



高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

电路与信号分析

主编 周井泉
主审 张永瑞



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>



高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

电路与信号分析

主 编 周井泉

副主编 于舒娟 史学军

主 审 张永瑞

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

本书比较系统地介绍了电路与信号的基本概念、基本理论和基本分析方法。全书共分 10 章, 主要内容包括电路与信号的基本概念、简单电阻电路分析、线性网络的一般分析方法、一阶电路分析、正弦稳态电路分析、耦合电感与变压器电路分析、电路与信号的频域分析、电路与信号的复频域分析、离散信号与系统的时域分析、离散信号与系统的 Z 域分析。各章配有较多不同类型的例题与习题, 以利于学生更好地掌握基本理论和分析方法。

本书以基本理论够用为度, 既有一定的知识宽度, 又不片面追求理论的过多、过深, 着重体现了理论的应用性和针对性。本书在结构编排上采用了先时域后变换域、先连续信号后离散信号的顺序, 使之符合由浅入深、循序渐进的认知规律。

本书可作为高等学校通信管理、信息管理、计算机与自动化等专业本科以及通信工程、电子工程与信息技术等专业专科学子学习电路课程的教科书, 也可供各电类相关专业自学者、有关技术人员和高校教师参考。

★本书配有电子教案, 需要者可登录出版社网站, 免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

电路与信号分析/周井泉主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2009. 3

高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2174-6

I. 电… II. 周… III. ① 电路分析—高等学校—教材 ② 信号分析—高等学校—教材 IV. TM133 TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 197307 号

策 划 毛红兵

责任编辑 张 梁 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 23

字 数 545 千字

印 数 1~4000 册

定 价 32.00 元

ISBN 978-7-5606-2174-6/TN·0477

XDUP 2466001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

西安电子科技大学出版社
高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材
编审专家委员会名单

主任: 杨震 (南京邮电大学校长、教授)

副主任: 张德民 (重庆邮电大学通信与信息工程学院副院长、教授)

秦会斌 (杭州电子科技大学电子信息学院院长、教授)

通信工程组

组长: 张德民 (兼)

成员: (成员按姓氏笔画排列)

王晖 (深圳大学信息工程学院副院长、教授)

巨永锋 (长安大学信息工程学院副院长、教授)

成际镇 (南京邮电大学通信与信息工程学院副院长、副教授)

刘顺兰 (杭州电子科技大学通信工程学院副院长、教授)

李白萍 (西安科技大学通信与信息工程学院副院长、教授)

张邦宁 (解放军理工大学通信工程学院卫星系主任、教授)

张瑞林 (浙江理工大学信息电子学院院长、教授)

张常年 (北方工业大学信息工程学院院长、教授)

范九伦 (西安邮电学院信息与控制系主任、教授)

姜兴 (桂林电子科技大学信息与通信学院副院长、教授)

姚远程 (西南科技大学信息工程学院副院长、教授)

康健 (吉林大学通信工程学院副院长、教授)

葛利嘉 (中国人民解放军重庆通信学院军事信息工程系系主任、教授)

电子信息工程组

组长: 秦会斌 (兼)

成员: (成员按姓氏笔画排列)

王荣 (解放军理工大学通信工程学院电信工程系系主任、教授)

朱宁一 (解放军理工大学理学院基础电子学系主任、工程师)

李国民 (西安科技大学通信与信息工程学院院长、教授)

李邓化 (北京信息工程学院信息与通信工程系系主任、教授)

吴谨 (武汉科技大学信息科学与工程学院电子系主任、教授)

杨马英 (浙江工业大学信息工程学院副院长、教授)

杨瑞霞 (河北工业大学信息工程学院院长、教授)

张雪英 (太原理工大学信息工程学院副院长、教授)

张彤 (吉林大学电子科学与工程学院副院长、教授)

张焕君 (沈阳理工大学信息科学与工程学院副院长、副教授)

陈鹤鸣 (南京邮电大学光电学院院长、教授)

周杰 (南京信息工程大学电子与信息工程学院副院长、教授)

欧阳征标 (深圳大学电子科学与技术学院副院长、教授)

雷加 (桂林电子科技大学电子工程学院副院长、教授)

