

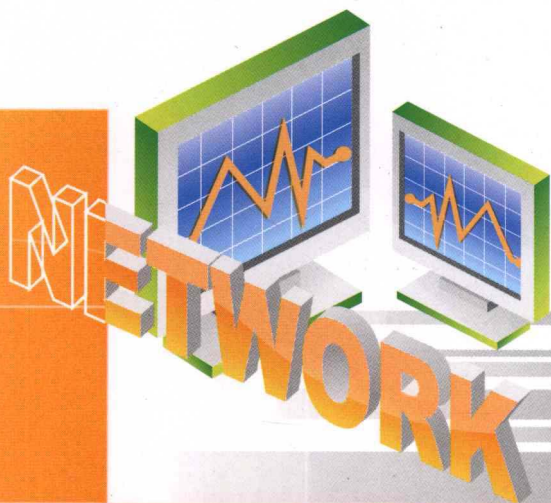


21st CENTURY

实用规划教材

21世纪全国应用型本科

电子通信系列 实用规划教材



电路分析

主 编 王艳红 蒋学华 戴纯春
主 审 郭英彪



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

|应用型本科电子通信系列实用规划教材

电 路 分 析

主 编	王艳红	蒋学华	戴纯春
副主编	黄丛生	刘淑娟	
参 编	丁 宏	郭 峰	
主 审	郭英彪		



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是按照教育部高等学校电子电气基础课教学指导分委员会 2004 年 8 月修订的《电路分析基础课程基本教学要求》编写的,包括电路的基本概念与定律、二端网络的等效、电路分析的基本方法、电路分析中的常用定理、电容元件与电感元件、正弦交流电路分析和相量模型、正弦稳态电路的功率、三相电路、电路的频率特性、耦合电感和理想变压器、一阶动态电路分析、二阶动态电路分析及双口网络,共 13 章,书中各章均列举了电路分析理论在实际中的应用例子,并给出计算机分析电路的方法,使学生能在掌握电路分析的基本定理和基本分析方法的同时,能将理论与实际更好地结合起来。

本书内容完整、深入浅出、通俗易懂、可读性强。在例题和习题的选择上,力争题型全面,有的例题给出多种解法。习题有填空、选择和计算多种题型,以帮助学生掌握理论知识,提高学生科学思维能力和实际应用能力。

本书可作为电子、通信、计算机、自动化、仪表测量类专业相关课程的教材,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析/王艳红,蒋学华,戴纯春主编. —北京:北京大学出版社, 2008.8

(21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材)

ISBN 978-7-301-12179-5

I. 电… II. ①王…②蒋…③戴… III. 电路理论—高等学校—教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 074916 号

书 名: 电路分析

著作责任者: 王艳红 蒋学华 戴纯春 主编

策 划 编 辑: 徐 凡

责 任 编 辑: 李娉婷

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-12179-5/TN · 0026

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 山东省高唐印刷有限责任公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787mm×1092mm 16 开本 24.25 印张 572 千字

2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

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

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

“电路分析”是研究电路理论的基础课程，其任务是使学生掌握电路的基本概念、基本理论和基本分析方法，为后续课程的学习提供必要的基础理论知识，为进一步研究电路理论打好基础。随着电子信息技术的飞速发展及社会对大学生素质要求的不断提高，高校培养学生的目标、任务、方法及模式都有了新的变化，从而对课程设置和课程教学提出了更高的要求，这就促使我们在教学内容、教学方法和教学手段上不断改进以适应教学改革和培养人才的需要。因此，本书在编写时，力求做到以下几点。

(1) 在保证基本概念、基本定理和基本分析方法完整的前提下，内容由浅入深、叙述简明扼要，重点突出，语言简练流畅，便于教与学。

(2) 突出应用。电路分析理论课程不仅理论严谨，还具有广泛的实用性和工程应用性，所以，本书重点章节设计了应用实例来讲述理论在实际中的应用，从而切实可行地使学生学到电路分析理论是如何与实际应用紧密相连的。

(3) 学生除了掌握传统的电路分析方法外，还需要掌握现代电路分析设计的新技术，在本书中引入了计算机辅助分析电路的方法，培养学生计算机辅助分析的能力。

(4) 为使学生深入掌握所学理论知识，提高学生科学的思维能力和分析计算能力，本书设置了丰富的例题，有的例题给出多种解法，每节都有思考练习题，每章习题题型多样，包括填空、选择和计算多种题型，并注重在习题中列出工程应用的实际问题，以提高学生分析和解决实际问题的能力。

(5) 为适应教学改革和目前课堂教学学时压缩的需要，本书在编写时，对电路分析的基本内容均给予系统和详细的讲解，既注重内容全面，又注意全书结构简单。二阶动态电路分析、双端口网络放在最后两章，可以作为选讲内容，少学时的电路分析课程，也可将非线性电路分析、计算机辅助分析等内容作为选讲或自学内容。本书在使用中可以根据各个专业的不同需要，适当删减章节。

