



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

本书第1版为普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家电工电子教学基地教材
湖北省精品课程教材

电工电子基础

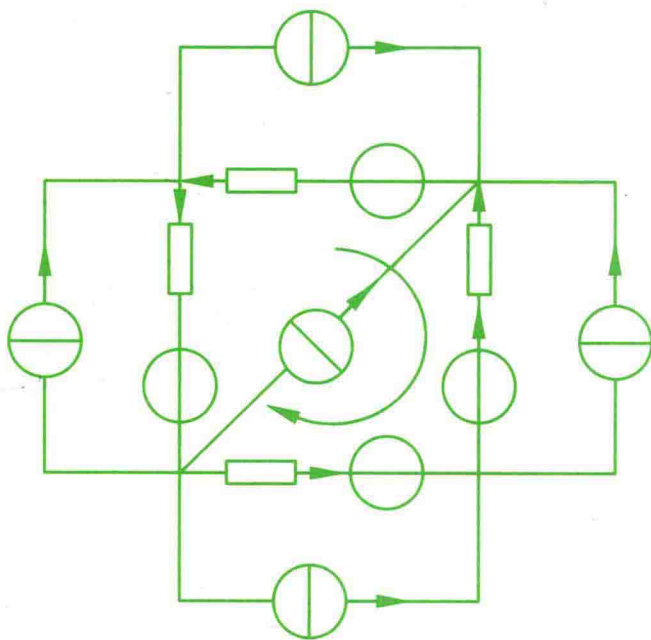
P rinciples of Electric Circuits

电路原理

(上册) 第2版

汪建 王欢 编著

Wang Jian Wang Huan



清华大学出版社





教育部高等

高等学校电子与电气专业系列教材

业教学指导委员会规划教材

Principles of Electric Circuits

电路原理

(上册)

第2版

汪建 王欢 编著

Wang Jian

Wang Huan

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书在第1版的基础上修订而成,系统地介绍电路的基本原理和基本分析方法。全书分上下两册,共18章。上册内容包括:电路的基本定律和电路元件;电路分析方法——等效变换法、电路方程法、运用电路定理法;含运算放大器的电阻电路;动态元件;正弦稳态分析;谐振电路与互感耦合电路。下册内容包括:三相电路;非正弦周期性稳态电路分析;双口网络;暂态分析方法——经典分析法、复频域分析法、状态变量分析法;均匀传输线的稳态分析和暂态分析;非线性电路分析概论。

从培养学生分析、解决电路问题的能力出发,通过对电路理论课程中重点、难点及解题方法的详细论述,本书将基本内容的叙述和学习方法的指导有机融合,例题丰富,十分便于自学。

本书可作为高等院校电气、电子信息类专业“电路理论”课程的教材,也可供有关科技人员参考。

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 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电路原理.上册/汪建,王欢编著.--2版.--北京:清华大学出版社,2016

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-42198-6

I. ①电… II. ①汪… ②王… III. ①电路理论—高等学校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 278946 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:时翠兰

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:27.5

字 数:665 千字

版 次:2007 年 12 月第 1 版 2016 年 3 月第 2 版

印 次:2016 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:49.00 元

产品编号:043099-01

高等学校电子信息类专业系列教材

顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科学技术大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

编审委员会

主任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委员	王志华	清华大学	宋梅	北京邮电大学
	韩焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学
	吴瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	张伟刚	南开大学
	刘铁根	天津大学	宋峰	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	靳伟	香港理工大学
	苑立波	哈尔滨工程大学		
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统设备的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

第2版前言

PREFACE

本书第1版于2007年底出版,为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,也被评为华中科技大学优秀教材一等奖。本书出版后,被国内多所大学选作电路课程教材并取得了良好的效果。多年的教学实践表明该教材能够适应理工院校对基础电路课程的教学需求。

