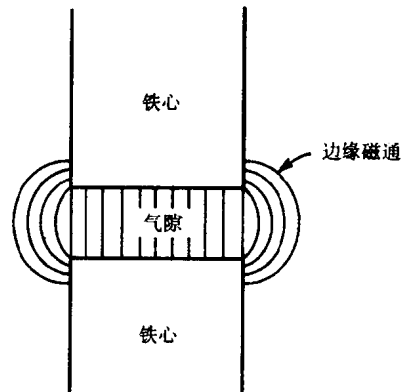


图 1-9

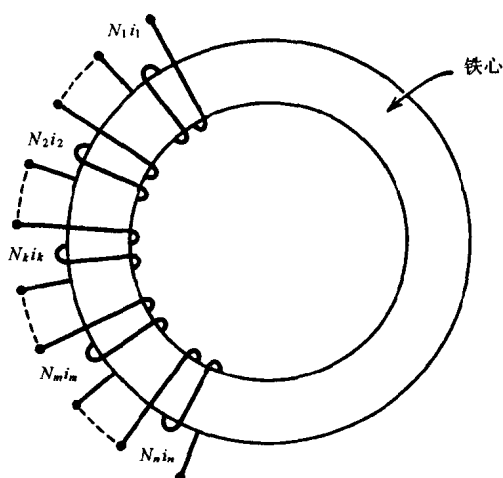


图 1-10

对于  $n$  个独立线圈绕成的磁环,如图 1-10 所示,存在  $n^2$  个电感量:

$$L_{pq} \equiv \frac{\text{由第 } q \text{ 个线圈中的电流产生的链接于第 } p \text{ 个线圈的磁通}}{\text{第 } q \text{ 个线圈中的电流}} = \frac{N_p(k_{pq}\phi_q)}{i_q} \quad (1.18)$$

其中,  $k_{pq}$  是线圈  $q$  交链于线圈  $p$  的磁通系数,称为两线圈之间的互感系数。根据定义,线圈  $q$  和线圈  $p$  之间有漏磁通。因此  $k_{pq} \leq 1$ 。当式(1.18)中两个脚标相同时,电感被称为自感;脚标不同时,该电感被称为线圈  $p$  和  $q$  之间的互感。电感量是对称的,即对于所有的  $p$  和  $q$  都有

$$k_{qp} = k_{pq} \quad \text{和} \quad L_{qp} = L_{pq} \quad (1.19)$$

采用磁路参数的形式表述  $L_{pq}$ ,将  $\phi_q = N_q i_q / \mathcal{R}$  代入式(1.18),得到

$$L_{pq} = \frac{k_{pq} N_p N_q}{\mathcal{R}} = k_{pq} N_p N_q \rho \quad (1.20)$$

其中  $\mathcal{R}$  是磁路磁阻,  $\rho$  是磁导。将  $l/\mu A$  (磁路中  $l$  和  $A$  已知)代替式(1.20)中  $\mathcal{R}$ ,得到

$$L_{pq} = \left( \frac{\mu A}{l} \right) k_{pq} N_p N_q \quad (1.21)$$

利用式(1.21),计算等式(1.17)所示的电感。同样,流过电流  $i$  的电感  $L$  中储存的能量为

$$W_m = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1.22)$$

那么依据式(1.22)等式右边与式(1.16)等式右边相等可得到  $L$ 。对于一个  $n$  线圈系统,通用关系为

$$\frac{1}{2} \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n L_{pq} i_p i_q = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dv \quad (1.23)$$

### 1.9 带有永久磁铁的磁路

在 1.1 节中曾经提到永久磁铁能够产生磁场。在由永久磁铁激励的磁路中,磁铁位置在很大程度上决定着其工作状况。一系列铝镍钴合金永久磁铁的第二象限  $B-H$  特性(去磁曲线)如图 1-11 所示,几种铁氧磁铁的特性如图 1-12 所示。工业上的有效特性仍然采用 CGS 单位制表述(若需要,可利用附录 A 将其转换为 SI 单位制)。通过去磁曲线上某点  $(H_d, B_d)$  的等能量双曲线描述了能量乘积  $B_d H_d$  的大小,由原点发出的射线(图中只画出了其末梢的尾部)描述了磁导率  $B_d/H_d$  的大小。能量积的重要性可从式(1.16)中显而易见。如果能量积达到最大,则表明永久磁铁得到了充分利用。