本书是按照教育部高等学校电子电气基础课教学指导分委员会 2004 年 8 月修订的《电路分析基础课程基本教学要求》编写的，包括电路的基本概念与定律、二端网络的等效、电路基本的分析方法、电路分析中的常用定理、电容元件与电感元件、正弦交流电路分析和相量模型、正弦稳态电路的功率、三相电路、电路的频率特性、耦合电感和理想变压器、一阶动态电路分析、二阶动态电路分析及双口网络，共 13 章。各章均列举了电路分析理论在实际应用中的例子，并给出计算机分析电路的方法。在课堂教学中授课内容主要集中在以电阻电路、正弦稳态电路和动态电路分析三大部分，采用传统授课方式与多媒体课件相结合，教师讲解、课堂讨论、学生自学加实验并举，同时引导学生使用一些计算机辅助分析电路通用软件，这样就构建了“教师课堂教学+学生自主学习+计算机辅助软件+实验与辅导”的教学模式，使学生能在掌握电路分析的基本定理和基本分析方法的同时，将理论与实际更好地结合起来。

本书可作为电子、通信、计算机、自动化、仪表测量类专业相关课程的教材，也可供有关科技人员参考。

本书建议授课的参考总学时约为 64~72 学时，实验参考学时约为 16~20 学时。具体学时安排需依照各学校具体情况自主灵活地制定教学计划。

本书参加编写的有王艳红(第 1 章、第 2 章、第 6 章)、蒋学华(第 3 章、第 4 章)、戴纯春(第 5 章、第 8 章、第 9 章)、黄丛生(第 11 章、第 12 章)、刘淑娟(第 10 章)、丁宏(第 7 章)、郭峰(第 13 章)。全书由王艳红负责编写提纲、各章初稿的修改和统稿。

本书承蒙郭英彪老师精心审阅，提出了宝贵意见，谨致以衷心的感谢。

编写本书时，查阅和参考了众多文献资料，获得教益和启发，也得到许多老师的帮助，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中的疏漏和不妥之处在所难免，恳请读者提出宝贵意见，以便修改。

编 者
2008 年 5 月

目 录

第 1 章 电路的基本概念与定律.....1	4.4 诺顿定理..... 116
1.1 电路与电路模型.....1	4.5 最大功率传输定理..... 119
1.2 电路的基本物理量.....3	*4.6 特勒根定理..... 122
1.3 理想电路元件.....8	4.7 互易定理..... 125
1.4 基尔霍夫定律.....13	4.8 小结..... 129
1.5 受控源.....18	4.9 习题..... 131
1.6 电阻的应用.....21	第 5 章 电容元件与电感元件..... 137
1.7 小结.....23	5.1 电容元件..... 137
1.8 习题.....24	5.2 电容元件的性质..... 142
第 2 章 二端网络的等效.....30	5.3 电感元件..... 142
2.1 二端电路等效的概念.....30	5.4 电感元件的性质..... 145
2.2 电阻的串、并、混联及等效电阻.....31	5.5 应用——混合电池(超级电容器件)... 146
2.3 电压源、电流源电路的等效变换.....39	5.6 小结..... 147
2.4 含受控源电路的等效变换.....45	5.7 习题..... 147
2.5 实际应用举例.....47	第 6 章 正弦交流电路分析和 相量模型..... 150
2.6 小结.....48	6.1 正弦交流电的基本概念..... 150
2.7 习题.....49	6.2 正弦交流电的相量表示法..... 154
第 3 章 电路分析的基本方法.....57	6.3 两类约束的相量形式..... 158
3.1 支路电流法.....57	6.4 阻抗和导纳——相量模型..... 165
3.2 网孔电流法.....62	6.5 正弦稳态电路分析..... 175
3.3 节点电压法.....66	6.6 实际应用..... 186
3.4 回路分析法和割集分析法.....72	6.7 小结..... 189
*3.5 非线性电路分析.....80	6.8 习题..... 191
3.6 含有运算放大器的电路分析.....83	第 7 章 正弦稳态电路的功率..... 200
*3.7 计算机辅助电阻电路分析.....87	7.1 电路基本元件的功率..... 200
3.8 小结.....92	7.2 正弦单口网络的功率..... 205
3.9 习题.....94	7.3 应用——功率因数的提高..... 213
第 4 章 电路分析中的常用定理.....103	7.4 正弦电路最大功率传递定理..... 216
4.1 叠加定理和齐次性定理.....103	7.5 小结..... 221
4.2 替代定理.....108	7.6 习题..... 222
4.3 戴维南定理.....111	

