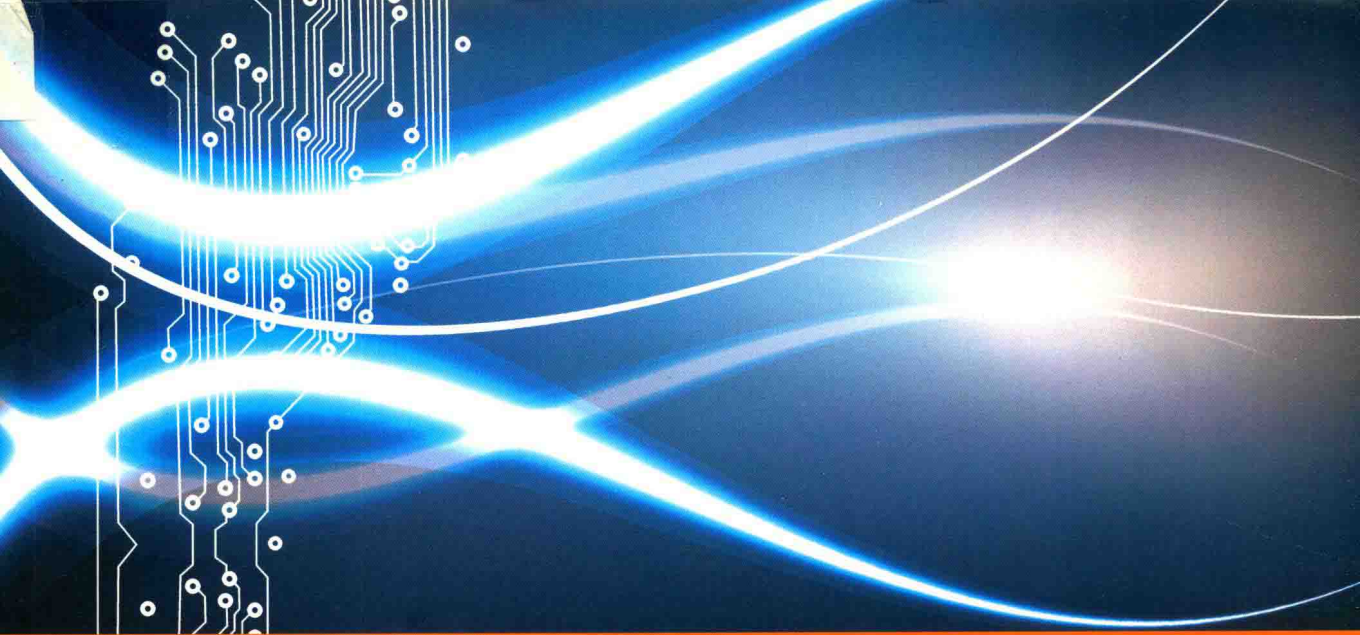




普通高等院校电气信息类应用型规划教材

电路分析基础

DIANLU FENXI JICHU

李文 周鹏 杨熙 主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等院校电气信息类应用型规划教材

电路分析基础

李文 周鹏 杨熙 主编

中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书作为湖南省“十三五”专业综合改革课程建设系列教材之一,是课程组在多年教学实践的基础之上,依据教育部颁发的《普通高等学校本科专业类教学质量国家标准》和《高等学校工科本科部分基础课课程教学基本要求》并结合应用型人才的培养目标和特点,本着突出实用性、实践性的原则编写而成的。

全书分为10章,按照从一般到具体的方式,对基本电路和其他类型的电路进行了分析与讨论。其中第1~3章为直流电阻性电路分析,第4~5章为直流动态电路分析,第6章为正弦交流电路稳态分析,第7~8章为工程电路分析,第9章为电路频率特性分析,第10章为双口网络分析。本书注重基础知识与工程实践的结合,以项目驱动为导向,以生活常见实例作为核心知识切入点,将电路分析对象化,使基础知识的学习做到深入浅出。注重激发学生对相关知识的学习兴趣,注重提出问题、分析问题、解决问题的能力 and 创新意识的培养。

本书适合作为高等学校电子信息与电气工程类本科、专科生电路分析课程的教材或教师教学参考书,也可供有关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/李文,周鹏,杨熙主编. —北京:
中国铁道出版社,2019.2

普通高等院校电气信息类应用型规划教材

ISBN 978-7-113-25158-1

I. ①电… II. ①李… ②周… ③杨… III. ①电路分
析-高等职业教育-教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第010535号

书 名:电路分析基础
作 者:李文 周鹏 杨熙 主编

策 划:韩从付 读者热线:(010)63550836
责任编辑:周海燕 绳 超
封面设计:刘 颖
责任校对:张玉华
责任印制:郭向伟

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com/51eds/>

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

版 次:2019年2月第1版 2019年2月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:18.75 字数:470 千

书 号:ISBN 978-7-113-25158-1

定 价:49.50 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社教材图书营销部联系调换。电话:(010)63550836

