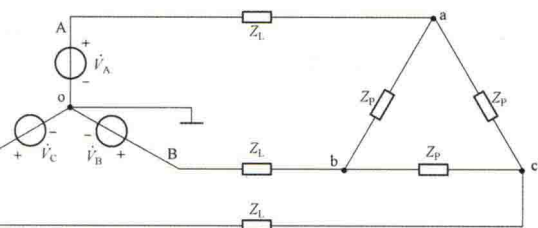




国家电工电子教学基地系列教材



电工技术

◎ 高岩 闻跃 赵文山 余晶晶 编著



清华大学出版社
<http://www.tup.com.cn>



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

国家电工电子教学基地系列教材

电工技术

高 岩 闻 跃 赵文山 余晶晶 编著

清华大学出版社
北京交通大学出版社
· 北京 ·

内 容 简 介

本书是国家电工电子教学基地系列教材之一,以电磁学为基础,以电路和磁路为基本模型介绍了电能、磁能及机械能的转换,以及处理的基本规律、分析方法和工程应用。主要内容包括电路模型,电路变量,电路变量基本约束,线性电路的直流特性、暂态特性及交流特性的分析方法,三相电路及工程应用知识,磁路模型,电能、磁能及机械能转换的基本原理,电感、变压器及三相异步电动机的工作原理、分析方法和实际应用。

本书可作为电子信息类、计算机类、电气类本科生教材,也可作为工科相关电类和非电类本科生及专业技术人员的教材或参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

电工技术 / 高岩等编著. —北京:北京交通大学出版社;清华大学出版社, 2019.1
(国家电工电子教学基地系列教材)

ISBN 978-7-5121-3837-7

I. ① 电… II. ① 高… III. ① 电工技术—高等学校—教材 IV. ① TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 035275 号

电工技术

DIANGONG JISHU

策划编辑:韩乐 责任编辑:付丽婷

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969 <http://www.tup.com.cn>
北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414 <http://www.bjtup.com.cn>

印刷者:三河市华骏印务包装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185 mm×230 mm 印张:15.5 字数:347 千字

版 次:2019年1月第1版 2019年1月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-3837-7/TM·81

印 数:1~3 000 册 定价:42.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。
投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

国家电工电子教学基地系列教材

编审委员会成员名单

主 任 谈振辉

副主任 张思东 赵乐沅 孙雨耕

委 员

王化深 卢先河 朱定华 刘京南 严国萍

杜普选 李金平 李哲英 邹家驷 沈嗣昌

张有根 张传生 张晓冬 陈后金 郑光信

屈 波 侯建军 贾怀义 徐国治 徐佩霞

廖桂生 薛 质 戴瑜兴

总 序

当今信息科学技术日新月异,以通信技术为代表的电子信息类专业知识更新尤为迅猛。培养具有国际竞争能力的高水平的信息技术人才,促进我国信息产业发展和国家信息化水平的提高,都对电子信息类专业创新人才的培养、课程体系的改革、课程内容的更新提出了富有时代特色的要求。近年来,国家电工电子教学基地对电子信息类专业的技术基础课程群进行了改革与实践,探索了各课程的认知规律,确定了科学的教育思想,理顺了课程体系,更新了课程内容,融合了现代教学方法,取得了良好的效果。为总结和推广这些改革成果,在借鉴国内外同类有影响教材的基础上,决定出版一套以电子信息类专业的技术基础课程为基础的“国家电工电子教学基地系列教材”。

本系列教材具有以下特色:

- 在教育思想上,符合学生的认知规律,使教材不仅是教学内容的载体,也是思维方法和认知过程的载体;
- 在体系上,建立了较完整的课程体系,突出了各课程内在联系及课群内各课程的相互关系,体现了微观与宏观、局部与整体的辩证统一;
- 在内容上,体现了现代与经典、数字与模拟、软件与硬件的辩证关系,反映了当今信息科学与技术的新概念和新理论,内容阐述深入浅出,详略得当,增加了工程性习题、设计性习题和综合性习题,培养学生分析问题和解决问题的素质与能力;
- 在辅助工具上,注重计算机软件工具的运用,使学生从单纯的习题计算转移到基本

