



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

# 工程电路分析基础

包伯成 乔晓华 主编  
孙雨耕 主审

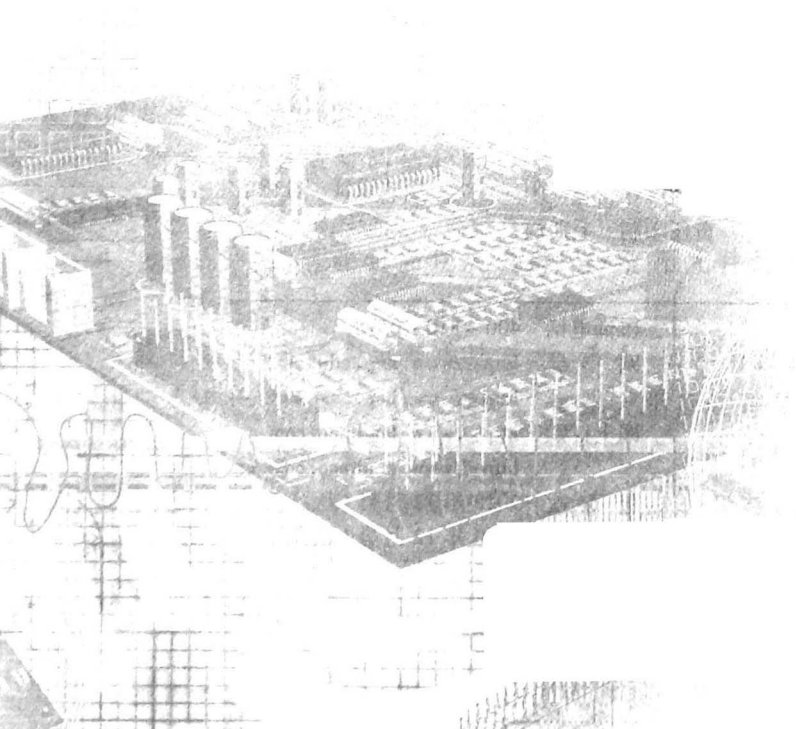


全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

# 工程电路分析基础

Gongcheng Dianlu Fenxi Jichu

包伯成 乔晓华 主编  
孙雨耕 主审



高等教育出版社·北京

HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

本书根据 2011 年教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会制定的“电路分析基础”课程教学基本要求编写。围绕电路分析方法,全面介绍了电路分析的基本概念、基本原理和基本方法。主要内容包括电路的基本概念和定律、电阻电路的分析方法、线性电路叠加与等效变换、正弦稳态电路分析、三相电路、频率特性与谐振电路、耦合电感、理想变压器及双口网络、动态电路的时域分析。全书配有丰富的例题、思考题和习题,书后附有习题答案。

本书以工程应用为背景,结构合理、内容简练、重点突出、可读性强,便于自学。全书各章末附有研究性学习、应用性学习和综合性学习内容,涉及了近年来新的电路理论知识和工程性强的实际应用案例,旨在拓展读者的工程视野和理论联系实际的工程观点。本书可作为普通高等学校电子电气信息类专业电路课程教材或教学参考书,也可供相关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程电路分析基础/包伯成,乔晓华主编.--北京:  
高等教育出版社,2013.12

ISBN 978-7-04-038899-2

I. ①工… II. ①包…②乔… III. ①电路分析—高等学校—教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 277100 号



策划编辑 杜 炜      责任编辑 张江漫      封面设计 赵 阳      版式设计 杜微言  
插图绘制 尹 莉      责任校对 刘春萍      责任印制 毛斯璐

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
邮政编码	100120		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
印 刷	国防工业出版社印刷厂	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
开 本	787mm × 1092mm 1/16		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
印 张	19.75	版 次	2013 年 12 月第 1 版
字 数	440 千字	印 次	2013 年 12 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	29.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物 料 号 38899-00

# 前 言

工程电路分析基础课程是工程应用型高等学校电气信息类专业的一门重要的专业基础课程。通过本课程的学习,可使读者掌握电路的基本理论知识、基本分析方法和进行电路实验、仿真的初步技能,为学习后续课程准备应有的电路理论知识和分析方法。

根据电子电气学科教学改革的发展方向以及高等教育大众化发展阶段的特点,考虑到普通工科人才培养目标定位于应用型高级专门人才的实际需求,在充分吸收近年来电路教学改革成果的基础上,本书增加了应用性学习、研究性学习和综合性学习等拓展内容,突出了电路的工程应用背景。

本教材内容符合教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会 2011 年制定的《“电路分析基础”课程教学基本要求》。在编写过程中,作者力求思路清晰、可读性强、重点突出,并着重考虑了以下问题:

1. 强调电路理论方法与工程应用相结合。电路分析课程是电子电气信息类各专业学生最先学习的专业基础核心课程,电路理论逻辑性强,工程应用要求高,普通工科院校的学生学习本课程难度较大。以前针对精英教育所编写的教材内容需要化繁就简,突出应用性。

2. 正确处理内容多与学时少的关系。电路课程的教学内容相对成熟,电路理论体系逻辑性强,分析方法繁多。编写中对电路的基本概念、基本理论和基本分析方法力求简练,突出重点,注重分析方法的归纳总结。

3. 调整了部分章节的结构和内容,总体上降低了例题难度,增加了内容的可读性;并在每章节中增添了思考题,方便读者掌握每章节的知识点和相关的分析方法。

4. 引入了电路理论最新发展成果——忆阻元件的概念,增加了创新性学习内容和应用性学习内容,有利于培养学生的实践创新能力。

本教材第 1~3 章为电阻电路分析,第 4~7 章为正弦稳态电路分析,第 8 章为动态电路的时域分析。全书由多位编者分工撰写。常州大学陈江焯编写第 1、8 章,常州大学吴志敏编写第 2、3 章,常州大学段仲麒编写第 4、5 章,江苏理工学院乔晓华编写第 6 章,江苏理工学院高倩编写第 7 章。全书研究性学习内容 by 常州大学包伯成编写,应用性学习内容 by 乔晓华编写。全书由包伯成和乔晓华统稿。

本书承蒙天津大学孙雨耕教授仔细审阅,并提出了许多宝贵的建议。作者在此致以衷心的感谢。

在本教材编写过程中,课程组的老师和参与使用的学生提出了很好的建议,同时编者参阅了

国内外已出版的大量优秀教材,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,错误和不妥之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。编者联系方式:  
[mervinbao@126.com](mailto:mervinbao@126.com)。

编 者

2013年10月

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

# 目 录

第 1 章 电路的基本概念和定律 .....	1
1.1 电路模型、集中参数电路 .....	1
1.1.1 实际电路与电路模型 .....	1
1.1.2 集中参数电路 .....	2
1.2 电路中的基本物理量 .....	3
1.2.1 电流及其参考方向 .....	3
1.2.2 电压及其参考极性 .....	4
1.2.3 电位的概念 .....	5
1.2.4 电功率 .....	6
1.3 基尔霍夫定律 .....	8
1.3.1 基尔霍夫电流定律(KCL) .....	9
1.3.2 基尔霍夫电压定律(KVL) .....	10
1.4 电阻元件 .....	11
1.4.1 电阻元件的定义 .....	11
1.4.2 电阻元件伏安关系(VCR) .....	11
1.4.3 电阻元件的功率 .....	14
1.5 电容元件 .....	15
1.5.1 电容元件的定义 .....	15
1.5.2 电容元件伏安关系 .....	16
1.5.3 电容的储能 .....	17
1.6 电感元件 .....	18
1.6.1 电感元件的定义 .....	18
1.6.2 电感元件伏安关系 .....	19
1.6.3 电感的储能 .....	20
1.7 电压源、电流源及受控源 .....	20
1.7.1 电压源 .....	21
1.7.2 电流源 .....	21
1.7.3 受控源 .....	22
*1.8 研究性学习:忆阻元件 .....	25

1.8.1 忆阻元件的定义 .....	25
1.8.2 忆阻元件伏安关系 .....	26
1.8.3 基本变量组合的完备性 .....	27
习题 1 .....	28
第 2 章 电阻电路的分析方法 .....	33
2.1 两类约束与电路方程 .....	33
2.1.1 KCL、KVL 与元件的伏安关系 (VCR) .....	33
2.1.2 独立的电路方程 .....	33
2.2 支路电流法 .....	35
2.3 网孔电流法 .....	38
2.3.1 网孔 KVL 方程列写 .....	38
2.3.2 含电流源支路的处理 .....	40
2.3.3 含受控源支路的处理 .....	41
2.4 节点电压法 .....	43
2.4.1 节点 KCL 方程列写 .....	43
2.4.2 含电压源支路的处理 .....	46
2.4.3 含受控源支路的处理 .....	48
2.5 理想运算放大器电路分析 .....	49
2.5.1 运算放大器电路模型 .....	50
2.5.2 理想运算放大器电路分析 .....	51
2.6 电路的对偶性 .....	54
*2.7 研究性学习:储能元件的 VCR 曲线 .....	55
2.7.1 电容元件 VCR .....	55
2.7.2 VCR 曲线的 Multisim 仿真 .....	56
习题 2 .....	57