打击盗版举报电话:(010)51873659

前言

PREFACE

随着社会逐步进入智能化时代,电子技术、通信技术等相关技术进一步发展,电路理论的作用更加突出,电路分析作为电路理论的基础性部分,其重要性不言而喻。本书是根据教育部颁发的《普通高等学校本科专业类教学质量国家标准》和《高等学校工科本科部分基础课课程教学基本要求》,兼顾当今高校应用型人才的培养要求,结合近年来国内外电路分析基础教学改革趋势和编者多年的教学经验与总结编写而成的。

本书主要针对应用型本科院校和高等职业院校电子信息与电气工程类专业,从实际教学的角度出发,删繁就简,力求结构紧凑、脉络清晰,在内容编排上注重结合应用型人才的培养特点,做到基础理论适用,分析设计方法够用,深入浅出,简洁易懂。注重理论应用于实践的特色,使学生通过本书的学习,提高工程应用能力,为后续课程及今后的就业和创业打下良好基础。

本书具体进行了如下几方面的探索和尝试:

(1)首次以面向对象的方式分析电路,减少学生对多种分析方法的混淆。例如在讲解基尔霍夫定律时,明确 KCL(基尔霍夫电流定律)分析的对象为节点,分析的变量为支路电流;明确 KVL(基尔霍夫电压定律)分析的对象为回路,分析的变量为回路中的支路电压;基尔霍夫定律的结论为支路电流(支路电压)代数和等于零。

(2)前3章以直流电阻性电路为研究对象,层层深入介绍了电路分析的基本概念、网络定理、等效变换和一般分析方法;第4~5章以直流一阶、二阶动态电路的时域分析作为研究对象,从元件的伏安关系出发研究动态元件的性质和动态电路的分析方法,着重强调了三要素分析法和二阶电路的响应特点;第6~9章以交流稳态电路的频域分析为研究对象,涉及正弦稳态电路、三相电路、变压器、电路的频率特性等内容,均以相量分析法为基础;第10章介绍了双口网络的概念和分析方法。本书从总体上是以集中参数电路的元件约束(伏安关系)和结构约束(基尔霍夫定律)作为学习的主线,并贯穿于电路分析课程的始终。

(3)为激发学生参与课堂的热情,每章均以学生喜闻乐见的电子项目作为核心知识的切入点,部分章节将知识与生活实例相结合。如在讲解独立电源等效变换时,让学生思考给电动车充电时蓄电池为何会发热,甚至引起火灾;手机电池为什么会发生爆炸等,引导学生认识电路分析的实际应用,形成项目驱动式的教学体系。通过发现问题,思考问题,从而逐步解决问题,让学生体验到“课堂不再枯燥”,而是与生活密切相关。

(4)为便于学生学习,本书力求抓住本质,深入浅出,强化基础,弱化理论推导。例如,在讲解节点分析法时,明确分析的对象为节点,分析变量为节点电压,则可从 KCL 角度出发,列出电路的 KCL 方程,用节点电压代替支路电流,从而总结出节点方程的列写方法,进而让学生自主地写出其他节点方程,因而减轻了学生死记公式的负担。与前后知识相联系,避免混淆。

(5) 本书按照工程教育理念,通过合理安排教材内容,突出基本理论与实际应用的结合。每章均有应用分析及 Multisim 仿真例题,便于学生自学,增强动手能力。

(6) 为加强学生对整个课程体系的理解,本书注重电路分析与后继相关课程的关联,注意承前启后。例如含受控源电路分析与模拟电路小信号模型法的关系、一阶动态电路与信号与系统课程的联系、相量的表示法与电磁场电磁波的关系等等,使学生对相关专业课程有了初步认识。

(7) 为便于教材使用者学习,解决“上课听得懂,课下解题难”的问题,每章后均有小结及习题。

全书共 10 章,内容包括绪论(1 学时)、电路的基本概念及基本元件(6 学时)、电路的等效变换与网络定理(10 学时)、电路的一般分析方法(6 学时)、一阶动态电路分析(8 学时)、二阶动态电路分析(5 学时)、正弦交流电路稳态分析(4 学时)、三相电路(3 学时)、互感和变压器(4 学时)、电路的频率特性(8 学时)、双口网络(4 学时)。建议理论学时 59 学时。

参与本书编写的人员均为湖南科技学院的骨干教师,有着该课程丰富的教学经验和科研经历。全书由李文、周鹏、杨熙任主编,陈泽顺、谭道军、贾竹君、黄丽韶任副主编。本书第 1、2、3 章及附录 A 由周鹏编写,绪论及第 4、5、10 章由李文编写,第 6、7 章由杨熙编写,第 8 章由谭道军编写,第 9 章由陈泽顺编写,习题及参考答案部分由贾竹君、黄丽韶编写。全书的统稿工作由李文和周鹏完成。

本书在编写过程中,得到了校内外相关教师和院系的大力支持和帮助,也参考了国内外许多优秀的同类教材以及网络资源,在此向各位同事和所有支持、帮助过本书编写的人员和单位一并表示感谢。

其中要感谢以下项目的资助:

(1) 教育部新工科研究与实践项目——“政校企”多方协同育人模式下的大数据学院共建与实践研究”(教高厅函[2018]17 号);

