



“十一五”浙江省重点教材建设项目

● 电子信息与电气学科规划教材 · 电子电气基础课程

电路分析教程

汪金山 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

“十一五”浙江省重点教材建设项目
电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

电路分析教程

汪金山 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本教材为“十一五”浙江省重点教材建设项目。本教材依据电子信息与电气学科电子电气基础课程教学指导分委员会“电路分析基础”课程教学的基本要求,遵循“理论够用,实用为主,便于教学”的原则而编写。全书共分8章,系统地介绍了电路分析中的基本概念、基本定律和基本分析方法,主要内容包括:集总电路的分析基础、线性电阻电路分析的基本方法、含有运算放大器电路分析、动态电路的时域分析、正弦稳态电路的相量分析法、三相正弦交流电路的分析、二端口网络、非线性电阻电路分析的基本方法,并在各章配备了一定量的电路设计与仿真实例。

本教材可作为高等学校电子与电气信息类专业电路分析课程的本科生教材,也可作为电子信息类专业的工程技术人员提供参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析教程/汪金山编著. —北京:电子工业出版社, 2011.1

电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

ISBN 978-7-121-12055-8

I. ①电… II. ①汪… 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(2010)第204254号

策划编辑:章海涛

责任编辑:冉 哲

印 刷: 北京市铁成印刷厂
装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 15.25 字数: 388千字

印 次: 2011年1月第1次印刷

印 数: 4000册 定价: 28.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

近年来,随着电子信息技术的快速发展,电类工程教育的课程设置和教学内容发生了巨大变化,然而,电路分析作为电类各专业的一门专业基础课程,内容却大体上保持稳定。虽然电路分析课程内容目前难以从根本上进行变革,但教育工作者还是为适应电工、电子技术发展的需要和不断更新的后继课程要求,努力以新的观点和方法对它的基本内容进行了重组和优化,以求达到在缩减教学时数的同时提高基础理论的教学质量。

根据美国教育心理学家布鲁纳(Jerome Seymour Bruner)“学科结构论”的观点,学习任何课程,主要是要使学生掌握该课程的基本结构。所谓基本结构是指各种定理、方法、概念、定义之间相互关系的理论框架。学生一旦掌握了课程的基本结构,也就掌握了该课程的基本原理和基本概念,就能处理许多看来似乎生疏但密切关联的知识,也就是说,在学习过程中可以把基本原理作为“学习迁移”的基础,不断扩大和加深对知识的理解和运用。

电路分析课程研究集总参数电路,以电流、电压、功率、能量为分析对象。传统电路理论以强电技术为其主要工程背景,而近代电路理论则以电子、通信、控制等弱电技术为其主要工程背景,按照其各种定理、方法、概念、定义之间相互关系,其基本结构可归结为一个假设、两类约束和三种基本方法。一个假设是指集总参数假设,是将实际电路抽象为电路模型的依据。两类约束是指电路结构的拓扑约束和电路元件的 VCR 约束,它们是描述电路的基本定律,是分析集总参数电路的基本依据,由此衍生出支路电流法、回路电流法、网孔电流法、结点电压法等电路分析方法,应贯穿于教材始终。三种基本方法是指等效法、叠加法和变换域法,等效法是对电路结构而言的,依据等效的概念,使结构复杂的电路问题转化为结构简单的电路问题,由此衍生出两种电源模型之间的等效变换、三端电阻网络的 T— Δ 等效变换、戴维南定理、诺顿定理、置换定理、互易定理等电路分析方法;叠加法是对激励信号而言的,通过叠加,使复杂激励的电路问题转化为简单激励的电路问题,由此衍生出叠加定理、三要素法和傅里叶级数展开等电路分析方法;变换域法是对整个电路模型而言的,通过对外施激励信号的变换,对两类约束关系的变换,从而达到对电路模型的变换,运用相量模型、复频域模型使直流电阻电路的分析方法得以应用于正弦稳态电路分析、动态电路分析,最终使三大类电路的分析方法得到统一。