概念、基本原理和基本方法的理解和应用，提高了学生的学习效率和效果。

本系列教材包括：

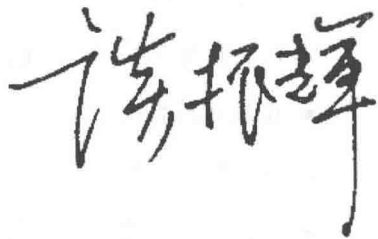
《基础电路分析》《现代电路分析》《电路分析学习指导及习题精解》《模拟集成电路基础》《信号与系统》《信号与系统学习指导及习题精解》《模拟电子技术》《模拟电子技术学习指导与习题精解》《电子测量技术》《微机原理与接口技术》《电路基础实验》《电子电路实验及仿真》《数字实验一体化教程》《SOPC 技术基础教程》《数字信息处理综合设计实验》《电路基本理论》《现代电子线路》《电工技术》。

本系列教材的编写和出版得到了教育部高等教育司的指导、北京交通大学教务处及电子与信息工程学院的支持，在教育思想、课程体系、教学内容、教学方法等方面获得了国内同行们的帮助，在此表示衷心的感谢。

北京交通大学

“国家电工电子教学基地系列教材”

编审委员会主任



2019年1月



前言

大类本科生培养的发展趋势要求专业基础课程教学内容重注通识教育，拓宽知识面，培养专业兴趣，加强基础教育，强化能力和素质培养。为此，作为重要教学资源的教材需要进行相应调整以适应这一发展趋势。

千姿百态的物理世界蕴含着丰富的资源，能量是物理系统的基本资源，物理系统的基本功能是能量的转换和处理。信息是物理的，当信息以某种能量形式表现时，该物理系统就具有了信息转换和处理功能。

认识物理世界的目的是利用这些资源设计专门物理系统并为人类服务。人类经过长期的实践活动将这些认识上升到理论知识，该过程蕴含着丰富的科学思想。学习和掌握这些知识并将其应用到实践活动的过程可以起到提高能力和素质的作用，并从中体验到神奇的自然规律带给我们的乐趣。

本书按照 32 学时要求，以电磁学为基础，以电路和磁路为基本模型介绍了电能、磁能、机械能的转换，以及处理的基本规律、分析方法和工程应用，主要特点包括如下几方面。

1. 优化知识结构的宽度，突出知识面的重点

在众多的能量形式中，电能、磁能和机械能与人类的日常生活息息相关，这些能量形式的转化和处理需要符合一定的物理规律。直流特性、暂态特性和交流稳态特性体现了电能转化和处理的主要特点，电感和变压器特性体现了电能和磁能转化和处理的主要特点，电动机特性体现了电能、磁能和机械能转化和处理的主要特点。综合学习和掌握这些规律、分析方法和应用原理是本书重点。

2. 优化知识结构的深度，突出基础知识

尽管一个物理系统从基本规律到实际应用涉及众多不同层次的知识，但都需要回答这样几个基本问题：用什么形式和什么物理量描述物理系统？这些物理量符合哪些基本约束？依据这些约束的物理系统所表现的主要现象和所能实现的基本功能是什么？电路和磁路是描述电能、磁能、机械能转换和处理的重要模型。本书以此为核心，以电磁学为基础，介绍了运用电路和磁路研究这些能量转换和处理的基本方法。