(2) 湖南省普通高等学校“十三五”专业综合改革试点项目(湘教通[2016]276 号);

(3) 湖南省普通高校校企合作创新创业教育基地(湘教通[2016]436 号);

(4) 湖南科技学院计算机应用技术重点学科建设项目;

(5) 教育部高等教育司产学合作协同育人项目(项目编号:201601021003,201701048006,201702065165,201701034028,201701048044,201702018122);

(6) 湖南省教育厅教改项目(湘教通[2016]400 号);

(7) 湖南省教育科学“十三五”规划课题(项目编号:XJK17QGD008)。

本书虽经过多次讨论及反复修改,但因时间仓促及编者水平有限,不当之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2018 年 10 月

绪 论	1	§ 2.5 戴维南定理和诺顿定理	47
第1章 电路的基本概念及基本元件 ...	3	2.5.1 戴维南定理	47
§ 1.1 实际电路和电路模型	3	2.5.2 诺顿定理	50
§ 1.2 电路分析的基本变量	5	§ 2.6 最大功率传输定理	52
1.2.1 电流及其参考方向	5	§ 2.7 等效变换应用实例	53
1.2.2 电压及参考方向	6	2.7.1 仿真实例	53
1.2.3 关联参考方向	7	2.7.2 扩音系统分析	54
1.2.4 功率和能量	7	小 结	56
§ 1.3 基尔霍夫定律	9	习 题	57
§ 1.4 电阻元件	12	第3章 电路的一般分析方法	63
§ 1.5 电源元件	15	§ 3.1 网孔分析法	64
1.5.1 独立电源	15	3.1.1 一般网孔分析法	64
1.5.2 实际电源的模型	18	3.1.2 特殊网孔分析法	65
1.5.3 受控电源	19	§ 3.2 节点分析法	68
§ 1.6 仿真与应用实例	22	3.2.1 一般节点分析法	68
1.6.1 软件的基本操作	22	3.2.2 特殊节点分析法	71
1.6.2 基尔霍夫定律仿真		§ 3.3 图论基础与回路分析法	72
与应用	23	3.3.1 图论基础	72
小 结	24	3.3.2 回路分析法	74
习 题	25	§ 3.4 一般分析法应用实例	78
第2章 电路的等效变换与网络		3.4.1 仿真实例	78
定理	30	3.4.2 NTC 测温电路	80
§ 2.1 等效变换的概念	31	小 结	82
§ 2.2 无源网络的等效电路	32	习 题	83
2.2.1 纯电阻网络的等效		第4章 一阶动态电路分析	88
电路	32	§ 4.1 动态元件	89
2.2.2 含受控源单口网络的		4.1.1 电容元件	89
等效电路	38	4.1.2 电感元件	94
§ 2.3 含源单口网络的等效电路 ...	39	§ 4.2 换路定则和初始值的计算 ...	98
2.3.1 独立源的连接及等效		§ 4.3 一阶电路的零输入响应	100
变换	39	§ 4.4 一阶电路的零状态响应	104
2.3.2 实际电源模型的互相		§ 4.5 一阶电路的全响应	107
转换	42	§ 4.6 三要素分析法	108
§ 2.4 线性和叠加定理	44	§ 4.7 应用仿真	113

4.7.1 一阶动态电路仿真	113	6.5.1 相量模型	159
4.7.2 照相机闪光灯电路 分析	114	6.5.2 阻抗、导纳的串联和 并联	159
小 结	115	6.5.3 正弦稳态电路的相量 分析	161
习 题	117	§ 6.6 正弦稳态电路的电功率	163
第 5 章 二阶动态电路分析	122	6.6.1 瞬时功率	163
§ 5.1 二阶串联电路的零输入 响应	123	6.6.2 平均功率、功率因数、 视在功率	164
§ 5.2 二阶串联电路的全响应	128	6.6.3 无功功率	164
§ 5.3 二阶并联电路的响应	130	6.6.4 R 、 L 、 C 单个元件的 各种功率	164
§ 5.4 应用仿真	132	6.6.5 复功率	165
小 结	134	6.6.6 关于功率因数提高与最大 功率传输问题	167
习 题	134	§ 6.7 技术实践	171
第 6 章 正弦交流电路稳态分析	137	小 结	173
§ 6.1 正弦交流电的基本概念	137	习 题	174
6.1.1 正弦量及其三要素	137	第 7 章 三相电路	180
6.1.2 正弦量间的相位差	138	§ 7.1 三相电路的基本概念	180
6.1.3 有效值	139	§ 7.2 对称三相电路分析	184
§ 6.2 电阻、电容及电感中的 正弦电流	140	§ 7.3 不对称三相电路分析	187
6.2.1 电阻元件	140	§ 7.4 三相电路的功率	188
6.2.2 电感元件	141	7.4.1 三相电路功率的 基本概念	188
6.2.3 电容元件	143	7.4.2 三相电路功率的 测量	190
§ 6.3 正弦量的相量表示法	144	§ 7.5 应用实例	191
6.3.1 复数和常用的表示 方法	144	小 结	192
6.3.2 相量的基本概念	146	习 题	193
6.3.3 正弦量和与之相对应的 相量的运算规则	147	第 8 章 互感和变压器	195
§ 6.4 电路基本元件 VCR 的相量 形式及电路定律	149	§ 8.1 互感和互感电压	195
6.4.1 基本元件 VCR 相量式	149	§ 8.2 含有互感电路的分析	198
6.4.2 电路定律的相量 形式	152	§ 8.3 理想变压器	203
6.4.3 相量的图形分析法—— 相量图	153	小 结	205
6.4.4 电路的阻抗和导纳	155	习 题	206
§ 6.5 正弦稳态电路分析的 相量法	159	第 9 章 电路的频率特性	209
		§ 9.1 电路的频率特性与网络 函数	210

