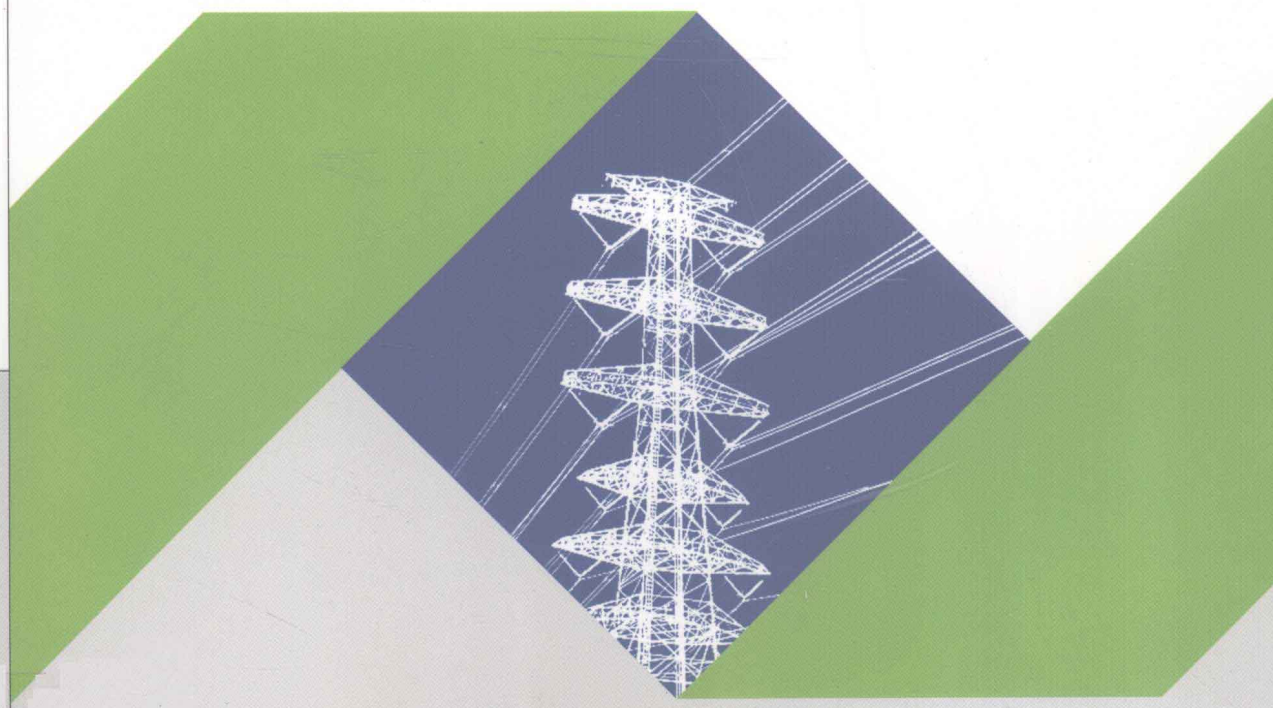


高等学校电气工程类系列教材

电工技术

(第三版)

李海 崔雪 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

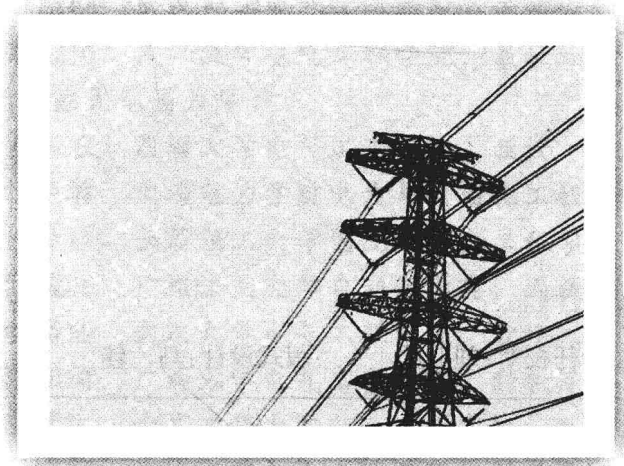
武汉大学出版社

高等学校电气工程类系列教材

电工技术

(第三版)