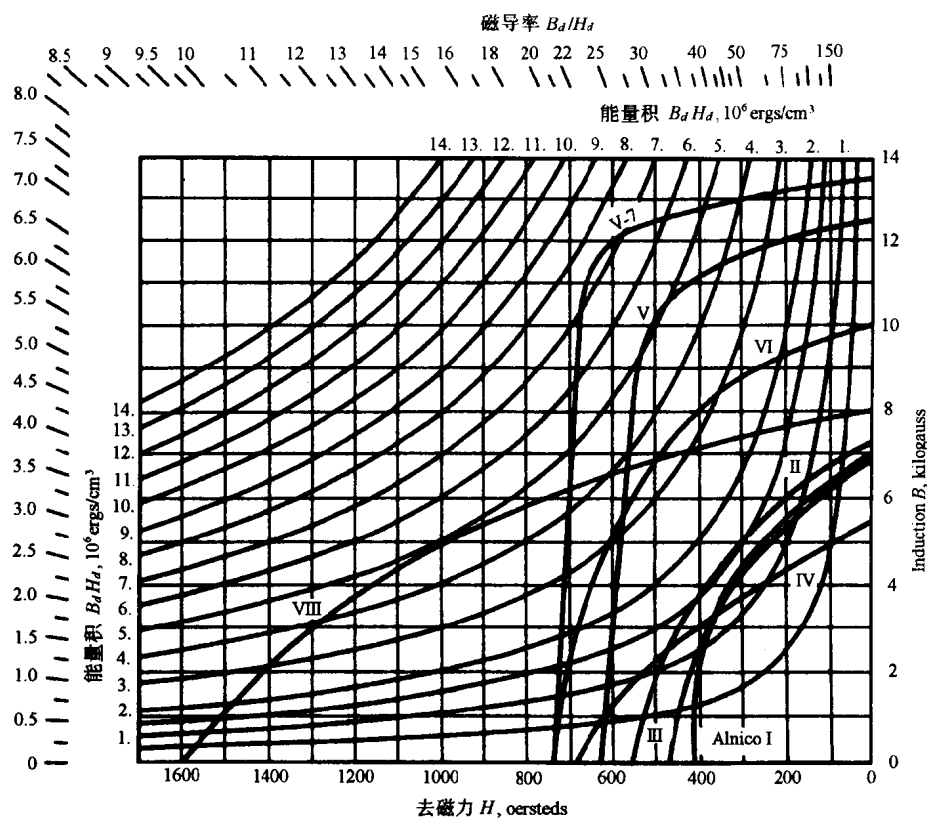


图 1-11 铝镍钴合金磁铁的去磁和能量积曲线

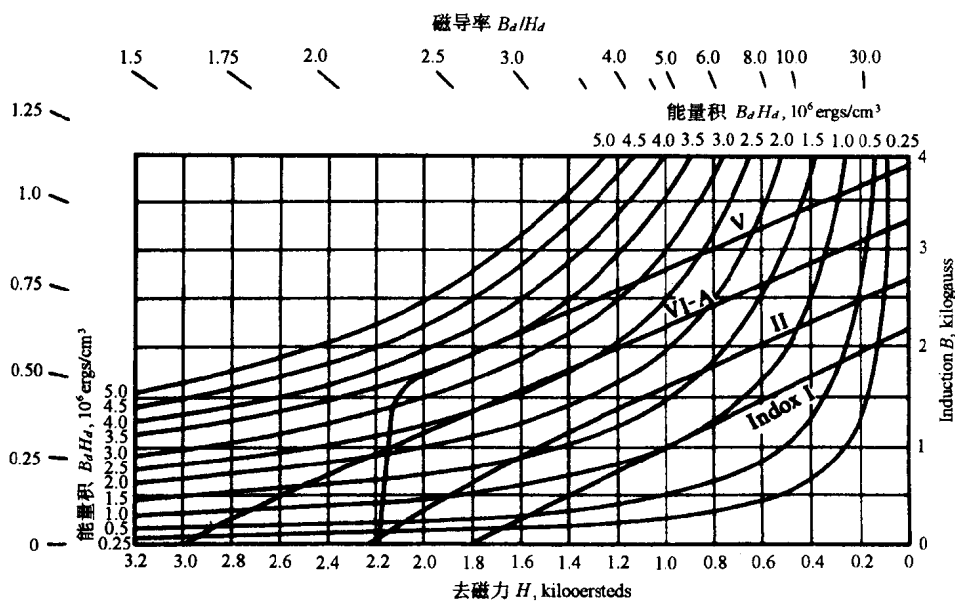


图 1-12 英多克斯钼磁铁的去磁和能量积曲线

**例 1.1** 永久磁铁的剩磁  $B_r$  是指饱和后减至零  $H$  时  $B$  的取值。矫顽力  $H_c$  是指饱和后  $B$  减小至零时对应的  $H$  值。利用图 1-11, 查找铝镍钴合金 V 的  $B_r$ 、 $H_c$  和最大能量积  $(BH)_{max}$ , 与附录 C 中表 C-1 中的数据相比较。

**解** 从去磁曲线的垂直和水平截距中分别读取  $B_r$  和  $H_c$  :

$$B_r = 12.4 \times 10^3 \text{ Gs} = 1.24\text{T}$$

$$H_c = 630 \text{ Oe} = 50\text{kA/m}$$

其中利用附录 A 转换为 SI 单位制。这些值与表 C-1 中给出的铝镍钴合金 V 范围一致。

最大能量乘积可以从与去磁曲线恰好相切于其拐点的双曲线中读取：

$$(BH)_{\max} = 5.2 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3 = 520 \text{ kJ/m}^3$$

该值大约比由表 C-1 推得的数据大 10 倍。然而，在 C G S 制中式(1.16)将转换为

$$W_m = \frac{1}{8\pi} \int B \cdot H dv$$

于是 C G S 制能量积是 SI 制能量积的  $4\pi$  倍，变换得到

$$\frac{1}{4\pi} (BH)_{\max} = \frac{5.2 \times 10^6}{4\pi} \text{ erg/cm}^3 = 41 \text{ kJ/m}^3$$

此时就与表 C-1 相一致了。

一旦确定了永久磁铁的类型，设计方法如下。根据安培定律，对于一个包括有气隙、永久磁铁部分和其他铁磁部分的磁路，

$$H_d l_m = H_g l_g + V_{m_i} \quad (1.24)$$