9.1.1 频率特性与网络函数的 定义	210	§ 10.2 双口网络方程及参数	242
9.1.2 网络函数的分类	210	10.2.1 双口网络的 Y 参数 ..	243
§ 9.2 RC 电路的频率特性	211	10.2.2 双口网络的 Z 参数 ..	246
§ 9.3 RLC 串联谐振	217	10.2.3 双口网络的 H 参数 ..	248
9.3.1 RLC 串联谐振条件 与谐振特性	217	10.2.4 双口网络的 T 参数 ..	249
9.3.2 RLC 串联谐振电路的 频率特性	221	§ 10.3 双口网络的互连	252
9.3.3 RLC 串联谐振的转移 电压比	223	10.3.1 级联	252
§ 9.4 GCL 并联谐振	225	10.3.2 串联	253
9.4.1 GCL 并联谐振条件 与谐振特性	225	10.3.3 并联	254
9.4.2 GCL 并联谐振电路的 频率特性	227	§ 10.4 双口网络的开路阻抗 和短路阻抗	256
9.4.3 实际并联谐振电路	228	§ 10.5 对称双口网络的特性 阻抗	257
§ 9.5 电源内阻及负载电阻 对谐振的影响	230	§ 10.6 双口网络的等效电路	258
§ 9.6 电路仿真及应用	232	10.6.1 Z 参数等效电路	258
小 结	234	10.6.2 Y 参数等效电路	259
习 题	235	§ 10.7 实际应用	260
第 10 章 双口网络	240	10.7.1 晶体管放大电路 分析	261
§ 10.1 双口网络概述	240	10.7.2 负阻抗变换器	264
10.1.1 二端网络(单口 网络)	240	小 结	265
10.1.2 双口网络的基本 概念	241	习 题	266
		习题参考答案	269
		附录 A 电路中常见名词中英文 对照	287
		参考文献	292

绪论

一、电路分析课程的地位

电路分析课程是通信类、应用电子技术类、电子信息类等专业的专业基础课。是后继课程,包括:模拟电子技术、信号与系统、通信原理、高频电子技术、电磁场与电磁波等专业基础课程、专业核心课程的基础。

二、电子技术发展简史

1879 年,美国发明家爱迪生发明了灯泡。开启了人类史上的“电力时代”。

1887 年,美籍发明家特斯拉发明了交流电电力系统,并制造出第一台交流发电机。

1894 年,意大利物理学家马可尼和俄国工程师波波夫分别发明了无线电。开创了人类通信的新纪元。

1895 年,荷兰物理学家洛伦兹提出了著名的洛伦兹力公式,他是经典电子论的创立者。

1904 年,英国弗莱明发明了电子二极管。

1906 年,美国德福雷斯特发明了电子三极管。

1925 年,英国贝尔德发明了电视机。1936 年黑白电视机问世。

1946 年,第一台电子管计算机在美国宾夕法尼亚大学制成。

1947 年,美国肖克莱、巴丁、布拉顿三人发明了晶体管。

1958 年,美国基尔比发明了集成电路,开创了电子技术的新纪元。

1981 年,美国 IBM 公司正式推出了 IBM 个人计算机。

三、电路理论的发展历史和最新动态

1. 发展历史

电路理论起源于物理学中电磁学的一个分支,若从欧姆定律(1826 年)和基尔霍夫定律(1845 年)的发表算起,至今已走过了一百多年的发展历程。目前已发展成为一门体系完整、逻辑严密、具有强大生命力的学科领域。

20 世纪 30 年代开始,电路理论已成为一门独立学科,建立了各种元器件的电路模型。

20 世纪 50 年代末,电路理论在学术体系上基本完善,这个阶段称为经典电路理论:主要是由时域分析发展到频域分析与电路设计。

20 世纪 60 年代以后的电路理论为近代电路理论,主要包括:

(1) 图论引入电路理论。

- (2) 出现大量新的电路元件、有源器件。
- (3) 电路分析和设计在计算机上的应用。

2. 电路理论研究的问题

电路理论包括电路分析和电路综合两大部分内容。电路分析是指给定电路的结构、元件参数,求由激励(电压或电流输入)产生的响应(电压或电流输出);电路综合是指给定电路激励和响应,求解电路的结构和元件参数。显然电路综合的难度要远高于电路分析,本书仅限于学习电路分析部分。