■ 李海 崔雪 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电工技术/李海,崔雪编著. —3版. —武汉:武汉大学出版社,2011.12
高等学校电气工程类系列教材
ISBN 978-7-307-09235-8

I. 电… II. ①李… ②崔… III. 电工技术 IV. TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第202131号

责任编辑:李汉保 责任校对:刘欣 版式设计:马佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:通山金地印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:24.75 字数:596千字

版次:1993年1月第1版 2005年7月第2版

2011年12月第3版 2011年12月第3版第1次印刷

ISBN 978-7-307-09235-8/TM·25 定价:35.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

高等学校电气工程类系列教材

编 委 会

- | | | |
|-------|-----------|--------------------------|
| 主 任 | 刘涤尘 | 武汉大学电气工程学院，教授、博士生导师 |
| 副 主 任 | 张步涵 | 华中科技大学电气与电子工程学院，教授、系副主任 |
| | 曾祥君 | 长沙理工大学电气与信息工程学院，教授、院长 |
| | 李欣然 | 湖南大学电气与信息工程学院，教授、系主任 |
| | 陈少华 | 广东工业大学自动化学院，教授、系主任 |
| | 廖家平 | 湖北工业大学电气与电子工程学院，教授、院长 |
| | 高 亮 | 上海电力学院电力与自动化工程学院，教授、副院长 |
| | 王渝红 | 四川大学电气信息学院，高级工程师 |
| | 查晓明 | 武汉大学电气工程学院，教授、副院长 |
| | 常 勇 | 武汉大学电气工程学院，教授级高工、副院长 |
| 编 委 | (按姓氏笔画为序) | |
| | 卫志农 | 河海大学电气工程学院，教授 |
| | 江玉蓉 | 上海电力学院电力与自动化工程学院，讲师 |
| | 孙春顺 | 长沙理工大学电气与信息工程学院，副教授 |
| | 何瑞文 | 广东工业大学自动化学院，副教授、重点实验室副主任 |
| | 李裕能 | 武汉大学电气工程学院，教授 |
| | 李如琦 | 广西大学电气工程学院，副教授 |
| | 李朝生 | 南京工程大学电气工程学院，副教授 |
| | 李咸善 | 三峡大学电气工程学院，副教授 |
| | 杨丽徙 | 郑州大学电气工程学院，教授 |
| 执行编委 | 李汉保 | 武汉大学出版社，副编审 |
| | 谢文涛 | 武汉大学出版社，编辑 |

内 容 简 介

本书内容符合国家教育部颁布的“电工技术”（电工学Ⅰ）教学基本要求，是在前两版工科本科生历经数年使用的基础上的修订和补充。其内容包括：电路模型与电路定律、电路定理和分析方法、正弦稳态的相量法、交流电路的频率特性、二端口网络、一阶电路、二阶电路、磁路与电机（变压器、同步机、异步电动机、控制电机）及其控制（继电器—接触器控制、可编程控制器）、供用电及安全用电等。

本书可以作为高等学校非电专业本科生电工学系列《电工技术》课程教材，可以作为其他强电、弱电结合专业本科生的教材，也可以供高等学校教师以及相关工程技术人员参考使用。

序

电力工业是国民经济生产的基础能源工业，对于现代化建设具有举足轻重的地位，涉及工业、农业、国防建设、科学技术以及国民经济建设的各个领域。我国电力工业正在蓬勃发展，发电装机容量迅速增长，电网规模不断扩大、网架日趋紧密，2020年，我国发电装机容量将稳居世界第一。未来20年，中国将是全球电力工业和电工制造业的最大市场。目前我国电力工业的规模已居世界第二位，大部分地区电力需求能得到满足。然而，我国电气化水平和发达国家还有相当一段差距，尤其在人均用电量方面，仅为世界平均水平的三分之一。因此，培养适应新时期电气工程类专业的高级人才，促进电力工业建设，对于21世纪我国实现跨越式发展具有重要意义。