第 3 章 电路叠加与等效变换 .....	62	4.3 基尔霍夫定律的相量形式 .....	127
3.1 线性电路叠加 .....	62	4.3.1 KCL 的相量形式 .....	127
3.1.1 线性电路的齐次性 .....	62	4.3.2 KVL 的相量形式 .....	128
3.1.2 叠加定理 .....	63	4.4 电路元件 VCR 的相量形式 .....	129
3.2 单口网络等效的概念 .....	68	4.4.1 电阻元件 VCR 的相量形式 .....	129
3.2.1 单口网络等效的概念 .....	68	4.4.2 电感元件 VCR 的相量形式 .....	130
3.2.2 单口网络的伏安关系 .....	69	4.4.3 电容元件 VCR 的相量形式 .....	131
3.3 单口电阻网络的等效变换 .....	71	4.4.4 受控源 VCR 的相量形式 .....	133
3.3.1 电阻的串联与并联 .....	72	4.5 阻抗与导纳 .....	134
3.3.2 电阻星形联结与三角形联结的 等效变换 .....	77	4.5.1 基本元件 VCR 的统一相量形式 .....	134
3.3.3 含受控源单口网络的等效电阻 .....	79	4.5.2 无源单口网络的等效阻抗与 导纳 .....	134
3.4 有源单口网络的等效变换 .....	81	4.6 正弦稳态电路的相量分析 .....	139
3.4.1 理想电源的串联和并联 .....	81	4.6.1 简单正弦稳态电路的分析 .....	140
3.4.2 实际电源的两种模型及其等效 变换 .....	84	4.6.2 复杂正弦稳态电路的分析 .....	145
3.5 替代定理 .....	89	4.7 正弦稳态电路的功率 .....	149
3.6 戴维宁定理和诺顿定理 .....	92	4.7.1 瞬时功率和平均功率 .....	150
3.6.1 戴维宁定理 .....	93	4.7.2 无功功率和视在功率 .....	153
3.6.2 诺顿定理 .....	97	4.7.3 功率因数的提高 .....	155
3.7 最大功率传输定理 .....	102	4.7.4 复功率 .....	159
*3.8 研究性学习:有源忆阻元件的 VCR 曲线 .....	106	4.8 最大功率传递定理 .....	162
3.8.1 有源忆阻元件模型及其 VCR .....	106	*4.9 应用性学习:日光灯电路与转 换电路设计 .....	165
3.8.2 忆阻元件的等效电路 .....	107	4.9.1 日光灯电路原理与分析 .....	165
3.8.3 VCR 曲线的 Multisim 仿真 .....	108	4.9.2 单相电压至三相电压的转换电路 设计 .....	167
习题 3 .....	108	习题 4 .....	168
第 4 章 正弦稳态电路分析 .....	115	第 5 章 三相电路 .....	173
4.1 正弦量的基本概念 .....	115	5.1 对称三相电源及联结 .....	173
4.1.1 周期、频率和角频率 .....	116	5.1.1 对称三相电压的产生 .....	173
4.1.2 瞬时值、振幅和有效值 .....	116	5.1.2 三相电源的星形联结 .....	175
4.1.3 相位、初相位与相位差 .....	117	5.1.3 三相电源的三角形联结 .....	176
4.2 正弦量的相量表示法 .....	120	5.2 对称三相负载及其联结 .....	177
4.2.1 复数与复数运算 .....	121	5.2.1 三相负载的星形联结 .....	177
4.2.2 正弦量的相量表示法 .....	123	5.2.2 三相负载的三角形联结 .....	178
		5.3 三相电路的计算 .....	179