3. 研究热点与前沿课题

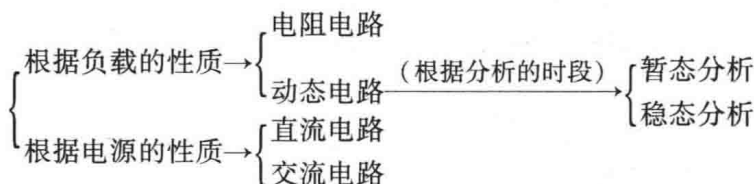
电路的故障诊断与自动检测、有源与开关电容电路、微电子电路设计与应用、非线性电路的分析综合、器件建模和新器件的创制、电路的数学综合、人工神经网络等。

四、电路分析课程结构和学习建议

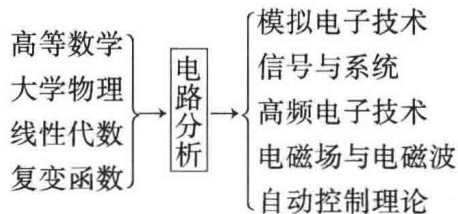
1. 课程结构

电路分析课程主要分为几个模块:第一个模块为电路分析的理论基础、静态电阻性电路分析;第二个模块为动态电路分析、正弦稳态电路分析、电路的频率特性分析;第三个模块为强电的电路分析;第四个模块为其他电路分析。这些模块均以元件的伏安关系和基尔霍夫定律为主线。

2. 电路的分类



3. 前后续课程及联系



4. 学习建议

学好本课程,应注意抓好四个主要环节:提前预习、认真听课、及时复习、独立作业。还要处理好三个基本关系:听课与笔记、作业与复习、自学与互学,即

课前预习,课堂理解;
课后练习,温故知新;
把握重点,突破难点;
注重特点,融会贯通;
重视实践,勤思多练;
善于归纳,勇于创新。

第 1 章

电路的基本概念及基本元件

本章是电路分析的基础性内容,通过本章的学习厘清电路分析的对象和变量,厘清参考方向和关联参考方向,有助于对电压、电流之间关系的理解。基尔霍夫定律是电路分析的核心点所在,贯串于电路分析的始终。

主要知识点

本章主要知识点包括实际电路与理想电路的基本概念、电路分析的变量及参考方向、关联参考方向、电路分析的元件、基尔霍夫定律。

能力培养

会将实际电路转化为理想电路进行分析求解。会利用工具测量电路端电压、端电流判断电路的正确性。

【引例】 漏电保护器

生活用电中,为了防止人畜触电,通常将漏电保护器接在电器之前。当人不小心触碰到裸线,或者其他原因造成漏电时,漏电保护器自动将电断开,保护人不受伤害,如图 1-引-1 所示。

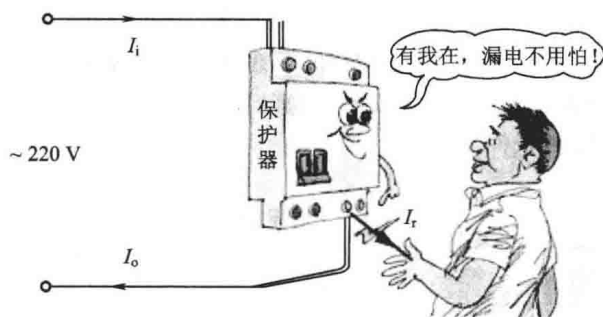


图 1-引-1 漏电保护器

§1.1 实际电路和电路模型

1. 实际电路

实际电路(circuit),即由一些电气设备或器件按一定的方式组合起来构成的具有一定功能的电流通路。

电路种类繁多,在生产、生活中应用广泛,主要是在电子信息、通信、自动控制、电力、计算

机等领域用来完成各种各样的任务。

如电力系统中发电、输电、配电、电力拖动、电热、电气照明等完成电能传输和转换的电路；再如电子信息、通信工程等领域中对语音、文字、图像等信号传输、处理和接收的电路；还有完成控制、存储等复杂功能的大规模及超大规模集成电路等。

虽然电路形式多种多样,但从电路本质来说,都由电源(source)、负载(load)和中间环节三个最基本部分组成。

如手电筒电路,由电池、灯泡、外壳组成。电池作为电源把化学能转换成电能供给负载——灯泡,灯泡把电能转换成光能作照明之用,电池和灯泡通过中间环节——外壳,连接起来。实际手电筒如图 1-1-1 所示,手电筒模型如图 1-1-2 所示。



图 1-1-1 实际手电筒

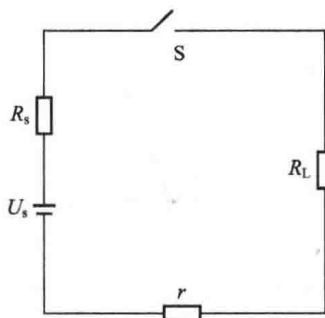


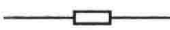
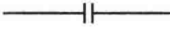
图 1-1-2 手电筒模型

