

电 工 技 术

下 册

谢 铭 谢冠虹 编

5
北京理工大学出版社

电 工 技 术

(下册)

谢、铭 谢冠虹 编

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书是根据高等工科学学校电工学课程教学指导小组审定的《电工技术》课程教学基本要求编写的,全书分上、下册。上册内容有电路的基本概念和基本定律、电路的分析方法、正弦交流电路、三相交流电路、非正弦交流电路和电路中的过渡过程。下册内容有电机、电器、控制、电工测量和电气安全。

本书内容丰富、叙述详尽、概念清楚、通俗易懂、便于自学。在内容上除满足课程教学的基本要求外,还适当加深和拓宽了一些知识,因此适用的专业面广。

本书可作为高等工科院校非电类专业本科学生学习《电工技术》课程的教材或参考书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术 下册/谢铭,谢冠虹编. -北京:北京理工大学出版社, 1996

ISBN 7-81045-107-3

I. 电… II. ①谢… ②谢… III. 电工学-高等学校-教材
N. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 00706 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 7 号)

(邮政编码 100081)

各地新华书店经售

北京房山先锋印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 印张 10.375 262 千字

1996 年 4 月第一版 1996 年 4 月第一次印刷

印数: 1—5000 册 定价: 13.65 元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

前 言

“电工学”是为高等工业学校理工科非电类专业开设的一门技术基础课。这门课内容涵盖面广，内容多、学时少的矛盾比较突出。编写一套既适合我国国情、适应科学技术发展，又能满足教学基本要求的“电工学”教材是我们长久以来的愿望。为此，我们组织部分教师，根据多年教学实践的体会，认真学习，吸收了兄弟院校的宝贵经验，编写出了这套教材。

这套教材是根据国家教委电工学课程指导小组审定的“电工学”课程教学基本要求编写的。在编写过程中注意贯彻了如下的指导思想。

第一、精选内容，确保教学基本内容。“电工学”是高等工科大学非电类专业教学计划中唯一的一门电类技术基础课，其主要内容包括电路基础、电机与控制、电子技术和电工测量、电气安全。课程的任务是使学生获得电工和电子技术方面的基本理论、基本知识和基本技能，为学习有关的后续课程和从事工程技术工作在“电”的方面打下初步基础。所以本教材注意贯彻“少而精”的原则，重视对基本内容、基本概念、基本原理和基本方法的阐述。这也是本课程的重点内容，请读者在学习中有意识地掌握好。

第二、增加必要的新知识、新技术，力求内容丰富。电工、电子技术飞速发展、日新月异。为了适应这种形势，本教材删除或削弱了部分相对陈旧的内容，适当增加了一些新内容。如电路基础部分中的受控源，双口网络；电机与控制部分中的可编程序控制器；电子技术中的中、大规模集成电路的应用等。我们希望通过这些内容的学习，能够进一步开阅读者的视野、了解电工、电子技术的发展。

第三、注重实践。对于从事工程技术的人员来说，学习的目的不仅仅是为了认识世界，更重要的是要用所学到的知识去改造世界。为此本教材注意理论联系实际。在概念的阐述上尽量避免繁琐的理论推导，注意概念的说明及工程计算。如在电机、电器部分注重使用方法及实用技术，在电子技术中注意器件的外部功能、特性及实用电路的介绍等等。

还应说明的是，本教材中有一部分是加深加宽的内容，教师可根据教学要求及学时选讲。

本教材分为《电工技术》(上、下册)和《电子技术》。《电工技术》上册由王宏甫(第三、四、五章)和张振玲(第一、二、六章)编写；下册由谢铭(第七、八、九、十、十一章)和谢冠虹(第十二、十三、十四章)编写。《电子技术》由庄效桓(第一、二章)、李燕民(第三、四章)、梁森(第五、六、七章)、刘蕴陶(第八、九章)编写。《电工技术》(上、下册)由北京理工大学黄孝和教授审稿、《电子技术》由北京理工大学成人教育学院钟治汉副教授审稿。他们认真审查了全部书稿，提出了许多宝贵的意见，并写出了评审意见。对此，我们表示衷心的感谢！