我们认为,随着现代电工技术、信息技术的飞速发展和进步,电路原理这一技术基础课的课程教学体系的改革应不断深化。在课程核心内容保持稳定的前提下,通过教学内容的适当调整和充实,使教材与时俱进,适应形势的发展,不断得到完善和提高。基于上述考虑,根据教材多年的教学实践情况及广泛听取教师和学生的意见及建议,本次对教材在第1版的基础上进行了修订、编写。修订的主要内容有:将动态元件及特性、奇异函数及波形的表示法的内容后移,两者合并单独编为一章,以使其与正弦稳态分析及暂态分析等内容更好地衔接,便于教学;将含运算放大器电路的分析单独设为一章重新编写,内容上做了较大的调整和充实;新增加了电路的计算机仿真分析的内容;另外,从加强基本概念의掌握、分析方法的应用以及更好地适应教学内容顺序调整的角度考虑,对各章习题进行了修订,适当增加或删减了部分习题。空军预警学院的黄道敏老师也参与了本书的修订工作,编写了下册的有关章节。

全书共18章,分上、下两册。上册包括8章。

上册的修订、编写工作由汪建和王欢共同完成。其中王欢负责编写、修订第2、5、6章,其余各章的编写、修订由汪建完成。全书由汪建统稿。

限于作者的水平,书中的错误和疏漏在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2016年1月于华中科技大学

第1版前言

PREFACE

电路理论是电类各专业重要的技术基础课。本课程的教学目的是使学习者懂得电路的基础理论,掌握电路分析的基本方法,为后续课程的学习及今后从事电类各学科领域的研究和工作打下坚实的基础。毋庸置疑,在电类专业领域的学习、研究过程中,电路理论知识的掌握程度至关重要,因此,学好这门课程的重要性不容低估。

电路理论的内容丰富,知识点多,概念性强。学习本课程不仅要具有良好的物理学有关内容的基础,也需要掌握高等数学的相关理论。可以说,清晰的物理概念和扎实的数学基础是学好电路理论的基本保证。通过本课程的学习,学生能够了解高等数学的理论在工程专业领域的应用方法,可以体会到数学工具在研究和解决专业理论和工程实际问题时的重要作用。

学生对本课程内容的掌握,可归结为综合运用所学的知识分析求解具体电路的能力。而这一能力的培养和提高,有赖于对基本概念、基本原理的准确理解,对基本方法的熟练掌握。因此,在本书的编写中,除参照高等学校对“电路”课程教学的基本要求,兼顾电气类和电子类专业的需要,突出对基本内容的叙述外,还刻意加强了对学习方法特别是解题方法的指导。具体的做法是:

(1) 强调对基本概念의准确理解。对重点、难点内容用注释方式予以较详尽的说明和讨论;对在理解和掌握上易于出错之处给予必要的提示。

(2) 重视对基本分析方法的训练和掌握。对各种解题方法给出了具体步骤,并用众多实例说明这些解题方法的具体应用,且许多例题同时给出多种解法,供读者比较。

(3) 注意培养学生独立思考、善于灵活运用基本概念和方法分析解决各种电路理论问题的能力。在每一章的最后均安排有“例题分析”,通过对一些典型的或综合性较强、具有一定难度的例题的精讲,进一步讨论各种电路分析方法的灵活应用,以启迪思维,开阔思路,达到融会贯通、举一反三的效果。

本书的内容采用授课式语言叙述,十分便于自学。

全书共分上、下两册 15 章,本书为上册。本书的出版得到了清华大学出版社的大力支持,在此深表谢意。

限于编者的学识水平,书中的疏漏和不当之处在所难免,希望读者批评指正。

编 者

2007 年 3 月于华中科技大学

目录

CONTENTS

第 1 章 电路的基本定律和电路元件	1
1.1 电路的基本概念	1
1.2 电流、电压及其参考方向	4
1.3 功率和能量	8
1.4 电路的基本定律——基尔霍夫定律	10
1.5 电路元件的分类	13
1.6 电阻元件	15
1.7 独立电源	20
1.8 受控电源	23
1.9 例题分析	26
习题	30
第 2 章 电路分析方法之一——等效变换法	35
2.1 等效电路和等效变换的概念	35
2.2 电阻元件的串联和并联	37
2.3 电阻元件的混联	40
2.4 线性电阻的 Y 形连接和 Δ 形连接的等效变换	43
2.5 电源的等效变换	47
2.6 无伴电源的转移	53
2.7 受控电源的等效变换	55
2.8 求入端等效电阻的几种特殊方法	60
2.9 例题分析	68
习题	75
第 3 章 电路分析方法之二——电路方程法	82
3.1 网络的图	82
3.2 有向图的矩阵描述	88
3.3 电路方程中的独立变量	95
3.4 基尔霍夫定律的矩阵表示式	97
3.5 $2b$ 变量分析法	102
3.6 支路分析法	109
3.7 节点分析法	117
3.8 网孔分析法	128
3.9 回路分析法	135
3.10 割集分析法	140

