

21 世纪 高 职 高 专 规 划 教 材

电 子 信 息 基 础 系 列



电路分析

曹才开 主编 谢宪继 熊幸明 副主编

邹逢兴 主审

清华大学出版社



21 世纪 高职 高专 规划 教材

电子 信息 基础 系列

电路分析

曹才开 主编 谢宪继 熊幸明 副主编
邹逢兴 主审

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

全书共 10 章,内容包括电路的基本概念与定律、电阻电路的等效变换、电路分析的一般方法、动态电路的时域分析、动态电路的复频域分析、正弦交流电路、具有耦合电感的电路、三相交流电路、非正弦周期电流电路、双口网络。

本书可供高职高专和成人高校电气类、电子类、电工类、通信类各专业作为教材使用,也可供有关工程技术人员和自学考试者参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

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。

本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术,用户可通过在图案表面涂沫清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂沫,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析/曹才开主编. —北京:清华大学出版社,2004.11

(21 世纪高职高专规划教材. 电子信息基础系列)

ISBN 7-302-09617-1

I. 电… II. 曹… III. 电路分析—高等学校:技术学校—教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 096938 号

出 版 者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:束传政

文稿编辑:刘 青

印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:三河市化甲屯小学装订厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:20 75 字数:426 千字

版 次:2004 年 11 月第 1 版 2004 年 11 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-09617-1/TN·215

印 数:1~5000

定 价:25.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

出版说明

高职高专教育是我国高等教育的重要组成部分,担负着为国家培养并输送生产、建设、管理、服务第一线高素质技术应用型人才的重任。

进入 21 世纪后,高职高专教育的改革和发展呈现出前所未有的发展势头,其学生规模已占我国高等教育的半壁江山,成为我国高等教育的一支重要的生力军;办学理念上,“以就业为导向”成为高等职业教育改革与发展的主旋律。近两年,教育部召开了三次产学研交流会,并启动四个专业的“国家技能型紧缺人才培养项目”,同时成立了 35 所示范性软件职业技术学院,进行两年制教学改革试点。这些举措都表明国家正在推动高职高专教育进行深层次的重大改革,向培养生产、服务第一线真正需要的应用型人才的方向发展。

为了顺应当前我国高职高专教育的发展形势,配合高职高专院校的教学改革和教材建设,进一步提高我国高职高专教育教材质量,在教育部的指导下,清华大学出版社组织出版“21 世纪高职高专规划教材”。

为推动规划教材的建设,清华大学出版社组织并成立“高职高专教育教材编审委员会”,旨在对清华版的全国性高职高专教材及教材选题进行评审,并向清华大学出版社推荐各院校办学特色鲜明、内容质量优秀的教材选题。教材选题由个人或各院校推荐,经编审委员会认真评审,最后由清华大学出版社出版。编审委员会的成员皆为教改成效大、办学特色鲜明、师资实力强的高职高专院校、普通高校以及著名企业,教材的编写者和审定者都是从事高职高专教育第一线的骨干教师和专家。

编审委员会根据教育部最新文件政策,规划教材体系,比如部分专业的两年制教材;“以就业为导向”,以“专业技能体系”为主,突出人才培养的实践性、应用性的原则,重新组织系列课程的教材结构,整合课程体系;按照教育部制定的“高职高专教育基础课程教学基本要求”,教材的基础理论以“必要、够用”为度,突出基础理论的应用和实践技能的培养。

本套规划教材的编写原则如下:

- (1) 根据岗位群设置教材系列,并成立系列教材编审委员会;
- (2) 编审委员会规划教材、评审教材;
- (3) 重点课程进行立体化建设,突出案例式教学体系,加强实训教材的出版,完善教学服务体系;
- (4) 教材编写者由具有丰富教学经验和多年实践经历的教师共同组成,建立“双师型”编者体系。

本套规划教材涵盖了公共基础课、计算机、电子信息、机械、经济管理以及服务等大类的主要课程,包括专业基础课和专业主干课。目前已经规划的教材系列名称如下:

公共基础课

公共基础课系列

计算机类

计算机基础教育系列

计算机专业基础系列

计算机应用系列

网络专业系列

软件专业系列

电子商务专业系列

电子信息类

电子信息基础系列

微电子技术系列

通信技术系列

电气、自动化、应用电子技术系列

机械类

机械基础系列

机械设计与制造专业系列

数控技术系列

模具设计与制造系列

经济管理类

经济管理基础系列

市场营销系列

财务会计系列

企业管理系列

物流管理系列

财政金融系列

服务类

旅游系列

艺术设计系列

本套规划教材的系列名称根据学科基础和岗位群方向设置,为各高职高专院校提供“自助餐”形式的教材。各院校在选择课程需要的教材时,专业课程可以根据岗位群选择系列;专业基础课程可以根据学科方向选择各类的基础课系列。例如,数控技术方向的专业课程可以在“数控技术系列”选择;数控技术专业需要的基础课程,属于计算机类课程可以在“计算机基础教育系列”和“计算机应用系列”选择,属于机械类课程可以在“机械基础系列”选择,属于电子信息类课程可以在“电子信息基础系列”选择。依此类推。

为方便教师授课和学生学习,清华大学出版社正在建设本套教材的教学服务体系。本套教材先期选择重点课程和专业主干课程,进行立体化教材建设:加强多媒体教学课件或电子教案、素材库、学习盘、学习指导书等形式的制作和出版,开发网络课程。学校在选用教材时,可通过邮件或电话与我们联系获取相关服务,并通过与各院校的密切交流,使其日臻完善。

高职高专教育正处于新一轮改革时期,从专业设置、课程体系建设到教材编写,依然是新课题。希望各高职高专院校在教学实践中积极提出意见和建议,并向我们推荐优秀选题。反馈意见请发送到 E-mail:gzgz@tup.tsinghua.edu.cn。清华大学出版社将对已出版的教材不断地修订、完善,提高教材质量,完善教材服务体系,为我国的高职高专教育出版优秀的高质量教材。

高职高专教育教材编审委员会

前言

电路分析

本书是根据教育部最新制定的“高职高专教育电工技术基础课程教学基本要求”，由湖南省高校电子技术教学研究会组织省内部分高等院校教师在多年教学研究和教材建设的基础上编写而成的。本书与曹才开主编的《电路实验》相配套。

全书共有 10 章。第 1~3 章为电路基础理论部分，第 4~5 章为动态电路分析，第 6~10 章为正弦交流电路、互感电路、三相交流电路、非正弦周期电流电路和双口网络等内容。

本书注重应用型人才能力的培养，突出基本内容和概念，突出工程应用，较好地处理了教学内容继承与更新、先进性与实用性的关系。为便于教学与自学，节后附有思考与练习，每章附有小结和习题，书末提供了部分习题答案。

本书还编入了少量加深、拓宽的内容，对这些内容均标有“*”号，以供不同学校选用。除这部分内容外，本书适用讲课学时为 80 左右。

本书由曹才开担任主编，谢宪继、熊幸明担任副主编。参加本书编写的有曹才开（第 1、3、6 章），熊幸明（第 2 章），陆秀令（第 4 章），何新军（第 5 章），罗雪莲（第 7 章），胡新晚（第 8 章），谢宪继（第 9、10 章）。

本书承国防科技大学邹逢兴教授（全国高校教学名师奖获得者）仔细审阅，提出了许多宝贵的修改意见，谨致以衷心感谢。在本书的编写过程中，得到了参编学校的大力支持，亦表感谢。

