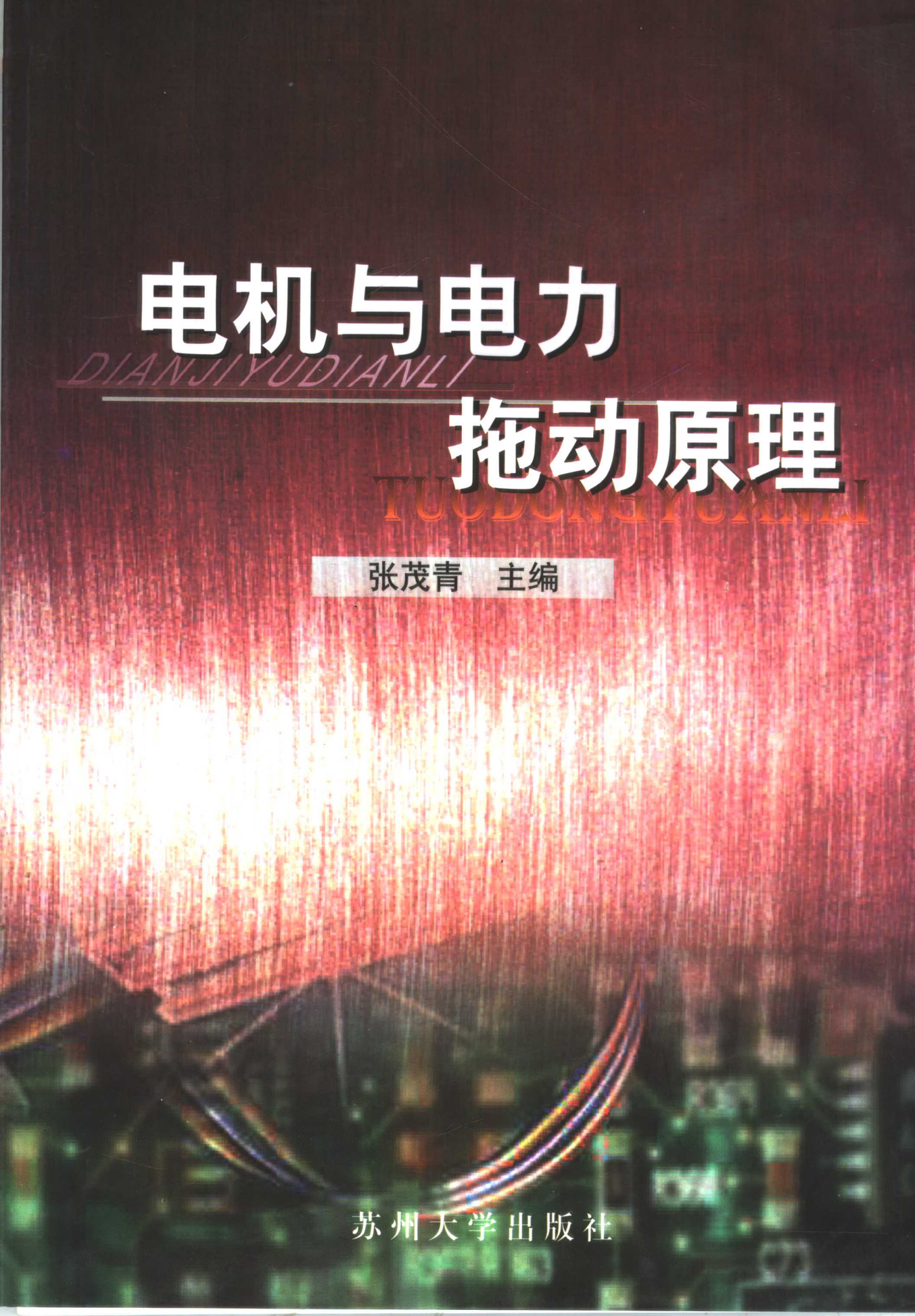




电机与电力

DIANJIYUDIANLI

拖动原理

TUODONGYUANLI

张茂青 主编

苏州大学出版社

电机与电力拖动原理

张茂青 主编

苏州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电机与电力拖动原理/张茂青主编. —苏州: 苏州大学出版社, 2001. 4
ISBN 7-81037-781-7

I. 电… II. 张… III. ①电机-理论-高等学校-教材②电力传动-理论-高等学校-教材
IV. TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 11596 号

电机与电力拖动原理

张茂青 主编
责任编辑 陈兴昌

苏州大学出版社出版发行

(地址: 苏州市十梓街 1 号 邮编: 215006)

丹阳教育印刷厂印装

(地址: 丹阳市西门外 邮编: 212300)

开本 787×1092 1/16 印张 11.25 字数 281 千

2001 年 4 月第 1 版 2001 年 4 月第 1 次印刷

印数 1—4100 册

ISBN 7-81037-781-7/TM·2(课) 定价: 18.00 元

苏州大学版图书若有印装错误, 本社负责调换
苏州大学出版社发行科 电话: 0512-5236943

前 言

本书是在苏州大学自编讲义《磁路分析与电机原理》的基础上改写而成的,在内容上力求系统性和实用性。

全书着重于基本原理、基本方法的分析和运用,在叙述上尽量做到由浅入深、简明扼要。

从路的角度来看,电机是由电路和磁路组成的,根据教学实践,电机课中增加一定的磁路知识有利于学生更好地对电机工作原理的掌握,所以书中我们对磁路的基本知识作了简要介绍。为了便于学生理解电机实验中所需的低压电器,本书还包括了常用低压电器内容,并介绍了利用低压电器进行异步电动机起动控制的几种控制线路。在附录中收录了电气常用图形符号和低压电器产品型号组成形式,以供学生查阅。