本教材是在符合电子信息与电气学科电子电气基础课程教学指导分委员会“电路分析基础”课程教学基本要求的前提下,结合作者多年来教学《电路分析》课程的实践心得编写而成的。在编写过程中主要考虑以下几个方面:

(1) 突出电路分析方法的实际运用。在每章中开辟一节——仿真与应用,或设计与仿真,有针对性地对相关的实际电路进行分析、设计与仿真,提高学生的学习兴趣。

(2) 注意教材内容的新颖和实用,将记忆电阻器等内容引入教程,激发学生的对新知识的求知热情。

(3) 将运算放大器内容单独作为一章,以加强学生对由运算放大器构成的各种运算电路的分析和认识,为学生做系统设计而进行必备的基础电路储备。

(4) 作为本科的一门技术基础课程,对于绝大多数学生来说,学习本课程的主要目的是为学习后续课程和毕业后从事电技术工作准备必要的电路基础知识,并不是直接从事电路理

论领域的研究工作。因此在编写中，充分考虑本教材的教学适用性，在内容安排上，注意适应学生的认识规律，合理、有序地组织教材内容，使各章、节的中心明确，层次清楚，概念准确，论述简明、深浅恰当、难易适度。

本教材编写得到了浙江省重点教材建设项目的资助，在编写过程中得到了浙江师范大学余水宝教授、汪晓东教授的有益帮助，吸取了参考文献中各位专家、学者的许多宝贵经验，同时，也得到了电子工业出版社高级策划编辑章海涛先生的大力支持，在此深表谢意。由于编者学识水平有限，值得商榷和不妥之处在所难免，恳请读者提出宝贵的意见。

为了方便教师教学，本书还配有教学指南、电子教案及习题答案，请有此需要的教师登录华信教育资源网（<http://www.hxedu.com.cn>）免费注册后再进行下载，再有问题时，请在网站留言板留言或与电子工业出版社联系（E-mail: unicode@phei.com.cn）。

汪金山
于浙江师范大学

目 录

第 1 章 集总电路的分析基础	1
1.1 电路和电路模型	1
1.1.1 电路的组成及其功能	1
1.1.2 理想电路元件	1
1.1.3 电路模型	2
1.1.4 集总假设	3
1.2 电路的基本物理量	3
1.2.1 电流	3
1.2.2 电压	4
1.2.3 电功率	5
1.2.4 国际单位制	7
1.3 基本电路元件的伏安特性	8
1.3.1 电阻元件	8
1.3.2 电感元件	9
1.3.3 电容元件	11
1.3.4 通用阻抗的概念	13
1.3.5 独立电压源与独立电流源	13
1.3.6 受控源	16
1.3.7 实际元件的主要参数及电路模型	16
1.3.8 记忆电阻器	17
1.4 基尔霍夫定律	19
1.4.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)	19
1.4.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)	20
1.5 一段非均匀电路欧姆定律	21
1.6 电路的仿真分析	24
1.6.1 Multisim 简介	24
1.6.2 电路仿真方法及步骤	33
1.6.3 电路仿真问题的解决	33
1.6.4 电路仿真注意事项	34
习题 1	35
第 2 章 线性电阻电路分析的基本方法	39
2.1 电路的等效变换	39
2.1.1 电路元件的串并联	39

2.1.2	电阻元件的星形、三角形连接及其等效转换	41
2.1.3	电压源、电流源之间等效变换	42
2.2	支路电流法	43
2.3	网孔电流法	45
2.3.1	网孔电流变量的完备性与独立性	45
2.3.2	网孔电流方程的导出与标准形式	45
2.3.3	网孔电流法解题的基本步骤及示例	46
2.4	结点电压法	47
2.4.1	结点电压方程的导出	48
2.4.2	结点电压方程的标准形式	49
2.4.3	结点电压法解题步骤及示例	50
2.5	叠加定理	52
2.6	等效电源定理	55
2.6.1	戴维南定理	55
2.6.2	诺顿定理	61
2.7	最大功率传输定理	64
2.8	仿真与应用	67
2.8.1	电压源与电流源之间的等效变换仿真验证	67
2.8.2	叠加定理仿真验证	68
2.8.3	KCL、KVL 仿真验证	68
2.8.4	戴维南定理仿真	69
2.8.5	一个简单电路的问题	70
习题 2		71