本书可供高职高专和成人高校电气类、电子类、电工类、通信类各专业作为教材使用，也可供有关工程技术人员和自学考试者参考。

由于编者水平有限，书中的疏漏和错误在所难免，敬请各位读者批评指正。

编 者

2004 年 10 月

目 录

电路分析

第 1 章 电路的基本概念与定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.1.1 电路的作用及组成部分	1
1.1.2 电路元件和电路模型	2
1.1.3 电路的工作方式	3
思考与练习	3
1.2 电流和电压的参考方向	3
1.2.1 电流的参考方向	3
1.2.2 电压的参考方向	4
思考与练习	5
1.3 电路的功率	5
思考与练习	7
1.4 电路元件的伏安关系	7
1.4.1 电阻元件	7
1.4.2 电容元件	9
1.4.3 电感元件	10
1.4.4 电压源	11
1.4.5 电流源	12
1.4.6 受控源	14
思考与练习	15
1.5 基尔霍夫定律	17
1.5.1 基尔霍夫电流定律	17
1.5.2 基尔霍夫电压定律	18
思考与练习	20

1.6 电路中电位的计算	21
思考与练习	22
本章小结	22
习题	24
第2章 电阻电路的等效变换	28
2.1 电路等效的概念	28
2.2 电阻的串联、并联等效变换	29
2.2.1 电阻的串联等效变换	29
2.2.2 电阻的并联等效变换	30
2.2.3 电阻的混联等效变换	31
思考与练习	32
2.3 电阻的星形联结与三角形联结的等效互换	32
2.4 电源的等效变换	35
2.4.1 实际电源的两种等效模型	35
2.4.2 电压源、电流源的串联与并联	37
思考与练习	40
2.5 含有电阻和受控源的单口网络的等效	41
思考与练习	43
2.6 替代定理	43
2.7 戴维南定理与诺顿定理	45
2.7.1 戴维南定理	45
2.7.2 诺顿定理	47
思考与练习	50
本章小结	50
习题	52
第3章 电路分析的一般方法	55
3.1 KCL 和 KVL 独立方程的个数	55
3.1.1 KCL 独立方程的个数	55
3.1.2 KVL 独立方程的个数	56
3.2 支路电流法	56
3.2.1 支路电流法的基本思想	56
3.2.2 支路电流法的步骤	57

思考与练习·····	57
3.3 叠加原理·····	58
思考与练习·····	61
3.4 网孔分析法·····	61
3.4.1 网孔分析法的基本思想 ·····	61
3.4.2 用观察法直接列写网孔方程 ·····	63
思考与练习·····	64
3.5 节点分析法·····	65
3.5.1 节点分析法的基本思想 ·····	65
3.5.2 用观察法直接列写节点方程 ·····	67
思考与练习·····	70
* 3.6 具有理想运算放大器的电阻电路的分析 ·····	70
3.6.1 运放的电路模型 ·····	71
3.6.2 具有理想运放的电阻电路的分析 ·····	72
思考与练习 ·····	74
* 3.7 非线性电阻电路的概念 ·····	75
3.7.1 非线性电阻元件 ·····	75
3.7.2 简单非线性电阻电路的分析 ·····	76
思考与练习 ·····	78
本章小结 ·····	78
习题 ·····	79
第4章 动态电路的时域分析 ·····	84
4.1 动态电路及其方程·····	84
思考与练习·····	86
4.2 电压和电流的初始值计算·····	87
思考与练习·····	89
4.3 一阶电路的零输入响应·····	90
4.3.1 RC 电路的零输入响应 ·····	90
4.3.2 RL 电路的零输入响应 ·····	94
思考与练习·····	96
4.4 一阶电路的零状态响应·····	97
思考与练习 ·····	101
4.5 一阶电路的全响应 ·····	101

思考与练习	106
4.6 一阶电路的三要素分析法	106
思考与练习	110
4.7 一阶电路的阶跃响应和冲激响应	110
4.7.1 一阶电路的阶跃响应	110
* 4.7.2 一阶电路的冲激响应	114
思考与练习	119
4.8 微分电路和积分电路	120
4.8.1 微分电路	121
4.8.2 积分电路	122
思考与练习	123
4.9 二阶电路的零输入响应	123
思考与练习	133
本章小结	133
习题	134
* 第5章 动态电路的复频域分析	138
5.1 拉普拉斯变换	138
5.1.1 拉普拉斯变换的定义	138
5.1.2 拉普拉斯变换的基本性质	139
5.1.3 常用信号的拉普拉斯变换	141
5.1.4 拉普拉斯反变换的部分分式法	142
思考与练习	145
5.2 复频域电路模型	146
5.2.1 电路元件的复频域模型	146
5.2.2 电路的复频域模型	149
5.3 电路的复频域分析	150
5.3.1 基尔霍夫定律的复频域形式	150
5.3.2 电路的复频域分析方法	150
思考与练习	158
本章小结	159
习题	160