3.11 例题分析	147
习题	154
第4章 电路分析方法之三——运用电路定理法	161
4.1 叠加定理	161
4.2 替代定理	168
4.3 戴维南定理和诺顿定理	170
4.4 特勒根定理	179
4.5 互易定理	183
4.6 最大功率传输定理	187
4.7 中分定理	190
4.8 对偶原理和对偶电路	195
4.9 例题分析	198
习题	209
第5章 含运算放大器的电阻电路	217
5.1 运算放大器及其特性	217
5.2 含运算放大器的电阻电路分析	219
5.3 例题分析	224
习题	226
第6章 动态元件	229
6.1 奇异函数	229
6.2 波形的奇异函数表示法	235
6.3 电容元件	239
6.4 电感元件	245
6.5 动态元件的串联和并联	248
6.6 例题分析	257
习题	261
第7章 正弦稳态电路分析	265
7.1 正弦交流电的基本概念	265
7.2 正弦量的相量表示	271
7.3 基尔霍夫定律的相量形式	277
7.4 RLC 元件伏安关系式的相量形式	278
7.5 复阻抗和复导纳	285
7.6 用相量法求解电路的正弦稳态响应	290
7.7 相量图与波形图	297
7.8 正弦稳态电路中的功率	303
7.9 功率因数的提高	318
7.10 例题分析	323
习题	334
第8章 谐振电路与互感耦合电路	345
8.1 串联谐振电路	345
8.2 并联谐振电路	357
8.3 一般谐振电路及其计算	363

8.4 耦合电感与电感矩阵	366
8.5 互感耦合电路的分析	374
8.6 耦合电感元件的去耦等效电路	378
8.7 空心变压器电路	384
8.8 全耦合变压器与理想变压器	386
8.9 理想变压器电路的计算	390
8.10 例题分析	394
习题	408
习题参考答案	416

本章提要

本章介绍了电路的基本概念、电路的基本定律以及几种基本的电路元件。主要内容有：电路和电路模型；电流、电压及其参考方向；基尔霍夫电流定律和电压定律；电阻元件；独立电压源和独立电流源；受控电源。应予以强调，电路的基本定律和电路元件的特性是分析、求解电路的基本依据。

1.1 电路的基本概念

一、实际电路

电与现代社会息息相关，它在人们的日常生产、生活和科学研究工作中几乎无处不在。电的作用是通过具体的实际电路实现的。所谓实际电路，是由用电设备或电工器件用导线按一定的方式连接而成的电流的通路。

实际的电路千差万别，种类繁多。尽管各种电路的复杂程度相异，完成的功能亦不相同，但它们都是由电源或信号源、用电设备（又称负载）和中间环节这三部分构成的。电路中电源或信号源的作用是将其他形式的能量转化为电能或产生信号向负载输出；用电设备（负载）的作用是将电能转化为人们需要的其他形式的能量或信号；而中间环节（包括连接导线、开关等）用于将电源和负载相连，并加以控制，构成电流的通路以传输电能。如一个简单的手电筒电路，其电源为干电池，它将化学能转化为电能并提供给负载；手电筒的负载为小灯泡，它将电能转化为光能供人们使用；手电筒的金属外壳或金属连线起着连接导线的作用并附有开关，以便根据需要形成电流的通路使电能从电池传送到灯泡。

电路也称为电网络或网络。

不同的电路具有不同的功能。实际电路可实现如下功能：完成能量的转换、传输和分配，例如电力系统；实现对某种对象的控制，如电机运行控制电路；对信号进行加工处理，以获取所需的信号，例如通信网络；实现信息的存储及数学运算，典型的例子是计算机电路等。无论何种电路，它们都遵循着相同的电路定律，可以按照共同的理论加以研究。