其中， $H_d$  = 磁铁的磁场密度，Oe

$l_m$  = 磁铁长度，cm

$H_g$  = 气隙内的磁场强度，奥斯特 = 气隙磁通密度，Gs

$l_g$  = 气隙长度，cm

$V_{m_i}$  = 其他铁磁部分的磁位降，Gi

注意，由于  $\mu_0$  是 C G S 系统单位， $H_g$  和  $B_g$  在数值上相等。

根据所需的气隙磁通可得到磁铁横截面的面积：

$$B_d A_m = K B_g A_g \quad (1.25)$$

其中， $B_d$  = 磁铁的磁通密度，Gs

$A_m$  = 磁铁横截面面积， $\text{cm}^2$

$B_g$  = 气隙磁通密度，Gs

$A_g$  = 气隙横截面面积， $\text{cm}^2$

$K$  = 无量纲的漏磁系数

确定某些普通结构漏磁系数的计算公式在题目 1.17 中给出。利用  $H_g = B_g$ ，求解式(1.25)中的  $A_m$  和式(1.24)中(忽略  $V_{m_i}$ )的  $l_m$ ，得到

$$\text{体积} = A_m l_m = \frac{B_g^2 A_g l_g K}{B_d H_d} (\text{cm}^3) \quad (1.26)$$

图 1-11 和图 1-12 中采用 C G S 制磁路的磁导率是外部磁路等效磁导  $\rho_{ge} \equiv A_g K / l_g$  与永久磁铁磁导  $\rho_m = A_m / l_m$  的比率。求解式(1.25)中的  $B_d$  和式(1.24)中(忽略  $V_{m_i}$ )的  $H_d$ ，得到该比率

$$\frac{B_d}{H_d} = \frac{A_g l_m K}{A_m l_g} = \frac{\rho_{ge}}{\rho_m} \quad (\text{C G S 单位}) \quad (1.27)$$

等式(1.27)看起来很简单，但求取  $K$  和  $\rho_{ge}$  的解析解却非常困难。假设磁导已知，式(1.27)在  $B-H$  平面上呈现为一条直线(负载线)。该直线与  $B-H$  曲线的交点是磁铁的工作点。参阅习题 1.33(c)。