第 8 章 三相电路	228	11.2 一阶动态电路的零输入响应	304
8.1 三相电源	228	11.3 一阶动态电路的零状态响应	310
8.2 三相负载的星形连接	231	11.4 一阶电路的全响应及其分解	315
8.3 三相负载的三角形连接	234	11.5 一阶电路的三要素法	317
8.4 三相电路的功率	236	11.6 一阶电路的阶跃响应	323
8.5 应用——二表法测量三相功率	236	11.7 一阶动态电路分析的应用	324
8.6 小结	237	11.8 小结	327
8.7 习题	238	11.9 习题	328
第 9 章 电路的频率特性	241	第 12 章 二阶动态电路分析	333
9.1 电路的频率响应	241	12.1 RLC 串联电路微分方程的建立	333
9.2 RLC 串联谐振电路	245	12.2 二阶电路的零输入响应	334
9.3 GLC 并联谐振电路	250	12.3 二阶动态电路的分析	336
9.4 应用	255	12.4 小结	339
9.5 小结	255	12.5 习题	340
9.6 习题	256	第 13 章 双口网络	341
第 10 章 耦合电感和理想变压器	259	13.1 双口网络概述	341
10.1 耦合电感的伏安关系	259	13.2 双口网络的 Z 参数与 Y 参数	342
10.2 耦合电感的去耦等效	265	13.3 双口网络的 H 参数与 T 参数	350
10.3 空芯变压器的分析	272	13.4 双口网络的参数转换及连接	356
10.4 理想变压器	278	13.5 实际应用	359
10.5 实际变压器	284	13.6 小结	361
10.6 变压器的应用	288	13.7 习题	363
10.7 小结	289	答案	367
10.8 习题	290	参考文献	381
第 11 章 一阶动态电路分析	300		
11.1 换路定律和初始条件的计算	300		

第 1 章 电路的基本概念与定律

教学提示：电路分析的主要研究对象是电路。电路分析的主要变量是电流、电压和功率。电路中的理想元件有电阻、电压源、电流源和受控源等。基尔霍夫定律是分析电路的基本定律。

教学要求：本章应了解电路模型，电路的基本变量是什么？理解电流和电压的参考方向；了解理想电路元件特性；掌握独立电源与受控电源的联系与区别；重点掌握基尔霍夫定律。

1.1 电路与电路模型

电路分为实际电路和电路模型，在电路分析中所讨论的电路主要是电路模型。

1.1.1 电路

手电筒的实际电路如图 1.1 所示。

该电路的组成主要有提供电能的电池，简称电源(electric source)；小灯泡将电能转变为光能，称为负载(load)；连接电源与负载的是导线；开关是控制元件，控制电路的接通与断开。

1. 电路

电路(electric circuit)是电子元器件按一定方式连接构成的电流通路。有些实际电路是十分庞大和复杂的，可以延伸到数百千米以外，如电力系统及通信系统等；有的局限在几平方毫米以内，例如，集成电路芯片可能比指甲盖还小，但上面却有成千上万个晶体管相互连接的电路系统。超大规模集成电路的集成度越来越高，可容纳的元器件数目越来越多。有些电路非常简单，手电筒就是很简单的电路。

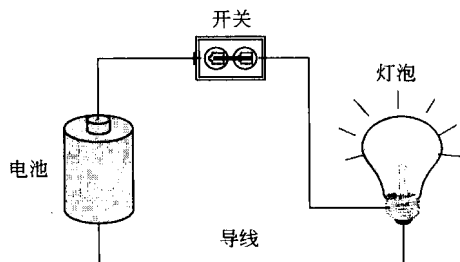


图 1.1 手电筒实际电路

2. 电路的分类

实际电路按其作用和功能可分为两大类。

1) 进行能量的产生、传输、转换的电路

如电力系统的发电机组将其他形式的能量转换成电能，经变压器、输电线传输到各用电部门，在那里又把电能转换成光能、热能、机械能等其他形式的能而加以利用，完成能量转换的功能。

2) 实现信号的传递与处理的电路

这种作用和功能在自动控制、通信、计算机技术等方面应用广泛。如电视机电路将接

收到的电信号经过调谐、滤波、放大等环节的处理,使其成为人们所需要的图像和声音,完成电信号的处理、变换等功能。

1.1.2 电路模型

实际电路在工作时,所涉及的物理量很复杂,为了便于对电路进行分析研究,常将一个实际电路器件用理想元件来表示,所谓的理想电路元件就是在一定条件下忽略实际器件的次要性能,突出其主要性能,将实际器件抽象成有精确数学定义的假想元件。

用理想电路元件构成的电路叫做电路模型(circuit model)。

例如,电灯、电炉等器件通常用电阻元件来表征。电池、发电机等提供电能的实际器件或设备可以用电源元件来表征。

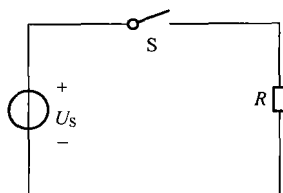


图 1.2 手电筒的电路模型

图 1.2 是手电筒电路的电路模型图,图中 U_s 是一个理想电压源,代替电池; R 是理想电阻元件,只消耗电能,代替灯泡; S 是开关元件;连接三个元件的细实线是理想导线,起着传输电能的作用。