二、电路模型

1. 理想电路元件

实际电路中的电气设备或元器件称为实际器件。当电路工作时,任何一个实际器件都将呈现出复杂的电磁特性,其内部一般包含有能量的损耗、电场能量的储存和磁场能量的储存三种基本效应。并且这些效应交织在一起,使得直接对实际电路的分析计算变得十分困难。譬如一个电感线圈,当绕组通以电流后,将储存磁场能量;同时还因绕线电阻存在,出现发热损耗;以及因有匝间电容及层间电容而储存电场能量。

为便于对实际电路进行分析研究,有必要对实际器件进行理想化处理。事实上,在一定的条件下,一个实际器件中的某些电磁效应处于次要地位,将其忽略不计也可使理论分析结果与实际情况十分近似,不会有本质的差异。鉴于此,提出了理想化电路元件的概念,用它们或它们的组合来近似模拟实际器件。

所谓理想化的电路元件是指具有有一种电磁性质的电路元件,并且可用数学式子予以严格定义。例如理想线性电阻元件的定义式为 $u= Ri$,即众所周知的欧姆定律。理想化的电路元件也称为理想元件或电路元件。应注意,实际中并不存在只呈现单一电磁性质的元器件,电路元件是理想化的元件模型,是一种科学抽象。

2. 电路模型

电路理论所研究的并非实际电路,而是由理想元件构成的电路模型。例如图 1-1(a)所示为手电筒的实际电路,它由干电池、灯泡、开关和手电筒壳(连接导体)组成。图 1-1(b)是手电筒的电路模型,其中干电池由一个电压为 U_s 的电源和一个与它串联的电阻 R_i 表示,灯泡由一个电阻 R 表示。电路模型体现为电路图,在电路图中各种电路元件采用规定的图形符号。

将实际电路或实际器件转化为电路模型的基本出发点是,必须客观地反映实际元器件的基本特性,即按照电路的工作条件,依据实际发生的能量效应和电磁现象,突出主要矛盾,忽略次要因素,用一些恰当的理想元件按一定方式连接所构成的电路模型去模拟、逼近实际情况。譬如对一个实际的电感线圈,在低频的情况下,其电容效应相对较弱,可予以忽略,因此它的电路模型是一个电阻元件和一个电感元件串联而成的电路,如图 1-2(a)所示。而在高频时,线圈的匝间和层间电容将增大,这样就必须考虑电容效应,其电路模型需由电阻、电感和电容三个元件组合而成,如图 1-2(b)所示。

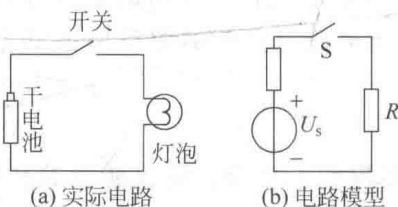


图 1-1 手电筒电路

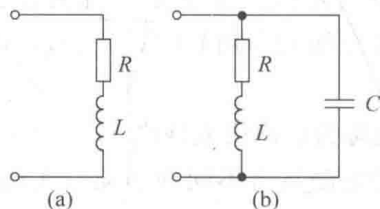


图 1-2 电感线圈的电路模型

由上述可见,对实际电路建立电路模型是理论分析所必需的,同时也是一种满足一定准确度的近似方法。对大多数的实际电路而言,通常需要深入分析其中的物理过程、电路现象才能作出其电路模型,而这是相应的专门课程的内容。

三、集中参数电路和分布参数电路

任何电路中都存在能量损耗、电场储能和磁场储能这三种基本效应。人们用电阻参数反映能量损耗,用电容参数和电感参数表征电路的电场储能及磁场储能性质。严格地讲,实际电路中的上述三种基本效应具有连续分布的特性,因此反映这些能量过程的电路参数也是连续分布的,或者说电路的各处既有电阻,也有电容和电感,这样的电路称为分布参数电路。从数学的观点看,分布参数电路中的电磁量是时间和空间坐标的函数,因而描述电路的是偏微分方程。