5.3.1 对称三相电路的计算 .....	179	7.1.3 耦合电感的 VCR .....	224
5.3.2 复杂对称三相电路的计算 .....	182	7.2 耦合电感电路分析 .....	226
5.3.3 不对称三相电路的计算 .....	184	7.2.1 耦合电感的去耦等效 .....	226
5.4 三相电路的功率及其测量 .....	187	7.2.2 耦合电感电路的计算 .....	230
5.4.1 三相电路功率的计算 .....	187	7.2.3 空心变压器电路 .....	232
5.4.2 三相电路功率的测量 .....	190	7.3 理想变压器 .....	234
*5.5 应用性学习:相序测量与配 电方式 .....	193	7.3.1 理想变压器的 VCR .....	234
5.5.1 三相电路的相序测量 .....	193	7.3.2 理想变压器的阻抗变换 .....	236
5.5.2 三相系统的配电方式 .....	194	7.4 双口网络 .....	238
习题 5 .....	195	7.4.1 双口网络的概念 .....	238
<b>第 6 章 频率特性与谐振电路</b> .....	199	7.4.2 双口网络的方程与参数 .....	239
6.1 网络函数与频率特性 .....	199	7.4.3 双口网络的等效电路 .....	242
6.1.1 网络函数的定义 .....	199	7.4.4 具有端接的双口网络 .....	243
6.1.2 网络函数的频率特性 .....	201	*7.5 应用性学习:钳形电流表 .....	244
6.2 多频率激励电路 .....	203	习题 7 .....	245
6.2.1 多频率正弦激励的电路响应 .....	203	<b>第 8 章 动态电路的时域分析</b> .....	248
6.2.2 非正弦周期信号激励的电路响应 .....	205	8.1 动态电路的过渡过程 .....	248
6.2.3 有效值、平均值和平均功率 .....	206	8.1.1 动态电路的过渡过程 .....	248
6.3 RLC 串联谐振电路 .....	208	8.1.2 初始值的确定 .....	249
6.3.1 谐振条件和特征 .....	208	8.1.3 稳态值的确定 .....	253
6.3.2 电路的选频特性 .....	210	8.2 一阶电路的零输入响应 .....	253
6.4 GLC 并联谐振电路 .....	213	8.2.1 RC 电路的零输入响应 .....	253
6.4.1 谐振条件和特征 .....	213	8.2.2 RL 电路的零输入响应 .....	255
6.4.2 电路的选频特性 .....	215	8.3 一阶电路的零状态响应 .....	258
*6.5 应用性学习:RC 移相电路的 频率特性 .....	216	8.3.1 RC 电路的零状态响应 .....	258
6.5.1 RC 移相电路 .....	216	8.3.2 RL 电路的零状态响应 .....	260
6.5.2 频率特性的 Multisim 仿真 .....	217	8.3.3 阶跃函数和阶跃响应 .....	262
习题 6 .....	218	8.4 一阶电路的全响应 .....	265
<b>第 7 章 耦合电感、理想变压器及 双口网络</b> .....	221	8.4.1 一阶电路的全响应 .....	265
7.1 耦合电感 .....	221	8.4.2 一阶电路的三要素法 .....	266
7.1.1 自感与互感、耦合系数 .....	221	8.5 二阶电路的暂态分析 .....	268
7.1.2 耦合电感的同名端 .....	223	8.5.1 二阶电路的状态方程 .....	269
		8.5.2 RLC 串联电路的零输入响应 .....	269
		8.5.3 RLC 串联电路的全响应 .....	273
		*8.6 综合研究性学习:蔡氏电路 研究 .....	276

---

8.6.1 状态方程和 Matlab 仿真 .....	276	部分习题答案 .....	289
8.6.2 蔡氏二极管的等效电路 .....	278		
8.6.3 蔡氏电路的实验结果 .....	279		
习题 8 .....	280	中英文名词对照 .....	299
附录 A 国际单位制 .....	285	参考文献 .....	306
附录 B 常用的标准元件值 .....	287		

# 第 1 章 电路的基本概念和定律

电路理论是当代电气工程与信息工程的重要理论基础之一,它与电子工程、通信工程、电气工程、自动化、计算机科学技术等学科专业的发展相互促进、相互影响。经历了一个多世纪的漫长道路以后,电路理论已经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。电路理论包括电路分析和电路综合两大方面内容。电路分析的主要内容是指在给定电路结构及元件参数的条件下,找出输入(激励)与输出(响应)之间的关系;电路综合主要研究在给定输入(激励)与输出(响应)即电路传输特性的条件下,寻求可实现电路的结构和元件参数。

## 1.1 电路模型、集中参数电路

### 1.1.1 实际电路与电路模型

电路(electric circuit)是由金属导线和电气设备以及电子部件组成的导电回路,或者是电流可以在其中流通的由导体连接的电路元件的组合。实际电路是为了实现某种目的,把元器件或者电气设备按照一定的方式用导线连接起来构成的整体,它常常借助于电压、电流完成传输电能或信号,处理信号,测量,控制,计算等功能。电路规模的大小相差很大,小到硅片上的集成电路,大到高低压输电网。根据所处理信号的不同,电子电路可以分为模拟电路和数字电路。直流电通过的电路称为“直流电路”;交流电通过的电路称为“交流电路”。

通常电路可分为三个部分:电源(source)、负载(load)和中间环节。电源(信号源)用来提供能量(提供信息),是将其他形式的能量转换为电能的装置,通常又称为“激励”(excitation);负载消耗能量(接收信息),是将电能转换为其他形式的能量的装置,通常又称为“响应”(response);中间环节是将电源和负载连接起来的部分,它起传输和分配电能的作用。

实际电路,根据其组成、性质和作用的不同有不同的分类方法,就实际电路是否满足线性关系,主要分为两类:一是线性电路,它是由线性元件所组成,描述线性电路的数学方程为线性方程;二是非线性电路,组成非线性电路的元件中至少含有一个非线性元件,描述非线性电路的数学方程为非线性方程。

电路系统的实际装置包括各种设备、器件和元件等,直接对实际电路进行分析和研究是很复杂、很困难、甚至是不可能的。像其他许多成熟完备的学科一样,电路理论亦必须采用科学的抽象分析方法,即用模型来代表实际电路元件的外部功能。以模型元件(或称理想电路元件)及其