可见,电路模型就是用抽象的理想元件及其组合近似地替代实际器件,从而构成了与实际电路相对应的电路模型。无论简单的还是复杂的实际电路,都可以通过理想化的电路

模型充分地进行描述。

需要指出的是:理想电路元件不完全等同于电路器件,而一个电路器件在不同条件下的电路模型也可能不同。例如电炉主要是消耗电能转变为热能,一般用电阻元件表示;但若电路电源频率增大,则电路内的电阻丝产生的磁场能量就不能忽略,其模型就不能只用一个电阻元件表示,还需要包含电感。

当实际电路的尺寸 l 远小于其工作时的最高工作频率所对应的波长 λ 时,即

$$l \ll \lambda$$

式中, $\lambda = c/f$; $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

此时,可以用“集总参数元件”来构建实际器件的模型,每一种集总参数元件只存在一种能量转换关系,即只有电能消耗的元件为电阻,只有电场储能的元件为电容元件,只有磁场储能的元件为电感元件。一个元件中只存在一种能量转换关系称为集总参数元件(也称为理想电路元件),由集总参数元件组成的电路称为集总参数电路(lumped parameter circuit)。

电路理论分析的对象为理想电路元件组成的电路模型,而非实际电路。

电路理论主要是研究电路的电磁现象,用电流、电压等物理量描述其中的物理过程。电路理论是一门研究电路分析与电路设计的基础工程学科。电路分析的任务是根据已知的电路结构和元件参数,在一定的外加电源(称为电路的“激励”)下,求解电路中的电压、电流(也称为电路的“响应”)。电路设计是研究如何构造一个电路,使其满足给定的性能指标。学习电路分析是为电路设计打基础的。

本书的主要内容是介绍电路的基本定律和定理,并讨论电路的各种计算分析方法,为学习电子技术、电气技术、自动化和计算机技术等打下必要的理论基础。

思考与练习

1.1-1 电路一般由哪几部分组成？

1.1-2 电路图上的元件与实际工程中的电路器件有何不同？

1.2 电路的基本物理量

电路分析的任务是对给定的电路确定其电性能，而电路的电性能通常可以通过一组物理量来描述，最常用的便是电流、电压和功率。

1.2.1 电流

1. 电流的定义

带电粒子的定向运动形成电流，为了表征和描述电流的大小，一般把单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流(electric current)，用符号 $i(t)$ 表示，即

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。

如果电流的大小和方向都不随时间变化，这种电流称为恒定电流，或称直流电流(direct current，简写作 dc 或 DC)，一般用大写字母 I 表示。随时间变化的电流简称交流电流(alternating current，简写作 ac 或 AC)，常用英文小写字母 i 表示。

国际单位制中(SI)，电流的单位为安[培]，符号为 A，1 安=1 库/秒，即 $1\text{A}=1\text{C/s}$ 。在通信和计算机技术中常用毫安(mA)、微安(μA)作为电流单位。它们的关系是

$$1\text{A} = 10^3 \text{mA} = 10^6 \mu\text{A}$$

2. 电流参考方向

电流是一个有方向的物理量，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电流的真实方向是十分困难的，如交流电路中电流的真实方向经常在改变，即使在直流电路中，要指出复杂电路中某一电路元件电流的真实方向也不是一件很容易的事。在进行电路分析时，为了列写电路方程的需要，常常需要预先假设一个电流方向。这个预先假设的电流方向叫做参考方向(reference direction)，参考方向是在电路图中用箭头任意标定的电流方向，如图 1.3 所示。

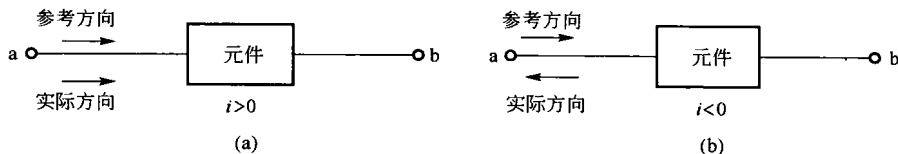


图 1.3 电流的参考方向

电流的参考方向可以任意选定,但一经选定,就不再改变。经过计算若求得 $i > 0$ 时,表示电流的实际方向和参考方向一致; $i < 0$ 则表示电流的实际方向和参考方向相反。

如图 1.3(a)所示,当 $i = 5\text{A}$ 时,表示电流实际方向和参考方向都是从 $a \xrightarrow{\text{流向}} b$;当 $i = -5\text{A}$ 时,表示电流的实际方向从 $b \xrightarrow{\text{流向}} a$,如图 1.3(b)所示。

在进行电路分析时,必须先标出电流的参考方向,方能正确进行方程的列写和求解,题目中给出的电流方向均是参考方向。只有规定了参考方向,电流的正负才有意义。

1.2.2 电压

1. 电压的定义

电路中电场力将单位正电荷由 A 点移到 B 点时,失去或得到的能量(或电场力所做的功)称为 A, B 两点间的电位差,也是 A, B 间的电压(voltage),即

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1.2)$$

不随时间变化的电压称为直流电压,其电压用大写 U 表示。交流电压是随时间变化的电压,常用小写字母 u 表示。

电压 u 的单位是伏特,简称伏(V)。常用电压单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV)。它们的关系是

$$1 \times 10^{-3} \text{kV} = 1 \text{V} = 1 \times 10^3 \text{mV} = 1 \times 10^6 \mu\text{V}$$

