



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电工学II

电机与电气控制

(第二版)

■ 侯世英 孙韬 主编

高等教育出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电工学II

电机与电气控制

(第二版)

■ 侯世英 孙韬 主编

高等教育出版社·北京

内容提要

“电工学”是高等学校非电类专业重要的技术基础课。《电工学Ⅱ（电机与电气控制）》（第二版）为“十二五”普通高等教育国家级规划教材《电工学》系列教材的第2分册，全书包括三个部分：变压器与电动机（第13~14章）、电气控制与PLC（第15~16章）、电工测量及现代建筑电气与用电安全（第17~18章）。教材内容涵盖了电机及其控制、电工测量和电气设备安全等内容的基本概念和基本原理，以及应用时的基本方法和基本技术。

教材附录提供了适用于三菱PLC的GX Works2编程软件的使用指南；提供了教材编写中使用的参考教材；本教材在<http://abook.hep.com.cn/1232977>上有配套数字课程，包含多媒体电子教案、课后习题参考解答、应用教学案例视频等。

本书内容兼顾了基础和应用，在编写过程中力求同时满足教和学的双向需求，适合高校理工科非电类专业本专科学生学习使用，也可作为自学考试和各种成人教育的教材或参考书，还可供相关工程技术人员在工程实用中参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工学.Ⅱ,电机与电气控制 / 侯世英,孙韬主编

. --2版. --北京:高等教育出版社,2019.3

ISBN 978-7-04-051006-5

I. ①电… II. ①侯… ②孙… III. ①电工-高等学校-教材②电机学-高等学校-教材③电气控制-高等学校-教材 IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第266875号

电工学Ⅱ

Diangongxue II

策划编辑 金春英

责任编辑 孙琳

封面设计 于文燕

版式设计 张杰

插图绘制 于博

责任校对 刁丽丽

责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市西城区德外大街4号

邮政编码 100120

印刷 三河市华骏印务包装有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 14.25

字数 300千字

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>

<http://www.hepmall.com>

<http://www.hepmall.cn>

版 次 2008年1月第1版

2019年3月第2版

印 次 2019年3月第1次印刷

定 价 29.90元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 51006-00

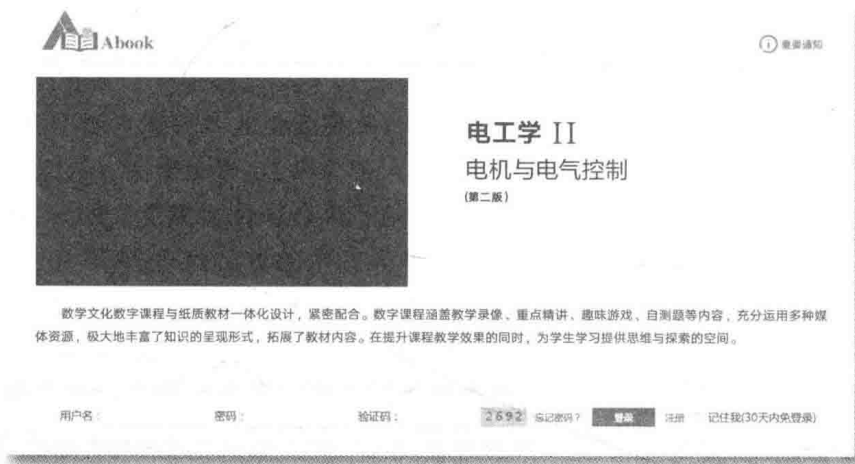
电工学 II

电机与电气控制

(第二版)

侯世英 孙韬

- 1 计算机访问<http://abook.hep.com.cn/1232977>, 或手机扫描二维码、下载并安装 Abook 应用。
- 2 注册并登录, 进入“我的课程”。
- 3 输入封底数字课程账号(20 位密码, 刮开涂层可见), 或通过 Abook 应用扫描封底数字课程账号二维码, 完成课程绑定。
- 4 单击“进入课程”按钮, 开始本数字课程的学习。



课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制, 部分内容无法在
手机端显示, 请按提示通过计算机访问学习。
如有使用问题, 请发邮件至 abook@hep.com.cn。



<http://abook.hep.com.cn/1232977>

第二版前言

“电工学”课程是高等院校为各类理工科非电类专业学生开设的一门技术类基础课程。随着信息时代的蓬勃发展,电工电子技术已经成为理工科专业人才培养体系中最重要技术基础之一。作为技术基础课程,理论与实践并重是“电工学”课程最为典型的特征。首先,作为基础课,课程教学需强调其基础性:不仅要系统学习基本理论,而且要具备在一定的范畴内对基本理论进行转换、延伸的能力;其次,作为技术课,不仅要具备基本知识、基本技能的应用能力,更多地还要强调为学科交叉应用提供必要的接口,为适应新技术的发展奠定基础。