组合作为电路理论的研究对象,来得到实际电路的工作性能及效果,这就是电路模型(circuit model)理论(模型分析法)。模型分析法不仅是必要的而且是可能的,同时模型分析法还具有以下两个优点:① 只要模型取得足够准确,分析所得结论就能准确地反映实际电路的性能,而且还可以预测实际电路可能具有的而尚未发现的性能,从而对认识实际电路的规律性具有极其重要的指导意义。② 可以将实际电路中共同的本质的东西抽象出来,用统一的、普遍的方法进行分析和研究。电路理论中所说的电路,就是电路模型或理想电路,它是由各种理想电路元件按一定方式连接组成的一个整体。

当实际电路工作时,如果只考虑电源、负载和中间环节的主要电磁性能,而忽略其次要的电磁性能,则构成电路的各个器件或元件,就可以看成是理想电路元件。理想电路元件(ideal circuit element)是组成电路模型的最小单元,是具有某种确定电磁性质并有精确数学定义的基本结构,常用的理想电路元件有电阻、电容、电感、电压源、电流源、受控源等。

图 1-1(a)所示为一个简单的实际电路,这是一个将电池和灯泡用两根导线连接所组成的照明电路,其电路模型如图 1-1(b)所示。图中的电阻元件  $R$  是作为灯泡的电路模型,电压源  $U_s$  和电阻元件  $R_s$  的串联组合作为电池的电路模型,用理想导线(其电阻设为零)即线段表示连接导线。

应该指出,实际电路用电路模型来近似表示是有条件的。一种电路模型只有在一定条件下才是适用的,当条件发生改变时,电路模型也要作相应的改变。

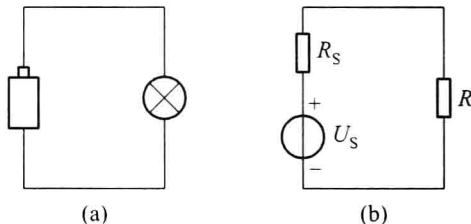


图 1-1 实际电路与电路模型

### 1.1.2 集中参数电路

集中参数元件又称为理想电路元件,集中参数元件是指电路元件的尺寸远小于电路元件所在电路的工作波长时的理想模型。由集中参数元件构成的电路,称为集中参数电路(lumped parameter circuit),简称集中电路。在集中电路中任何时刻该电路任何地方的电压、电流都是与其空间位置无关的确定值。本书只对集中电路进行分析与计算。

应该指出,用集中电路来近似代替实际电路是有条件的,当实际电路的尺寸远小于电路正常工作信号的最高频率所对应的波长时,则实际电路视为集中电路。采用集中电路模型意味着不考虑电路中的电场和磁场的相互作用,不能考虑电磁波的传播现象,认为电路中电能的传输是瞬间完成的。如果电路的尺寸大于最高工作频率对应的波长或两者属于同一数量级时,便不能作为集中电路,应作为分布参数电路处理。

例如,用  $c=3.0 \times 10^8$  m/s 代表光速(电磁波的传播速度), $f$  代表电路中信号的频率, $\lambda$  代表电路中信号的波长( $\lambda=c/f$ ),在音频范围内, $f$  的最小值为 20 Hz,最大值等于 20 kHz,那么信号的最小波长为

$$\lambda = \frac{3.0 \times 10^8}{20 \times 10^3} \text{ m} = 15\ 000 \text{ m} = 15 \text{ km}$$

该波长比实验室中的常用电路尺寸大得多,则集中参数模型就适用。

又如,在电视信号中, $f=100\text{ MHz}$ ,则波长为

$$\lambda = \frac{3.0 \times 10^8}{1 \times 10^8} \text{ m} = 3 \text{ m}$$

半波天线长度为  $1.5\text{ m}$ ,此天线元件尺寸与波长相差无几(属同一数量级),则采用集中电路分析该电路时,产生的误差就很大,因为信号在电路中的传输时间就不能忽略;电路中的电流、电压不仅是时间的函数,也是空间位置的函数;集中电路就不适用了,则必须采取分布参数电路模型来分析此类电路。

用理想电路元件或它们的组合来模拟实际电路器件,建立实际电路模型的方法,称为电路建模。如上所述,根据电路尺寸与其工作波长的大小关系,实际电路可分别建立集中参数电路模型或分布参数电路模型。

### 思考题

1-1 “电路的基本作用是实现电能和非电能的转换”这种说法是否正确?

1-2 晶体管调频收音机最高工作频率约为  $108\text{ MHz}$ ,那么该收音机电路适用于集中参数电路吗?