本书可作为高等院校电气工程及自动化、电子技术与应用、计算机应用、机电工程等相关专业的教材,教师可根据专业要求适当增减内容,适用于总学时为 54~72 学时的电机与电力拖动课程教学。

本书由苏州大学张茂青主编,江苏石油化工学院马正华副主编;苏州大学刘文杰、陈德炯参加了编写工作;苏州大学钱振雄教授主审了书稿。

限于编者水平,书中难免存在不完善之处,敬请读者指正。

编 者

2001 年 3 月

目 录

第一章 磁路分析中的基本概念和基本定律

- § 1.1 磁场的基本概念和基本定律 (1)
- § 1.2 磁路的基本概念和基本定律 (3)
- § 1.3 磁路与电路的比较 (6)

第二章 磁性材料的磁特性

- § 2.1 磁性材料的磁化过程 (8)
- § 2.2 磁性材料的分类 (10)

第三章 直流磁路

- § 3.1 概述 (13)
- § 3.2 无分支直流磁路的计算 (14)
- § 3.3 有分支直流磁路的计算 (18)

第四章 交流磁路

- § 4.1 交流磁路的特点 (20)
- § 4.2 磁饱和对线圈电流的影响 (20)
- § 4.3 磁滞对线圈电流的影响 (22)
- § 4.4 涡流对线圈电流的影响 (22)
- § 4.5 交流磁路的计算 (24)
- 习 题 (26)

第五章 直流电机

- § 5.1 直流电机的工作原理与结构 (27)
- § 5.2 直流电机的磁场 (32)
- § 5.3 直流电机的运行原理 (40)
- § 5.4 直流电机的拖动基础 (46)
- § 5.5 他励直流电动机的起动 (49)
- § 5.6 他励直流电动机的制动 (54)
- § 5.7 他励直流电动机的调速 (58)
- 习 题 (60)

第六章 变压器

- § 6.1 变压器的基本结构 (64)
- § 6.2 变压器的工作原理 (65)
- § 6.3 变压器的运行特性 (69)
- § 6.4 单相变压器的极性 (70)
- § 6.5 三相变压器 (70)

习 题	(74)
第七章 交流异步电动机	
§ 7.1 概述	(76)
§ 7.2 异步电动机的结构	(76)
§ 7.3 异步电动机的工作原理	(78)
§ 7.4 异步电动机的基本方程式	(81)
§ 7.5 异步电动机的电磁转矩	(84)
§ 7.6 异步电动机的机械特性	(85)
§ 7.7 异步电动机的起动	(87)
§ 7.8 异步电动机的制动	(91)
§ 7.9 异步电动机的调速	(93)
习 题	(95)
第八章 控制电机	
§ 8.1 步进电机	(98)
§ 8.2 伺服电动机	(111)
§ 8.3 自整角机	(114)
习 题	(118)
第九章 低压电器	
§ 9.1 低压电器的分类	(120)
§ 9.2 熔断器	(120)
§ 9.3 刀开关和转换开关	(124)
§ 9.4 自动开关	(128)
§ 9.5 接触器	(131)
§ 9.6 继电器	(138)
§ 9.7 主令电器	(150)
§ 9.8 起动器	(154)
§ 9.9 鼠笼电动机降压起动控制线路举例	(156)
附录 I 低压电器产品全型号组成形式	(160)
附录 II	(162)

第一章 磁路分析中的基本概念和基本定律

§ 1.1 磁场的基本概念和基本定律

本章讨论磁路的基本定律,它们是进行磁路分析的基本依据.磁路的基本定律来源于磁场的某些规律,因此在讨论磁路问题之前,有必要先对物理学中有关磁场的基本概念和基本定律作一简要的复习和补充.

从场的角度来看,磁路分析的问题多属于恒定场和似稳场的问题,我们主要复习一些恒定磁场的基本概念和基本规律.

一、恒定磁场中的基本概念

1. 磁感强度 B

磁感强度是一个描述磁场性质的物理量,是一个矢量和点函数.它反映了运动电荷被引入磁场中要受到磁场力作用的这一性质.如有电荷 q ,在磁场中以速度 v 运动,则它所受磁场对它的作用力为

$$f=q(v \times B). \quad (1.1.1)$$

式中 B 为运动电荷所在处的磁感强度(又称磁通密度,简称磁密).

在国际单位制(SI)中,磁感强度的单位是 T(特).过去也常用 Gs(高斯)作单位,两者之间的关系为

$$1\text{T}=10^4\text{Gs}.$$

磁感强度是一个点函数,又是一个矢量,所以磁场可以形象地用一簇磁感线表示.规定磁感线上各点的切线方向与各点的磁感强度的方向相一致,并且可用磁感线的疏密来表示某磁感强度的大小.

2. 磁通量 Φ

磁通量是磁感强度的通量,简称磁通,即

$$\Phi = \int_S B \cdot dS. \quad (1.1.2)$$

式中 S 为磁场中的某一面积.

磁通是磁密对某一面积积分的积分值.它是一个标量,没有方向,但有正负. B 与 dS 的夹角小于 90° 时 Φ 为正,大于 90° 时 Φ 为负.

磁通可以形象地用穿过该面积磁感线的条数来表示.

磁通的单位在 SI 制中是 Wb(韦).