热忱欢迎广大读者、老师和同学对教材的缺点、错误和不足之处提出批评意见。谢谢！

北京理工大学电工教研室

1995. 7

目 录

第七章 磁路	(1)
7.1 基本物理量	(1)
7.1.1 磁感应强度	(1)
7.1.2 磁通	(2)
7.1.3 磁导率	(2)
7.1.4 磁场强度	(3)
7.1.5 磁动势和磁压降	(3)
7.2 磁性物质的基本性能	(4)
7.2.1 高导磁性	(4)
7.2.2 磁滞性和饱和性	(5)
7.3 磁路定律	(9)
7.3.1 磁场的基本规律	(9)
7.3.2 磁路	(10)
7.3.3 磁路的基本定律	(10)
7.4 恒定磁通的磁路计算	(14)
7.4.1 已知磁通求磁动势	(14)
7.4.2 已知磁动势求磁通	(16)
7.5 交流磁路	(17)
7.5.1 励磁电流与磁通	(17)
7.5.2 铁心损耗	(22)
7.5.3 励磁线圈中的感应电动势	(24)
7.6 电磁铁	(24)
7.6.1 直流电磁铁	(25)
7.6.2 交流电磁铁	(26)
习题	(28)
第八章 变压器	(30)

8.1 变压器的类别及构造	(30)
8.1.1 分类	(30)
8.1.2 构造	(31)
8.1.3 铭牌数据	(31)
8.2 变压器的工作原理	(34)
8.2.1 空载运行情况与变压原理	(34)
8.2.2 负载运行情况与变流原理	(36)
8.2.3 变阻抗原理与阻抗匹配	(37)
8.3 变压器的外特性及效率	(40)
8.3.1 外特性	(40)
8.3.2 效率	(42)
8.4 变压器的等值电路及相量图	(44)
8.4.1 等值电路	(44)
8.4.2 相量图	(48)
8.5 同名端的判别	(49)
8.5.1 交流判别法	(50)
8.5.2 直流判别法	(51)
8.6 专用变压器	(52)
8.6.1 自耦变压器	(52)
8.6.2 仪用变压器	(54)
8.6.3 电焊变压器	(56)
习题	(57)
第九章 交流电动机	(59)
9.1 三相异步电动机	(59)
9.1.1 异步电动机的用途与分类	(59)
9.1.2 基本结构	(60)
9.1.3 转动原理	(62)
9.1.4 三相异步电动机的定子和转子电路	(72)
9.1.5 三相异步电动机的转矩和机械特性	(80)
9.1.6 三相异步电动机的使用	(88)
9.1.7 型号及额定值	(103)
9.2 单相异步电动机	(107)

9.2.1	结构和工作原理	(107)
9.2.2	起动方法	(110)
9.3	两相异步电动机	(114)
9.3.1	结构和工作原理	(115)
9.3.2	特性曲线	(117)
9.4	步进电动机	(119)
9.4.1	反应式步进电动机的工作原理	(120)
9.4.2	单段三相反应式步进电动机	(123)
习题		(126)
第十章	直流电机	(130)
10.1	直流电机的构造和工作原理	(130)
10.1.1	直流电机的构造	(130)
10.1.2	直流电机的工作原理	(133)
10.1.3	直流电机的型号、额定值及分类	(140)
10.2	直流发电机	(144)
10.2.1	感应电动势和电磁转矩	(144)
10.2.2	电动势、功率和转矩平衡方程式	(145)
10.2.3	直流发电机的运行特性	(146)
10.3	直流电动机	(153)
10.3.1	概述	(153)
10.3.2	机械特性	(157)
10.3.3	直流电动机的运行特性	(160)
习题		(168)
第十一章	控制电器及控制线路	(171)
11.1	控制电器	(171)
11.1.1	手动电器	(171)
11.1.2	自动电器	(176)
11.2	三相异步电动机基本控制线路	(181)
11.2.1	点动控制线路	(181)
11.2.2	长动控制线路	(183)
11.2.3	点动与长动控制线路	(184)
11.2.4	多地点的控制线路	(186)