实际电路及其元器件中的电磁现象及过程与其几何尺寸密切相关。当电路中电压和电流的最高频率所对应的波长远大于电路器件及电路的各向尺寸时,电路参数的分布性对电路性能的影响程度很小,可认为能量损耗、电场储能和磁场储能分别集中在电阻元件、电容元件和电感元件中进行,并将电路元件赋以确切的参数,这样的电路称为集中参数电路。描述一般集中参数电路的是常微分方程,对于电阻性电路,其对应的则是实数代数方程。采用集中参数电路的概念也是一种近似方法,它给大多数实际电路的理论分析与计算带来了便利。同时,分布参数电路的研究也可借助于集中参数电路的分析方法。

若用 l 表示电路的最大几何尺寸, λ 表示电路中电流波或电压波的最高频率对应的波长,则当式(1-1)成立时,所研究的电路便可视作集中参数电路:

$$\lambda > 100l \quad (1-1)$$

式中 $\lambda = c/f$, f 为电路的最高工作频率, $c = 3 \times 10^5 \text{ km/s}$, 为电磁波的传播速度。

如频率 $f = 50 \text{ Hz}$ 的工频正弦交流电,其波长 $\lambda = c/f = 6000 \text{ km}$,而一般用电设备及电路的尺寸远小于这个数值,因而相应的电路视为集中参数电路处理是完全可行的。但对于电力传输线(高压输电线路)而言,其长度可达几百千米甚至数千千米,与电路工作频率的波长处于同一数量级,若将其当作集中参数电路,将导致不良或是错误的结果。又如在高频电子电路中,信号频率的波长为米,甚至是毫米数量级,与电路和元器件的尺寸相当或更小,这样的电路只能按照分布参数电路来处理。

四、电路中的几个术语

下面结合图 1-3 所示的电路,介绍电路中常用的几个重要名词。

1. 支路

电路中的每一个分支称为一条支路。如图 1-3 电路中的分支 baf 、 bd 、 df 、 bce 等均为支路。这样,该电路共有六条支路。此外,亦可将每一个二端元件(具有两个端钮的元件)、甚至一对开路端钮或者一段短接线视为一条支路。

2. 节点

电路中两条或两条以上支路的联接点被称为节点。

节点的定义与电路中支路的定义有关。若认为图 1-3 电路中的每一个二端元件为一条支路,则该电路共有七个节点;若将电路中的每一个分支视为一条支路,则该电路只有 b 、 d 、 e 、 f 四个节点。

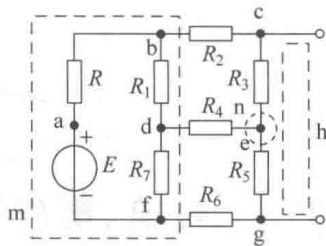


图 1-3 用以说明电路术语的电路

电路中亦有“广义节点”的概念。所谓“广义节点”是指电路中的任一封闭面,如图 1-3 中由虚线构成的闭合路径 m 、 n 表示两个封闭面。“汇集”于每一个广义节点的支路为虚线(即封闭面)所切割的支路,如“汇集”于广义节点 m 的有 bc 、 de 、 fg 等三条支路。要注意表示广义节点的虚线(即封闭面)只能对任一支路切割一次。显然,“节点”是“广义节点”的特例,其封闭面只包围一个节点,仅切割与该节点相连的支路,如广义节点 n 就是节点 e 。

3. 回路

电路中从任一节点出发,经过某些支路和节点,又回到原来的起始节点(所有的节点和支路只能通过一次)的任一闭合路径被称为回路。如图 1-3 所示电路中的路径 $bcedb$ 、 $degfd$ 、 $bcegfdb$ 等均是回路,该电路共有七个回路。

回路不一定要全部由支路构成,也可以包括虚拟路径,如在图 1-3 中的回路 $chgec$ 便包括了虚拟路径 chg ,这种回路称为虚拟回路。

回路的特例是“网孔”。所谓“网孔”是指在回路内部不含有支路的回路。如图 1-3 中的回路 $bcedb$ 便是一个网孔;但回路 $bcegfdb$ 不是网孔,因为在该回路内部有一条 de 支路。网孔又分为“内网孔”和“外网孔”。外网孔是指由电路最外沿的支路所形成的闭合路径。如图 1-3 中的路径 $abcegf a$ 构成一个外网孔,该电路有三个内网孔和一个外网孔。网孔的概念只适用于所谓的“平面”电路。