项目策划: 毛红兵

策划: 曹 昉 寇向宏 杨 英 郭 景

前 言

“电路与信号分析”是高等院校电子信息及其相关专业的一门重要基础课程。本书根据高等院校电子信息类基础课程教学指导委员会的“电路分析教学基本要求”和“信号与系统教学基本要求”，结合专业教学的具体要求编写而成，主要讨论确定信号的特性以及线性非时变集总参数电路(或系统)的基本概念和分析方法。

本书力求将信号与电路的概念有机联系起来，在内容选材上，力求做到以基本理论够用为度，不片面追求理论的过多、过深，而着重体现理论的实用性和针对性；在结构编排上，采用先直流后交流、先时域后变换域、先连续信号后离散信号的顺序；在文字叙述上，力求突出重点、分散难点、由浅入深，以利于教学。同时，本书还精选了大量例题和习题，并配备了习题参考答案，以便学生学习和练习，增强学生对所学知识的理解和掌握。

本书是在南京邮电大学电子科学与工程学院电路与系统教学中心全体教师 20 余年教学经验积累的基础上编写而成的。其中周井泉编写了第 1、4、7 和 8 章，于舒娟编写了第 5、9 和 10 章，史学军编写了第 2、3 和 6 章。全书由周井泉统稿。

在本书的编写过程中，我们得到了南京邮电大学各级领导和电路与系统教学中心全体教师的大力支持，其中教务处处长陈鹤鸣教授对本书的编写给予了热情的鼓励和帮助。西安电子科技大学的张永瑞教授详细审阅了本书并提出了许多宝贵意见。在此，对他们表示衷心的感谢。

限于编者的水平，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2008 年 11 月

目 录

第 1 章 电路与信号的基本概念	1
1.1 电路与信号	1
1.2 电路模型	3
1.3 电路变量	4
1.4 电路元件	8
1.5 基尔霍夫定律	14
1.6 信号的运算	17
习题 1	22
第 2 章 简单电阻电路分析	27
2.1 电阻串联、并联和混联的等效变换	27
2.2 电阻星形连接与三角形连接的等效互换	32
2.3 含独立电源网络的等效变换	35
2.4 含受控电源网络的等效变换	43
习题 2	47
第 3 章 线性网络的一般分析方法	53
3.1 支路分析法	53
3.2 网孔分析法	55
3.3 节点分析法	59
3.4 叠加定理与齐次性定理	63
3.5 替代定理	67
3.6 戴维宁定理和诺顿定理	68
3.7 互易定理	76
3.8 电路的对偶特性与对偶电路	78
习题 3	81
第 4 章 一阶电路分析	90
4.1 电容元件和电感元件	90
4.2 换路定则及初始值计算	100
4.3 一阶电路的零输入响应	104
4.4 一阶电路的零状态响应	110
4.5 一阶电路的全响应	114
4.6 一阶电路的三要素法	116
4.7 一阶电路的阶跃响应	121
4.8 一阶电路的冲激响应	124
4.9 卷积积分	130
习题 4	133

第 5 章 正弦稳态电路分析	142
5.1 正弦量	142
5.2 正弦量的相量表示	146
5.3 正弦稳态电路的相量模型	148
5.4 阻抗与导纳	155
5.5 正弦稳态电路的相量分析法	160
5.6 正弦稳态电路的功率	165
5.7 谐振电路	171
5.8 三相电路	178
习题 5	185
第 6 章 耦合电感与变压器电路分析	192
6.1 耦合电感元件	192
6.2 耦合电感的去耦等效	197
6.3 空芯变压器电路分析	202
6.4 理想变压器	205
6.5 一般变压器	213
习题 6	217
第 7 章 电路与信号的频域分析	222
7.1 周期信号的傅里叶级数展开	222
7.2 周期信号的频谱	226
7.3 非周期信号的傅里叶变换	234
7.4 一些常用信号的频谱分析	237
7.5 傅里叶变换的性质	244
7.6 线性电路的频域分析	256
7.7 电路无失真传输信号的条件	259
习题 7	260
第 8 章 电路与信号的复频域分析	268
8.1 拉普拉斯变换	268
8.2 常用信号的拉普拉斯变换	271
8.3 拉普拉斯变换的性质	273
8.4 拉普拉斯反变换	282
8.5 线性电路的复频域分析	287
8.6 网络函数与网络特性	292
习题 8	298
第 9 章 离散信号与系统的时域分析	303
9.1 离散时间信号的概念	303
9.2 离散时间信号的基本运算	306
9.3 离散时间系统及其数学模型	310
9.4 离散时间系统的响应	312
9.5 离散系统的单位函数响应	316
9.6 离散卷积和	318
习题 9	321