## 1.2 电路中的基本物理量

要分析研究电路理论,就要涉及到电路理论中描述电路工作状态和元件工作特性的基本的变量,而电流、电压、功率、能量、电荷、磁通是电路中常用的物理量,通常用符号  $i$ 、 $u$ 、 $p$ 、 $W$ 、 $q$  和  $\Phi$  分别表示。一般选择电流、电压、电荷、磁通作为电路中的基本变量(所谓基本变量,就是能用它们方便地表示出电路中其他的各种物理量),磁链用  $\Psi$  表示。本节着重讨论电流、电压的参考方向问题,以及如何用电流、电压表示电路的功率和能量问题。

### 1.2.1 电流及其参考方向

定义:单位时间内通过某横截面的电荷量,称为电流强度,简称电流(current),用符号  $I$  或  $i$  表示。根据定义有

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

其中,在国际单位制(今后本书中统称为SI制,见附录A)中,电流  $i$  的单位为安培(A),电荷  $q$  的单位为库仑(C),时间  $t$  的单位为秒(s)。

电流方向:通常规定正电荷移动的方向为电流的正方向,又称为电流的真实方向。

在电路分析中,电流的大小和方向是描述电流变量不可缺少的两个方面。但是对于一个给定的电路,要直接给出某一电路元件中的电流真实方向是十分困难的,如交流电路中电流的真实

方向在经常改变,即使在直流电路中,要指出复杂电路中某一电路元件的电流真实方向也不是一件很容易的事,那么如何解决这一问题呢?

为了定量计算及分析电路,引入了电流参考方向的概念,即人为指定电流在电路中的流动方向,称为电流的参考方向(reference direction)(或正方向)。电流的参考方向可以任意选定,但一经选定,就不可以再改变。

电流参考方向的表示方法有两种:

一种直接在电路元件上用箭头标出,如图 1-2 所示。

另一种,用带字符  $i$  的双下标表示,如对于图 1-2 来说,可用  $i_{ab}$  表示电流参考方向由 a 指向 b。

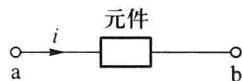


图 1-2 电流参考方向

当电流的真实方向与指定的参考方向一致时,电流规定为正值,反之为负值。同时当有了电流的参考方向后,分析计算电路时,若计算所得的电流为正值,表示电流的真实方向与假想的参考方向一致;若为负值,表示二者方向相反。

于是,在进行电路的分析计算时,由于指定了参考方向,就把电流这个实际的变量变成了代数量,既有数值又有与之相应的参考方向。在分析计算电路时,必须首先指定电流的参考方向。同时约定今后电路图中箭头所标电流方向都是电流的参考方向。

### 1.2.2 电压及其参考极性

定义:电路中 a、b 两点间的电压(voltage)表明了单位正电荷由 a 点转移到 b 点时所获得或失去的能量,用  $U$  或  $u$  表示。根据定义有

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

其中,电压  $u$  的单位为伏特(V),能量  $W$  的单位为焦耳(J),电荷  $q$  的单位为库仑(C)。

习惯上把电位降落(高电位指向低电位)的方向规定为电压的正方向(或真实方向),通常电压的高电位端标为“+”极,低电位端标为“-”极。跟电流一样,电压也需要选定参考方向(又称参考极性),即人为假定的电压正极性,在电路图中用“+”表示电压参考极性的高电位端,用“-”表示电压参考极性的低电位端,如图 1-3 所示。

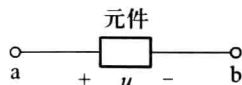


图 1-3 电压参考极性

电压的参考方向同样是任意选定的,但一经选定,就不可以再改变。如经计算  $u > 0$ ,表示电压的真实方向与所设参考方向一致;若经计算  $u < 0$ ,表示电压的真实方向与所设电压参考方向相反。

电压参考方向亦可用字符  $u$  的双下标表示,如  $u_{ab}$  表示 a 点为“+”极,b 点为“-”极。或也可用箭头表示(电位降落的方向)。

电压参考方向与其正负号一起表明电压的真实极性。例如图 1-3 中设  $u = -5 \text{ V}$ ,表示实际上 b 点电位高,a 点电位低。

与电流类似,不标注电压参考方向的情况下,电压的正负是毫无意义的,因此,在分析计算电路时,必须首先选定电压的参考方向,同时约定今后电路图中“+”、“-”号所标电压方向都是电压的参考方向。

既然电路中电流与电压的参考方向都是任意选定的,两者之间独立无关,那么在电路分析中,如何处理两者之间的关系呢?