2. 元器件与电路模型

元器件:构成电路的基本单元,电路分析中常见的元器件主要有电阻元件、电容元件、电感元件,这三类元件被称为二端元件,见表 1-1-1。除二端元件外,还有多端元件,比如受控源、耦合电感、变压器等。实际元器件称为器件,理想元器件,称为元件。

集中参数元件:不考虑其尺寸、形状和大小,其特性集中体现在一个点上,称为集中参数元件,又称集总参数元件、理想元件。

表 1-1-1 常见电路元件

实际器件	理想元件	符号	单位	图形符号	基本作用
电阻器	电阻元件	R	欧(Ω)		分压、分流、消耗能量
电容器	电容元件	C	法(F)		存储电场能
电感器	电感元件	L	亨(H)		存储磁场能

电路模型:由集中参数元件构成的电路称为电路模型,又称集中参数电路(lumped circuit),简称电路。较复杂的电路又称网络(network)。

电路模型是实际电路的科学化、抽象化的数学模型。采用电路模型来分析电路,不仅计算过程大为简化,而且能更清晰地反映电路的物理实质。

在本书中,“电路”和“网络”通用。将集中参数元件用模型符号表示,画出的图称为电原

理图(即电路图)。电路图和元件的尺寸与实际电路和实际器件的尺寸无关。

本书只研究集中参数电路。如不特别声明,本书中提到的电路指集中参数电路,元件指集中参数元件。

3. 实际电路与电路模型之间的转换关系

实际电路在研究时需要考虑各种因素,比如周围的温度、信号的频率、电路的损耗等,往往会影响电路分析的目的,增加分析难度。在电路分析中,分析的对象往往不是实际电路,而是理想电路。

任何一个实际器件,在一定的工作条件下,总可以近似表征为一个或多个理想元件。同样实际电路在一定的工作条件下,也可以近似为电路模型。通常,实际电路的几何尺寸 l 远小于电路中工作信号的最高频率对应的波长 λ ,即

$$l \ll \lambda \quad (1-1-1)$$

实际电路即可转换为集中参数电路。如果不满足该条件,则可以转换为分布参数电路。

说明:本书只讨论集中参数电路,以下简称电路。

【例1-1-1】晶体管调频收音机最高工作频率约108 MHz。问该收音机的电路是集中参数电路还是分布参数电路?

解 频率为108 MHz周期信号的波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{108 \times 10^6} \text{ m} = 2.78 \text{ m}$$

一般收音机的几何尺寸 d 是远小于这个值的,即 $d \ll \lambda = 2.78 \text{ m}$,则收音机电路应视为集中参数电路。

§1.2 电路分析的基本变量

电流、电压、电荷、磁链、功率和能量是描述电路工作状态和元件特性的6个变量,一般为时间的函数。其中电压、电流为最常用的两个基本变量。本节内容主要讲解电流、电压及参考方向的问题。

1.2.1 电流及其参考方向

1. 电流

带电粒子的定向移动形成电流(current)。电流的大小用电流强度来衡量。电流强度(简称“电流”)指单位时间内通过单位导体横截面的电荷量。电流用 i 或 I 表示。

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

式中, q 表示电荷量,单位为库仑(简称库,用字母C表示)。电流的单位是安培(简称安,用字母A表示), $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ 。

电流的方向规定为正电荷移动的方向。大小和方向都不随时间变化而变化的电流称为恒定电流(直流电流),简称直流(direct current,简写为dc或DC)。大小或方向随时间变化而变化的电流称为交变电流,简称交流(alternating current,简写为ac或AC)。电路中一般用小写字母笼统地表示交流量,而用大写字母表示直流量。

2. 电流的参考方向

电流的方向是客观存在的,但在分析较复杂的直流或交流电路时,事先难以确定电流的

真实方向。所以分析电路时,为了计算方便,在计算之前先人为地选取一个电流方向,称为电流的参考方向(reference direction)(假设方向,标出方向)。

标注电流参考方向常用方法有两种:一是用字符及下标标注,例如电流 I_{ab} ,表示电流参考方向从元件的 a 端流向元件的 b 端。二是在电路图上直接用箭头标注,如图 1-2-1 所示。

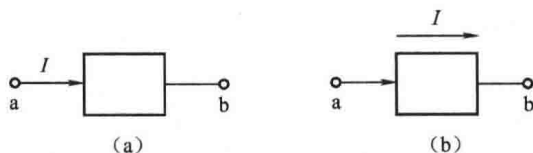


图 1-2-1 电流参考方向图形表示

在参考方向之下计算电流,若电流的计算结果为正值,表明电流的真实方向与参考方向一致;若计算结果为负值,表明电流的真实方向与参考方向相反。

例如,图 1-2-2(a)是电路的一部分,方框用来泛指元件。计算流过元件的电流时,先假设参考方向为 $a \rightarrow b$,如图 1-2-2(b)所示,在此参考方向之下计算电流,若值为 1 A,表明实际方向与参考方向一致,即电流的实际方向由 a 流向 b;若计算的电流值为 -1 A,表明实际方向与参考方向相反,即电流的实际方向由 b 流向 a。若参考方向为 $b \rightarrow a$,如图 1-2-2(c)所示,计算结果将正好与图 1-2-2(b)的值相差一个负号。