电气工程专业是一门历史悠久的专业。经过一百多年的不断发展，电气工程专业已逐步发展成为一个新兴的电气工程学科。至今，电气工程学科已形成为学科覆盖面广、学科理论体系完善、工程实践成功、应用领域宽广的一门独立学科。电气工程给人类社会的许多方面带来了巨大而深刻的影响。近一百年来，电气工程专业在我国高等教育中一直占据着十分重要的地位，为国家培养了大批的规划、设计、建设、生产及管理 and 科技人才，他们为我国电气工程的建设及其他领域的工作作出了巨大的贡献。

为了提高高等学校电气工程类课程建设、教材建设水平，由武汉大学电气工程学院和武汉大学出版社联合倡议，组建了高等学校电气工程类系列教材编委会，并联合若干所高等学校编写电气工程类教材，为我国高等学校从事电气工程类教学的教师，尤其是长期在教学和科研一线积累了丰富的教学经验的教师搭建了一个研讨交流的平台，以此联合编写教材，交流教学经验，研讨教学方法。同时，通过相互讨论学习，确保教材的编写质量，突出课程的基本特色，有利于教材的不断更新，极力打造精品教材。

本着上述原则和方法，我们组织编撰出版了高等学校电气工程类系列教材。根据国家教育部电气工程类本科人才培养方案以及编委会成员单位（高校）电气工程类本科人才培养方案明确了教材种类（课程内容），并根据专业（课程）特色进行分工和编排，旨在提高高等学校电气工程类课程的教学质量和教材建设水平。

参加高等学校电气工程类系列教材编委会的高校有：

武汉大学，华中科技大学，四川大学，湖南大学，河海大学，南京工程大学，广东工业大学，郑州大学，三峡大学，湖北工业大学，上海电力学院，广西大学，长沙理工大学等院校。

武汉大学出版社是被中共中央宣传部与国家新闻出版署联合授予的全国优秀出版社之一，在国内享有较高的知名度和社会影响力，感谢其在出版过程中给予了许多有益的建

议。我们愿与各位朋友真诚合作，力争将该系列教材打造成为国内同类教材中的精品教材，为高等教育的发展作出更大的贡献！

高等学校电气工程类系列教材编委会
2011 年 4 月

前 言

近代科学技术发展的特点是继承积累和多种学科成果综合。前者体现在继承前人的知识、经验和成果的基础上向前发展；而后者是依靠和综合多种学科的成果，将多种技术结合起来实现科学技术的飞跃或更快的发展。

多种学科成果综合离不开现代仪器、机器，现代仪器、机器多采用多种先进技术形式综合集成，其根本上是电工电子技术的集成。今天，无论从事何种职业都离不开电工知识和技能

的掌握。人们在生活、学习和生产实践中，对电工电子技术知识的需求正日益渗透到人类社会实践的各个领域。为了适应社会需求和教学改革的需要，根据国家教育部最新颁布的高等学校工科本科基础课程“电工学”教学基本要求作为依据，结合教学改革的实践和需要，我们在前两版同名教材的基础上进行了较大修改。考虑到电工电子新技术的不断产生和发展，人们对电工电子技术应用需求和内容的扩展要求，以及教学手段的不断更新等因素，这次修订在体系上作了些微调，对前两版的传统内容进行精选和压缩，考虑到部分专业的特殊需求，力求使教材适应非电类更多专业的需求

和应用。本书编写的指导思想是，在内容上考虑到电子信息技术的迅速发展及其在非电类专业越来越广泛的应用，因此编写时既覆盖了教学基本要求所规定的全部内容，又增添了一些拓宽和加深的内容，以满足非电类各专业根据具体需要进行取舍；在阐述上由浅入深，循序渐进，使之符合人们认识客观事物的规律，便于读者自学；适当反映了现代科学技术发展的新成就。并注意加强知识的综合和系统的概念，力求保证基础、体现先进、加强应用，处理好基础性、先进性和应用性的关系。在体系上注意各部分章节的有机联系，加强了各主要部分内容的逻辑性，便于读者应用和科技创新能力的培养。