现有的大部分技术类基础课程教学均是以盖全为目标,希望把所有认为有用的基础理论、基本方法以及基本技术完全教授给学生,并在理论与实践教学两个方面实现“厚基础”和“强能力”的目标。但是,在现有的学分制体制下及有限的学时内,要妥善解决这对矛盾非常困难。在国外,类似的工程技术类课程中工程实验所占学时远远大于我国同类课程,大部分技术基础课程是通过工程实验和设计性实验环节进行学习的。这不仅有利于解决课程“内容多,学时少”的矛盾,而且更符合能力培养的教学目标。为此,在重庆市精品课程建设和重庆大学系列课程教学团队建设项目的支持下,本课程组提出“强化实验教学,精品化理论教学”的课程教学改革思路,并把该改革理论贯彻于教材建设中,对原有教材进行了大幅修订。

本教材是“十二五”普通高等教育国家级规划教材《电工学》系列教材的第2分册:《电工学Ⅱ——电机与电气控制》(第二版),编写思想仍然遵循《电工学Ⅰ——电路与电子技术》(第二版)编写中的3个原则,即基础性原则、应用性原则和适应性原则,内容上尽可能涵盖变压器、电机与电气控制技术、电工测量和现代建筑电气与用电安全的基本内容,但在各章节中部分拓展或选修内容以*标示,便于针对不同的需求进行教学内容选择,使教材具有更广泛的适应性。

本教材由重庆大学电工学系列课程教学团队组织编写,其中侯世英和孙韬担任主编,参加编写的人员还有张立群、李利、肖馨和龙利。全书共6章,章节的编排按照《电工学Ⅰ——电路与电子技术》(第二版)的顺序继续编号。相比第一版教材,第二版教材的结构设置作了如下改进:

1. 结合高等教育国际化的趋势,教材中给出了每一章节对应的英文标题,以及重要术语的英文名词,利于有需要的学生参看外文教材。
2. 在每一章的起始部分,给出了本章的基本教学要求,供教学人员和学生参考。
3. 在每一章的结束部分编写了学习指导,通过重点、难点及典型例题讲解,尽可能地给学生更多指导,希望有助于提高在有限教学学时的教学效果。
4. 每一章的习题按基本概念题、简单计算题和综合应用题三个类型编写,基本

概念题可作课前预习题目,而部分综合应用题可作为课后讨论题目,便于实施教学安排。

根据 2016 年中国高等学校电工学研究会修订的最新“电工学”教学基本要求,第二版教材的内容体系作了以下几个方面的调整:

1. 删除了原第 11 章“电力电子技术”。

2. 在第 14 章中增编了“同步电动机”,使电动机系列内容更加完整。

3. 第 15 章“继电接触器控制系统”的编写改变了先器件、后电路的模式,第二版教材编写中将控制电路与器件紧密结合,根据各种控制电路的具体需求,然后引入需要用到的控制电器,再介绍该电器的结构和工作原理。

4. 结合电工电子国家级实验教学示范中心的产学研融合发展思路,以及实验室可编程控制器的配置现状,在第 16 章“可编程序控制器”中将西门子品牌 PLC 改编为三菱 FX 系列 PLC。

5. 将第 17 章“电工测量”中的“非电量的测量与电工测量新技术”改编为“传感器与现代检测技术”。

6. 将第一版最后一章“安全用电”的人身安全用电部分调整到了《电工学 I——电路与电子技术》(第二版)的第 3 章“三相电路”,本章改编为“现代建筑电气与用电安全”,增加了 18.1 节“现代建筑电气系统概述”。

本教材是重庆大学电工学系列课程教学团队教学研究改革成果的体现,是集体智慧的结晶,参与教材编写和提出修改建议的均是长期从事“电工学”课程教学的一线教师,经过大家孜孜不倦的辛苦劳动,几度检查和修改,才使得教材成功呈现在读者的面前,在此向电工学课程教学团队所有教师致敬。本教材的修订工作还得到了重庆大学电气工程学院和电工电子国家级实验教学示范中心领导及同仁们的支持和帮助,在此表示真诚的感谢。为了便于读者学习,作者将多年教学讲义、应用案例教学视频以二维码形式呈现出来,供扫描观看。同时也可访问本教材配套网站,进行在线学习。

本教材由华南理工大学的殷瑞祥教授审稿,殷教授不仅在审稿中,而且在整个教材建设过程中都对教材提出了诸多的宝贵意见,在此向殷教授长期以来的支持表示由衷感谢!