由于磁通 SI 制的单位太大,在工程上习惯采用 Mx(麦克斯韦)作磁通的单位.它们的换算关系为

$$1\text{Wb}=10^8\text{Mx}.$$

3. 磁场强度 H

描述磁场性质的另一个重要的物理量是 H (磁场强度). 磁场强度有一重要性质, 即 H 沿场中任意闭合路径的线积分只与产生磁场的电流有关, 而与场中的介质无关. 磁场强度也是一个矢量, 一个点函数.

磁场强度的单位在 SI 制中是 A/m (安/米). 过去也常用 Oe (奥),

$$1\text{Oe} = \frac{10^3}{4\pi} \text{A/m}.$$

4. 磁导率 μ

磁导率是表征磁场中介质性质的物理量, 也就是衡量磁介质导磁能力的物理量. 它是一个点函数, 决定了该点磁感强度与磁场强度之间的关系, 即

$$B = \mu H. \quad (1.1.3)$$

上式称为磁介质的性能方程. 式中 $\mu = \mu_0 \mu_r$, μ_0 称为真空磁导率, 在 SI 制中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$; μ_r 称为相对磁导率, 是一个无量纲的数.

根据物质对磁场的影响不同, 可把物质分为两大类. 一类是弱磁性物质, 如空气、木材、纸、铜、铝等, 它们的 $\mu_r \approx 1$; 另一类是强磁性物质, 如铁、钴、镍等, 它们的 μ_r 约为几十、几百甚至几万. 这类物质一般称为铁磁材料或磁性材料. 一般这些磁性材料的 μ_r 都不是常数, 它与 H 有关.

二、磁场中的基本定律

1. 磁通连续性原理 (磁学中的高斯定理)

磁通连续性原理是磁场的基本规律之一, 它的表达式为

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0. \quad (1.1.4)$$

式中 $d\mathbf{S}$ 的方向是闭合面在 dS 处法线的方向.

上式表明, 在磁场中, 通过任意闭合面的磁通量总为零. 从场图的角度看, 就是穿入某闭合面的磁感线, 必同时穿出该闭合面. 此原理对于有无介质存在的磁场都是成立的.

2. 安培环路定律

安培环路定律是磁场的另一个基本规律. 该定律反映了磁场与产生它的电流之间的关系, 即

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \Sigma I. \quad (1.1.5)$$

安培环路定律: 磁场强度沿任意闭合路径的线积分等于穿过该闭合路径所限定面积的电流的代数和.

闭合路径所限定的面积的方向按路径方向的右手定则确定. 电流的方向与此面积的方向一致时取正号, 否则取负号. 例如, 对图 1.1.1 而言, 运用安培环路定律可写成

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_1 + I_2 - I_3.$$

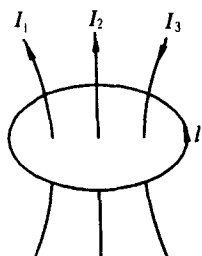


图 1.1.1

§ 1.2 磁路的基本概念和基本定律

一、磁路

在工程上常利用载流导体在磁场中受力的现象和电磁感应现象来设计制造机电能量变换器件和信号转换器件,如各种电机、电磁铁、继电器、变压器、互感器、接触器、磁放大器、电磁仪表等.为了提高效率,缩小体积,这些器件都要求能以尽可能小的电流而获得尽可能大的磁通.这就要求设法把磁场集中在一定的区域里.如果利用磁性材料组成一定的磁通回路结构,就可以达到上述的目的.这种利用磁性材料制成一定形状的回路,其周围绕有通电流的线圈,或其中装有永久磁铁,人为地造成磁通的路径,使磁通主要集中在这个路径中,这种结构的总体称为磁路.

磁性材料形成的路径之所以能集中磁感线是因为它们的磁导率比其周围的空气或其他非磁性材料的磁导率高得多的缘故.图 1.2.1 是几种常见的磁路结构.