本书的特点是：“精选内容保基础，跟踪前沿新技术，面向实际重应用，突出能力的培养”。本书含有足够大的信息量，我们希望能

为教师提供丰富的教学内容和各类不同学时对内容取舍的选择余地，也有利于开拓学生眼界和思路，便于学生自学。本书是电工学课程的电工技术及应用部分。在内容组织上精选和压缩传统内容，注重跟踪新技术的发展，强调新技术的介绍。在结构上采用模块式，并注意各模块之间在不同组合时的逻辑衔接问题，以便不同专业使用。本书视其学时和要求，可以单独使用，也可以与相应的《电子技术》（如由李海主编、中国电力出版社出版的“十二五”规划教材《电子技术》）配套使用。

本书的内容除覆盖全部教学基本要求外，还充分考虑培养面向 21 世纪人才所必须具备的基础扎实、知识面宽、能力强和素质高的特点。为此，我们注意

注意下列几点：
1. 重点保证“三基”即基本理论、基本知识和基本技能方面的内容，加强基本分析方法和电路定理的应用，注重“三基”的培养和训练。

2. 尽可能反映现代电工技术的新成果、新技术,如零输入和零状态网络的引入,电动机的软起动、变频调速以及可编程控制等内容,使教材的内容尽可能跟上时代发展的步伐。

3. 为了便于教与学,书中配有多种类型的例题和习题。例题是联系实际的典型例子,用来巩固基本知识和扩展基本内容,多数不必讲述,让学生自学理解。各章的习题大致可以分为三种类型:一是在“基本要求”范围内的习题,用于加强概念,理解、掌握“基本要求”的内容;二是较难习题,用于加深理解,起到举一反三之功用;三是接近实际的应用题,用于开拓学生视野,掌握实际应用知识。

这次修订编写工作由李海、崔雪承担。第8章~第12章由崔雪编写,第1章~第7章、第13章由李海编写。全书由李海统稿。

本书编写参考和引用了许多同仁的优秀成果,在此对参考资料和成果的原作者,表示衷心感谢!

限于作者学识水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请使用本书的教师、学生以及其他读者批评指正。