第 3 章 含有运算放大器电路分析 79

3.1	运算放大器的电路模型	79
3.1.1	认识运算放大器	79
3.1.2	运算放大器的电路组成及其分类	80
3.1.3	运算放大器的外特性	82
3.1.4	运算放大器的电路模型	82
3.1.5	理想运算放大器	83
3.2	含运算放大器的电路分析	83
3.3	运算放大器在信号运算方面的应用	85
3.3.1	加法运算	85
3.3.2	正相(同相)比例器	87
3.3.3	电压跟随器	87
3.3.4	减法运算	88
3.3.5	积分运算	90
3.3.6	微分运算	92
3.3.7	对数和指数(反对数)运算电路	93

3.3.8 乘法和除法运算电路	94
3.4 RC 有源滤波器	95
3.5 负阻变换器电路分析	97
3.6 仪表放大器	98
3.7 设计与仿真	99
3.7.1 设计完成实现 $u_o = 2(u_{i1} + u_{i2}) - 0.5u_{i3}$ 运算功能的运放电路	99
3.7.2 求解微分方程的电子模拟电路设计	101
3.7.3 回转器电路分析——模拟电感和模拟电容设计	101
3.7.4 剩余燃料监测电路设计	104
3.7.5 对积分电路的仿真	105
习题 3	105
第 4 章 动态电路的时域分析	110
4.1 动态电路方程的建立	110
4.2 电路初始条件的确定	113
4.2.1 换路定律	113
4.2.2 电路初始值的计算	113
4.3 一阶电路的零输入响应	115
4.3.1 RC 电路的零输入响应	116
4.3.2 RL 电路的零输入响应	118
4.3.3 一阶电路零输入响应的一般形式	119
4.4 一阶电路的零状态响应	120
4.5 一阶电路的完全响应	122
4.6 一阶电路的三要素法	123
4.7 正弦信号激励下一阶电路响应	127
4.8 一阶电路的阶跃响应	129
4.9 二阶电路分析	131
4.9.1 二阶电路的零输入响应	131
4.9.2 直流 RLC 串联电路的完全响应	134
4.10 设计与仿真——无损耗 LC 电路设计	134
习题 4	137
第 5 章 正弦稳态电路的相量分析法	144
5.1 正弦交流电的基本概念	144
5.2 正弦交流电的相量表示	147
5.3 基尔霍夫定律的相量形式	149
5.4 三种基本电路元件伏安关系的相量表示	150
5.5 阻抗和导纳	154
5.5.1 阻抗与导纳	154
5.5.2 用相量法分析 R、L、C 串联电路	155

5.5.3	用相量法分析 R、L、C 并联电路	157
5.5.4	复阻抗与复导纳的等值转换	157
5.6	正弦稳态电路分析	158
5.7	弦稳态电路的功率	161
5.7.1	正弦稳态功率的定义	162
5.7.2	特殊单口网络的功率	163
5.7.3	功率因数	165
5.7.4	最大功率传输定理	167
5.8	正弦稳态电路的谐振状态	168
5.8.1	串联谐振	168
5.8.2	并联谐振	170
5.9	正弦稳态电路的叠加	170
5.10	设计与仿真——振荡器电路设计	172
习题 5		174
第 6 章	三相正弦交流电路的分析	180
6.1	三相正弦交流电的产生	180
6.2	三相电源的连接	181
6.3	三相负载的连接	183
6.4	三相正弦交流电路的计算	184
6.4.1	Y-Y 连接的三相电路	184
6.4.2	Y- Δ 连接的三相电路	187
6.5	三相负载的功率	189
6.6	设计与仿真	191
习题 6		193
第 7 章	二端口网络	196
7.1	二端口网络的一般概念	196
7.2	二端口网络的基本方程和参数	197
7.2.1	阻抗方程和 Z 参数	197
7.2.2	导纳方程与 Y 参数	198
7.2.3	混合方程与 H 参数	199
7.2.4	传输方程和 T 参数	200
7.3	二端口网络参数的计算	201
7.4	含线性二端口网络的电路分析	203
7.5	理想变压器与互易二端口网络	207
7.5.1	理想变压器	207
7.5.2	互易二端口网络	210
7.6	二端口网络的连接	210
7.7	二端口网络应用——滤波器简介	212