第 6 章 正弦交流电路	163
6.1 正弦量的三要素	163
6.1.1 正弦量的三要素的基本概念	163
6.1.2 交流电的有效值	166
思考与练习	167
6.2 正弦量的相量表示法及相量电路模型	168
6.2.1 复数的复习	168
6.2.2 正弦量的相量表示法	169
6.2.3 电路元件伏安关系的相量形式	170
6.2.4 基尔霍夫定律的相量形式	175
6.2.5 正弦交流电路的相量电路模型	176
思考与练习	177
6.3 阻抗与导纳	178
6.3.1 阻抗	178
6.3.2 导纳	182
思考与练习	185
6.4 正弦稳态交流电路的分析	185
6.4.1 简单正弦交流电路的稳态分析	186
6.4.2 正弦稳态交流电路的一般分析方法	187
思考与练习	189
6.5 正弦交流电路中的功率	190
6.5.1 瞬时功率	190
6.5.2 平均功率和功率因数	191
6.5.3 无功功率	192
6.5.4 视在功率和额定容量	192
6.5.5 复功率	193
思考与练习	194
6.6 功率因数的提高	195
思考与练习	197
6.7 正弦交流电路中的谐振	197
6.7.1 串联谐振	197
6.7.2 并联谐振	201
思考与练习	203

本章小结	203
习题	205
第7章 具有耦合电感的电路	210
7.1 互感	210
7.1.1 两个耦合电感线圈的互感	210
7.1.2 两个耦合电感线圈的耦合系数	211
7.1.3 互感线圈的同名端及其伏安关系	212
思考与练习	217
7.2 具有耦合电感电路的计算	217
7.2.1 耦合电感的串联与并联	217
7.2.2 具有耦合电感电路的分析计算	221
思考与练习	225
7.3 空心变压器	226
思考与练习	231
7.4 理想变压器	232
思考与练习	237
本章小结	238
习题	239
第8章 三相交流电路	243
8.1 对称三相电源	243
8.1.1 对称三相电源的特点	243
8.1.2 三相电源的联结方法	245
思考与练习	247
8.2 负载为星形联结的三相对称电路	248
8.2.1 三相四线制电路	248
8.2.2 负载为星形联结的三相对称电路的计算	248
思考与练习	252
8.3 负载为三角形联结的三相对称电路	252
思考与练习	255
8.4 不对称三相电路的概念	256
8.4.1 负载不对称电路及中线的作用	256
8.4.2 不对称三相电路的计算	257

思考与练习	260
8.5 三相电路的功率	260
8.5.1 对称负载三相功率的计算	260
8.5.2 不对称负载三相功率的计算	260
思考与练习	262
本章小结	262
习题	263
第9章 非正弦周期电流电路	267
9.1 非正弦周期电流电路的基本概念	267
9.1.1 非正弦周期电流、电压的概念	267
9.1.2 产生非正弦周期电压、电流的原因	267
9.1.3 谐波分析法	268
思考与练习	269
9.2 非正弦周期信号的谐波分析	269
9.2.1 非正弦周期信号的谐波分析方法	269
9.2.2 对称波形的傅里叶级数	272
9.2.3 查表求周期函数 $f(t)$ 的傅里叶级数展开式	274
思考与练习	276
9.3 有效值、平均值和平均功率	277
9.3.1 有效值	277
9.3.2 平均值	279
9.3.3 平均功率	280
思考与练习	282
9.4 非正弦周期电流电路的计算	282
思考与练习	285
本章小结	286
习题	287
* 第10章 双口网络	289
10.1 概述	289
10.2 双口网络的 Y 参数	290
思考与练习	294
10.3 双口网络的 Z 参数	295