第 10 章 离散信号与系统的 Z 域分析	324
10.1 Z 变换	324
10.2 Z 反变换	327
10.3 Z 变换的性质	331
10.4 离散系统的 Z 域分析	337
10.5 离散系统函数及系统特性分析	341
习题 10	343
习题参考答案	346
参考文献	358

第 1 章 电路与信号的基本概念

电路理论包括电路分析和电路综合两方面内容。电路分析的主要内容是指在给定电路结构、元件参数的条件下,求由输入(激励)所产生的输出(响应);电路综合则主要研究在给定输入(激励)和输出(响应)的条件下,寻求可实现的电路结构和元件参数。

信号的特性可以表现为它随时间变化的规律,即时间特性,也可以表现为频率成分的分布规律,即频率特性。信号的形式之所以不同,就因为各自有不同的时间特性和频率特性,而信号的时间特性和频率特性有着对应的关系。信号分析就是分析信号的时(间)域特性与频(率)域特性及其两者之间的内在联系。

本课程仅限于线性时不变集总参数电路的分析以及确定信号的分析。

本章首先介绍电路、信号的基本概念以及两者的关系,然后介绍电路模型、电路分析的基本变量、电路元件和电路的基本定律——基尔霍夫定律,最后介绍一些信号的运算。

1.1 电路与信号

1.1.1 信号及其描述

人类的社会活动离不开传递消息。一般将语言、文字、图像或数据等统称为消息(Message),在消息中包含有一定数量的信息(Information)。但是,信息的传送一般都不是直接的,它必须借助于一定形式的信号(光信号、声信号、电信号等),才能远距离快速传输和进行各种处理。我们的祖先利用烽火传递边疆警报,古希腊人以火炬的位置表示字母符号,这些都是借助光信号传送消息。人们相互问候、发布新闻、击鼓鸣金传送命令,这是利用了声信号。19世纪以来,电报、电话相继发明,无线电传输技术迅速发展,互联网迅速普及,使电信号广泛应用于广播图像或传输数据。

那么,什么是信号(Signal)?广义地说,信号是随时间变化的某种物理量。信号是消息的表现形式,它是通信传输的客观对象,而消息则是信号的具体内容,它蕴藏在信号之中。

在可以作为信号的多种物理量中,电量是最常用的物理量。因为电量不仅容易产生和控制,而且它与非电量之间的转换比较容易,如话音信号通过话筒就能变成相应的电信号。因此,本书只讨论应用广泛的电信号,它通常是随时间变化的电压或电流,在某些情况下也可以是电荷或磁通。

信号是随时间而变化的,在数学上可以用时间 t 的函数 $f(t)$ 来表示,因此,“信号”与“函数”两个名词常常通用。

按时间函数的确定性,信号可分为确定信号和随机信号两类。确定信号(Determinate Signal)是指一个可以表示为确定的时间函数的信号,对于指定的某一时刻,信号有确定的值,如正弦信号、周期脉冲信号等。随机信号(Random Signal)则与之不同,它不是一个确

定的时间函数，通常只知道它取某一数值的概率，如噪音信号等。本课程只讨论确定信号，它也是研究随机信号特性的重要基础。

确定信号按其变化有无重复性的特点，可以分为周期信号与非周期信号；按其存在时间是否为连续的特点，又可分为连续时间信号和离散时间信号。

除若干个不连续点外，在所讨论的任意时刻都有定义的信号称为连续时间信号，简称连续信号，如直流信号、矩形脉冲信号、单边指数信号和正弦信号等，分别如图 1-1(a)~(d)所示。