重庆大学《电工学》教材编写组

2018 年 4 月 于重庆



重庆大学《电工电子学》

宣传片

目 录

第 13 章 变压器	1	(Speed Regulating)	52
13.1 磁路的基本概念	1	14.2.5 三相异步电动机的铭牌 数据	54
13.1.1 表征磁场性能的基本 物理量	1	14.3 单相异步电动机	57
13.1.2 磁性材料的磁性能	2	14.3.1 电容式单相异步电动机的 结构与工作原理	57
13.1.3 磁动势的建立与磁路欧姆 定律	4	14.3.2 电容式单相异步电动机的 起动	59
13.2 交流铁心线圈电路与变压器的 工作原理	5	14.3.3 三相异步电动机的单相 运行	61
13.2.1 交流铁心线圈电路	5	* 14.4 同步电动机	61
13.2.2 变压器的结构与用途	7	14.4.1 同步电动机的基本结构	61
13.2.3 变压器的工作原理与变换 作用	9	14.4.2 同步电动机的工作原理	62
13.2.4 三相变压器	13	14.4.3 同步电动机的铭牌数据	62
13.3 变压器的铭牌参数与使用	15	* 14.5 直流电动机	63
13.3.1 变压器的运行特性	15	14.5.1 直流电动机的工作原理与 基本结构	63
13.3.2 变压器的铭牌参数	16	14.5.2 直流电动机的机械特性	65
13.3.3 变压器的选择与使用	17	* 14.6 控制电动机	72
13.4 特殊变压器与电磁铁	19	14.6.1 步进电动机	72
13.4.1 特殊变压器	19	14.6.2 伺服电动机	73
* 13.4.2 电磁铁	20	14.6.3 力矩电动机	74
学习指导	21	学习指导	75
习题	24	习题	81
第 14 章 电动机	27	第 15 章 继电器接触器控制系统	85
14.1 电机概述	28	15.1 继电器接触器控制概述	86
14.1.1 电机的主要功能	29	15.2 异步电动机的直接起停控制电路 与常用低压控制电器	86
14.1.2 电机的分类	29	15.2.1 问题的提出	86
14.2 三相异步电动机	30	15.2.2 完整的异步电动机直接起停 控制电路设计	88
14.2.1 三相异步电动机的基本结构 和工作原理	30	15.2.3 其他常用低压控制电器	92
14.2.2 三相异步电动机的功率、转矩 和机械特性	38	15.3 异步电动机的基本控制电路	93
14.2.3 三相异步电动机的起动与制动 方法	46	15.3.1 异步电动机的直接起动和 停止控制	94
14.2.4 三相异步电动机的调速			

15.3.2 异步电动机的点动控制	94	17.1.2 测量的误差及其分析	159
15.3.3 能在两处起动和停止的控制 电路	95	17.1.3 电工测量仪表的基础 知识	163
15.3.4 异步电动机的顺序起动和 停止控制	95	17.2 电工仪表	165
15.3.5 异步电动机的直接正反转 控制	96	17.2.1 磁电系仪表	165
15.4 行程控制与时间控制	98	17.2.2 电磁系仪表	167
15.4.1 行程开关与行程控制	98	17.2.3 电动系仪表	169
15.4.2 时间继电器和延时控制	99	17.3 各种常见电量的测量	175
15.5 控制电路的综合举例	101	17.3.1 常见电量的测量方法	175
学习指导	105	17.3.2 常见电量的测量分类	175
习题	106	17.4 传感器与现代检测技术	179
第 16 章 可编程序控制器	111	17.4.1 非电量的测量方法	179
16.1 可编程序控制器概述	112	17.4.2 传感器及其应用	180
16.1.1 PLC 的发展及应用	112	17.4.3 现代检测技术	185
16.1.2 PLC 的分类	113	学习指导	188
16.1.3 PLC 的组成与工作原理	114	习题	190
16.1.4 三菱 FX _{3U} 系列 PLC	117	第 18 章 现代建筑电气与用电 安全	192
16.2 PLC 的编程基础	123	18.1 现代建筑电气系统概述	192
16.2.1 PLC 的编程语言	123	18.2 电气设备的安全保护	193
16.2.2 PLC 的数据类型	124	18.2.1 工作接地	195
16.2.3 PLC 的编程元件	124	18.2.2 保护接地	195
16.3 PLC 的基本指令	130	18.2.3 保护接零	196
16.3.1 FX 系列 PLC 的基本指令	130	18.2.4 重复接地	197
16.3.2 梯形图编程规则与技巧	137	18.2.5 保护零线	197
16.4 小型 PLC 控制系统程序设计 举例	139	18.3 电器的防静电	198
16.4.1 PLC 控制系统设计的一般 步骤	139	18.4 雷电防护	199
16.4.2 梯形图的经验设计法	139	18.4.1 雷电的形成与活动规律	199
16.4.3 根据继电器电路图设计梯形 图的方法	145	18.4.2 雷电的危害	200
学习指导	146	18.4.3 建筑物的防雷等级	200
习题	154	18.4.4 防雷措施	201
第 17 章 电工测量	158	学习指导	202
17.1 电工测量与仪表的基本知识	159	习题	203
17.1.1 测量的概念	159	附录 GX Works2 编程软件使用 指南	204
		参考文献	218