思考与练习	296
10.4 双口网络的 $T(A)$ 参数	296
思考与练习	298
10.5 双口网络的 H 参数	299
10.6 双口网络参数间的关系	300
10.6.1 Z 参数与 Y 参数的关系	300
10.6.2 Y 参数与 T 参数的关系	301
10.6.3 四个参数之间的转换关系	302
思考与练习	303
10.7 双口网络的等效电路	304
思考与练习	306
10.8 双口网络的连接	306
10.8.1 双口网络的级联	307
10.8.2 双口网络的并联与串联	308
思考与练习	309
本章小结	309
习题	310
部分习题答案	312
参考文献	318

电路的基本概念与定律

本章将介绍电路模型和电阻、电容、电感、电压源、电流源、受控源等理想电路元件,引出电流和电压的参考方向的概念。电路中电压、电流所受到的两类约束,其中一类约束来自元件的本身性质,即元件的伏安关系;另一类约束来自元件的相互连接方式,即基尔霍夫定律。最后介绍电路中电位的概念。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路的作用及组成部分

实际电路是为实现某种应用目的,由若干电器设备或器件按一定方式用导线连接而成的电流通路。

实际电路的形式多种多样,但就其作用而言,可以划分为两大类。其中一类主要是实现电能的传输和转换。这类电路有时称为电力电路或强电电路。典型的例子是电力系统,发电机组产生的电能通过变压器、输电线等输送给各用电单位,这就构成了一个很复杂的电路。又如我们所熟识的手电筒的电路,是用来照明的一种最简单的电力电路,它由电池、灯泡和开关按钮通过手电筒壳(导体)连接而成。其中电池是提供电能的器件,这类器件称为电源;灯泡是耗用电能的器件,这类器件称为负载;而按钮和导体介于电源和负载之间,起着传输和控制作用,这类器件称为中间环节。在一般电路中,中间环节还包括保障安全用电的保护电器和测量仪表等。

另一类电路主要是实现信号的传递和处理。这类电路有时称为电子电路或弱电电路。如图 1.1(a)所示的电路是一种最简单的收音机电路。其中天线用以接收无线电波,向电路提供电信号,是收音机电路的信号源,属于另一类电源;耳机是将电信号转换成声音的器件,属于另一类负载。线圈、电容器、半导体二极管是进行调谐、检波的器件,属于中间环节。

电源、负载和中间环节,是电路的三个基本组成部分。

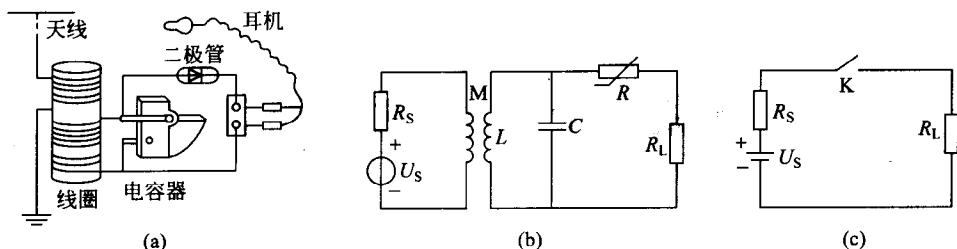


图 1.1 电路和电路模型

1.1.2 电路元件和电路模型

用于构成实际电路的电器设备和器件,统称为实际电路元件,简称为实际元件。实际元件不但种类繁多,而且对一个实际元件来说,其电磁性能也不是单一的。例如实验室用的滑线变阻器由导线绕制而成,当有电流通过时,不仅会消耗电能(具有电阻性质),而且还会产生磁场(具有电感性质);不仅如此,导线的匝与匝之间还存在分布电容(具有电容性质)。上述性质是交织在一起的,而且电压、电流频率不同时,其表现程度也不一样。