3. 优化知识结构的内在联系, 强化能力与素质的培养

研究电能量转化和处理的电路模型涉及了电压和电流这两个基本物理量, 拓扑约束和元件约束决定了电路的基本特性。研究电能、磁能、机械能的转化和处理的磁路模型涉及了磁动势和磁通量这两个基本物理量, 也存在与电路对应的拓扑约束和元件约束。此外, 基本规律、基本特性分析和应用之间存在一定的逻辑关系。本书在结构安排上注重知识点的纵向与横向联系, 使学生在在学习专业知识的同时提高了科学研究的基本能力和素质。

4. 强化工程应用, 培养专业兴趣

本书以正文、练习与思考、习题等形式从不同角度和层次讲解相关基本概念和工程应用知识, 使学生从应用的角度出发理解本书内容和专业领域, 培养专业兴趣。

本书共分7章。第1章到第5章以电路为核心, 介绍了电路的基本概念、分析方法及应用。第6章和第7章以电能、磁能、机械能的转换为核心, 介绍了变压器和三相异步电动机的工作原理、分析方法及应用。第1章电路的基本概念, 介绍了电路模型、电路变量、电阻与电源的基本约束、拓扑约束及应用分析。第2章线性电路分析方法以直流特性分析为主, 介绍了电路变换、叠加定理、戴维南定理和诺顿定理、最大功率传输定理、支路电流法、单回路及双结点电路分析法及结点分析法。第3章电路的暂态响应介绍了电容和电感的基本特性、动态电路基本概念、一阶电路分析方法及响应特点。第4章正弦交流电路介绍了正弦稳态特性的相量分析原理。第5章三相电路介绍了三相供电系统及用电知识。第6章磁路和变压器介绍了电磁能转换原理、电感和变压器特性及应用分析。第7章三相异步电动机及其控制介绍了电能、磁能及机械能转换机理、三相异步电动机工作原理、分析方法及应用知识。

本书第2、4章由高岩编写, 第1、5、6章由闻跃编写, 第7章由赵文山编写, 第3章由余晶晶编写。章内设计了练习与思考, 章末附本章要点及习题, 书末给出了部分习题参考答案。全书由高岩主编, 编写框架及内容由全体作者共同确定。

本书以讲义形式已在本科生“电工技术”课程的教学实践过程中被多次使用, 并经过数次修改和调整以适应实际教学需要。本书的编写得到了北京交通大学教材出版基金的资助及北京交通大学出版社的大力支持, 并得益于电路理论学科组及实验室教师多年相互交流及积累的教学经验和资源, 谨此致谢。

限于水平, 书中难免存在错误及不妥之处, 敬请读者批评指正。

作者

2019年1月



目 录

第1章 电路的基本概念	1
1.1 电路模型	1
1.1.1 电路的作用	1
1.1.2 电路模型	2
1.2 电路变量及其参考方向	3
1.2.1 电流	3
1.2.2 电压	4
1.2.3 电压与电流的关联参考方向	5
1.2.4 功率	6
1.3 电路元件	7
1.3.1 电阻元件	7
1.3.2 电源	8
1.3.3 开路与短路	10
1.4 基尔霍夫定律	11
1.4.1 电路连接概念	11
1.4.2 基尔霍夫电流定律	12
1.4.3 基尔霍夫电压定律	14
1.5 简单电路求解	15
1.5.1 实际电源	15
1.5.2 电阻连接	17
1.5.3 电位电路	21
本章要点	23
习题	23