习题 7	213
第 8 章 非线性电阻电路分析的基本方法	218
8.1 非线性电阻元件	218
8.2 非线性电阻电路的图解分析法	219
8.3 非线性电阻电路的小信号分析法	224
8.4 假定状态分析法	227
8.5 设计与仿真	228
习题 8	230
参考文献	233

第1章 集总电路的分析基础

本章介绍电路模型、集总假设、电流和电压的参考方向等重要概念，阐明电路中的电压、电流受到的两类约束关系。这些基本概念和基本定律是分析集总参数电路的理论基础。

1.1 电路和电路模型

为实现某种功能，由若干个电气设备或器件按一定方式用导线连接而成的整体称为电路。电路是电荷流通的路径。

1.1.1 电路的组成及其功能

所有的实际电路都是由电源（或信号源）、负载和中间环节三个基本部分组成的。电源或信号源是提供电能或信号的器件；负载是用电器件，它将电能转换为其他形式的能量；介于电源和负载之间的其他器件统称为中间环节，它们起着电能（或信号）的传输、控制、保护、放大等作用。

实际电路形式是多种多样的，有可以延伸到数百、数千千米以外的电力电路，也有可以局限在几平方毫米以内的集成电路。但就其功能而言，可以划分为两大类：一类主要实现电能的产生、分配、传输和转换，如电力系统中的输电电路和照明电路等；另一类主要实现信号的变换、传输和储存，如微分电路、滤波电路、计算机电路等。

1.1.2 理想电路元件

组成实际电路的器件不但种类繁多，而且对某一器件来说，其电磁性能也不是单一的。以实验室用的滑线变阻器为例，它由导线绕制而成，当有电流流过时，首先它将电能转换成热能，说明它具有电阻的性质；其次，由于导线中有电流，电流会激发磁场，这说明它具有电感的性质；另外，由于导线两端有电压，在导线中储存有电场能量，这说明它具有电容的性质。当电流、电压的频率不同时，其各种性质表现程度也不相同，在电路分析中，如果对实际器件的所有性质都加以考虑，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理想化的概念，就是在一定的条件下，突出实际器件的主要性质，而忽略其次要性质，用只具有单一电磁性能的理想元件来代表它，所以理想电路元件是实际器件抽象出来的理想化模型。例如，理想电阻元件只消耗电能，理想电感元件只储存磁场能量，理想电容元件则只储存电场能量。在不同工作条件下，一种实际器件可用一种或几种理想电路元件的组合来近似表征。例如，上面提到的滑线变阻器可用理想电阻元件来表征；若考虑磁场的作用，则可用理想电阻元件和理想电感元件的组合来表征。同时，对于电磁性能相近的一类实际器件，也可用同一种理想电路元件来近似表征。例如，所有的电阻器、电烙铁、白炽灯、电熨斗等器件，都可用理想电阻元件来近似表征。

在电路分析中，常用的理想电路元件只有几种，而且都有各自精确的数学定义，在电路图中用规定的符号来表示，它们可以用来表征千千万万种实际的电路器件。在今后的叙述中，一般将理想电路元件简称为电路元件。

值得指出的是，电路元件作为实际电路器件的模拟，在概念上它们是有区别的。在电路分析时，作为电路元件的工作电压、电流和功率是没有限制的，而作为实际电路器件必须在一定的电压、电流和功率范围内才能正常工作。所以电路器件除标注本身的性能参数外，通常还标注出额定电压、额定电流和额定功率。