第 13 章 变 压 器

Chapter 13 Transformer



第 13 章
讲义

本章内容 13.1 磁路的基本概念 13.2 交流铁心线圈电路与变压器的工作原理 13.3 变压器的铭牌参数与使用 13.4 特殊变压器与电磁铁 学习指导 习题	基本要求: 理解电磁感应定律;理解交流铁心线圈电路中的电磁关系与电压平衡方程式;理解单相变压器的工作原理,明确铁心和线圈在变压器中的作用;掌握变压器中电压、电流、阻抗变换关系式,并能作简单的分析和计算;了解变压器额定值与外特性的含义;了解各种特殊变压器的特点与使用注意事项。
---	--

变压器是将一种电压等级的交流电能转换成同频率的另一种电压等级的交流电能的静止电能变换装置。变压器不仅是电力系统中一种重要的电气设备,而且在电力拖动系统或自动控制系统中的应用也十分广泛。

本章首先复习磁场中的基本物理量,介绍构成变压器的铁磁材料的磁性能,通过分析交流铁心线圈电路,说明变压器的构成与变换原理。最后结合变压器的使用讲解变压器的运行特性和铭牌参数,并简单介绍常用的特殊变压器及其性能。

13.1 磁路的基本概念

13.1 Basic Concept of Magnetic Circuit

13.1.1 表征磁场性能的基本物理量

研究磁路问题时,我们常常用磁感应强度 B 、磁通 Φ 和磁场强度 H 等基本物理量来表征磁场的性能(它们的严格定义已在物理学中介绍过,这里只从工程应用角度简单叙述与复习)。

1. 磁感应强度(B)

与磁场方向相垂直的单位面积上所通过的磁通量,叫做磁感应强度,又叫做磁通

密度 (Magnetic-Flux Density), 通常用字母 B 来表示。它是一个矢量, 与产生磁场的电流之间的方向关系可用右手螺旋定则来确定, 其大小为

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (13.1.1)$$

式中: B ——磁感应强度, 在国际单位制 (SI) 中, 磁感应强度的单位是特 [斯拉] (T)。

在厘米·克·秒制中, 磁感应强度的单位常用高斯 (Gs)。两者之间的换算关系是: $1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gs}$

Φ ——通过面积 A 的磁通, 在国际单位制 (SI) 中, 磁通的单位是伏·秒, 通常称为韦 [伯] (Wb), 在厘米·克·秒制中, 磁通的单位是麦克斯韦 (Mx)。

两者之间的换算关系是: $1 \text{ Wb} = 10^8 \text{ Mx}$

A ——与磁场方向相垂直的面积, 单位为 m^2 。

2. 磁导率 (Permeability, μ)

磁导率 (μ) 是一个用来表征各种材料导磁能力的物理量, 其单位为亨/米。真空的磁导率一般用 μ_0 来表示, 是一个常数。在国际单位制 (SI) 中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ (亨/米)。其他材料的磁导率 μ 和真空磁导率 μ_0 之比, 称为该材料的相对磁导率 μ_r , 即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (13.1.2)$$

工程上常用 μ_r 比较各种材料间的导磁能力: 即根据 μ_r 的大小将材料分为磁性材料 ($\mu_r \gg 1$, 如铁、镍、钴、钢、合金钢、坡莫合金等) 和非磁性材料 ($\mu_r \approx 1$, 如铜、铝、橡胶、空气、塑料等) 两大类。

磁性材料是以铁为代表的一类磁性很强的物质, 又称为铁磁材料, 但它们之间的相对磁导率差别较大, 如铸铁的 $\mu_r = 200 \sim 400$, 铸钢的 $\mu_r = 500 \sim 2\,200$, 硅钢的 $\mu_r = 7\,000 \sim 10\,000$, 坡莫合金的 $\mu_r = 20\,000 \sim 200\,000$ 。

3. 磁场强度 (Magnetic-Field Intensity, H)

磁场强度是为了简化磁场的计算而引入的辅助物理量, 它表征了电流产生的磁场的强弱和方向, 其大小定义为磁感应强度和磁导率之比。

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (13.1.3)$$

式中: H ——磁场强度, 单位为 A/m (安/米)。

13.1.2 磁性材料的磁性能

对非磁性材料而言, 其磁导率 μ 为常数, 并且都具有 $\mu \approx \mu_0$ 、 $\mu_r \approx 1$ 的特点, 所以, 磁感应强度 (B) 与磁场强度 (H) 成正比, 或者说 B 与 H 呈线性关系。磁性材料的磁导率是非线性的, 故其磁性能可从以下三个方面描述。

1. 高导磁性

铁磁材料的相对磁导率 $\mu_r \gg 1$, 具有很强的被磁化特性, 即在外加磁场的作用下, 其内部的磁感应强度大大增加。这是因为磁性材料内部存在着很多以分子为单位、