第2章 线性电路分析方法	29
2.1 电源等效变换.....	29
2.1.1 理想电源串并联.....	29
2.1.2 实际电源的等效变换.....	30
2.2 叠加定理.....	32
2.2.1 线性电路的齐次性.....	32
2.2.2 线性电路的叠加性.....	33
2.3 戴维南定理和诺顿定理.....	36
2.3.1 戴维南定理与诺顿定理.....	36
2.3.2 应用戴维南定理的分析.....	38
2.3.3 直流最大功率传输.....	39
2.4 支路电流法.....	40
2.5 简单结构电路的分析.....	43
2.5.1 单回路电路的分析.....	43
2.5.2 双结点电路的分析.....	44
2.5.3 结点分析法.....	45
2.6 星形与三角形电路的等效变换.....	47
本章要点.....	50
习题.....	50
第3章 电路的暂态响应	55
3.1 动态元件.....	55
3.1.1 电容元件.....	55
3.1.2 电感元件.....	57
3.2 动态电路的基本概念.....	59
3.2.1 动态电路.....	59
3.2.2 动态电路的过渡过程.....	61
3.3 动态电路的初始值和直流稳态值.....	61
3.3.1 换路定律.....	61
3.3.2 动态电路直流稳态值的计算.....	63
3.3.3 动态电路初始值的计算.....	65
3.4 一阶动态电路的经典解法.....	66
3.5 一阶动态电路的三要素法.....	69
3.5.1 时间常数.....	69

3.5.2	三要素法	72
	本章要点	77
	习题	78
第4章	正弦交流电路	82
4.1	正弦信号	82
4.1.1	正弦信号基本概念	82
4.1.2	正弦信号相位差	83
4.1.3	正弦信号有效值	85
4.1.4	正弦稳态特点	87
4.2	相量	88
4.2.1	正弦信号的相量表示	88
4.2.2	相量图	89
4.2.3	相量运算	91
4.3	两类约束关系的相量形式	95
4.3.1	基尔霍夫定律的相量形式	95
4.3.2	基本元件约束的相量形式	97
4.4	阻抗与导纳	100
4.4.1	简单支路的相量伏安关系	100
4.4.2	无源二端电路的阻抗与导纳	101
4.4.3	阻抗的连接	103
4.5	相量分析	106
4.5.1	阻抗串联与并联电路的分析	106
4.5.2	一般正弦稳态电路的分析	109
4.6	正弦稳态功率	114
4.6.1	基本元件的功率	114
4.6.2	二端电路的功率	116
4.6.3	功率因数补偿	119
	本章要点	122
	习题	123
第5章	三相电路	130
5.1	三相电源	130
5.1.1	三相系统	130
5.1.2	三相电源	131

5.1.3	三相电源的连接	132
5.2	三相负载	134
5.2.1	星形连接三相负载	134
5.2.2	三角形连接三相负载	137
5.3	三相电路的功率	139
5.3.1	三相负载的平均功率	139
5.3.2	对称三相负载的瞬时功率	139
5.4	电力系统介绍	143
5.4.1	电力系统构成	143
5.4.2	电力系统的参数和特点	144
5.4.3	电力系统的额定电压等级	145
5.5	安全用电	145
5.5.1	人体安全电压和电流	145
5.5.2	触电方式	146
5.5.3	保护线接地	147
	本章要点	151
	习题	152
第6章	磁路和变压器	156
6.1	磁场的基本概念	156
6.1.1	磁感应强度与磁通量	156
6.1.2	磁场强度和磁导率	157
6.1.3	安培环路定律	158
6.1.4	感应电动势	159
6.1.5	互感	160
6.2	铁磁材料	162
6.2.1	铁磁材料的电磁特性	162
6.2.2	铁磁材料的损耗	164
6.2.3	铁磁材料的种类和应用	165
6.3	磁路	167
6.3.1	磁路的概念	167
6.3.2	直流磁路分析	170
6.3.3	交流铁心线圈电路	171
6.4	变压器的工作原理	175