2. 电压的参考方向

如同电流标定参考方向一样,在进行电路分析时首先需对电压标定参考方向(也称为参考极性),如图 1.4 所示,电压的参考方向是在元件或电路的两端用“+”、“-”符号来表示。“+”号表示高电位,“-”号表示低电位。

电压的参考方向可以任意选定,但一经选定,就不再改变。经过计算若求得 $u > 0$ 时,表示电压的实际方向和参考方向一致; $u < 0$ 则表示电压的实际方向和参考方向相反。另外还可以用双下标表示,例如, u_{ab} 表示 a、b 两点间电压的参考方向是从 a 指向 b 的(a 点高电位, b 点低电位)。

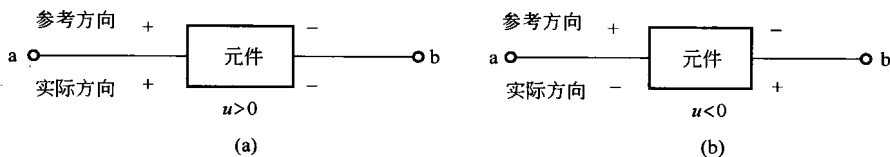


图 1.4 电压的参考方向

3. 关联参考方向

在以后的电路分析中,完全不必先考虑各电流、电压的实际方向究竟如何,而应首先在电路中标定它们的参考方向,然后按参考方向进行计算,由计算结果的正负值与标定的参考方向确定它们的实际方向,图中不需标出实际方向。参考方向可以任意选定,在图中相应位置标注(包括方向和符号),但一经选定,在分析电路的过程中就不再改变。

为了分析电路方便, 常将电压和电流的参考方向选得一致, 称其为关联参考方向。

关联参考方向(associated reference direction): 如果指定流过元件电流的参考方向是从标以电压“+”极流向“-”极性的一端, 即两者的参考方向一致, 称电压、电流的这种参考方向为关联参考方向; 否则称为非关联参考方向。如图 1.5(a)所示为关联参考方向, 图 1.5(b)所示为非关联参考方向。

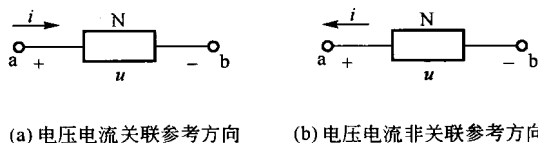


图 1.5 电压电流的关联参考方向与非关联参考方向

4. 电位

为了分析的方便, 常在电路中选某一点为参考点, 把任一点到参考点的电压称为该点的**电位(potential)**, 参考点的电位一般选为零, 所以, 参考点也称为零电位点。

电位用 v 或 V 表示, 单位与电压相同, 也是 V(伏)。

[例 1.1] 在图 1.6(a)中, 选 c 点为参考点时, 已知

$V_a = 30V$, $V_b = 5V$, $V_d = -10V$, 求: (1) U_{ab} , U_{ad} , U_{bc} ;

(2) 选择 b 点为参考点时, 求其他三点的电位值。

[解] (1) 图(a)电路中 a 点、b 点间的电压 U_{ab} 是 a 点与 b 点电位之差, 电压就是电位差。

所以

$$U_{ab} = V_a - V_b = 30V - 5V = 25V$$

$$U_{ad} = V_a - V_d = 30V - (-10V) = 40V$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = 5V - 0V = 5V$$

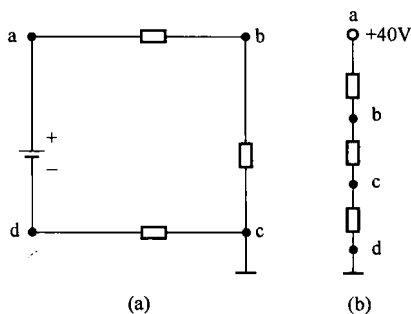


图 1.6 例 1.1 电路图

(2) 若选 b 点为参考点, 两点间的电压不变,

这是因为无论选择电路中的哪一点作为参考点, 都未改变电路的连接关系, 因此任意两点间的电压不会改变。当选 b 点为参考点时, 根据电位的定义, 现在 $V_b = 0$

$$U_{ab} = V_a - V_b$$

因为

$$U_{ab} = 25V$$

$$U_{ab} = V_a - 0 = V_a = 25V$$

$$U_{ad} = V_a - V_d = 40V$$

所以

$$V_d = V_a - 40 = 25V - 40V = -15V$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = 0 - V_c = 5V$$

$$V_c = -5V$$

结论: 电路中电位参考点可任意选择。当选择不同的电位参考点时, 电路中各点电位均不同, 电位具有相对性; 但任意两点间电压保持不变, 电压与参考点的选择无关, 具有