4. 平面电路和非平面电路

若一个电路能画在平面上且不致有任何两条支路在非节点处交叉(即交叉而不相连接的情况),这种电路被称为平面电路,否则称为非平面电路。图 1-4(a)所示的电路是一个非平面电路。在该电路中出现了 R_8 支路和 R_9 支路交叉而不相联接的情况。但图 1-4(b)所示电路不是非平面电路,这是因为它能被改画为图 1-4(c)所示的电路,在此电路中, R_5 和 R_6 支路不再交叉。

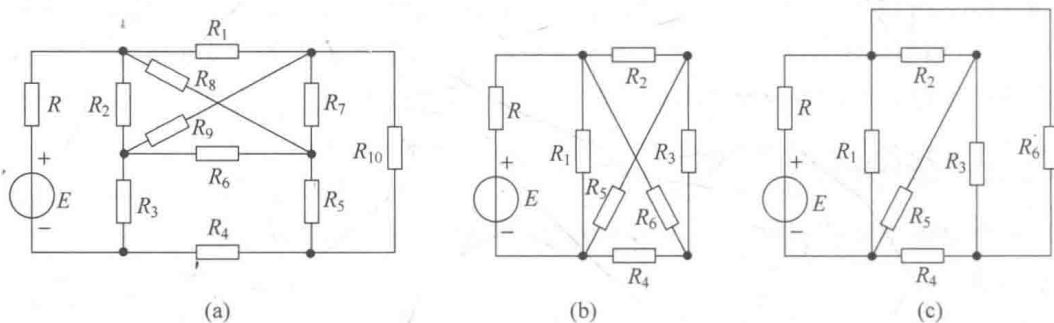


图 1-4 非平面电路和平面电路示例

1.2 电流、电压及其参考方向

电流和电压是电路中的两个基本物理量,它们也是电路分析的主要求解对象。这两个物理量在物理学中已有论述,下面对它们作简要的回顾,重点是介绍电流和电压的参考方向。

一、电流

电荷的定向运动形成电流。为表征电流的强弱,引入电流强度的概念,它被定义为单位时间内通过导体横截面的电量,用符号 i 表示,即

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

式中电荷量 q 的单位为库[仑](C),时间 t 的单位为秒(s),则电流强度 i 的单位为安[培](A)。实用中电流强度的单位还有千安(kA)、毫安(mA)和微安(μ A)等。

电流强度通常简称为电流。这样,电流这一术语既表示一种物理现象,同时也代表一种物理量。

电流是有流向的,习惯规定正电荷的运动方向为电流的正方向。一般情况下,电流是时间 t 的函数,以小写字母 i 表示,称为瞬时电流。当电流的大小和方向为恒定时,称为直流电流,并可用大写字母 I 表示。

实际中的电流有传导电流、徙动电流和位移电流三种类型。电流是按其形成方式的不同来分类的。传导电流是导电媒质中的自由电子或离子在电场作用下有规则地运动而形成的,如金属导体或电解液中的电流。徙动电流是由带电粒子在自由空间(真空或稀薄气体中)运动而形成的电流,典型的例子是电晕现象和真空电子管中的电流。徙动电流也称作对流电流或运流电流。位移电流是因电场的变化使得电介质内部的束缚电荷位移而形成的电流,例如电容器内部的电流。

二、电压和电位

电荷在电场中会受到电场力的作用。为衡量电场力作功的能力,引入“电压”这一物理量。电场中任意两点 a 、 b 间的电压被定义为库仑电场力将单位正电荷从 a 点移动至 b 点所作的功。设电量为 dq 的电荷由 a 点移动至 b 点时电场力作的功为 dW ,则 a 、 b 两点间的电压为

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1-3)$$

设能量 W 的单位为焦[耳](J),电荷 q 的单位为库(C),则电压 u 的单位为伏(特)(V)。实用中,电压的单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)等。

电压也可用电场强度 E 进行计算,其计算式为

$$u_{ab} = \int_{alb} E dl \quad (1-4)$$

该积分式中的 alb 表示由 a 点经路径 l 至 b 点的线积分。式(1-4)是电压的又一定义式,由该式可见,电压 u_{ab} 的值只取决于点 a 、 b 的位置,与积分路径的选取无关。