6.4.1	变压器结构	175
6.4.2	空载运行和电压变换	176
6.4.3	负载运行和电流变换	177
6.4.4	理想变压器	179
6.4.5	阻抗变换	180
6.5	实际变压器的特性和使用	182
6.5.1	变压器等效电路	182
6.5.2	变压器的运行特性	183
6.5.3	变压器的额定值	185
6.6	其他类型的变压器	187
6.6.1	自耦变压器	187
6.6.2	三相变压器	188
6.6.3	多线圈变压器	189
	本章要点	191
	习题	192
第7章	三相异步电动机	198
7.1	基本结构	198
7.1.1	定子	199
7.1.2	转子	199
7.2	工作原理	201
7.2.1	旋转磁场	201
7.2.2	转子转动原理	204
7.3	电路分析	205
7.3.1	定子电路	206
7.3.2	转子电路	207
7.4	电磁转矩和机械特性	209
7.4.1	电磁转矩	209
7.4.2	机械特性	209
7.5	额定值	212
7.6	三相异步电动机的使用	215
7.6.1	异步电动机的起动	215
7.6.2	异步电动机的调速	219
7.6.3	异步电动机的制动	221

本章要点·····	223
习题·····	223
部分习题参考答案·····	226
参考文献·····	234

第1章

电路的基本概念

提要 电路是电工技术的基础内容。本章介绍电路的基本概念和基本规律。先介绍电路模型、电路变量及其参考方向，再讨论对于变量的两类约束，即元件特性和基尔霍夫定律，最后讲解几个简单电路的求解问题。

1.1 电路模型

1.1.1 电路的作用

在现代生活中电能的利用无处不在。要利用电能，就需要让电能在人们规定的路径内传递，按照人们希望的方式工作，而实现这种功能的设备或系统都可称为电路。在工程应用中，电系统可以分为两大类，一类是以电能的传递和转换为目的的设备或系统，如电力系统；另外一类以信息的传递和处理为主要目的，如通信系统。图 1-1 显示了两种系统的例子。图 1-1 (a) 是电力系统的示意，说明了发电、输电和用电整个过程的原理，以及涉及的主要设备。图 1-1 (b) 属于信息处理系统，描述了典型的传感器信号电路原理。

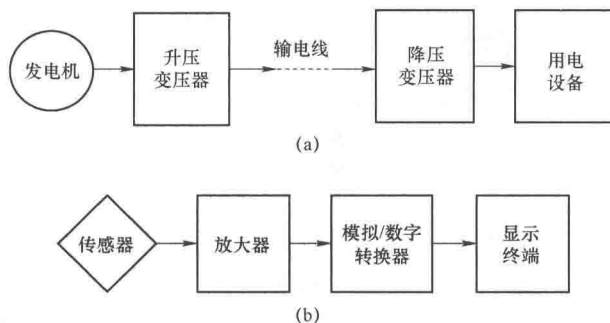


图 1-1 实际电路示意图

以上例子中包含了能量流动过程或者信息流动过程。在以能量传输和利用为主的应用中，能量的来源在电路中称为电源，如发电机或电池，负责把机械能或化学能等转换为电能。用电设备称为负载，如电动机、电灯和电炉等，用来把电能转换为机械能、光能和热能等。导线用来连接电源和负载，通过的电流作为能量传递的载体。长距离、大容量电力传递还需要变压器和输电线等设备。

在信息传输和处理系统中，电路以传递和处理信号为主要功能。信号源在电路中也以电源形式呈现。图 1-1 (b) 的例子中，传感器将速度、压力等物理量转换为电压信号，微弱电压波形经过放大器放大到一定幅度后，经过模拟数字转换电路变成数字形式，在显示终端设备上以数字或曲线形式显示出来。在这个过程中伴随着电能传递和形式转换，但人们注重的是电压或电流变化所携带的信息。

电路的应用非常广泛，各个工程领域中都需要某种形式的电路。随着科学技术的发展，电路和电子学科从最初的物理学中独立出来，逐渐发展出了电力、电子、通信、计算机等众多工程领域。凡是用到电能及电磁原理工作的设备，都包含有电路。

1.1.2 电路模型

实际电路由实际电气器件互相连接而成。实际的电气器件包括电阻器、电容器、电感器、晶体管、集成电路、发电机、电动机等。这些实际的元件或设备的内部电磁过程复杂，差别很大，而且种类繁多。为了便于对实际电路进行分析和描述，需要对实际元器件和设备的特性进行简化，找到它们主要的和公共的特性，抽象为便于分析的电路模型。