唯一性。

在电子电路中, 为了电路的简练醒目, 对于一端接地(参考点)的电压源常不画出电源的符号, 而只在电源的非接地的一端标出其极性及电压值。例如当图 1.6(a)电路选 d 为参考点时, 简化电路图如图 1.6(b)所示。

图 1.7(a)为电子电路的简化电路的习惯画法, 图 1.7(b)为图(a)的原电路, 参考点 d 是电源的公共端, 注意电源的正负极性。

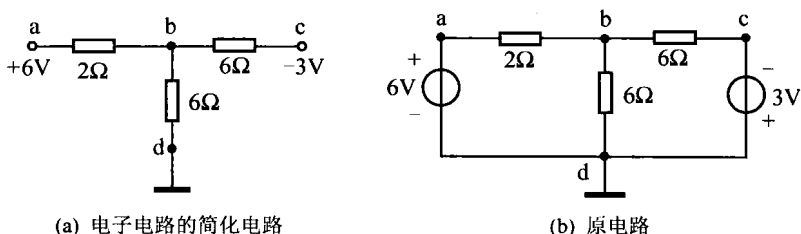


图 1.7 电路与简化电路

1.2.3 功率与能量

1. 功率的定义

电路的基本功能之一是实现能量传输, 为了描述和表征电荷和元件交换能量的快慢(速率), 下面引入功率这个物理量。

定义: 电场力在单位时间内移动正电荷所做的功称为电功率, 简称功率(power)。即

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (1.3)$$

由于 $i(t) = \frac{dq}{dt}$, $u(t) = \frac{dw}{dq}$, 故电路的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1.4)$$

对直流电流和直流电压而言, 功率记为

$$P = UI \quad (1.5)$$

功率的国际单位是瓦[特](W), 对大功率, 采用千瓦(kW)或兆瓦(MW); 对小功率, 采用毫瓦(mW)或微瓦(μ W)。

$$1\text{MW} = 10^3\text{kW} = 10^6\text{W}$$

$$1\text{W} = 10^3\text{mW} = 10^6\mu\text{W}$$

2. 功率的计算

如图1.5(a)所示电路 N 的电压 u 和电流 i 取关联参考方向, 故电路消耗的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1.6)$$

对于图1.5(b), 由于 N 电路的 u 和 i 取非关联参考方向, 可将电压或电流视为关联参考方向的负值, 此时功率计算公式应该写为

$$p(t) = -u(t)i(t) \quad (1.7)$$

根据电压和电流是否为关联参考方向，可以相应选用式(1.6)或式(1.7)计算功率 p ：

(1) 若 $p > 0$ ，则表示电路 N 确实消耗(吸收)功率；

(2) 若 $p < 0$ ，则表示电路 N 吸收的功率为负值，实质上它产生(提供或发出)功率。

[例 1.2] 已知图 1.5(b)所示电路图中 $i = -4\text{A}$ ， $u = -6\text{V}$ ，求其功率。

[解] 因为图 1.5(b)中电压电流为非关联参考方向，利用式(1.7)，

$$\begin{aligned} p(t) &= -ui \\ &= -(-6) \times (-4) \text{ W} = -24 \text{ W} \end{aligned}$$

计算出功率 $p < 0$ ，表示 N 提供功率。

注意：计算功率时必须注意电压 u 和 i 的参考方向，还应注意公式中各数值的正负号的含义。

[例 1.3] 电路如图 1.8(a)所示，方框代表电源或电阻，各电压、电流的参考方向均已设定。已知 $I_1 = -2\text{A}$ 、 $I_2 = 1\text{A}$ 、 $I_3 = 3\text{A}$ 、 $U_1 = 20\text{V}$ 、 $U_2 = -14\text{V}$ 、 $U_3 = 12\text{V}$ 、 $U_4 = -8\text{V}$ 、 $U_5 = -2\text{V}$ 。试标出各元件的实际方向，并求各元件消耗或向外提供的功率，并验证是否满足功率守恒。

[解] 因为 I_2 、 I_3 、 U_1 、 U_3 为正值，所以其实际方向和参考方向一致，而 I_1 、 U_2 、 U_4 、 U_5 为负值，表明其实际方向与参考方向相反。电路图 1.8(b)标出了元件的实际方向，电压也可以用箭头表示极性由“+”指向“-”。