仅在某些不连续规定的时刻有定义的信号称为离散时间信号，简称离散信号，如图 1-1(e)所示。

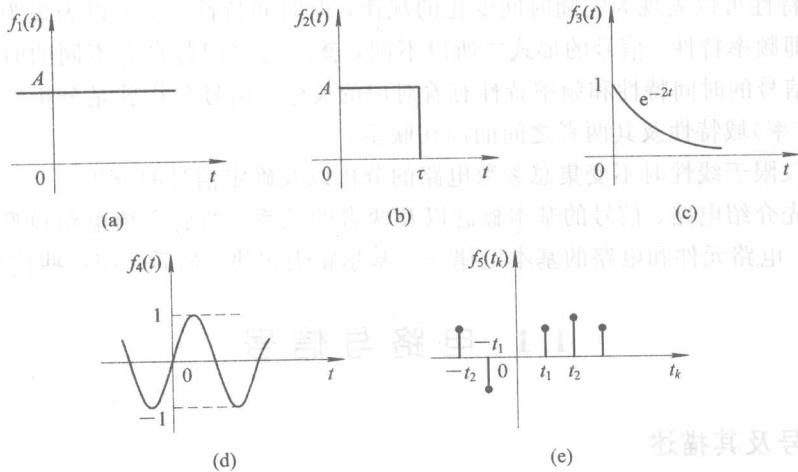


图 1-1 连续信号和离散信号

(a) 直流信号；(b) 矩形脉冲信号；(c) 单边指数信号；(d) 正弦信号；(e) 离散信号

信号可以从时间特性和频率特性两个方面来描述。信号的特性首先表现为它随时间变化的规律，即“时间特性”，比如它出现时间的先后、持续时间的长短、重复周期的大小及随时间变化的快慢等。因此，可以用时间域的数学表达式(时域函数)来描述信号，或绘出函数的图像，即信号的波形。另一方面，信号的特性又表现为它的频率成分分布的规律，即“频率特性”。因为任意信号在一定条件下总可以分解为许多不同频率的正弦分量之和，即具有一定的频率分量，各频率分量具有相对的大小，主要频率分量占有一定的频率范围等。因此，信号又可以用频域函数来描述，这需要用到相应的正交变换，如傅里叶变换、拉普拉斯变换、Z 变换等。

1.1.2 实际电路

实际电路是由各种电器按一定的方式互相连接而构成的电流的通路。它的主要功能是实现电能或电信号的产生、传输、转换和处理。例如日常使用的收音机和电视机，它们能对接收到的微弱的无线电信号进行各种加工处理，最后提供人们所需要的声音和图像；又如计算机可对输入的数据进行指定的计算、存储和控制等。总之，实际电路种类繁多、千差万别，电路的各部分及其周围空间又伴随着各种电磁现象和能量交换，从而形成了一个复杂的物理系统。

系统是由若干相互作用和相互依赖的事物组合而成的具有特定功能的整体。通常将施加于系统的作用称为系统的输入(激励),而将要求系统完成的功能称为系统的输出(响应)。分析一个实际系统,首先要对实际系统建立数学模型,在数学模型的基础上,运用数学方法求其解答,最后又回到实际系统,对结果作出物理解释,并赋予物理意义。所谓系统的数学模型,是指系统物理特性的抽象,即以数学表达式或具有理想特性的符号图形来表征系统的特性。

输入和输出均为连续时间信号的系统称为连续时间系统。输入和输出均为离散时间信号的系统称为离散时间系统。模拟通信系统是连续时间系统,而数字计算机则是离散时间系统。连续时间系统的数学模型用微分方程来描述,而离散时间系统的数学模型则用差分方程来描述。

在信息科学与技术领域中,常常利用通信系统、控制系统和计算机系统进行信号的传输、交换与处理。这些系统的主要部件中包括大量多种类型的电路。电路也称电网络或网络。

有时认为系统比电路更复杂,规模更大。然而,更确切地说,系统与电路二词的主要差异体现在观察事物的着眼点或处理问题的角度不同。系统问题注意全局,而电路问题则关心局部。例如,仅由一个电阻和一个电容组成的简单电路,在电路分析中,注意其各支路、回路的电流和电压;而从系统的观点来看,可以研究它如何构成微分或积分功能的运算器。