电路模型由理想化电路元件和理想导线相互连接构成。理想化电路元件（简称电路元件）是从实际器件的电磁特性抽象出来的数学模型，它包含了元件的电路符号和元件定义的数学表示。

图 1-2 显示了一个照明电路示意图及其对应的电路模型，这个典型的抽象化过程包含了几点考虑。

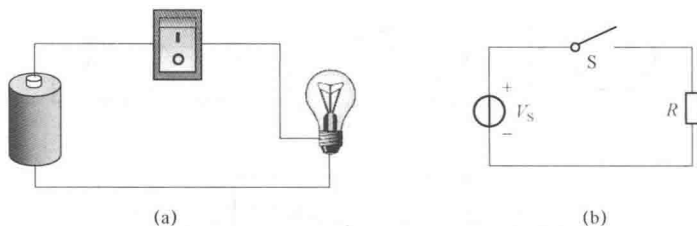


图 1-2 实际电路和电路模型

(1) 电路元件只体现单一的电磁特性，可以用精确的数学关系来描述。例如，照明电

路中的灯泡，通电后发光和热，主要表现为对电能的消耗，可以等效为电阻。但实际的照明设备除了发热之外还可能还有其他效应，如交流日光灯电路还有电感效应，这在电阻元件中并不体现，在建立模型时，可忽略这个次要的特性，或者增加一个电感元件来单独体现。

(2) 一种电路元件可以表征一类实际器件，用很少的几种类型就可以描述种类繁多的实际器件。例如，上述照明电路中，电池有多种，其产生电能的机理不同，特性也不同。但是所有电池有共同的外部特性，就是两端子之间的电压恒定。这个特性就抽象为电路模型中的电压源，它可以代表任何具有电压源性质的电源器件、供电设备和信号源。

(3) 电路元件只能近似代表实际器件。一个实际器件也可用多个理想电路元件的组合作为它的模型，而且在不同工作条件下，可以有不同模型。

电路中采用的元件模型已经被证明是成熟有效的。在通常情况下，用很少的几种理想化元件模型就可以描述各种类型的实际应用电路，得到足够精确的结果。实际器件如何近似和抽象，建立模型，与具体应用有关，不同的工程领域采用不同的建模方法将实际电路转换成电路模型。

1.2 电路变量及其参考方向

电工技术在电路模型的分析中用到了很多物理量，用来分析元件的特性和电路的特性。这些物理量包括电压、电流、电荷、磁链、能量和功率等。电能量的交换和处理是电路的主要功能。由于电功率可分解为电压和电流这两个可测物理量，所以，电路问题中的分析与计算主要针对电压、电流和功率。对电路进行分析，就是根据给定的电路结构和参数，求出特定的电路变量，从而了解电路的特性。

1.2.1 电流

电荷有规则的流动即形成电流。电流定义为在单位时间内通过电路导体某横截面的电荷量，即

$$i = dq / dt \quad (1-1)$$

电流的基本单位为安培 (A)。在工程上规定正电荷移动的方向为电流的实际方向。在电路中用变量 i 或 I 表示电流变量，在电路导线或元件旁边用箭头表示电流变量的假设正方向，或称为参考方向。如图 1-3 (a) 所示，变量 i 表示一个经过元件 E 从 a 流向 b 的电流。实际电流可以是常数，即以恒定的大小、固定的方向流动，图 1-3 (b) 所示电流称为直流电流，直流电流常用大写字母 I 表示。电流也可能随着时间变化，这类电流称为时变电流，通常记为 $i(t)$ ，或简单写为 i 。典型的时变电流是正弦电流，其大小、方向随时间反复按正弦规律变化。以正弦电流工作的电路称为交流电路。