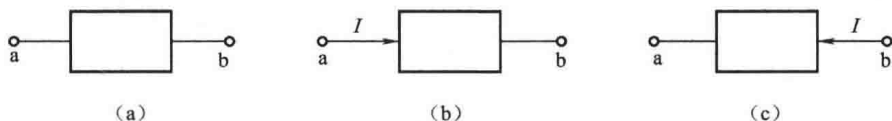


图 1-2-2 电流的计算

需要注意的是,参考方向一经取定,在计算过程中便不再改变。由参考方向与电流的正、负号相结合可表明电流的真实方向。所以,在参考方向之下计算出结果后不必另外指明真实方向。在没有假设参考方向的前提下,直接计算得出的电流值的正、负号没有意义。

1.2.2 电压及参考方向

1. 电压

电压(voltage)又称电位差。如图 1-2-3 所示,图中 M 为部分电路,a、b 两点之间的电压,为单位正电荷 q 由高电位点(a)转移到低电位点(b)时电场力所做的功 W ,用 u 或 U 表示。

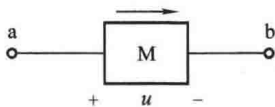


图 1-2-3 电压的定义

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-2-2)$$

式中, W 代表能量,单位为焦耳(简称焦,用字母 J 表示)。

正电荷从 a 点转移到 b 点过程中电场力做功时, u 为“正”,即 a 点为高电位(+)端,b 点

为低电位(−)端。正电荷从a点转移到b点过程中外力做功时, u 为“负”,即a点为低电位(−)端,b点为高电位(+)端。电压的单位是伏特(简称伏,用字母V表示)。

2. 电压的极性(方向)

电压的方向规定为电压降低的方向,即由高电位(“+”极性)端指向低电位(“−”极性)端。如果电压的大小和方向不随时间变化而变化,这样的电压称为恒定电压(直流电压),如果电压的大小或方向随时间变化而变化,这样的电压称为交变电压(交流电压)。

同样,为了计算方便,在计算之前先人为地选取一个电压的参考极性,为了统一概念,称为电压的参考方向(reference direction)。标注电压参考方向常用方法同样有两种:一是用字符及下标注,例如电压 u_{ab} ,表示a端电压高,b端电压低;二是在电路图上直接用箭头标注,如图1-2-3所示。

1.2.3 关联参考方向

电压和电流的参考方向可以独立地任意选取,当电流的参考方向从标以电压参考极性的“+”端流入而从标以电压参考极性的“−”端流出时,称电流与电压为关联参考方向(associated reference directions),而当电流的参考方向从标以电压参考极性的“−”端流入,而从标以电压参考极性的“+”端流出时,称电流与电压为非关联参考方向。为了计算方便,常采用关联参考方向。需要注意的是,关联参考方向是元件的关联参考方向,与元件所在电路无关。

如图1-2-4(a)所示,电流与电压为关联参考方向;如图1-2-4(b)所示,电流与电压为非关联参考方向。

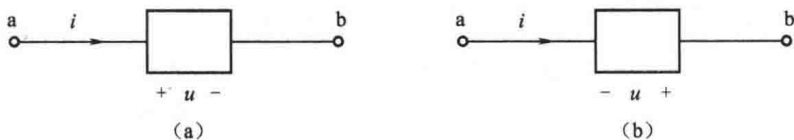


图1-2-4 关联参考方向

1.2.4 功率和能量

功率(power)和能量(energy)是电路中的重要变量,电路在正常工作时常伴随着电能与其他形式能量的相互转换。器件或设备在使用时都有功率的限制,不能超过额定值,否则会损坏。

如图1-2-4(a)所示,方框表示一段电路,当正电荷从该段电路的电压“+”端运动到“−”端时,电场力对电荷做功,电路吸收能量;如图1-2-4(b)所示,当正电荷从该段电路的电压“−”端运动到“+”端时,电场力对电荷做负功,电路向外释放能量。

在时间 $t_0 \rightarrow t$ 时间内,电路吸收的能量为

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq \quad (1-2-3)$$

单位时间内电路所吸收(或释放)的能量称为功率。图1-2-4(a)所示,元件所吸收的功率为

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} = u(t) \frac{dq(t)}{dt}$$

再由式(1-2-1)电流定义式得

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$$

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-2-4)$$

当电压的单位为伏(V)、电流的单位为安(A)时,功率的单位为瓦(W)。式(1-2-4)按实际方向推导得出,由图1-2-4(a)可见,实际方向符合电压、电流关联参考方向的情况。

当电压 u 和电流 i 取非关联参考方向时,元件所吸收的功率为

$$p(t) = -u(t)i(t) \quad (1-2-5)$$

需要注意的是,若计算结果为 $p > 0$,表示元件实际产生或提供的功率;若计算结果为 $p < 0$,表示元件实际吸收或消耗的功率。一段电路(或元件)吸收的功率为 10 W,也可说产生的功率为 -10 W,两种说法等效。