在电路分析中,如果对实际元件的所有性质加以考虑,将是十分困难的。为了便于对实际电路进行分析和数学描述,在电路理论中采用了模型的概念,这就是在一定条件下,对实际元件加以近似化和理想化,用只具有单一电磁性能的理想电路元件来代表它。所以,理想电路元件是实际元件抽象出来的理想化模型。一种实际元件可用一种或几种理想电路元件的组合来表征。例如上面提到的滑线变阻器,若只考虑其消耗电能的性质,则可用电阻元件来表征;若还考虑磁场的作用,则可用电阻元件与电感元件的组合来表征。同时,对于电磁性能相近的实际元件,也可用同一种理想电路元件近似地表征。例如,所有的电阻器、灯泡、电烙铁、电熨斗等,都可用电阻元件来表征。在电路分析中,常用的理想电路元件只有几种(如电阻元件、电感元件、电容元件和电源元件等),它们可以用来表征千千万万种实际元件。以后常将理想电路元件简称为电路元件,它们都有各自的精确定义和数学模型,在电路图中用规定的符号表示。

由电路元件构成的电路,称为电路模型。今后我们研究的电路都是电路模型,并非实际电路。所有的实际电路,不论简单的还是复杂的,都可以用几种电路元件所构成的电路模型来表示。例如,图 1.1(a)所示的实际电路,它的电路模型如图 1.1(b)所示;手电筒的电路模型如图 1.1(c)所示。上述实际电路中的电池和天线用电源元件表示,灯泡、半导体二极管和耳机用电阻元件表示,线圈用电感元件表示,电容器用电容元件表示。如何把实际电路变成电路模型,即所谓“建模”的问题,不是本课程的任务,本书对此不作讨论。

1.1.3 电路的工作方式

电路在工作时,对电源来说,通常处于下列三种方式之一:负载、空载和短路。

负载工作方式时,负载与电源接通,负载中有电流通过,该电流称为负载电流,负载电流的大小与负载电阻有关。通常负载都是并联的,它们的两端接在一定的电压下,因此当负载增加时(例如并联的负载数目增加),负载电阻减小,负载电流增大,即功率增大。一般所说的负载的大小,指的是负载电流或功率的大小,而不是指负载电阻的大小。

空载时,负载与电源未接通,电路不通,电路中电流为零。这时电源的端电压叫做空载电压或开路电压。

短路是指由于某种原因使电源两端直接接通,这时电源两端的外电阻等于零,电源输出的电流仅由电源内阻限制,此电流称为短路电流。一般内阻很小,所以此电流将很大,以致烧毁电源、导线等。短路通常是一种严重事故。为了避免短路的发生,一般在电路中接入熔断器或其他自动保护装置,一旦发生事故,它们能迅速将故障电路自动切断。

思考与练习

1.1.1 什么是理想电路元件?它与实际电路元件有什么区别?什么是电路模型?

1.1.2 电路由哪几部分组成?并说明各部分的功能。

1.1.3 电路在短路状态时,电路中的电流将如何变化?它对电路的工作有什么影响?

1.2 电流和电压的参考方向

电流(current)和电压(voltage)是描述电路工作过程的两个基本物理量。关于它们的定义,在物理学中已有介绍,本书不再重复,只着重讲述它们的参考方向。

1.2.1 电流的参考方向

电流用 i 或 I 表示, I 表示直流电流或交流电流有效值。在国际单位制(SI)中,电流的单位是安培,简称安(A),其辅助单位有千安(kA)、毫安(mA)和微安(μA)。 $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$, $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$ 。

在电路中,习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。对于一个简单的电路,有时可以判断出电流的实际方向,但对于复杂电路,却很难做到。如果是正弦交流,由于它的实际方向时刻在变化,就更难判定了。为了分析电路,引进了参考方向的概念,有的书中把参考方向称为正方向。

所谓电流参考方向,是人们任意假定的电流方向,在电路图中用箭头表示。例如,对于图 1.2 所示的一段电路,它的电流参考方向既可以选定为 A 至 B[图 1.2(a)],也可以选定为由 B 至 A[图 1.2(b)]。电流的参考方向也可以用双下标表示,如 i_{AB} ,它表示电流