电压是有极性的。若单位正电荷从 a 点移动至 b 点时电场力作了正功,则 a 点为正极性, b 点为负极性, $u_{ab} > 0$,此时 a 、 b 之间的这段电路将吸收能量。若单位正电荷从 a 点移动至 b 点时电场力作了负功,则 a 点为负极性, b 点为正极性, $u_{ab} < 0$,此时 a 、 b 间的这段电路将释放能量。电压 u_{ab} 采用的是双下标表示法,其前一个下标代表电压的起点,后一个下标为电压的终点,且 $u_{ab} = -u_{ba}$,表明两个下标的位置不可随意颠倒,需特别予以注意。

电场中任意两点间电压的大小与计算时所选取的路径无关,是一个重要的结论。与此

结论对应的实际应用是,当用电压表测量电路中两点的电压时,无论连接电压表的导线如何弯曲,只要电压表所连接的电路中两点的位置不变,则表的读数不变。在进行理论计算时,若求解电压有多个路径,则应选取计算最便利的路径。

电压一般是时间 t 的函数,应以小写字母 u 表示,称为瞬时电压。当电压为恒定值时称为直流电压,可用大写字母 U 表示。

在电路分析中,常用到“电位”的概念。电路中某点的电位被定义为该点与电路中参考点之间的电压,因此在谈到电位的同时必须指出电路的参考点。参考点的电位显然为零。电位的单位与电压的单位相同。

电位的表示符号为 U 或 φ ,并常用单下标作为点的标记。例如若选电路中的某点 O 为参考点,则 a 点的电位可记为 U_a 或 φ_a ,这也意味着 $U_a = \varphi_a = U_{aO}$ 。

设电路中 a 、 b 两点的电位为 φ_a 和 φ_b ,则

$$\varphi_a - \varphi_b = U_{aO} - U_{bO} = U_{aO} - (-U_{Ob}) = U_{aO} + U_{Ob} = U$$

这个电压 U 是电场力移动单位正电荷从 a 点经 O 点至 b 点所作的功。前已指出,电路中两点间的电压与电荷移动的路径无关,因此 U 便是 a 、 b 两点间的电压。于是有

$$\varphi_a - \varphi_b = U_{ab} \quad (1-5)$$

这表明,电路中任两点间的电压等于这两点的电位之差,故电压又称为电位差。

若选择不同的参考点,则电场中某点的电位将具有不同的值,这表明电位是一个相对的量。但两点间的电压(电位差)却与参考点的选择无关,它是一个确定的值。

在分析实际的电磁场或电路问题时,往往需选择一个参考点。原则上讲,参考点可任意选择,但许多情况下应根据具体研究对象,从便于分析的角度出发选择参考点。如在电磁场问题中,通常是将无穷远处作为电位参考点;而在电力系统中一般以大地为电位参考点;在电子线路中往往把设备的外壳或公共接线端作为电位参考点。

三、电流和电压的参考方向

电流有流向,习惯上规定正电荷的运动方向为电流的实际方向。电压有极性(方向),电压的实际方向是指由实际高电位点指向实际低电位点的方向。但除了结构极简单的电路可以较容易地确定电流、电压的实际方向外,对于结构稍复杂的电路,如图 1-5 所示的电路,则很难不通过分析计算而直接判断出每一元件中的电流和大多数元件两端电压的实际方向。另外在交流电路中,电流和电压的方向随时间而不断变化,它们的实际方向在电路中不便于标示,即便标示也无实际意义。

为了分析计算电路,从而确定电流、电压的实际方向和数值的大小,需建立电路的数学模型,即列出必要的电路方程。当电流和电压的方向不确定时,因无依据而不能列写电路方程。考虑到电流、电压的实际方向只有两种可能,我们给各元件的电流和电压人为地假设一个方向,并按此方向来建立电路方程。这一假设的方向称为“参考方向”。

应强调指出,在电路理论中,参考方向是一个极为重要的概念,须予以特别重视。

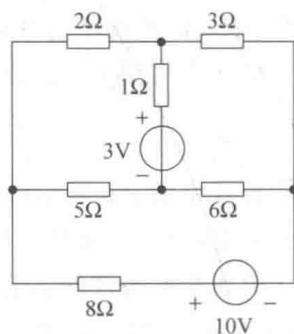


图 1-5 电路示例