通常为了处理问题方便起见,对于同一元件或同一电路,习惯上采用关联参考方向(associated reference direction),即电流的参考方向与电压的参考方向取为一致(电流的参考方向由电压参考方向的“+”极性端指向“-”极性端),如图 1-4 所示。



图 1-4 关联参考方向

当电流、电压采用“关联”参考方向时,只要在电路图中标出其中任一变量的参考方向,则另一变量的参考方向即确定,可省略不标。

若电压与电流的参考方向相反,则称为非关联参考方向,如图 1-5 所示。在非关联参考方向中,两者的方向都必须标示出来。

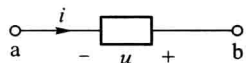


图 1-5 非关联参考方向

### 1.2.3 电位的概念

在电路分析中,经常使用到电位的概念。电位(potential)是相对的,电路中某点电位的大小,与参考点(reference point)(即零电位点)的选择有关,因此讲某点电位为多少,是对所选的参考点而言,否则是没有意义的。同一电路中,只能选取一个参考点,工程上常选大地为参考点。电子线路中常选一条特定的公共线作为参考点,这条公共线是许多元件的汇聚处,并与机壳相连,也称“地线”。在检修电子线路时,常常需要测量电路中各点对“地”的电位,来判断电路的工作是否正常。

下面举例说明电位的计算。

**【例 1-1】** 如图 1-6(a) 所示电路,已知  $u_{s1} = 70 \text{ V}$ ,  $u_{s2} = 40 \text{ V}$ ,  $i_1 = 4 \text{ A}$ ,  $i_2 = 2 \text{ A}$ ,  $i_3 = 6 \text{ A}$ , 分别选择 a 和 d 点作为参考点,计算电路中其余各点电位和  $u_{ab}$  和  $u_{cd}$ 。

**解** (1) 如图 1-6(b) 所示,选取 a 点作为参考点,则 a 点电位  $u_a = 0 \text{ V}$

$$u_b = -5i_3 = -30 \text{ V}$$

$$u_c = 10i_1 = 40 \text{ V}$$

$$u_d = 5i_2 = 10 \text{ V}$$

$$u_{ab} = -u_b = 30 \text{ V}$$

$$u_{cd} = u_{ca} + u_{ad} = u_c - u_d = (40 - 10) \text{ V} = 30 \text{ V}$$

(2) 如图 1-6(c) 所示电路,选取 d 点作为参考点,则 d 点电位  $u_d = 0 \text{ V}$

$$u_a = -5i_2 = -10 \text{ V}$$

$$u_b = -u_{s2} = -40 \text{ V}$$

$$u_c = u_{ca} + u_{ad} = u_{ca} + u_a = (40 - 10) \text{ V} = 30 \text{ V}$$

$$u_{ab} = 5i_3 = 30 \text{ V}$$

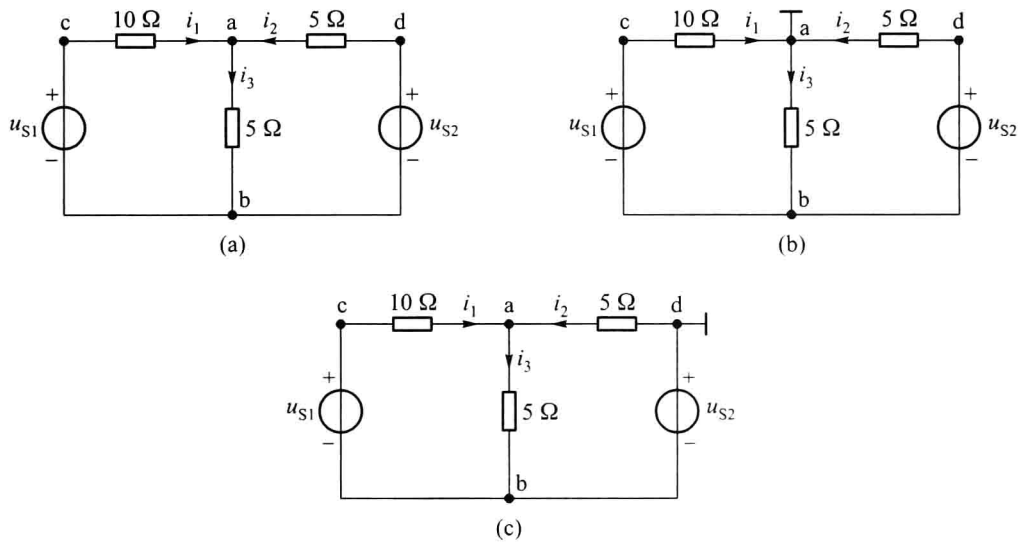


图 1-6 例 1-1 图

$$u_{cd} = u_c = 30 \text{ V}$$

从上例可以看出,参考点选取不同,电路中各点的电位也不同,但是两点间的电位差是不会改变的。即电路中各点的电位与参考点选取有关,两点间的电压与参考点选取无关。通常,电路中把电源、信号输入和输出的公共端接在一起作为参考点,因此电路中有一个习惯画法,即电源不再用符号表示出来,而只标出其电位的极性和数值。电路的简化画法如图 1-7 所示。