## 习 题 解 答

1.1 一个无穷长直导体中通入  $I$  安培电流，求取距该导体  $r$  米处某点的磁场强度。

**解** 由图 1-13 和式(1.6)，

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = 2\pi r H_r = I \text{ 或 } H_r = \frac{I}{2\pi r} (\text{A/m})$$

从该题的几何意义可知,  $\mathbf{H}$  的径向和纵向分量是零。

- 1.2 将题 1.1 中的导体放置于空气中, 并通入 100A 电流。确定距该导体 0.05m 处某点的磁通密度。

既然  $B = \mu_0 H$ , 由题 1.1 可得

$$B_r = \mu_0 H_r = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 100}{2\pi \times 0.05} = 0.4\text{mT}$$

- 1.3 将一个矩形环放置于题 1.1 中的导体所产生的磁场中, 如图 1-14 所示。该环交链的总磁通是多少?

假设介质磁导率  $\mu$ , 由题 1.1

$$B_r = \mu H_r = \frac{\mu I}{2\pi r} (\text{T})$$

单元面积  $dA = ldr$  内的磁通  $d\phi$  为

$$d\phi = B_r dA = \frac{\mu I l}{2\pi} \frac{dr}{r}$$

则

$$\phi = \frac{\mu I l}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{\mu I l}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} (\text{Wb})$$

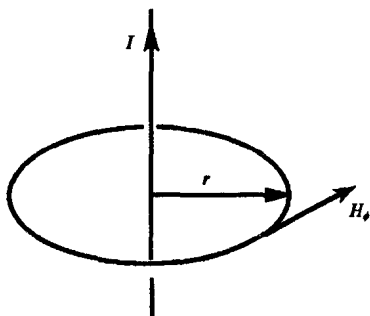


图 1-13

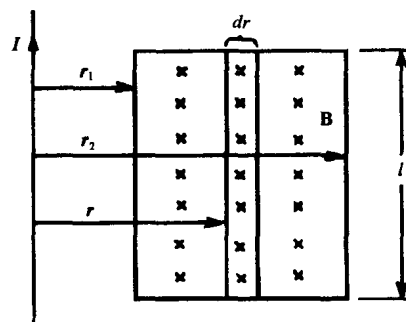


图 1-14

- 1.4 具有直径为 3cm, 平均周长为 80cm 圆形横截面的铸钢环上均匀绕制着 600 匝线圈。  
 (a) 估算能够在环内产生 0.5mWb 磁通所需要的线圈电流。  
 (b) 如果环内出现 2mm 的锯齿状气隙, 近似计算在(a)中求得的电流作用下产生的气隙磁通。  
 (c) 求取能够产生与(a)相同气隙磁通所需的电流。忽略边缘效应和漏磁。铸钢材料的磁化特性可查阅图 1-5(b)。

(a) 圆环横截面,  $A = \frac{\pi}{4} \times 3^2 \times 10^{-4} = 7.07 \times 10^{-4} \text{m}^2$

$$\text{铁心磁通密度, } B = \frac{\phi}{A} = \frac{0.5 \times 10^{-3}}{7.07 \times 10^{-4}} = 0.707 \text{ T}$$

由图 1.5(b), 在  $B = 0.707 \text{ T}$ ,  $H = 675 \text{ At/m}$  处

$$\text{磁动势} = \mathcal{F} = Hl = 675 \times 0.8 = 540 \text{ At} = NI = 600I$$

$$\text{因此, } I = \frac{540}{600} = 0.9 \text{ A}$$

(b)  $\mathcal{R}_{\text{total}} = \mathcal{R}_{\text{core}} + \mathcal{R}_{\text{air}}$ 。由(a)可得

$$\mathcal{R}_{\text{core}} = \frac{\mathcal{F}}{\phi} = \frac{540}{0.5 \times 10^{-3}} = 1.08 \times 10^6 \text{ H}^{-1}$$

$$\mathcal{R}_{\text{air}} = \frac{g}{\mu_0 A} = \frac{2.0 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times 7.07 \times 10^{-4}} = 2.25 \times 10^6 \text{ H}^{-1}$$

$$\mathcal{R}_{\text{total}} = (1.08 + 2.25)10^6 = 3.33 \times 10^6 \text{ H}^{-1}$$

$$\text{气隙磁通, } \phi_{\text{air}} = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_{\text{total}}} = \frac{540}{3.33 \times 10^6} = 0.162 \text{ mWb}$$