【例 1-2-1】 电路如图 1-2-5 所示。

(1) 图 1-2-5(a) 中,若 $i = 1 \text{ A}$, $u = 3 \text{ V}$,求元件吸收的功率 p ;

(2) 图 1-2-5(b) 中,若 $i = 1 \text{ A}$, $u = 3 \text{ V}$,求元件吸收的功率 p 。

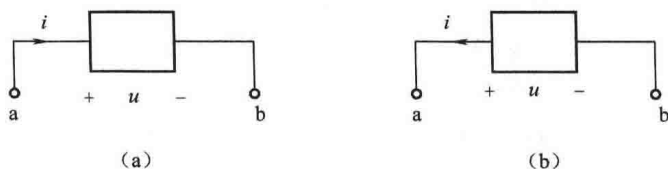


图 1-2-5 例 1-2-1 图

解 (1) 图 1-2-5(a) 中元件的端电压 u 与端电流 i 取了关联参考方向,由式(1-2-4)可得该元件吸收的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) = (1 \times 3) \text{ W} = 3 \text{ W}$$

(2) 图 1-2-5(b) 中元件的端电压 u 与端电流 i 取了非关联参考方向,由式(1-2-5)可得该元件吸收的功率为

$$p(t) = -u(t)i(t) = -(1 \times 3) \text{ W} = -3 \text{ W}$$

则该元件产生的功率为 3 W。

【例 1-2-2】 在图 1-2-6 所示电路中,已知 $U_1 = 20 \text{ V}$, $I_1 = -2 \text{ A}$, $U_2 = 10 \text{ V}$, $U_3 = 10 \text{ V}$, $I_3 = 3 \text{ A}$, $I_4 = 1 \text{ A}$,试求图中各元件的功率,以及各元件功率之和。

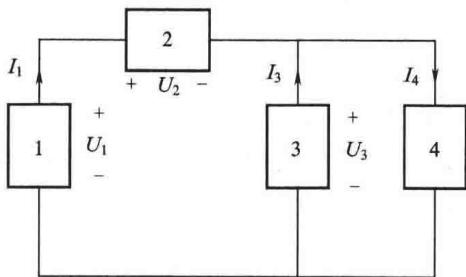


图 1-2-6 例 1-2-2 图

解 元件 1 的电压与电流没取关联参考方向,则元件 1 吸收功率 $P_1 = -U_1 I_1 = 40 \text{ W}$;

元件 2 的电压与电流取了关联参考方向,则元件 2 吸收功率 $P_2 = U_2 I_1 = -20 \text{ W}$;

元件 3 的电压与电流没取关联参考方向,则元件 3 吸收功率 $P_3 = -U_3 I_3 = -30 \text{ W}$;

元件 4 的电压与电流取了关联参考方向,则元件 4 吸收功率 $P_4 = U_3 I_4 = 10 \text{ W}$;

各元件功率之和为 $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = (40 - 20 - 30 + 10) \text{ W} = 0 \text{ W}$ 。

各元件功率之和为零,符合功率守恒定律。

§1.3 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律(Kirchhoff's law)是德国物理学家基尔霍夫,在1845年提出的电路理论,是集中参数电路的基本定律,包括基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's current law, KCL)和基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's voltage law, KVL)。为了叙述方便,先介绍几个有关的术语。

1. 几个有关的术语

1) 支路(branch)

在集中参数电路中,将每一个二端元件称为一条支路。

2) 支路电流和支路电压

流经元件的电流及元件的端电压分别称为支路电流及支路电压。在任意时刻,支路电流及支路电压是可以确定的物理量,是集中参数电路分析研究的变量。

3) 节点(node)

两条或两条以上支路的连接点,称为节点。

4) 回路(loop)

由两条或两条以上的支路构成的任一个闭合路径,称为回路。

5) 网孔(mesh)

在回路内部不包含其他支路的回路,称为网孔。

如图1-3-1所示电路,共有5个二端元件,即有5条支路,4个节点,3个回路,2个网孔。元件1、2、3、4及元件3、5构成的回路为网孔,元件1、2、5、4构成的回路不是网孔。

为方便起见,有时也将由多个二端元件串联起来(流过同一电流)的支路称为一条支路,如图1-3-1所示,元件2、1、4串接而成也可看成一条支路,这样,图中便有3条支路,2个节点(节点2和节点4)。

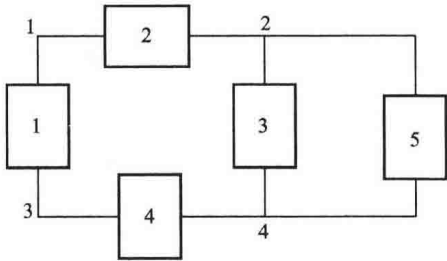


图1-3-1 电路结构与术语

2. 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律的表述:在任一时刻,对任一集中参数电路的任一节点,流经(流进或流出)该节点的所有支路电流的代数和恒为零。数学表达式为

$$\sum_{k=1}^K i_k(t) = 0 \quad (1-3-1)$$

式中, K 为回路中的支路数; $i_k(t)$ 为回路中第 k 条支路的电流。