1.1.3 电路模型

由理想电路元件构成的电路称为电路模型。也就是说，电路模型是把实际电路加以理想化以后而得到的，是实际电路的近似模拟，并非实际电路。所有的实际电路，不论简单还是复杂，都可以用由电路元件构成的电路模型来表示。在不同条件下，同一实际器件可能采用不同的模型，模型取得是否恰当，将直接影响电路分析的计算量和计算结果对实际电路模拟的精确程度。一个简单的实际电路与电路模型如图 1-1 所示。

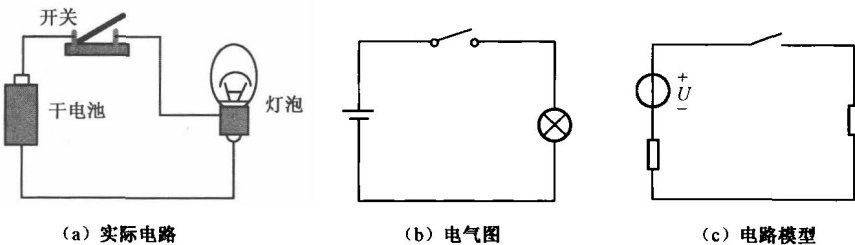


图 1-1 一个简单的实际电路与电路模型

电路模型中常用的电路元件图形符号见表 1-1。

表 1-1 常用的电路元件图形符号（根据国家标准 GB 4728）

符 号	名称与说明	符 号	名称与说明	符 号	名称与说明
	导线		开关		电容器
	导线连接		熔断器		极性电容器
	交直流		电压表		微调电容器
	接地一般符号		灯、信号灯		半导体二极管
	接机壳或底板		闪光型信号灯		稳压二极管
	理想电流源		电阻器		隧道二极管
	理想电压源		可变电阻器		半导体三极管
	理想回转器		滑线式变阻器		电池或蓄电池
	手动开关		电感器、线圈		运算放大器

1.1.4 集总假设

集总假设是电路理论中最基本的假设。在理想化的电路模型中,理想电路元件只表现一种电或磁的性能,如果进一步假设电路元件的电磁过程总是集中在元件内部进行,则这样的假设被称为集总假设。满足集总假设的元件称为集总参数元件,由集总参数元件构成的电路模型称为集总参数电路模型,简称集总电路。本书研究的电路均为集总电路。

集总假设要求各元件中的电磁过程均发生在元件内部,这就意味着器件中变化的电场或变化的磁场所激发的电磁波能量不能被辐射;由于电路中的能量不能被辐射,或者说电路中的电磁能量辐射可以忽略不计时,电路必定为稳恒电路或似稳电路;要使电路为稳恒电路或似稳电路,电路中的电场必定为稳恒电场或似稳电场;要使电路中的电场为稳恒电场或似稳电场,这就要求电路的几何尺寸远远小于各条支路上的电流所激发的电磁波的波长。例如,我国电力用电的频率为 50Hz,对应的波长为 6000km,对实验室电路来说,其电路尺寸与这一波长相比可以忽略不计,因而各条支路上的电场必定为稳恒电场或似稳电场,用集总的概念是完全可以的,似稳电场的波长与电路尺寸的关系可用图 1-2 来说明。但是,对于远距离输电电路而言,必须考虑电场、磁场沿电路分布的现象,需要用分布参数电路来处理。



图 1-2 似稳电场的波长与电路尺寸的关系

另外,根据金属电子理论,金属中自由电子运动的平均速率与电场强度成正比,而电路中电流的大小又取决于电荷运动的平均速率,因此,在集总假设前提下,因为电路中的电场为稳恒电场或似稳电场,所以可以得到集总电路中同一支路上的电流处处相等的结论。反之,如果讨论的电路不满足集总假设,则电路中同一支路上的电流并不一定处处相等,这样也就失去了电路分析的意义。