11.3 三相异步电动机的正、反转控制线路	(186)
11.3.1 正、停、反控制线路	(187)
11.3.2 正、反转控制线路	(189)
11.3.3 带点动的正、反转控制线路	(190)
11.3.4 带行程开关的正、反转控制线路	(190)
11.4 三相异步电动机顺序控制线路	(192)
11.5 三相异步电动机的时间控制线路	(194)
11.5.1 Y- Δ 起动控制线路	(195)
11.5.2 能耗制动控制线路	(195)
11.6 三相异步电动机的速度控制线路	(198)
11.7 继电器接触控制线路的阅图方法	(199)
11.7.1 电器原理图的阅读方法	(200)
11.7.2 举例	(200)
习题	(208)
附录: 电机、电器常用符号	(215)
第十二章 可编程序控制器的基本原理和应用	(220)
12.1 可编程序控制器的基本原理	(221)
12.1.1 PC 的基本原理	(221)
12.1.2 PC 的组成及系统各部分的作用	(226)
12.2 OMRON C 系列 P 型机介绍	(231)
12.2.1 结构和输入输出配置	(231)
12.2.2 各类继电器的功能及通道分配	(234)
12.2.3 指令系统	(239)
12.2.4 编程及应用举例	(255)
习题	(273)
第十三章 电气安全	(275)
13.1 触电及其预防	(275)
13.1.1 触电的几种形式	(275)
13.1.2 触电预防	(277)
13.2 保护接地和保护接零	(280)
习题	(284)
第十四章 电工测量	(285)

14.1	电工测量的基本知识	(285)
14.1.1	电工测量和测量方法	(285)
14.1.2	电工仪表的分类	(287)
14.1.3	指示仪表的误差和准确度	(289)
14.2	电流与电压的测量	(292)
14.2.1	磁电系仪表	(293)
14.2.2	电磁系仪表	(297)
14.2.3	电动系仪表	(300)
14.3	万用表	(304)
14.4	功率的测量	(312)
14.4.1	电动系功率表	(312)
14.4.2	三相功率的测量	(316)
	习题	(318)
	主要参考文献	(321)

第七章 磁 路

磁路是研究局限于一定范围内的磁场问题。磁路与电路一样，也是电工技术课程所研究的基本对象。

研究磁路，主要是研究它的基本概念、基本定律和基本分析方法。

电机和变压器等电工设备，都是通过磁场实现电能与机械能的相互转换的。在这个能量转换过程中，磁场起着主要的耦合和媒介作用。所以在研究这些电工设备时，既要掌握电路的基本理论，也要掌握磁路的基本理论，才能对各种电工设备做出全面的分析。

7.1 基本物理量

7.1.1 磁感应强度

磁感应强度是表示空间某点磁场强弱和方向的物理量。它是一个矢量，用符号 B 表示。它的定义为：单位正电荷以单位速度向与磁场相垂直的方向运动时，所受到的力。其大小为

$$B = \frac{F}{q \cdot v} \quad (7.1-1)$$

式中 q ——运动电荷量，单位 C（库仑）；

v —— q 电荷在磁场中的运动速度，单位 m/s；

F ——磁场对 q 电荷产生的作用力，单位 N；

B ——磁感应强度，单位 T（特斯拉）。

工程上磁感应强度有一个较小的单位 Gs（高斯），它们之间的

换算关系是 $1\text{T}=10^4\text{Gs}$ 。

电机、电器上的磁感应强度范围一般在 $0.2\sim 1.8\text{T}$ 。

如果磁场中各处的磁感应强度相同，称这样的磁场为均匀磁场。

7.1.2 磁通

垂直穿过某一截面的磁感应强度的通量称作磁通，用符号 Φ 表示。磁通也可以说是穿过某一截面的磁力线的总数。在均匀磁场中可以用下式表示

$$\Phi = B \cdot A \quad (7.1-2)$$

式中 A ——截面积，单位 m^2 ；

B ——磁感应强度，单位 T ；

Φ ——磁通，单位 Wb （韦伯）。

式（7.1-2）也可以写成

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (7.1-3)$$

它表明磁感应强度在数值上，可以看成与磁场方向相垂直的单位面积上所通过的磁通量。所以磁感应强度又可称为磁通密度。由此得出磁感应强度的另一种单位表示为 Wb/m^2 ，它和单位 T 的关系是 $1\text{T}=1\text{Wb}/\text{m}^2$ 。