作 者

2011年9月

目 录

电路基础篇

第 1 章 电路模型及基本定律 3

 § 1.1 电路及其基本物理量 3

 § 1.2 电路模型 7

 § 1.3 电路基本定律 14

 § 1.4 元件连接及等效简化 18

 § 1.5 电路工作状态 23

 习 题 1 25

第 2 章 网络分析方法与网络定理 29

 § 2.1 简单电路计算 29

 § 2.2 电位的计算及电路的简化表示 32

 § 2.3 网络变换 35

 § 2.4 网络方程法 38

 § 2.5 电路定理 44

 § 2.6 含受控电源电路的分析方法 53

 § 2.7 非线性电阻电路分析 56

 习 题 2 61

第 3 章 正弦交流电路 66

 § 3.1 正弦交流电的基本概念 66

 § 3.2 正弦量的相量表示 69

 § 3.3 电路约束的相量形式 75

 § 3.4 复阻抗与复导纳 80

 § 3.5 正弦稳态分析的相量法 85

 § 3.6 正弦交流电路的功率 94

 § 3.7 功率因数的提高 100

 习 题 3 102

第4章 三相电路	108
§ 4.1 三相电路的概念	108
§ 4.2 三相电压	108
§ 4.3 对称三相电路及其计算	111
§ 4.4 三相电路的功率	115
习 题 4	116
第5章 非正弦交流电路	119
§ 5.1 非正弦交流电路的计算	119
§ 5.2 非正弦波的频谱	128
§ 5.3 网络函数	131
§ 5.4 RC 电路的频率特性	132
§ 5.5 LC 电路的频率特性	137
习 题 5	142
第6章 电路的暂态分析	144
§ 6.1 换路定则及分析方法	144
§ 6.2 RC 一阶电路的零输入响应	149
§ 6.3 RC 一阶电路的零状态响应	153
§ 6.4 RC 一阶电路的全响应及三要素法	158
§ 6.5 微分电路与积分电路	162
§ 6.6 RL 一阶电路的暂态分析	167
§ 6.7 二阶电路的暂态分析	172
习 题 6	178
第7章 二端口网络	183
§ 7.1 二端口网络	183
§ 7.2 二端口网络的参数	184
§ 7.3 二端口网络的连接及等效电路	190
§ 7.4 二端口网络的等效电路	194
习 题 7	195

技术应用篇

第8章 磁路与电器	199
§ 8.1 磁路及其计算	199

目 录	3
§ 8.2 交流铁芯线圈	206
§ 8.3 变 压 器	211
§ 8.4 常 用 电 器	225
习 题 8	237
第 9 章 交流电动机	241
§ 9.1 异步电动机的构造	241
§ 9.2 三相异步电动机的工作原理	243
§ 9.3 三相异步电动机的电路	247
§ 9.4 三相异步电动机的转矩与机械特性	249
§ 9.5 异步电动机的使用	254
§ 9.6 单相异步电动机*	264
§ 9.7 同步电动机*	268
习 题 9	273
第 10 章 异步电动机的控制	277
§ 10.1 基本控制电路	277
§ 10.2 继电器接触器控制系统及应用	286
§ 10.3 PLC 控制系统	289
§ 10.4 异步电动机的电子控制*	306
习 题 10	310
第 11 章 直流电动机	313
§ 11.1 直流电动机的构造	313
§ 11.2 直流电机的工作原理	316
§ 11.3 直流电动机的基本特性	319
§ 11.4 直流电动机的起动、调速和制动	322
习 题 11	327
第 12 章 控制电机及其控制系统	329
§ 12.1 自动控制的基本概念	329
§ 12.2 伺服电动机及其控制	332
§ 12.3 步进电动机及其控制	337
§ 12.4 测速发电机	343
§ 12.5 自 整 角 机	347
习 题 12	352
第 13 章 工业企业供电与安全用电	353

§ 13.1 电力系统概述	353
§ 13.2 低电配电线路	355
§ 13.3 安全用电	359
 部分习题答案	 368
 参 考 文 献	 382

电路基础篇

第1章 电路模型及基本定律

电工、电子技术发展十分迅速,现代一切新的科学技术无不与电有密切的关系。因此,人们愈易清楚地认识到电工技术在现代社会中的应用地位。在这样的形势下,作为未来的工程师及科技工作者,掌握电工技术的相关理论知识和技能是极为重要的。

学习电路知识主要应掌握电路的基本规律及其计算方法,从而了解典型电路的特性,为今后的实际工作做好理论准备。但是,书本中所能介绍的电路毕竟是有限的,而今后工作中可能遇到的电路问题则是千变万化、层出不穷的。因此,我们应立足于掌握一些分析问题的方法,这样将会终生受益,对解决实际问题就能得心应手,应对自如。本章将从最一般的分析方法入手,即建立实际装置的物理模型,进而遵照电路的基本规律建立其数学模型,由此引出一些基本概念以及后面各章的学习内容。因此,本章是全书的基础。

§ 1.1 电路及其基本物理量

一门严谨的学科理论,往往有若干无需证明的公理作为全部立论依据,以示无懈可击。如牛顿的经典力学理论,就是建立在质量守恒、能量守恒这两条公理以及一条集中化假设——质点不具有空间几何尺寸之上的。同样,电路理论寻根究源也有其理论支柱,那就是电荷守恒、能量守恒这两条公理和一条集中化假设——理想模型(元件)不具有空间几何尺寸。凡符合上述集中化假设条件的元件称为集中参数元件。在这一假设下,电路中各部分的电压和电流仅是时间 t 的函数,可以表示为 $u(t)$ 和 $i(t)$ 。在这一假设下,元件端钮上的电压和电流,可以用物理方法准确的测定,不因其测试位置不同而异。凡不符合上述假设条件者将要用分布参数表示,本课程只讨论集中参数元件电路。