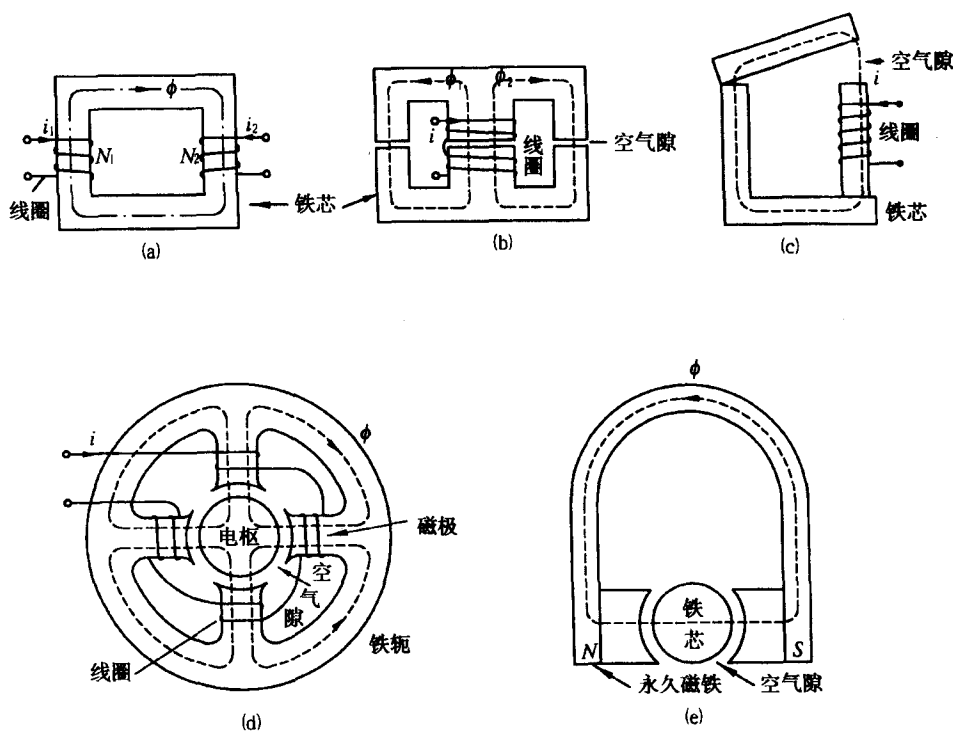


图 1.2.1

由于磁性材料的磁导率比空气磁导率最多大几万倍,因此还有少量的磁通散布在磁性材料的外面.对于这些少量的磁通(称为漏磁通),在多数情况下可以忽略不计.这种近似的方法给分析、计算磁路带来了很大的方便.在近似的条件下,磁路具备以下三个基本特点:

- (1) 可以认为磁通全部(或主要)集中在磁路中,磁路的路径就是磁感线的轨迹.
- (2) 磁路常可分为几段,使每段具有相同的截面积和相同的磁介质.在这样的磁路段中磁

场强度处处相同,方向与磁路的路径一致.

(3) 在磁路中任一截面上,磁通都是均匀分布的.

二、磁路分析中的基本物理量

磁路分析中的物理量与磁场中的物理量基本相同. 其中磁通 Φ 、磁密 B 、磁场强度 H 的含义、符号和单位完全一样. 需要补充的是磁通势和磁压.

1. 磁通势 F_m :

围绕磁路的某一线圈的电流 i 与其匝数 N 的乘积,称为该线圈电流产生的磁通势,用符号 F_m 表示,即

$$F_m = Ni. \quad (1.2.1)$$

磁通势的方向由产生它的线圈电流按右手螺旋定则确定. 磁通势的单位在 SI 制中是 A (安).

2. 磁压 U_m :

某一磁路段中的磁场强度 H 与该磁路段长度 l 的乘积称为该磁路段的磁压,用 U_m 表示,即

$$U_m = Hl. \quad (1.2.2)$$

磁压的方向与磁场强度的方向一致. 磁压的单位在 SI 制中是 A(安).

三、磁路欧姆定律

如图 1.2.2 所示,一个由同一磁性材料制成的圆环(圆环的截面为矩形),上面密绕 N 匝线圈,线圈中通过电流为 I . 由于圆形磁路的横截面是相同的,所以在圆环磁路中各处的磁密 B 的数值都相同.

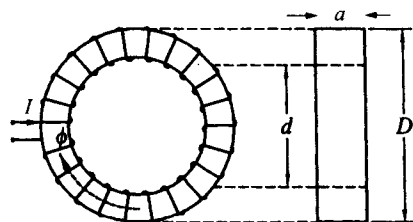


图 1.2.2

设圆环磁路中的磁密为 B ,则磁路内的磁通 $\Phi = BS$,这里 $S = \frac{a(D-d)}{2}$,为磁路的横截面积. 根据安培环

路定律,以圆环磁路的平均长度 $l = \frac{(D+d)\pi}{2}$ 为线积分的闭合路径,由式(1.1.5)左边可得

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \oint_l H \cos \alpha dl = \oint_l H dl = Hl; \quad (1.2.3)$$

由式(1.1.5)等号右边可得

$$\Sigma I = NI. \quad (1.2.4)$$

合并以上两式可得

$$Hl = NI. \quad (1.2.5)$$

式(1.2.5)就是在这圆形磁路中安培环路定律的具体表现形式. 实际上,式(1.2.5)对任何闭合的、各处截面均匀的磁路都是适用的.

如果用 $H = \frac{B}{\mu}$ 代入(1.2.5)式,可得

$$\frac{B}{\mu} l = NI, \quad (1.2.6)$$

$$B = \frac{\mu}{l} NI. \quad (1.2.7)$$

将(1.2.7)代入 $\Phi = BS$ 中,可得

$$\Phi = \frac{\mu S}{l} NI, \quad (1.2.8)$$

或写成 $\Phi = \frac{NI}{R_m}. \quad (1.2.9)$

式(1.2.9)中的 $R_m = \frac{l}{\mu S}$, 称为磁阻, NI 就是磁通势. 磁路的磁通势就是磁路的磁压, 即 $HI = NI$, 所以式(1.2.9)可写成

$$\Phi = \frac{U_m}{R_m}. \quad (1.2.10)$$

式(1.2.10)就是磁路中的欧姆定律的表达式. 磁通等于磁压与磁阻之比, 它与电路中的欧姆定律在形式上相似.

磁阻的单位在 SI 制中是 $1/H(1/\text{亨})$.

四、磁路的基尔霍夫定律

根据前述磁路的基本特点, 在磁路中, 磁通连续性原理演变为如下形式

$$\Sigma \Phi = 0, \quad (1.2.11)$$

即对于磁路中的任一包围面, 在任何时刻, 穿过该包围面的各分支磁路段磁通量的代数总和等于 0.

这一定律在形式上与电路中的基尔霍夫第一定律相似, 所以常称其为磁路的基尔霍夫第一定律.

对于图 1.2.3 所示的磁路, 在图示的参考方向下, 对包围面 A 写出磁路的基尔霍夫第一定律的方程为(假定穿出包围面的磁通为正)

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

同理, 根据前述磁路的特点, 在磁路中, 安培环路定律演变成如下形式

$$\Sigma HI = \Sigma NI. \quad (1.2.12)$$

式(1.2.12)说明, 对于磁路中的任一闭合路径, 在任一时刻, 沿该闭合路径的各段磁路磁压的代数和等于围绕此闭合路径的所有磁通势的代数和.