利用图 1.8(a)计算各功率

$$P_1 = U_1 I_1 = 20 \times (-2) \text{ W} = -40 \text{ W} \text{ (提供)}$$

$$P_2 = U_2 I_2 = -14 \times 1 \text{ W} = -14 \text{ W} \text{ (提供)}$$

$$P_3 = U_3 I_3 = 12 \times 3 \text{ W} = 36 \text{ W} \text{ (吸收)}$$

$$P_4 = U_4 I_1 = (-8) \times (-2) \text{ W} = 16 \text{ W} \text{ (吸收)}$$

由图 1.8(a)知元件 5 电压与电流参考方向为非关联，元件 5 的功率为

$$P_5 = -U_5 I_2 = -(-2) \times 1 \text{ W} = 2 \text{ W} \text{ (吸收)}$$

求功率的和有

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 0$$

也可以求得提供功率之和等于吸收的功率之和。

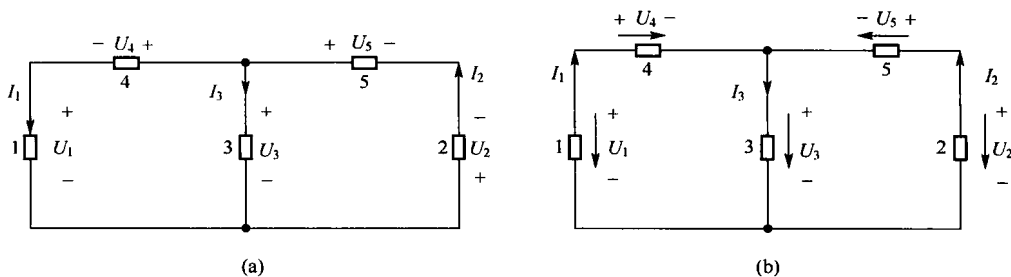


图 1.8 例 1.3 电路图

在电路中，所有的元件功率的代数和为零，也就是在任何时刻元件发出的功率等于吸收的功率，称为功率守恒。

3. 电能

从 t_0 到 t 的时间内, 元件吸收(或提供)的电能用 W 表示为

$$W = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t u i dt \quad (1.8)$$

单位: 焦 [耳], 简称焦(J)。它表示功率为1W的用电设备在1s时间内所消耗的电能。实用中常用千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$)(俗称度)作电能单位,

$$1 \text{ 度} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

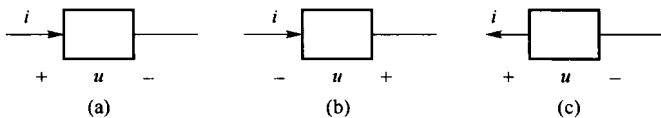
思考与练习

1.2-1 简述对电路中电流、电压设参考方向的意义。

1.2-2 一个10kW的加热器在30min内所消耗的能量是多少?

1.2-3 查找各种家用电器的耗电功率, 1200W烤面包器由220V线路取用多少电流?

1.2-4 试计算题1.2-4图中各元件吸收或提供的功率。



题1.2-4图

图(a): $u = -2\text{V}$, $i = 1\text{A}$ 图(b): $u = -3\text{V}$, $i = 2\text{A}$

图(c): $u = 10\text{V}$, $i = 5e^{-2t}\text{mA}$

(提供2W; 吸收6W; 提供 $50e^{-2t}\text{mW}$)

1.3 理想电路元件

电路元件是组成电路的最基本单元, 它通过端子与外部相连接。按电路元件引出端子数目可分为二端元件、三端元件或四端元件等, 还可分为无源元件和有源元件, 线性元件和非线性元件, 时不变元件和时变元件等。

电路分析中, 二端理想电路元件主要有理想电阻元件、理想电感元件、理想电容元件、理想电源。本节将介绍理想电阻元件、理想电压源和电流源, 其他元件将在后续章节中讲述。

1.3.1 电阻

1. 电阻元件定义与伏安关系

电路中最简单、最常用的元件是二端电阻元件, 电阻元件是耗能的元件。电阻器、灯泡、电炉等在一定条件下可用二端电阻元件作为电路模型。

(1) 定义: 若一个二端元件在任意时刻, 其两端电压和电流之间的关系可用 $u \sim i$ 平面上的一条曲线决定, 则此二端元件称电阻元件(resistor), 如图1.9所示。

电压的单位是伏(V), 电流的单位是安(A), 电阻元件的电压电流关系称为伏安特性或伏安关系(Voltage Current Relation, VCR)。

根据此定义有如下几种电阻元件。

① 若直线的斜率随时间变化(见图 1.9(a)), 则称为线性时变电阻元件。

② 若电阻元件的 VCR 不是线性的(见图 1.9(b)), 则称此电阻是非线性电阻元件。

③ VCR 在任意时刻都是通过 $u \sim i$ 平面坐标原点的一条直线, 如图 1.9(c)所示, 则称该电阻为线性时不变电阻元件, 其电阻值为常量, 用 R 表示。

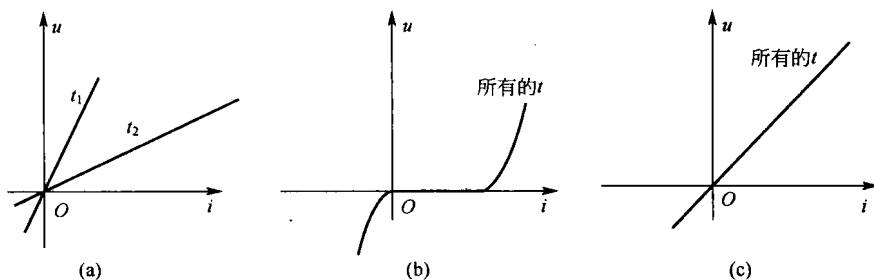


图 1.9 电阻的 $u \sim i$ 曲线图

本书重点讨论线性时不变电阻元件, 简称为电阻元件。

可见, 线性时不变电阻元件的伏安关系是一条通过原点的直线。 R 为该直线的斜率, 称为电阻元件的电阻, 单位为欧姆, 简称“欧”, 符号为 Ω , $1\Omega = 1\text{V/A}$ 。线性电阻元件也可以定义为: 若电阻 R 值与其工作电压或电流无关, 是一个常数, 那么这样的电阻元件称为线性电阻元件。图 1.10 为电阻元件的符号。