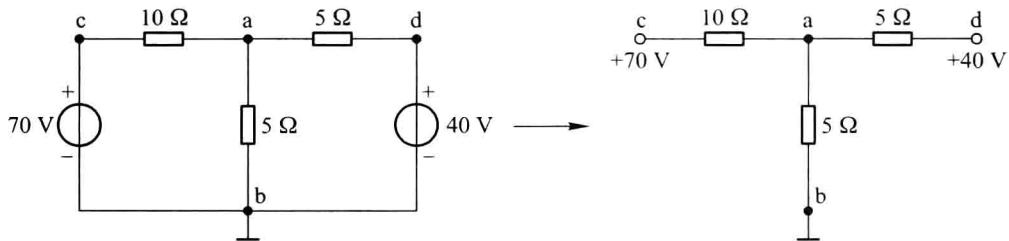


图 1-7 电路的简化画法

电路中电位相等的点,称之为等电位点,可以把等电位点视作开路或者短路,或者接上任意电阻,电路的计算结果都不会改变。

#### 1.2.4 电功率

在电路的分析与计算中,功率和能量的分析与计算也是十分重要的。因为电路工作时,总伴随着电能与其他形式能量的相互转换;并且电气设备、电路部件本身在工作过程中都有功率的限制,在使用时若超过其额定值,过载会使设备或部件损坏,甚至不能正常工作。电功率与电路中的电压和电流密切相关。

定义:某二端电路的功率(power)是该二端电路吸收或发出电能量(electric energy)的速



率,有

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt} \quad (1-3)$$

其中,功率  $p$  的单位为瓦特(W),能量  $W$  的单位为焦耳(J),时间  $t$  的单位为秒(s)。

对一个元件或一段电路来说,设  $t$  时刻电流与电压的真实方向如图 1-4 所示。若  $dt$  时间内由  $a$  点到  $b$  点正电荷量  $dq = i(t) dt$ , 电荷失去的能量(即电路所吸收的能量)  $dW = u(t) dq = u(t) i(t) dt$ , 则该时刻该电路吸收电能的速率(功率)  $p(t) = dW/dt = u(t) i(t)$ 。因此,根据关联参考方向可计算功率

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

若  $p(t) > 0$ , 则表示电路或元件吸收功率;若  $p(t) < 0$ , 则表示电路或元件发出功率。

注意:若为非关联参考方向,则需转换成关联参考方向后进行功率计算。

【例 1-2】如图 1-8 所示,已知  $i = -4 \text{ A}$ ,  $u = 6 \text{ V}$ , 求其功率。

解 根据功率的定义进行计算。图 1-8 中电压与电流为非关联参考方向,可以把电压的参考极性转换成相反的方向,则有

$$p(t) = (-u) \cdot i = [(-6) \times (-4)] \text{ W} = 24 \text{ W}$$

说明图示元件实际吸收 24 W 功率。

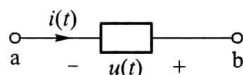


图 1-8 例 1-2 图

【例 1-3】如图 1-9 所示,已知各元件两端电压和电流,试求:(1) 各二端元件吸收的功率;(2) 整个电路吸收的功率。

解 (1) 对于元件 1、2、4, 电流和电压采用关联参考方向,各元件的吸收功率为

$$P_1 = (1 \times 1) \text{ W} = 1 \text{ W}$$

$$P_2 = [(-6) \times (-3)] \text{ W} = 18 \text{ W}$$

$$P_4 = [5 \times (-1)] \text{ W} = -5 \text{ W}$$

对于元件 3、5, 电流和电压采用非关联参考方向,各元件的吸收功率为

$$P_3 = [ -(-4) \times 4 ] \text{ W} = 16 \text{ W}$$

$$P_5 = [ -(-10) \times (-3) ] \text{ W} = -30 \text{ W}$$

由计算结果可知:

元件 1、2、3 吸收功率为正,表示这三个元件实际消耗功率,为负载。负载消耗总的功率为三者之和 35 W。

元件 4、5 吸收功率为负,表示这两个元件实际发出功率,为电源。电源发出总的功率是两者之和也为 35 W。

(2) 整个电路吸收的功率

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = (1 + 18 + 16 - 5 - 30) \text{ W} = 0 \text{ W}$$

在一个电路中,有元件吸收功率,就有元件释放功率,吸收的功率应和释放的功率相等,称为

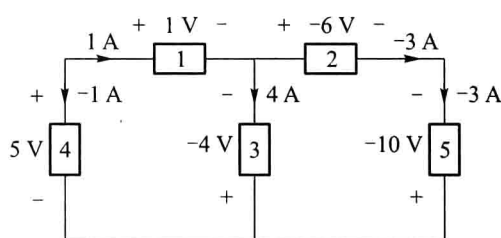


图 1-9 例 1-3 图