(c) 若保证  $\phi = 0.5 \text{ mWb}$ ,  $\mathcal{F} = R\phi = 3.33 \times 10^6 \times 0.5 \times 10^{-3} \text{ At}$

或  $\mathcal{F} = NI = 1665 \text{At}$ , 则  $I = \frac{1665}{600} = 2.775 \text{A}$ 。

- 1.5 在图 1-15 所示的磁路中,  $N = 10$  匝,  $l_g = 0.1 \text{mm}$ ,  $l_m = 100 \text{mm}$ , 叠压系数 = 0.9; 铁心材料为 M-19。计算产生 1T 气隙磁通密度所需的  $I$ 。忽略边缘效应和漏磁。

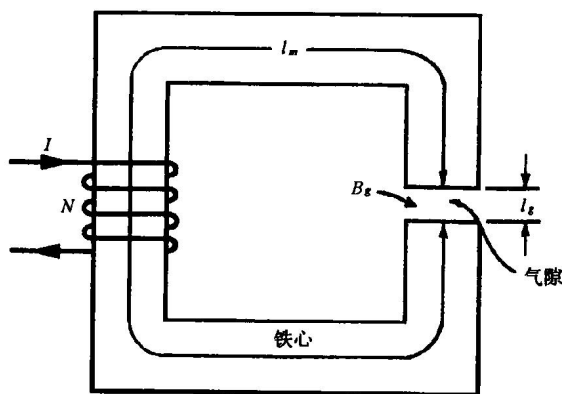


图 1-15

**解** 气隙:

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{1.0}{4\pi \times 10^{-7}} = 7.95 \times 10^5 \text{A/m}$$

$$\mathcal{F}_g = H_g l_g = (7.95 \times 10^5)(10^{-4}) = 79.5 \text{At}$$

铁心:

$$B_m = \frac{B_g}{\text{叠压系数}} = \frac{1}{0.9} = 1.11 \text{T}$$

根据附录 C 和图 C-1,  $B_m = 1.11 \text{T}$  时

$$H_m = 130 \text{A/m}, \mathcal{F} = (130)(0.0100) = 13 \text{At}$$

则所需的全部磁动势为

$$\mathcal{F}_g + \mathcal{F}_m = 79.5 + 13 = 92.5 \text{At}$$

由此得到

$$I = \frac{92.5}{10} = 9.25 \text{A}。$$

- 1.6 根据附录 C, 求取磁通密度为 1T 时, (a) AISI1020 和 (b) M-19 相对磁导率的大小。 ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ )

**解** (a)  $\mu_a = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{1}{1600} \right) \approx 500$

(b)  $\mu_b = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{1}{90} \right) \approx 8800$

- 1.7 假设某一理想铁心 ( $\mu_i \rightarrow \infty$ ), 计算如图 1-16(a) 所示的磁路气隙中的磁通密度。

**解** 在此得到与磁路相类似的电路, 如图 1-16(b) 所示。并可将其简化为图 1-16(c) 所示的形式。

由后者和表 1-1 可得

$$\mathcal{R}_g \equiv \text{气隙磁阻} = \frac{5 \times 10^{-3}}{\mu_0 (20 \times 40 \times 10^{-6})} = \frac{50}{8\mu_0}$$

$$\mathcal{R}_i \equiv \text{套管磁阻} = \frac{2 \times 10^{-3}}{\mu_0 (20 \times 20 \times 10^{-6})} = \frac{20}{4\mu_0}$$

$$\mathcal{R}_s \equiv \text{总磁阻} = \mathcal{R}_g + \frac{1}{2} \mathcal{R}_i = \frac{70}{8\mu_0}$$

$$\phi_g \equiv \text{气隙磁通} = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_s} = \frac{(50)(10)}{70/8\mu_0} = \frac{400\mu_0}{7}$$

$$B_g \equiv \text{气隙磁通密度} = \frac{\phi_g}{A_g} = \frac{400\mu_0/7}{20 \times 40 \times 10^{-6}}$$