近年来,大规模集成电路技术的发展以及各种复杂系统部件的直接采用,使系统、电路以及器件等名词的划分发生困难。在本课程中,系统、电路与网络等名词通用。

广义地讲,系统的概念不仅限于电路、通信、控制等方面,它涉及的范围十分广泛,还包括电力系统、机械系统等物理系统和政治结构、经济组织、生产管理等非物理系统。本课程仅研究电路系统,所述的网络也是指电网络而不是指信息网络(通信网)。

信号、电路与系统之间有着十分密切的联系。离开了信号,电路与系统将失去意义。信号作为待传输消息的表现形式,可以看做运载消息的工具,需要电路或系统来实现传输或加工。从传输的观点来看,信号通过系统后,由于系统的职能作用而使信号的时间特性及频率特性发生变化,从而产生新的信号。从系统响应的观点来看,系统在信号的激励下,将必然作出相应的反应,从而完成系统的职能作用。

本书前八章讨论连续信号与电路(系统)的分析,离散信号与系统的分析则在后两章中讨论。

1.2 电路模型

当电路工作时,各种电路器件所发生的电磁现象相当复杂,如果一起考虑,就会给电路分析带来困难,甚至变成不可能。因此,必须将构成实际电路的各种电工或电子器件理想化和模型化。理想化就是保留所发生电磁现象的主要方面而忽略微不足道的方面;模型化就是用一种抽象的电路元件来表征所发生的某种电磁特征。例如,理想电阻元件仅表征消耗电能并转变成非电能的特征,理想电容元件仅表征存储或释放电场能量的特征,理想

电感元件仅表征存储或释放磁场能量的特征，它们分别是实际电路中电阻器、电容器和电感器在一定条件下的近似化、理想化。

上述三种理想电路元件均具有两个端子，称为二端元件，又称单口元件。除二端元件外还有多端元件，如受控源、耦合电感、变压器等四端元件。

通常，当电路器件的尺寸远小于电路最高工作频率所对应的波长时，可以认为元件的参数“集总”于一个点上，形成所谓的集总参数元件，简称集总元件。

理想元件是抽象的模型，没有体积大小，是集总参数元件。由集总参数元件构成的电路称为集总参数电路，简称集总电路。在集总电路中，任何时刻该电路任何地方的电流、电压都是与其空间位置无关的确定值。

由理想元件组成的电路称为电路模型。今后所提到的电路，除特别指明外均为电路模型，所提到的元件均为理想元件。

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，条件变了，电路模型也要作相应的改变。

例如，我国电力系统照明用电的频率为 50 Hz，其波长为 6000 km。对于大多数用电设备来说，其元件尺寸与之相比可忽略不计，采用集总参数概念是合适的。而远距离的通信线路和电力输电线路则不满足上述条件，就不能用集总参数来分析。又如在微波电路中，信号的波长 $\lambda = 0.1 \sim 10$ cm，此时波长与元件尺寸属同一数量级，信号在电路中传输时元件尺寸不能忽略；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；某一时刻从电路或器件一端流入的电流不一定等于另一端流出的电流，此时集总参数模型失效，应当采用分布参数或电磁场理论来分析。有关这部分内容将在后续课程中学习。

本课程只对集总参数电路进行分析，集总参数的条件即集总假设是电路分析的重要假设。当满足集总参数条件时，就可以采用由分立元件模型组成的集总参数电路模型。图 1-2 所示电路就是一个手电筒电路的集总参数电路模型。图中电源元件 U_s 与电阻元件 R_s 的组合表示干电池，是提供电能的能源；电阻元件 r 表示手电筒金属壳体的电阻；电阻元件 R_L 表示灯泡，是用电设备，称为负载；图中连线为理想导线。

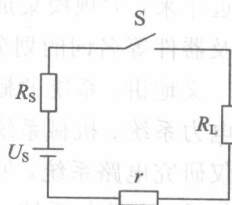


图 1-2 手电筒电路模型

1.3 电路变量

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工作特性的六个变量，一般都是时间的函数。其中电流和电压是电路分析中最常用的两个基本变量，本节着重讨论电流、电压的参考方向，以及电路功率和能量的计算。