这是因为在磁路中, H 与 dl 的夹角不是零就是 π , 故 H 与 dl 的点积变成了 H 与 l 的乘积, 线积分变成了相加. 我们在前面分析圆环磁路时已看到了该形式的一个特例.

式(1.2.12)中等号右端各项的正负由各项磁通势的方向与沿闭合路径选定的绕行方向是否一致来确定. 一致者取正号, 不一致者取负号; 等号左端各项的正负号由磁场强度与上面选定的绕行方向是否一致来确定, 一致者取正号, 不一致者取负号.

若考虑到磁通势和磁压的符号, 式(1.2.12)也可写成

$$\Sigma U_m = \Sigma F_m. \quad (1.2.13)$$

这一规律在形式上与电路中的基尔霍夫第二定律相似, 所以常称其为磁路的基尔霍夫第二定律.

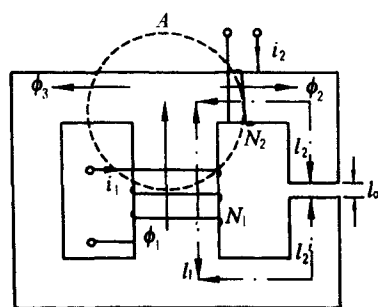


图 1.2.3

二定律.

对于图 1.2.3 所示磁路,取其右边的闭合路径,若选闭合路径绕行方向为顺时针,则该闭合路径的基尔霍夫第二定律方程为

$$H_1 l_1 + H_2 (l_2 + l_2') + H_0 l_0 = N_1 i_1 - N_2 i_2.$$

在运用磁路基尔霍夫第二定律时需要知道各磁路段的长度,但是磁路中沿内表面和外表面的长度不同,一般在计算时,取磁路的几何中心线作为平均磁路的长度.

§ 1.3 磁路与电路的比较

如上所述,磁路与电路有许多相似的地方.为了加深理解,现把恒定磁通磁路(直流磁路)与直流电阻电路中有关的物理量和基本定律作一对比,如表 1.3.1 所示.

表 1.3.1

电 路			磁 路		
基本物理量 或基本定律	符号或 表达式	单 位	基本物理量 或基本定律	符号或 表达式	单 位
电 流	I	安(A)	磁 通	Φ	韦(Wb)
电 压	$U=RI$	伏(V)	磁 压	$U_m=Hl$	安(A)
电 势	E	伏(V)	磁通势	F_m	安(A)
电 阻	$R=\frac{l}{\sigma S}$	欧(Ω)	磁 阻	$R_m=\frac{l}{\mu S}$	1/亨(1/H)
电 导	$G=\frac{1}{R}$	西(S)	磁 导	$\Lambda=\frac{1}{R_m}$	亨(H)
电流密度	$J=\frac{I}{S}$	安/米 ² (A/m ²)	磁通密度	$B=\frac{\Phi}{S}$	韦/米 ² (Wb/m ²)
电导率	σ	西/米(S/m)	磁导率	μ	亨/米(H/m)
KCL	$\Sigma I=0$		磁路 KCL	$\Sigma \Phi=0$	
KVL	$\Sigma U=0$		磁路 KVL	$\Sigma Hl=\Sigma HI$	
欧姆定律	$U=RI$		磁路欧姆定律	$U_m=R_m \Phi$	

从表 1.3.1 可见,磁路与电路有一些相似之处,因此可以用电路类似的原理去分析计算磁路的问题.但是它们之间还有很多不同之处,认识这些不同之处对正确理解磁路是很有帮助的.

与电路相比较,磁路有以下一些特点:

(1) 电流表示带电质点的定向运动,它在导体中运动时,电场力对带电质点做功而消耗能量,其功率损耗为 RI^2 ;磁通并不代表某种质点的运动, $R_m \Phi^2$ 也不代表什么功率损耗.这是磁路与电路的一个本质区别.

(2) 磁路中磁压这一概念只与某一具体磁路段相联系,而不像电路中称两点的电位差那样称两点的磁压.因为磁场是有旋场,磁场强度沿任一闭合路径的线积分不等于零,即磁场中的磁压与路径有关.

(3) 自然界存在有对电流绝缘的材料,但却尚未发现对磁通绝缘的材料.就目前所知,磁导率最小的铋的磁导率约为 $0.999824\mu_0$,空气的磁导率约为 $1.00038\mu_0$,因此空气的磁导率几

乎可以看作是最低的了. 导磁性能最好的磁性材料的相对磁导率 μ_r 约为 10^6 数量级, 而导体铜的电导率是绝缘体橡胶的电导率的 10^{20} 倍. 因此漏到绝缘体橡胶中的电流可以完全忽略不计. 由于以上的差别, 又可得出磁路的两个特点:

磁路中没有断路的情况, 即不存在有磁通势而无磁场的现象;

磁路中有漏磁现象.

如在图 1.3.1 所示的磁路中, 若线圈通以电流 I , 在磁性材料组成的磁路(俗称铁芯)中将产生磁通 Φ , 但是由于空气与铁芯的磁导率不是相差得很悬殊, 所以铁芯不能把磁通完全地限制在铁芯里, 空气中还会有少量的磁通. 通常把其闭合磁感线完全在磁路中分布的磁通称为主磁通, 如图中的 Φ ; 而把其闭合磁感线部分在磁路中、部分在空气中的磁通称为漏磁通, 如图中的 Φ_s .