在每个区域内的分子磁场具有相同方向的微小磁体,称为磁畴。在没有外磁场作用时,磁畴杂乱地排列,磁场相互抵消,对外不呈现磁性,如图 13.1.1(a) 所示。在外磁场作用下,磁性材料中的磁畴出现两种过程:一是其他方向的磁畴顺外磁场方向转动,作有规则的排列,如图 13.1.1(b) 所示;二是与外磁场同方向的磁畴边界扩大,组合磁性增强。

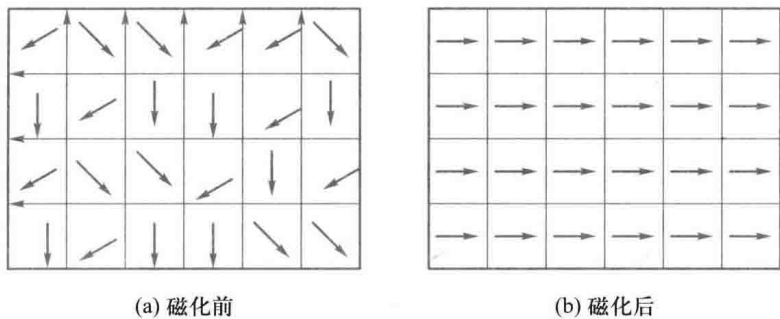


图 13.1.1 铁磁材料的磁性能

在外磁场作用下,对外显示很强的磁性,这就是铁磁材料的高导磁性(也称铁磁材料的磁化现象)。如图 13.1.2 中 $O-a-b$ 段所示。

非磁性材料没有磁畴结构,所以不具有被磁化特性。

磁性材料的高导磁性广泛应用于电工设备中,在电机变压器及各种铁磁元件的线圈中都放有铁心,在这种具有铁心的线圈中通入不大的励磁电流,便可产生足够大的磁通和磁感应强度。利用永磁磁性材料,可使同一容量的电机重量和体积大大减轻和缩小。

2. 磁饱和性

铁磁材料的磁饱和性是指磁感应强度不会随着外加磁场(励磁电流)的增强而无限增强。因为当外加磁场增大到一定值时,其内部所有的磁畴已基本上转向与外部磁场的方向一致,所以再增大外加磁场(励磁电流),其磁感应强度不会继续增强。

图 13.1.2 曲线①所示为磁性材料的磁感应强度 B 随外磁场强度 H 变化的曲线,用 $B=f(H)$ 表示。磁化曲线的 Oa 段,外磁场 H 较弱, H 增加主要是与外磁场同方向的磁畴边界扩大的过程, B 增加缓慢;在 ab 段,外磁场 H 较强,主要是磁畴沿外磁场方向转动, B 迅速增大;在 bc 段,外磁场 H 继续加强,但由于几乎所有磁畴都转向外磁场方向, B 增大缓慢,进入临界饱和状态,此后, H 再增加, B 几乎不变,达到饱和状态。由此可见,磁性材料的磁导率 $\mu\left(\mu=\frac{B}{H}\right)$ 不是常数,如图 13.1.2 中曲线②所

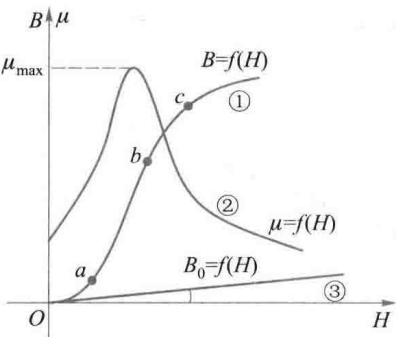


图 13.1.2 磁性材料的磁化曲线

示, $B-H$ 关系是非线性的。

非磁性材料的磁化曲线是通过原点的直线, 如图 13. 1. 2 中曲线③所示。

3. 磁滞性

当铁磁材料在交变磁场中反复磁化时, 磁感应强度 B 的变化会滞后于磁场强度 H 的变化, 也就是说, 当 H 已减到零时 B 并未回到零。磁感应强度滞后于磁场强度变化的性质称为磁性物质的磁滞性。这是由于磁畴在外磁场作用下边界扩大与转动时彼此之间产生的界面“摩擦”, 使得相应外磁场增加的上升磁化曲线与相应外磁场减小的下降磁化曲线不重合(如图 13. 1. 3 所示)。在磁性材料反复交变磁化的情况下, 表示 $B=f(H)$ 变化关系的闭合曲线 $abcdefa$ 称为磁滞回线(如图 13. 1. 3 所示)。当磁场强度减到零时, 磁性材料中所保留的磁感应强度 B_r 称为剩余磁感应强度, 对应 $B=0$ 时的磁场强度 H_c 称为矫顽力。

按磁性物质的磁性能, 磁性材料可分为三种类型。

(1) 软磁材料

软磁材料具有较小的矫顽力和较窄的磁滞回线。一般用来制造电机、电器和变压器等的铁心, 常用的有铸铁、硅钢、坡莫合金和铁氧体等。铁氧体在电子技术中应用也很广泛, 可用作计算机的磁心、磁鼓、录音机的磁头等。