1.2 电路的基本物理量

电路理论中所涉及的基本物理量有电荷、磁通(磁通链)、电流、电压、能量和电功率 6 种。在电路分析中,更多关注的基本物理量是电路中的电流、电压和电功率。

1.2.1 电流

电荷的定向移动形成电流,电流的大小用电流强度来定义。电流强度的定义是:在单位时间内通过导体横截面的电量。电流强度用字母 i 表示,其定义式为

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

电流强度的国际单位是安培,简称安,用符号 A 表示。

在电路分析中,人们习惯于用小写字母表示随时间变化的物理量,用大写字母表示不随时间变化的物理量。例如,用小写字母 i 表示随时间变化的电流,如交流电流(ac 或 AC);

用大写字母 I 表示不随时间变化的电流，如直流电流（dc 或 DC）。

电流的方向是指电流在电路中由一端流向另一端的流向，与力学量的空间方向有本质的区别。习惯上，人们把正电荷移动的方向规定为电流的实际方向。电流的方向可以用箭头标示，也可以用双下标表示。

电路分析的任务之一就是要分析计算出电路中某条支路上电流的大小和方向。在通常情况下，电路中电流的大小和实际方向在人们对电路未进行分析计算之前是不知道的。为了计算出电路中电流的大小和实际方向，必须依据电路理论对电路列写方程，而要对电路列写方程又必须要事先知道电流的方向，这样，分析电路就遇到了困难。为了克服这一困难，引入参考方向的概念，即在列写电路方程之前，事先可以对各条支路上的电流任意假定一个方向，并标示在电路图中，这个任意假定的电流方向就是通常所说的参考方向或正方向。

根据电路理论，依据电路中所标示的电流的参考方向，就可以列写出电路方程，从而可以求出各条支路上的电流 i 。当计算某条支路上电流的结果 $i > 0$ 时，说明该支路上的电流实际方向与假设的参考方向一致；当 $i < 0$ 时，则说明该支路上的电流实际方向与假设的参考方向相反，如图 1-3 所示。这样就可以根据各条支路上电流的正负和参考方向来确定各条支路上电流的实际方向了。



图 1-3 电流的实际方向与假设的参考方向的关系

需要说明的是，电路中电流的参考方向是可以任意假定的，本书后面电路图中所标示的电流方向均为参考方向。由于在集总电路中，电路的尺寸是无关紧要的，流过元件的电流可以是时间的函数，却谈不上是空间位置的函数，因此，在任意时刻从任意元件的一端流入的电流必定等于从它另一端流出的电流，这是集总假设的必然结果。

1.2.2 电压

电荷在电路中做定向漂移运动，在某些部分（例如电源处）会获得能量，而在另外一些部分（例如电阻处）会失去能量，因此，电荷在电路中做定向漂移运动的过程实际上也就是能量的传递与交换的过程。为了便于研究电路的这一性质，引入电压物理量。

电压的定义是：电路中 a、b 两点之间的电压为单位正电荷从 a 点移动到 b 点所获得或失去的能量，用符号 u 表示。其定义式为

$$u = \frac{dw}{dq} \tag{1-2}$$

电压的国际单位是伏特，简称伏，用符号 V 表示。

电压也叫做电位差，如果正电荷从 a 转移到 b，获得能量，则规定 a 点为低电位，b 点为高电位；如果正电荷从 a 转移到 b，失去能量，则规定 a 点为高电位，b 点为低电位。高、低电位分别用符号+（正极）和-（负极）表示。为了便于叙述，常引用“电压的方向”说法，并习惯上规定电压的实际方向为由高电位指向低电位的方向。

电压的方向通常有三种表示方式：比较常用的方式是用符号+、-表示，电压的方向是由+指向-的方向；另一种方式是用箭头符号表示，箭头的方向就是电压的方向；还有一种方式就是双下标表示，如 u_{ab} 表示电压的方向是由 a 指向 b。

在电路分析时，如同需要为电流规定参考方向一样，也需要为电压规定参考方向或参考极性。即在列写电路方程之前，事先可以对各个元件上的电压任意假定一个方向，并标示在电路图中，这个任意假定的电压方向就是通常所说的参考方向或参考极性。根据电路理论，依据电路中所标示的电压的参考方向，可以列写出电路方程，从而可以求出各个元件上的电压 u 。当计算某个元件上电压的结果 $u > 0$ 时，说明该元件上的电压实际方向与假设的参考方向一致；当计算的结果 $u < 0$ 时，说明该元件上的电压实际方向与假设的参考方向相反，如图 1-4 所示。这样就可以根据各个元件上电压的正负和参考方向来确定各个元件上电压的实际方向了。