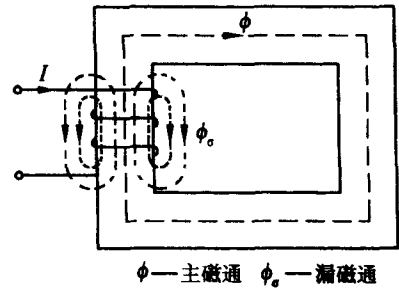


图 1.3.1

(4) 磁路几乎都是非线性的, 这是因为磁性材料中的磁特性都是非线性的缘故. 磁路分析的问题是非线性分析的问题. 前面引入的磁阻的概念和磁路欧姆定律只有在磁路中各段的材料都是线性的或者可以作为线性处理的情况下才是适当的. 因此在磁路计算中不用磁阻的概念和磁路欧姆定律, 而是直接用安培环路定律和各段磁路材料的 $B-H$ 曲线. 所谓磁性材料的 $B-H$ 曲线就是磁性材料的磁特性. 为此有必要对磁性材料的磁特性有一定的了解, 这就是第二章的内容.

第二章 磁性材料的磁特性

§ 2.1 磁性材料的磁化过程

磁性材料有很强的导磁能力,这是因为它们内部结构与非磁性材料有很大的不同.由物理学得知,在磁性材料内部存在着很多自发饱和磁化的小区域,称为磁畴.每个磁畴相当于一个自发磁化的小永磁体,具有相当大的磁矩,这个磁矩比非磁性材料中的所谓分子电流的磁矩大得多.相邻磁畴的分界层称为畴壁.

在没有外磁场时,磁性物质中的磁畴杂乱地排列,因此对外不显出磁性.在外磁场的作用下,这些磁畴在不同的条件下:① 可以发生体积的变化,即原来与外磁场方向接近的磁畴的体积扩大,原来与外磁场方向近于相反的磁畴体积缩小;② 可以发生翻转,即与外磁场方向不接近的磁畴翻转到与其接近的方向;③ 可以发生旋转,使磁畴逐渐旋转到外磁场一致的方向上来.强大的内磁场大大地增强了外磁场,因而使磁性材料对外呈现出很强的磁性.

磁性材料的磁特性的外部表现是该材料的磁感强度 B 与磁场强度 H 的关系,这个关系可由实验测定.实验时将被测磁性材料做成环形,环上绕上线圈,通过测量线圈中的电流 I ,根据式(1.2.6)可以算出磁场强度 H ;另一方面通过仪器(如磁通计等)测量相应穿过环形磁性材料横截面的磁通量 Φ ,根据 $\Phi=BS$ 算出 B .实验中 H 和 B 都从零开始,逐渐增加电流 I 使 H 增加, B 值也随之增加.当 B 值增加到某一较高的数值之后,其值虽然仍随 H 值的增加而增加,但其增加的数值却很少了,这就是磁化到了饱和状态.这一变化情况如图 2.1.1 曲线 $Oabc$ 所示.这条从完全退磁状态($H=B=0$)开始磁化测得的 B - H 曲线称为原始磁化曲线,它反映了磁性材料的磁化程度随外磁场变化的规律.下面对此原始磁化曲线作一简单的物理解释.

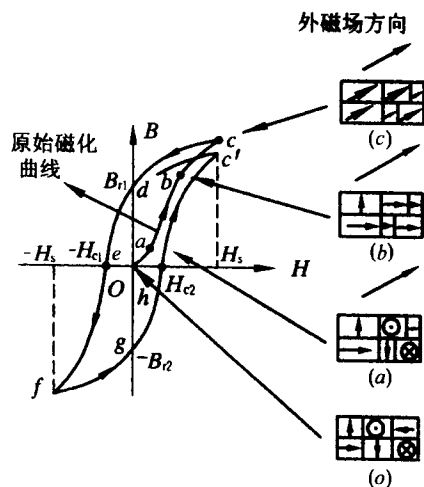


图 2.1.1

根据磁化程度,原始磁化曲线可分为四段,即 Oa 段、 ab 段、 bc 段和 c 点以上段.初始外磁场 $H=0$ 时,各磁畴的磁化方向是混乱的,故 $B=0$.其示意图如图 2.1.1 右边的 (O) 所示. H 增加时(在磁化曲线的 Oa 段),那些磁化方向与外磁场 H 成锐角的磁畴有较小的势能,与外磁场成钝角的磁畴有较大的势能;势能小的磁畴的体积会增大,而势能大的磁畴的体积会缩小,如图 2.1.1 (a) 所示.由此可见,由磁畴体积变化产生的附加磁场较小.另外此时若撤去外磁场,磁畴体积的变化还可以复原,因此 Oa 段特性是可逆的. Oa 段曲线始点的斜率,称为初始磁导率,用符号 μ_i 表示, $\mu_i = \left. \frac{dB}{dH} \right|_{H=0}$. 当 H 再增加,磁化进入第二段,此段 B 值随 H 值的变化最快,即曲线斜度最大,最大磁导率 μ_m 就产生在这一