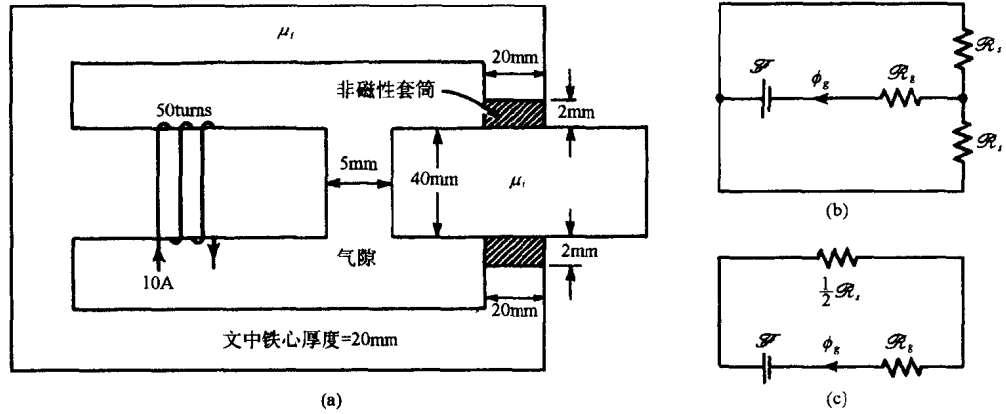


图 1-16

代入  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ , 得到  $B_g = 90\text{mT}$  或  $900\text{Gs}$ 。

1.8 具有不同横截面的合成磁路如图 1-17(a)所示; 铁心部分的  $B-H$  特性如图 1-17(b)所示。已知:  $N = 100$  匝;  $l_1 = 4l_2 = 40\text{cm}$ ;  $A_1 = 2A_2 = 10\text{cm}^2$ ;  $l_g = 2\text{mm}$ ; 漏磁通  $\phi_1 = 0.01\text{mWb}$ 。计算气隙磁通密度为  $0.6\text{T}$  时所需的  $I$ 。

由  $B_g = 0.6\text{T}$ , 得

$$H_g = \frac{0.6}{\mu_0} = 4.78 \times 10^5 \text{ A/m}$$

$$\mathcal{F}_g = (4.78 \times 10^5)(2 \times 10^{-3}) = 956 \text{ At}$$

$$B_H = B_g = 0.6 \text{ T}$$

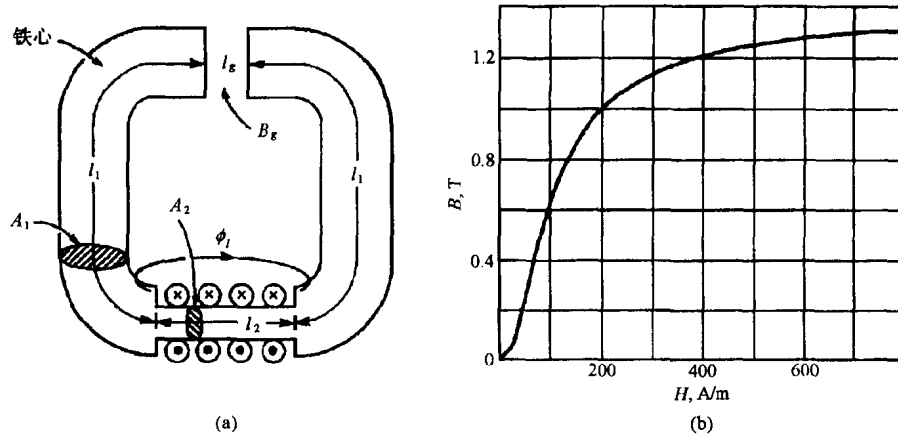


图 1-17

由图 1-17(b)可知, 当  $B = 0.6\text{T}$  时  $H = 100\text{A/m}$ , 则对于两段长度为  $l_1$  的区域存在

$$\mathcal{F}_{H1} = (100)(0.4 + 0.4) = 80 \text{ At}$$

气隙磁通  $\phi_g$  为

$$\phi_g = B_g A_1 = (0.6)(10 \times 10^{-4}) = 0.6\text{mWb}$$

由线圈内电流产生的全磁通  $\phi_c$  是气隙磁通和漏磁通之和:

$$\phi_c = \phi_g + \phi_1 = 0.6 + 0.01 = 0.61\text{mWb}$$

因此  $l_2$  段的磁通密度为

$$B_2 = \frac{\phi_c}{A_2} = \frac{0.61 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-4}} = 1.22 \text{ T}$$