7.1.3 磁导率

磁导率是表示物质的导磁性能的物理量，用符号 μ 来表示。单位是 H/m 。

经实验测定，真空中的磁导率 μ_0 是一个常数，其大小为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H}/\text{m}$ 。

任何一种物质的磁导率 μ 和真空磁导率 μ_0 的比值称为该物质的相对磁导率，用符号 μ_r 表示，即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (7.1-4)$$

显然, μ 是一个无单位的数值。它表明在其他条件相同时, 某物质的磁感应强度是真空中多少倍。

自然界的所有物质按磁导率的大小, 可以分为磁性物质(也称磁性材料或铁磁材料)和非磁性物质。磁性物质的相对磁导率远远大于 1, 如铁、镍、钴及其它们的合金, 还有铁氧体。而相对磁导率 $\mu \approx 1$ 的物质, 称为非磁性物质。可以认为非磁性物质的磁导率是一个常数。

7.1.4 磁场强度

磁场强度是为了进行磁场计算而引用的一个物理量。它是一个矢量, 用符号 H 表示。磁场强度的定义为: 介质中某点的磁感应强度与介质的磁导率之比。其大小为

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (7.1-5)$$

磁场强度的单位是 A/m (安/米)。

7.1.5 磁动势和磁压降

一、磁动势

磁动势是指围绕磁路的某一线圈的电流 i 与其匝数 N 的乘积, 用符号 F_m 表示, 也可直接用 Ni 表示。即

$$\left. \begin{aligned} F_m &= Ni && (\text{交流电流}) \\ F_m &= NI && (\text{恒定电流}) \end{aligned} \right\} \quad (7.1-6)$$

磁动势的方向可由产生它的线圈电流, 也称为励磁电流, 按右手螺旋定则来确定。

磁动势的单位是 A。

二、磁压降

把磁路中某一磁路段中的磁场强度 H 与该磁路段长度 l 的乘积, 称为这一磁路段的磁压降, 用符号 U_m 表示。即

$$U_m = Hl \quad (7.1-7)$$

磁压降的方向与磁场强度 H 的方向一致。

磁压降的单位是 A。

7.2 磁性物质的基本性能

7.2.1 高导磁性

磁性物质的高导磁性是指在外磁场的作用下，它能够被强烈磁化而呈现出很强的磁性。即 $\mu \gg 1$ 。

为什么磁性材料具有能够被磁化的特性呢？我们用磁畴理论来解释。在各种磁性物质的分子中，由于电子环绕原子核运动和本身的自旋运动而产生电子磁矩。当没有外磁场作用时，电子磁矩在磁性物质内部已经按某个方向在一个个小的区域内平行地排列起来，从而具有一定的磁性。这种自发磁化的小区域称作磁畴。其示意图如图 7.2-1 (a) 所示。一块磁性物质内具有许许多多多个磁畴。通常，这些磁畴任意取向，排列杂乱无章，磁性相互抵消，对外界不呈现磁性。当把磁性物质置于外磁场 B 中（如图 7.2-1 (b) 所示），每个磁畴的磁矩受到外磁场的作用，从不同方向改变到与外磁场相接近或者相一致的方向上去，使得磁性物质对外呈现出很强的磁性了。或者说磁性物质被外界磁场强烈地磁化了。