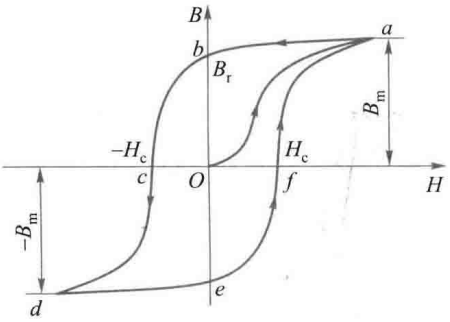


图 13. 1. 3 磁性材料的磁滞回线

(2) 永磁材料

永磁材料具有较大的矫顽力和较宽的磁滞回线。一般用来制造永久磁铁, 常用的有碳钢、钕铁氧体、铝镍钴、稀土钴、钕铁硼等, 尤其是后两种性能优良, 可以大力发展。

(3) 矩磁材料

矩磁材料具有较小的矫顽力和较大的剩磁, 磁滞回线接近于矩形, 稳定性良好。在计算机和控制系统中可用作记忆元件、开关元件和逻辑元件, 常用的有镁锰铁氧体和铁镍合金等。

13. 1. 3 磁动势的建立与磁路欧姆定律

通有电流的空心线圈周围会产生磁场, 但这种磁场较弱。为了使较小的励磁电流产生足够大的磁通, 通常将线圈绕在导磁材料上。由于磁性材料的磁导率远比空气的磁导率大, 所以磁通主要分布在磁性材料中, 并沿着磁性材料所限制的路径闭合。我们把这种人为造成磁通流通的路径, 称为磁路, 如图 13. 1. 4 所示; 将集中在铁心中, 沿铁心闭合的绝大部分磁通称为主磁通, 用字母 Φ 表示, 另外, 还有很少一部分磁通沿铁心

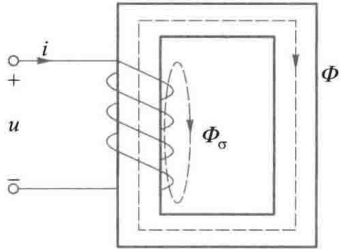


图 13. 1. 4 磁路示意图

以外的空间闭合称为漏磁通,用 Φ_σ 表示。由于 Φ_σ 很小,工程上常常忽略不计。

在图 13.1.4 所示铁心线圈电路中,根据安培环路定理可写出

$$\oint Hdl = \sum I \Rightarrow Hl = NI \Leftrightarrow NI = Hl = \frac{B}{\mu}l = \frac{\Phi}{\mu A}l$$

或

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu A}} = \frac{F}{R_m}$$

(13.1.4)

式中, $F=IN$ 称为磁动势,由此而产生磁通 Φ ; R_m 称为磁阻,是表示磁路对磁通具有阻碍作用的物理量; l 为磁路的平均长度; A 为磁路的截面积。

将式(13.1.4)与图 13.1.5 电路中的欧姆定律进行比较,发现二者非常相似,故称其为磁路的欧姆定律。二者对照如下:

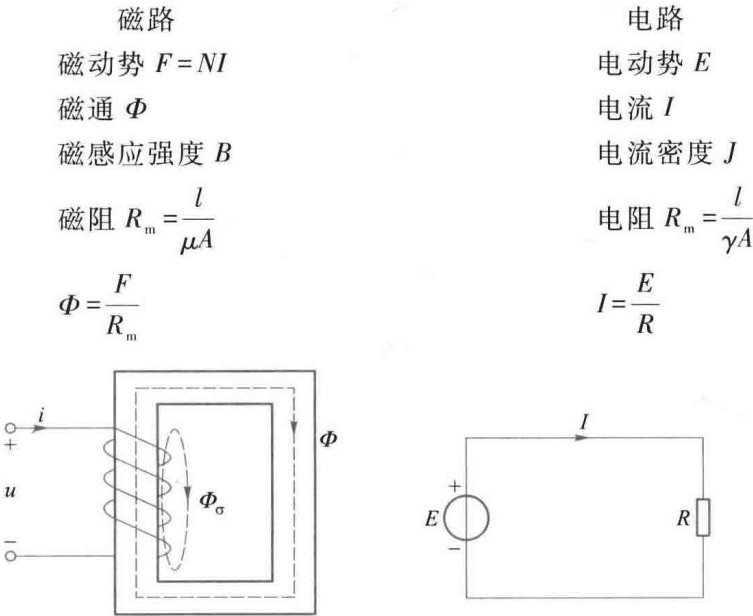


图 13.1.5 磁路与电路对比示意图

对于磁性材料,由于物质的磁导率随励磁电流的变化而变化,所以磁阻是非线性的,这与一般的线性电阻电路不一样,因此磁路计算比电路计算复杂,式(13.1.4)一般只作定性分析使用。