图 1-4 电压的实际方向与假设的参考方向的关系

如上所述，对于一段电路上或一个元件上的电流、电压的参考方向是可以独立无关地任意假定的，这种任意假定的结果有两种可能：一种是一段电路上或一个元件上电流、电压的参考方向一致，另一种就是电流、电压的参考方向相反。把元件上电流、电压的参考方向一致称为关联参考方向，电流、电压的参考方向相反称为非关联参考方向，如图 1-5 所示。为了方便起见，一般采用关联参考方向。



图 1-5 关联参考方向与非关联参考方向

1.2.3 电功率

在电路中，电场力在单位时间内所做的功称为电功率，简称功率，用 p 表示，其定义式为

$$p = \frac{dw}{dt}$$

在国际单位制中，电功率的单位是瓦特，简称瓦，用符号 W 表示。

描述电路元件的功率可以有两种定义：吸收功率与放出功率。对同一个电路元件而言，吸收的功率与发出的功率互为相反数，即 $p_{\text{吸}} = -p_{\text{放}}$ 。

如图 1-6 (a) 所示，在关联参考方向下， dt 时间内电场力将正电荷量 dq 由高电位点 a 点经元件移动到低电位点 b 点所做的功为

$$dw = udq = u \frac{dq}{dt} dt = uidt$$



图 1-6 元件吸收的功率

电场力对 dq 做功的结果使得 dq 由高电位移动到低电位， dq 在单位时间内所失去的能量等于电场力在单位时间内对 dq 所做的功，由于 dq 失去的能量被元件所吸收，因此在关联参考方向下，元件所吸收的功率为

$$p = \frac{dw}{dt} = ui \tag{1-3}$$

同理，如图 1-6 (b) 所示，在非关联参考方向下，元件所吸收的功率为

$$p = -ui \tag{1-4}$$

这里应特别注意的是，在电路分析时，所有的电路方程或数学表达式都是依据参考方向来列写的，参考方向标示得不同，电路方程或数学表达式的形式就不同。例如，元件吸收的功率在关联参考方向下应写为 $p = ui$ ，而在非关联参考方向下应写为 $p = -ui$ 。这样，无论关联参考方向还是非关联参考方向，当计算结果 $p > 0$ 时，表示元件吸收功率；当 $p < 0$ 时，表示元件放出功率。

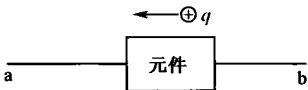


图 1-7 例 1-1 图

例 1-1: 在图 1-7 中，假如 2 库仑的正电荷在 4 秒时间内由 b 端经元件移动到 a 端，且在移动过程中获得 6 焦耳能量。试在电路中以电压、电流的参考方向和电压、电流数值的正负表示出真实的电压、电流的大小和方向，并计算出元件所吸收的功率。