阶段. 这是因为此段磁化在较强的外磁场的作用下, 磁性材料内部除原与外磁场方向一致的磁畴外, 其余磁畴都是相继发生翻转变而引起的. 由于磁畴朝着外磁场方向翻转, 附加磁场大增, 因此 B 值变化很大. 由于磁畴翻转时, 畴壁间的相互摩擦要消耗能量, 所以此段变化过程是不可逆的, 即外磁场消失后, 磁畴不能恢复到原来状态. 曲线 b 点的磁畴示意图如图 2.1.1(b) 所示. 由图 2.1.1(b) 可见, 此时磁畴已基本上翻转到接近外磁场的方向, 即所有磁畴方向与外磁场方向的夹角都成锐角. 当 H 继续增加, 磁化进入第三段(bc 段), 磁畴的方向随着外磁场的增加转向外磁场的方向, 此段虽然外磁场更强, 但 B 值随 H 值增加却变得缓慢. 当磁畴的方向与外磁场的方向都一致时, 磁化过程达到饱和, 此时对应于磁化曲线的 c 点. 达到饱和的磁感强度和磁场强度称为饱和磁感强度和饱和磁场强度, 分别用符号 B_s 和 H_s 表示. 当达到饱和点 c 点之后再继续增大 H , B 值随 H 值变化更小, 接近真空的情况, $\frac{dB}{dH} \approx \mu_0$. 这是由于在此段中, 磁性材料中磁畴状态不再变化, B 随 H 的变化情况与真空相近. 显然, 此段特性也是可逆的.

当磁场强度 H 增加到使磁化达到饱和状态的 H_s 值以后再逐渐减小时, B 值也将随之减小. 但是, 是沿着比原始磁化曲线稍高的曲线减小的, 如图 2.1.1 中曲线 cd 段所示. 当 H 减小到零时, B 并不减小到零, 而是大于零的值 B_r , 这个对应于 $H=0$ 的 B 值称为剩余磁感强度, 简称剩磁. 要使 B 继续减小, 需加反向磁场, B 随 H 沿 de 段下降, 当 B 重新为零时, 反向磁场为 $-H_c$. 这个对应于 $B=0$ 的磁场强度 H_c 称为矫顽力. 如果继续增加反向磁场, B 值将沿 ef 段下降, f 点称为反向饱和点. f 点以下与 c 点以上情况相同, 也是饱和状态, 称为反向饱和. 如果从 f 点逐渐减小反向磁场, B 值将沿 fg 段上升, 当 $H=0$ 时, B 为 $-B_r$, 对应于 g 点. B_r 也称剩余磁感强度. 如果再把 H 从零正向增加, B 将沿 gh 段上升, h 点对应的磁场强度值 H_c 也可称矫顽力. 如果 H 从 h 点再次增加到 H_s , B 将沿 hc' 上升到 c' 点, c' 点比 c 点稍低一些. 这个差别是由于 c 点是 B 为 0 开始磁化得到的, 而 c' 点是从 $-B_r$ 开始磁化得到的. 这样反复磁化十多次, 便可得到一个差不多是闭合的对称回线, 这个回线称为磁滞回线.

需要指出的是, 以上的磁化过程, 只是一个典型的磁化过程. 实际上, 一个具体的磁性材料的磁化过程除与磁性材料有关外, 还与激磁条件, 即激磁电流的大小及变化情况有关. 所以磁性材料磁化过程还可能有下列几种情况.

(1) 铁芯被外磁场反复磁化时, 其磁化过程虽然都使它们的 B 、 H 关系曲线形成磁滞回线的形状, 但其回线的具体形状是随着外磁场最大值 H_m 的不同而有所不同的. 如图 2.1.2 所示, H_m 大的, 相应的磁感强度最大值 B_m 、剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 和磁滞回线面积也大. 当 H_m 大到一定程度上时, 再增大 H_m , 磁滞回线的形状几乎不变. 这样的磁滞回线称为极限磁滞回线. 把若干个磁滞回线的顶点连成曲线, 这曲线称为基本磁化曲线.

(2) 如果铁芯在反复磁化过程中, 磁场强度由 H_1 降到 H_2 , 然后增到 H_m , 磁感强度 B 将先沿一条小回线改变, 然后增到 B_m , 如图 2.1.3 所示. 这个小回线称为局部磁滞回线.

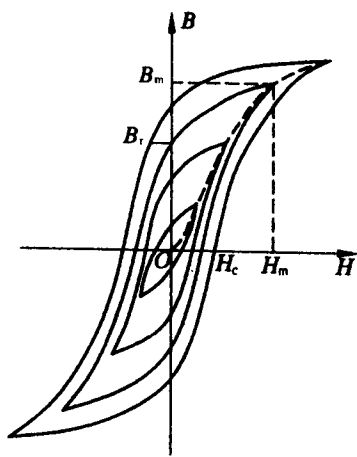


图 2.1.2

(3) 如果铁芯在恒定磁场强度 H_0 磁化的同时,还受到一个小的交变磁场 $\pm \frac{1}{2}\Delta H$ 的反复磁化,如图 2.1.4 所示,则磁感强度 B 先从 B_0 随 H 增加 $\frac{1}{2}\Delta H$ 而增加到 P 点对应的值,以后沿局部磁滞回线 PQ 变化。