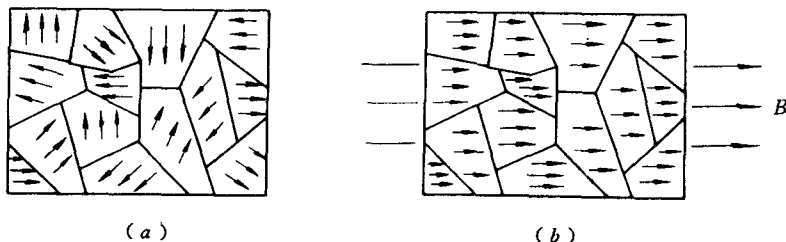


图 7.2-1 磁性物质的磁化

7.2.2 磁滞性和饱和性

磁性物质的磁滞性和饱和性是在其磁化过程中所表现出来的
一种特性。可通过实验测出磁性物质的磁化过程并用磁化曲线表
现出来,如图 7.2-2 所示。

当磁场强度 H 从零值开始
增加到最大值 H_m 时,磁感
应强度 B 也由零值增加到
最大值 B_m , $B-H$ 的关系如
图 7.2-2 中 $0a$ 曲线,称 $0a$
为原始磁化曲线。当磁场强
度由 H_m 逐渐减小时,磁感
应强度值并不按原始磁化
曲线规律下降,而是沿高于
 $0a$ 曲线减小,如图 7.2-2
中 ab 曲线。当磁场强度减
为零值时,磁感应强度还未
回到零。这种磁感应强度落

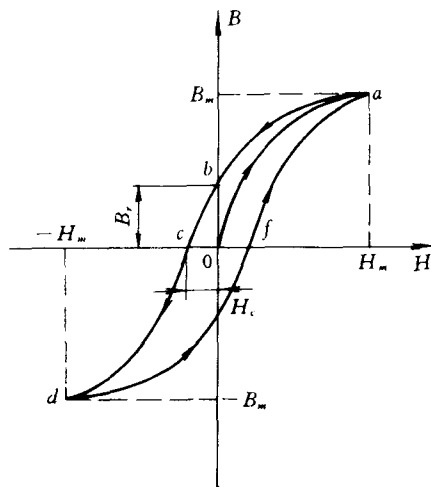


图 7.2-2 磁性物质的磁化特性

后于磁场强度的现象称为磁性物质的磁滞性。 H 为零值时的 B 值
称为剩余磁感应强度简称剩磁,用符号 B_r 表示。要想使 B 值回到
零,则磁场强度 H 应变为负值,对应这个值的磁场强度称为矫顽
力。用符号 H_c 表示,它反映出磁性物质反抗退磁的能力。可见,
在反复改变磁场方向的磁化中,磁性物质的磁化曲线不是一条曲
线而是一个回线,称为磁滞回线。磁滞回线的形成是因为磁性物
质在被磁化的过程中,磁畴之间彼此具有摩擦力,使其跟不上磁
场强度的变化所致。

对于不同的磁性材料其磁滞回线的形状不相同,如图 7.2-3
所示。其中(a)图的磁滞回线具有较大的剩磁,较高的矫顽力和较
大的磁滞回线面积,它可以使磁性长久地保持恒定,不易消失,称