13.2 交流铁心线圈电路与变压器的工作原理

13.2 AC Iron Core Coil Circuit and Working Principle of Transformer

13.2.1 交流铁心线圈电路

在图 13.1.4 中,给线圈通入交流电流,就会产生交变磁场,从而在磁路中建立磁动

势,产生磁通。在这种情况下,线圈中的电流大小不仅与电源电压有关,而且受磁路的影响,也就是说,交流铁心线圈电路中电路与磁路交互融合,相互影响,因此前面学习的各种分析方法将无法直接完成对电路的分析。

本节将从电磁关系分析入手,对其进行分析。

1. 交流铁心线圈中的电磁关系

交流电压产生交流电流,建立磁动势,分别产生主磁通和漏磁通,并感应主磁电动势 e 和漏磁电动势 e_σ (见图 13.2.1),因为漏磁通经空气闭合,可等效为线性电感元件,所以其感应电动势可表示为线性关系。将这一过程描述如下

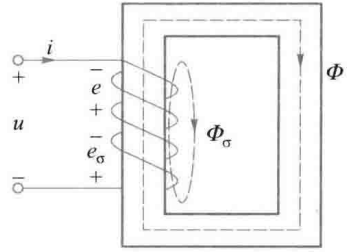


图 13.2.1 交流铁心线圈电路

$$\begin{aligned} u \rightarrow i(Ni) \rightarrow \Phi \rightarrow e &= -N \frac{d\Phi}{dt} \\ &\rightarrow \Phi_\sigma \rightarrow e_\sigma = -N \frac{d\Phi_\sigma}{dt} = -L_\sigma \frac{di}{dt} \end{aligned}$$

设铁心中的主磁通按正弦规律变化,即: $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, 根据楞次定律可得

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

其中, $E_m = N\Phi_m \omega = 2\pi f N\Phi_m$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 4.44fN\Phi_m \quad (13.2.1)$$

同理 $e_\sigma = -L_\sigma \frac{di}{dt}$

2. 交流铁心线圈中的电压电流关系

对图 13.2.1 列写 KVL 方程,则有

$$u + e + e_\sigma = iR$$

式中, R 为线圈的电阻。

所以
$$u = iR + (-e_\sigma) + (-e) = iR + L_\sigma \frac{di}{dt} + N \frac{d\Phi}{dt} = iR + u_\sigma + u'$$

由于线圈的电阻 R 和漏磁通 Φ_σ 都很小,所以电阻 R 上的电压 iR 和漏感电压 u_σ 也很小,主磁通产生的电动势可以忽略不计,于是

$$u = iR + u_\sigma + u' \approx u' = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (13.2.2)$$

$$U \approx E = 4.44fN\Phi_m$$

在忽略线圈电阻 R 及漏磁通 Φ_σ 的条件下,当线圈匝数 N 和电源频率 f 一定时,主磁通的幅值 Φ_m 由励磁线圈外施电压有效值 U 确定,与铁心的材料和尺寸无关。或者说:当线圈两端外加电压恒定时,磁路中磁通的最大值恒定,不随磁路性质而改变。

3. 交流铁心线圈的功率损耗

当铁心线圈中通入交流电流时,线圈电阻将以发热的形式消耗电能,称为铜损耗,简称铜耗 ΔP_{Cu} 。与此同时,交变磁通使铁心材料反复磁化存在磁滞现象,因而存在铁心磁滞损耗;可以证明,磁滞损耗 ΔP_h 和铁心材料反复磁化后的磁滞回线面积成正比。为了减少磁滞损耗,通常采用磁滞回线面积小的软磁材料制作铁心。

交变磁通穿过铁心时,铁心既是导磁材料又是导电材料,因为铁心在交变磁通作用下产生感应电动势,从而在垂直磁通方向的铁心平面内产生旋涡状的感应电流——涡流,如图 13.2.2 所示。涡流在铁心材料内的电阻上流动,使铁心发热,产生涡流损耗 ΔP_e 。为了减少涡流损耗,通常采用电阻率高、彼此绝缘的薄硅钢片顺着磁场方向叠成,使涡流只能在每一较小的截面内流通,这样就加长了涡流流通的路径并增大了电阻,从而大大减小涡流和涡流损耗。

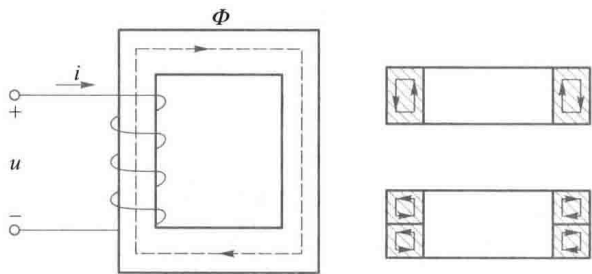


图 13.2.2 铁心中的涡流

磁滞损耗 ΔP_h 和涡流损耗 ΔP_e 都表现为铁心发热引起的损耗,故称为铁心损耗,简称铁耗 ΔP_{Fe} 。由此可见,交流铁心线圈总的功率损耗等于线圈的铜耗 ΔP_{Cu} 和铁耗 ΔP_{Fe} 的总和。其中,铁耗 ΔP_{Fe} 由磁滞损耗 ΔP_h 和涡流损耗 ΔP_e 构成。即