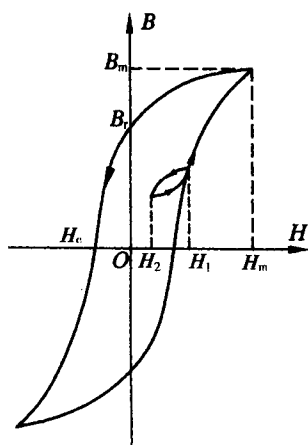


图 2.1.3

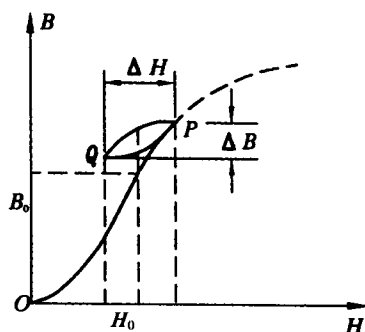


图 2.1.4

§ 2.2 磁性材料的分类

磁性材料一般都含有铁磁物质,所以磁性材料又称之为铁磁材料。

铁磁物质的元素虽然只有铁、镍、钴、钆等几种,但铁磁性元素和非铁磁性元素相互之间以各种各样的组合而构成的物质也能具有铁磁性,因此铁磁材料的种类非常多。

按照铁磁材料的磁滞回线的特点,铁磁材料一般可分为两大类:软磁材料和硬磁材料。

一、软磁材料

软磁材料的磁滞回线较窄,如图 2.2.1 所示.软磁材料具有较小的矫顽力 ($H_c < 10^2 \text{ A/m}$),磁导率高,剩磁小.常用的软磁材料有以下几种。

1. 电工纯铁

铁具有高的饱和磁感强度、高的磁导率和低的矫顽力,它的纯度越高,则磁性能越好.在工程上常用电工纯铁做直流电磁铁的材料,但在交流磁路中基本不用电工纯铁,因为电工纯铁的电阻不大,涡流损耗很大。

在要求不高的直流电磁铁中也常采用铸铁和铸钢做铁芯,以降低成本。

2. 硅钢

硅钢又称矽钢,它是铁和硅的合金.当铁中加入少量的硅(1%~4.5%)时,其磁导率就大大增加,矫顽力变小,电阻率显著提高,用于交流磁路中可使涡流损耗显著下降.为了进一步减

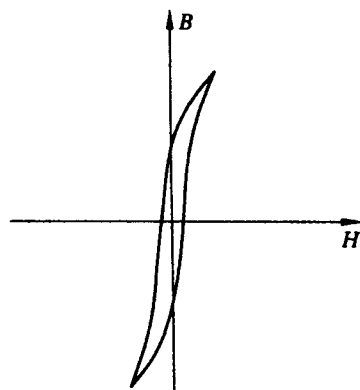


图 2.2.1

少涡流损耗,硅钢一般轧制成片状,通常称为硅钢片.硅钢片有热轧及冷轧两种,我国目前生产的热轧硅钢片的型号有 D₁₁、…、D₄₁、D₄₂等(型号中的字母 D 表示“电工钢片”,下标中的第一个数字表示含硅量;第二个数字表示铁损的大小,数字越大,铁损越小).

由于硅钢片的磁性能高,造价低,故在工程上被广泛采用.

3. 铁镍合金

铁镍合金通常被称为坡莫合金,其含镍量约为 35%~80%,其初始磁导率和最大磁导率都很高,矫顽力很小.当含镍量在 45%~50%时,铁镍合金有最大的饱和磁感强度,其最大缺点是电阻率很低.铁镍合金常用在高灵敏度的仪器仪表中.

4. 软磁铁氧体

铁氧体是一种非金属磁性材料.这种材料一般是由铁、锰、镁、铜等金属氧化物粉末按一定比例混合压制成型再经高温烧结而成的.由于它的制造方法与陶瓷近似,所以也叫磁性瓷.

铁氧体的初始磁导率 μ_i 较高,但稳定性较差.饱和磁感强度 B_s 较低,一般在 0.2T~0.4T 之间.铁氧体的居里点比常用的铁磁材料低,一般允许工作温度在 100℃ 以下.铁氧体的最大特点是它的电阻率特别高,其电阻率比铁大几百万倍以上.所以铁氧体非常适合于作高频交流磁路的铁芯.

几种软磁材料的主要性能如表 2.2.1 所示.

表 2.2.1

材料名称	初始相对磁导率	最大相对磁导率	$H_c/A \cdot m^{-1}$	$B_r/Wb \cdot m^{-2}$	$B_m/Wb \cdot m^{-2}$
电工纯铁		>15000	<96		1.8
铸 铁		200	880~1040	0.475~0.50 4750~5000	2.16
硅 钢 (热轧)	450	8000	48	0.8~1.2	1.95
硅钢(冷轧单向)	600	10000	16	8000~12000	2.00
坡莫合金 (7.85Ni)	9050	100000	4	1.1~1.4 11000~14000	1.00
锰锌铁氧体	300~5000		16		0.3
镍锌铁氧体	5~1200		32		0.35

二、硬磁材料

硬磁材料的磁滞回线较宽,如图 2.2.2 所示,具有较大的矫顽力($H_c > 10^4 A \cdot m^{-1}$),剩磁也大,磁滞现象比较显著.

表征硬磁材料性能的指标除 B_r 和 H_c 外,还有一个最大磁能积指标,即磁滞回线的退磁曲线段上, B 和 H 的乘积为最大时的值,用 $(BH)_m$ 表示.当 B_r 和 H_c 值一定时,退磁曲线越接近矩形,则材料的 $(BH)_m$ 越高.

若将硬磁材料放在外磁场中充磁(磁化)后取出,它能保留较强的磁性,且不易清除,所以它是制造永久磁铁的材料.

表 2.2.2 列出了几种硬磁材料的磁性能,其中第三代稀土硬磁

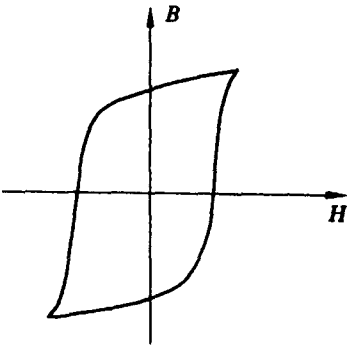


图 2.2.2