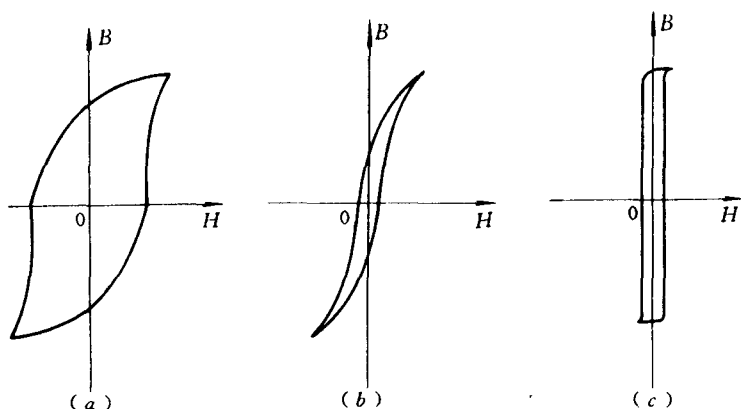


图 7.2-3 不同磁性材料的磁滞回线
(a)硬磁材料；(b)软磁材料；(c)矩形材料

之为硬磁材料，如碳钢、钴钢、钨钢、铁镍铝钴合金、硬磁铁氧体和稀土钴等。

图 7.2-3 (b) 图的磁滞回线的剩磁和矫顽力都小，磁滞回线的面积也小，具有很高的磁导率，称之为软磁材料，如纯铁、铸钢、电工钢片、铁镍合金（又称坡莫合金）和软磁铁氧体等。它是适合于制造电机和变压器铁心的材料。

图 7.2-3 (c) 图的磁滞回线近似矩形称为矩磁材料。剩磁 B_r 接近饱和时的最大磁感强度 B_m 。矫顽力小且很稳定。磁化后仍能保持两个方向上很大的剩磁又易于翻转，被用来作为记忆元件，如电子计算机存贮器中的磁心。

对同一种磁性材料加不同的 H 值进行磁化其磁滞回线也不一样，如图 7.2-4 所示。显然，用它来分析和计算磁路问题是很复杂的。为了简化磁路计算，通常把各磁滞回线的正向顶点连成一条曲线，如图 7.2-4 中的 $0a_1a_2a_3$ 曲线。对每一种磁性材料而言，它是一条确定的曲线，并称为基本磁化曲线。

图 7.2-5 中绘出的是基本磁化曲线。可以看出曲线的初始段 ($0a$) B 值随 H 值的增大而增大, 但增长的速度较慢。而在曲线的 ab 段, B 随 H 的增大而迅速增大。到了曲线的 bc 段, B 随 H 增大的速度又变慢了。过了 c 点 H 再增加, B 的变化很小, 出现了饱和现象。这就是磁性材料 $B-H$ 关系的一个特点。

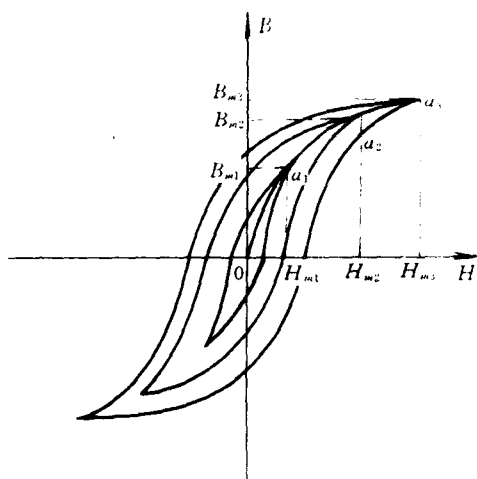


图 7.2-4 不同 H 值测出的磁滞回线

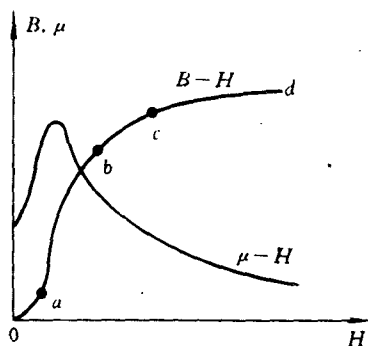


图 7.2-5 基本磁化曲线

在基本磁化曲线上的任何一点 B 与 H 之比称为该点的磁导率, 即 $\mu=B/H$ 。图 7.2-5 中也绘出了 $\mu-H$ 曲线。曲线的 $0a$ 段 μ 较小, ab 段 μ 值很大, 过了 b 点 μ 值又变小, 进入饱和区后 μ 值急剧下降。为了在一定的励磁电流下获得较强磁场, 都希望磁性材料的 μ 值要高。因此磁性材料的 B 值不能取得太高, 一般 B 值取在磁化曲线的拐弯处, 即 bc

段为好。

图 7.2-6 给出了几种磁性材料的基本磁化曲线, 可供分析和计算时查阅。其中 D_{11} 、 D_{41} 为电工钢片 (硅钢片)。