1.1.1 电路及其分类

1. 电路的组成

由电气装置和器件组成,为完成能量或信号的转换、电能的输送和分配以及信号的传递和处理的系统,称为电路。习惯上把这种电路称为实际电路。

任何一个实际电路都是由电能(或信号)源、电能接受器以及中间环节三部分组成的。

电能(或信号)源,如发电机、信号发生器、蓄电池、温差电池、干电池等,这些装置将其他形式的能量转换成电能。

电能接受器用来将电能转换成其他形式的能量。如电动机、加热器、电灯、永磁式扬声器等都属于电能接受器。在电路中电能接受器习惯上称为负载。

中间环节用来连接电源和电能接受器(负载),抑制或放大确定的信号分量(如滤波器,放大器),改变电路其他部分的电压和电流水平(如变压器),等等。

我们在研究这些实际电路的特性时,往往不是以这些实际的装置和器件作为讨论对象,而是对这些装置和器件的电磁特性进行科学的抽象与概括,用一些模型来代表实际装置和器件的外部功能。用这些模型元件按一定规则进行组合来描述实际装置的主要电磁性能。

由此可知,我们的研究对象,已不是看得见摸得着的实际装置,而是一些理想模型,以及由这些模型相互连接所构成的各种电路图,习惯上称之为电路。在后面所谈到的电路,都是指的电路图。

电路按其功能可以分为传输或分配电能(如电力系统)与传递或处理信号之用(如无线电技术、通信技术等电路)的两大类。

2. 电路中的物理过程

(1) 能量类型。

$$\text{能量} \begin{cases} \text{电磁能量(电能)} \begin{cases} \text{磁场能量} \\ \text{电场能量} \end{cases} \\ \text{非电磁能量(非电能)} \end{cases}$$

(2) 电路中的物理过程。

电路中的物理过程主要是能量转换和能量交换。能量转换是指电能与非电能之间的转换,能量交换是指电场能量与磁场能量的交换。

在电能转换成非电能的过程中,将伴随着能量的交换。电能转换成非电能要消耗电能,称为能量消耗或消耗有功,用转换的速率表示。而电能和磁能的交换没有电能损耗,用能量交换的最大速率表示其特性。电工中称之为消耗无功。

1.1.2 电路元件及其种类

用来代表实际装置外部功能的物理模型称为电路符号,习惯上又称为电路元件,简称元件。电路中的每个元件都有确定的引出端钮,借助引出端钮元件之间相互连接。

电路的实际装置可以用这些元件端钮上的有关物理量的代数方程或微分方程来描述,当然只能是近似地描述所研究的实际装置,模型取得越精确,则理论分析的结果与实际情况就越吻合。

电路元件按其引出端钮数目一般分为二端元件和多端元件,按其元件的数学模型,元件又分为线性和非线性两大类。电路元件还可以分为有源元件和无源元件。能源属于有源元件,放大器件(如电子管、晶体管、运算放大器等)属于有源元件;消耗电能或储存电能的元件(如电阻、电感线圈、电容器、变压器等)都属于无源元件。元件还可以按其他的条件分类,这里不一一介绍了。

1.1.3 基本变量

所谓基本变量是指能用这些变量方便地表示出电路中其他各物理量。电路问题的基本描述量是沿用物理学中有关电学的基本物理量。这些基本物理量一般分为基本变量与基本复合变量两大类。

基本变量如:电流 i 、电压 u 、电荷 q 、磁通 ϕ 等。

基本复合变量如:功率 p 、能量 w 等。

为了便于使用,对本书中用得较多的三个变量,即电压、电流和功率略加回顾。