解: 根据电流的定义得电流的大小为

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{2}{4} = 0.5 \text{ A}$$

因为正电荷从 b 向 a 运动，所以电流的真实方向为由 b 指向 a 的方向。

根据电压的定义得电压的大小为

$$u = \frac{dw}{dq} = \frac{6}{2} = 3 \text{ V}$$

因为正电荷从 b 向 a 运动过程中获得能量，所以电压的真实极性为 a 端为高电位，b 端为低电位。

若以电压、电流的参考方向和电压、电流数值的正负来表示出真实的电压、电流的大小和方向，则有下列 4 种不同的标示，如图 1-8 所示。

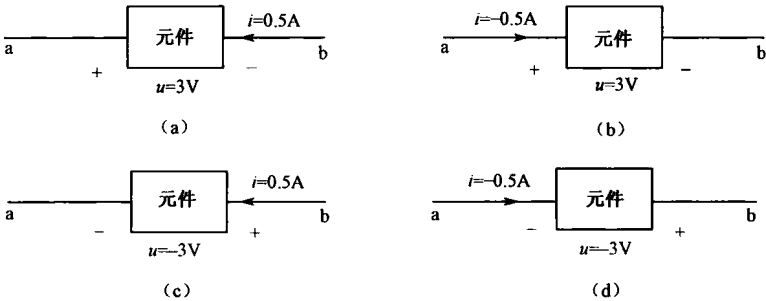


图 1-8 例 1-1 电压、电流的 4 种不同的标示

其元件吸收功率由图 1-8 (a) 得

$$p = -ui = -3 \times 0.5 = -1.5 \text{ W}$$

由图 1-8 (b) 得

$$p = ui = 3 \times (-0.5) = -1.5 \text{ W}$$

由图 1-8 (c) 得

$$p = ui = (-3) \times 0.5 = -1.5\text{W}$$

由图 1-8 (d) 得

$$p = -ui = -(-3) \times (-0.5) = -1.5\text{W}$$

通过上述计算结果可以看出，无论如何选择电流、电压的参考方向，在计算元件吸收的功率时，只要注意在关联参考方向时选用公式 $p = ui$ ，而在非关联参考方向时选用公式 $p = -ui$ ，就可以得到相同的结论。因为计算结果 $p = -1.5 < 0$ ，所以元件在上述过程中实际上是放出功率 1.5W。

1.2.4 国际单位制

在电路分析中，普遍采用国际单位制 (SI)。国际单位制是建立在 7 种基本单位的基础上的，它们是：长度单位米 (m)、质量单位千克 (kg)、时间单位秒 (s)、电流单位安培 (A)、热力学温度单位开尔文 (K)、物质的量单位摩尔 (mol)、发光强度单位坎德拉 (cd)，而其他物理量单位都是由基本单位导出的，如能量的单位是焦耳 (J)、热能单位卡路里 (cal) (1cal=4.187J)、电能的单位是千瓦时 (kW·h) (1kW·h=3.6×10⁶J) 等。

在国际单位制中，常用前缀 10 的各次幂将较大或较小的单位与基本单位相联系，例如：

1mA (毫安) = 10⁻³A (安)
1μs (微秒) = 10⁻⁶s (秒)
1nm (纳米) = 10⁻⁹m (米)
1kW (千瓦) = 10³W (瓦)

常用的 SI 标准前缀见表 1-2。

表 1-2 常用的 SI 标准前缀

前 缀	名 称	符 号	前 缀	名 称	符 号
10 ⁻²⁴	幺[科托] (yocto)	y	10 ²⁴	尧[它] (yotta)	Y
10 ⁻²¹	仄[普托] (zepto)	z	10 ²¹	泽[它] (zetta)	Z
10 ⁻¹⁸	阿[托] (atto)	a	10 ¹⁸	艾[可萨] (exa)	E
10 ⁻¹⁵	飞[母托] (femto)	f	10 ¹⁵	拍[它] (peta)	P
10 ⁻¹²	皮[可] (pico)	p	10 ¹²	太[拉] (tera)	T
10 ⁻⁹	纳[诺] (nano)	n	10 ⁹	吉[咖] (giga)	G
10 ⁻⁶	微 (micro)	μ	10 ⁶	兆 (mega)	M
10 ⁻³	毫 (milli)	m	10 ³	千 (kilo)	k
10 ⁻²	厘 (centi)	c	10 ²	百 (hecto)	h
10 ⁻¹	分 (deci)	d	10 ¹	十 (deka)	de

按照国际标准化组织推荐的使用方法，不允许用几个前缀的组合构成前缀，如“毫微秒”等。需要指出的是：在电路分析和一般工程中，往往用所谓的“工程单位”来表示数值，即某个量通常习惯表示为介于 1 ~ 999 之间的数字和一个适当的能被幂次 3 整除的公制单位。例如，人们更习惯将 0.068W 表示成 68mW，而不是 6.8cW、6.8 × 10⁻²W 或 68000μW。