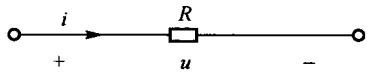


图 1.10 电阻元件符号

(2) 欧姆定律。

线性电阻的电压电流关系满足欧姆定律

$$\boxed{u(t) = Ri(t)} \quad (u \text{ 和 } i \text{ 为关联参考方向}) \quad (1.9)$$

$$u(t) = -Ri(t) \quad (u \text{ 和 } i \text{ 为非关联参考方向}) \quad (1.10)$$

式中, u 为电阻两端电压, i 为流过电阻的电流。

(3) 电导(G)。

电阻的倒数定义为电导(conductance), 以符号 G 表示, 即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.11)$$

电导的 SI(国际)单位为西 [门子] (S), 用电导表征电阻时, 欧姆定律为: $i(t) = \pm Gu(t)$ 。

2. 电阻元件的性质

1) 电阻元件均是无记忆的

由式(1.9)可知, 电阻的一个重要特性是在任一时刻, 电阻端电压(或电流)由同一时刻的电流(或电压)所决定, 而与过去的电压或电流无关。从这个意义上讲, 电阻是一种无记忆元件或称即时元件。

2) 开路和短路

线性电阻当 $R = 0$ (或 $G = \infty$) 时, 称为短路, 短路时电阻两端电压为零; 当 $R = \infty$ (或

$G=0$)时,称为开路,开路时流过电阻的电流为零。

理想导线的电阻值为零。

3) 电阻元件的功率

$$p(t) = R^2(t) = u^2(t)/R \quad (1.12)$$

显然若 $R \geq 0$, 则 $p(t) \geq 0$, 为耗能元件是无源元件(passive element), 简言之, 对所有 t , 元件吸收的能量 $w(t) \geq 0$, 这种元件称为无源元件, 即无源元件从不向外电路提供能量。如果二端元件不是无源的, 则此元件称为有源元件(active element), 通常我们遇到的电阻, 大都属于耗能无源元件。

最后说一下实际电子元件的额定值问题。额定值就是为了保证安全、正常使用用电器具, 制造厂家所给出的电压、电流或功率的限制数值。例如, 一只灯泡上标明 220V, 40W, 即说明这样的含义: 这只灯泡接电压为 220V, 消耗功率为 40W。如果所接电压超过 220V, 灯泡消耗功率大于 40W, 就有可能将灯泡烧坏(不安全); 如果所接电压低于 220V, 灯泡消耗功率小于 40W, 会发暗, 应用不正常, 是大材小用, 使用不合理。市售的碳膜、金属膜电阻, 除标明电阻值以外, 通常还标有 1/8W、1/4W、1/2W 及 2W 各挡额定功率; 线绕电阻额定功率较大。在实际设计装配电路时, 不但应按所需电阻值大小来选电阻, 还应根据电阻在电路中所消耗的功率选择电阻型号。

[例 1.4] 求一只额定功率为 100 W、额定电压为 220 V 的灯泡的额定电流及电阻值。

[解] 由公式

$$P = UI = \frac{U^2}{R}$$

得

$$I = \frac{P}{U} = \frac{100}{220} \text{ A} = 0.455 \text{ A} \quad R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{100} \Omega = 484 \Omega$$

[例 1.5] 4Ω 电阻上电压与电流为关联参考方向, 已知电阻上的电流为 $i = 2\sin t \text{ A}$, 求电压 u 、功率 p 以及从 0 到 t 期间电阻吸收的电能(W)。

[解] 因为电压与电流为关联参考方向, 利用欧姆定律

$$u = Ri = 4 \times 2 \sin t = 8 \sin t \text{ V}$$

功率为

$$p = ui = 8 \sin t \times 2 \sin t = 16 \sin^2 t \text{ W}$$

从 0 到 t 期间电阻吸收的电能(W)为

$$\begin{aligned} W &= \int_0^t p d\xi = \int_0^t 16 \sin^2 \xi d\xi = 16 \left[\frac{1}{2} \xi - \frac{1}{4} \sin 2\xi \right]_0^t \\ &= 8t - 4 \sin 2t \text{ J} \end{aligned}$$

1.3.2 理想电压源

1. 理想电压源的定义

理想电压源是从实际电源抽象出来的一种电路模型, 是有源元件。

若一个二端元件接到任何电路后, 该元件两端电压总能保持给定的时间函数 $u_s(t)$, 与通过它的电流大小无关, 则此二端元件称为理想电压源(亦称独立电压源), 简称为电压