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_e \tag{13.2.3}$$

线圈电阻 R 上的铜耗为

$$\Delta P_{Cu} = I^2 R$$

综上所述,交流铁心线圈工作时的功率损耗也就是该电路消耗的有功功率不仅包含电路中线圈电阻消耗的功率,还包含铁心中损耗的功率,即

$$P = UI \cos \varphi = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} = I^2 R + \Delta P_{Fe} \tag{13.2.4}$$

13.2.2 变压器的结构与用途

在交流铁心线圈电路中的铁心上增加一个绕组(如图 13.2.3 所示),该绕组上会产生感应电动势,如果外接负载构成回路,该回路中会有电流流过,这就实现了电能的非接触传输,这就是变压器的雏形。那么增加的这个绕组应该如何绕制?绕制匝数有什么要求?能量传递与这个绕组和原来的绕组之间有什么

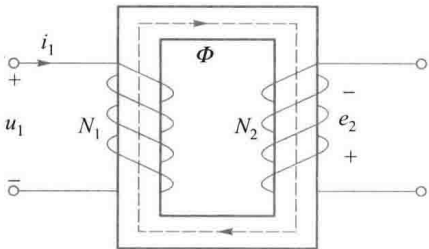


图 13.2.3 变压器原理

关系呢？本节将解答这些问题。

1. 变压器的基本结构

目前广泛使用的变压器种类繁多,用途各异,但它们的基本结构相同:都是由绕组和铁心组成(如图 13.2.4 所示)。

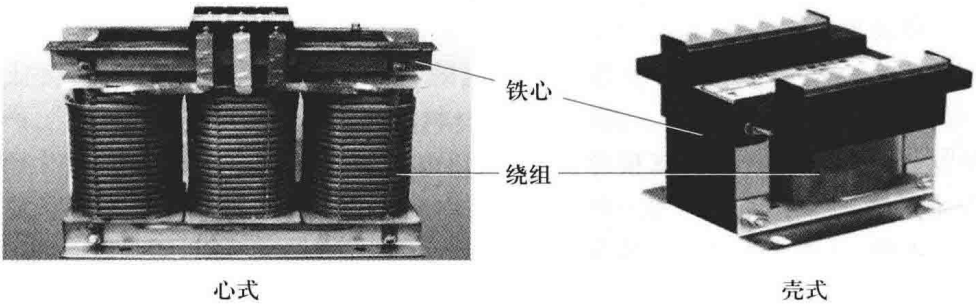


图 13.2.4 变压器结构

按变压器铁心和绕组的结构形式可分为心式和壳式,如图 13.2.4 所示。心式结构的特点是铁心包围着线圈,不需要专门的变压器外壳,用于小容量的变压器;壳式结构的特点是线圈包围着铁心,构造简单,用铁量少,多用于容量较大的变压器。

绕组构成变压器的电路部分。一般小容量变压器的绕组是用高强度漆包线绕成的,大容量变压器的绕组可用绝缘扁铜线和铝线制成。

2. 变压器的用途

变压器是一种用途广泛的电气设备,它的主要功能是将一种等级的交流电压和电流变换成同频率的另一种电压和电流。总的来讲,变压器主要用于电能的输送和变换(电力变压器),满足特殊要求的电压变换(特种电源变压器)和用于电子系统中的各种变换(专用变压器)等方面。

(1) 电力变压器——用在输配电系统中,用来传输和分配电能。按照相数不同,可分为单相变压器和三相变压器;按冷却介质不同,可分为油浸变压器、干式变压器(空气冷却式)和水冷变压器。图 13.2.5 是两种电力变压器的图片。

(2) 特种电源变压器——用来获得工业中特殊要求的电源,如整流变压器、电炉变压器等。

(3) 专用变压器——是一类专门用途的变压器,如为电子系统提供电源的电源变压器、实现阻抗匹配的阻抗变换变压器、脉冲变压器、隔离变压器、自耦变压器和用于电气测量的互感器等。图 13.2.6 是三种专用变压器的图片。

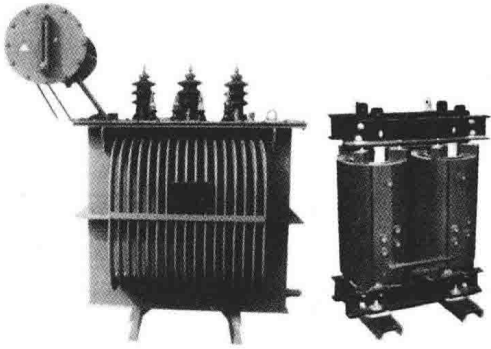


图 13.2.5 电力变压器