由图 1-17(b)可知, 对应于该磁通密度  $H = 410\text{A/m}$ , 那么

$$\mathcal{F}_{H2} = (410)(0.10) = 41\text{At}$$

则所需的全部磁动势  $\mathcal{F}$  为

$$\mathcal{F} = \mathcal{F}_g + \mathcal{F}_{H1} + \mathcal{F}_{H2} = 956 + 80 + 41 = 1077\text{At}$$



当  $N = 100$  匝时,所需的电流为

$$I = \frac{1077}{100} = 10.77\text{A}$$

1.9 画出与图 1-17(a)所示的磁路相类似的电路。

■ 见图 1-18。

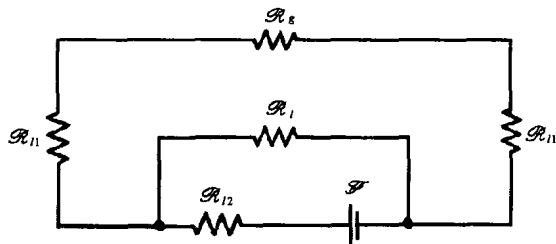


图 1-18

1.10 计算图 1-17(a)中所示线圈(全部)的自感值和漏感值。

■ 根据题 1.8,该线圈中流过的电流  $I = 10.77\text{A}$ ,产生的全磁通  $\phi_c = 0.61\text{mWb}$ 。则

$$L = \frac{N\phi_c}{I} = \frac{(100)(0.61 \times 10^{-3})}{10.77} = 5.66\text{mH}$$

$$L_l = \frac{N\phi_l}{I} = \frac{(100)(0.01 \times 10^{-3})}{10.77} = 0.093\text{mH}$$

1.11 求取在图 1-17(a)所示的磁路中,分别储存于铁心和气隙内部的磁能;

■ 由式(1.16)可得,

$$W_{\text{air}} = \frac{1}{2\mu_0} B_g^2 \times \text{vol}_{\text{gap}} = \frac{(0.6)^2}{2\mu_0} [(10 \times 10^{-4})(2 \times 10^{-3})] = 0.286\text{J}$$

由式(1.22)和题 1.10 可得,

$$W_{\text{iron}} = \frac{1}{2} LI^2 - W_{\text{air}} = \frac{1}{2} N\phi_c I - W_{\text{air}} = 0.328 - 0.286 = 0.042\text{J}$$

1.12 若叠压系数是 0.8,  $B_g$  仍为 0.6 T,求取在图 1-17(a)所示的磁路中不同部分的磁通密度。

■

$$B_g = 0.6\text{ T}$$

$$B_{l1} = \frac{B_g}{\text{叠压系数}} = \frac{0.6}{0.8} = 0.75\text{T}$$

$$B_{l2} = \frac{B_2}{\text{叠压系数}} = \frac{1.22}{0.8} = 1.525\text{T}$$

其中,  $B_2$  的大小取自于题 1.8 中求得的数值。

1.13 一个具有矩形横截面的环形铁如图 1-19 所示。其平均直径大于铁心的径向厚度,所以铁心的磁通密度是均匀的。推导环形铁的电感量描述形式,并计算当  $r_1 = 80\text{ mm}$ ,  $r_2 = 100\text{ mm}$ ,  $a = 20\text{ mm}$  和  $N = 200$  匝时电感的大小。铁心的相对磁导率是 900。

■ 由于  $A = a(r_2 - r_1)$ ,  $r = (r_2 + r_1)/2$ , 则

$$\text{磁链: } \lambda = N\phi$$

$$\text{磁通: } \phi = \frac{Ni}{\mathcal{R}} = \frac{\mu ANi}{2\pi r} = \frac{\mu a (r_2 - r_1) Ni}{\pi (r_2 + r_1)}$$

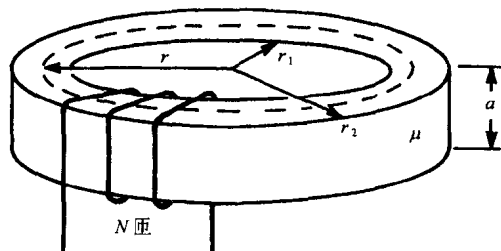


图 1-19