1.3.1 电流及其参考方向

单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度，简称电流，用符号 i 表示，即

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

规定正电荷运动的方向为电流的真实方向。

大小和方向都不随时间改变的电流称为恒定电流,简称直流,用大写字母 I 表示。在这种情况下,通过导体横截面的电荷量 q 与时间 t 成正比,即

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

在国际单位制(SI)中,电流、电荷和时间的单位分别为安[培](简称安,符号为 A)、库[仑](简称库,符号为 C)和秒(符号为 s)。1 安=1 库/秒。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

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

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

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的电流真实方向也不是一件容易的事。为此,引入电流参考方向的概念。

对于连接电路 a、b 两点间的二端元件,流经它的电流 i 的参考方向常用箭头表示,如图 1-3 所示。电流的参考方向可以任意选定,但一经选定,就不再改变,以此作为分析计算的依据。经过计算,如电流值为正值,则表示参考方向与



图 1-3 电流参考方向

电流真实方向一致;如电流值为负值,则表示参考方向与真实方向相反。

电流参考方向亦可用字符 i 的双下标表示,如图 1-3 中的电流 i_{ab} 表示电流参考方向由 a 指向 b。

电流是代数量,既有数值又有与之相应的参考方向才有明确的物理意义。只有数值而无参考方向的电流是没有意义的。所以在求解电路时,必须首先选定电流的参考方向。

电路图中箭头所标电流方向都是电流的参考方向。电流的参考方向又叫电流的正方向。

1.3.2 电压及其参考方向

单位正电荷由 a 点移到 b 点时电场力所作的功称为 a、b 两点间的电位差,即 a、b 间的电压,用符号 u 表示,即

$$u = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-3)$$

习惯上把电位降低的方向(高电位指向低电位)规定为电压的方向。通常电压的高电位端标为“+”极,低电位端标为“-”极。

大小和方向都不随时间改变的电压称为恒定电压或直流电压,用大写字母 U 表示。在这种情况下,电场力作的功与电荷量成正比,即

$$U = \frac{\omega}{q} \quad (1-4)$$

在国际单位制中,电压、能量(功)的单位分别为伏[特](简称伏,符号为 V)和焦[耳](简称焦,符号为 J)。1 伏=1 焦/库。在通信和计算机技术中常用毫伏(mV)、微伏(μV)作为电压的单位,它们的关系是

$$1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$$

$$1 \text{ } \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}$$

像需要为电流选定参考方向一样,也需要为电压选定参考方向(也称参考极性)。在电路图上用“+”表示参考极性的高电位端,“-”表示参考极性的低电位端,如图 1-4(a)所示。电压的参考极性同样是任意选定的。经过计算,如电压值为正值,则表示电压的参考极性与真实极性一致;如电压值为负值,则表示电压的参考极性与真实极性相反。

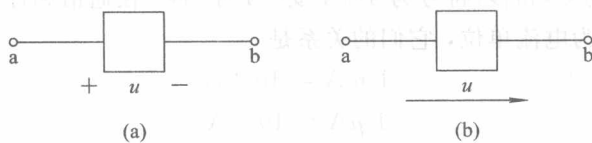


图 1-4 电压的参考方向

电压参考方向亦可用字符 u 的双下标表示,对于图 1-4(a),可用 u_{ab} 表示 a 点为参考正极性端“+”,b 点为参考负极性端“-”。当 $u > 0$ 时,从 a 到 b 为电位降或电压降;当 $u < 0$ 时,从 a 到 b 为电位升或电压升。

有时也可用箭头表示电压的参考方向。如图 1-4(b)所示箭头的方向是电位降低的方向。

与电流参考方向类似,不标注电压参考方向的情况下,电压的正负是毫无意义的。所以在求解电路时也必须首先选定电压的参考方向。

1.3.3 关联参考方向

在电路分析中,电流与电压的参考方向是任意选定的,两者之间独立无关。但是为了方便起见,对于同一元件或同一段电路,习惯上常采用“关联”参考方向,即电流的参考方向与电压参考“+”极到“-”极的方向选为一致,如图 1-5(a)所示。关联参考方向又称为一致参考方向。

当电流、电压采用关联参考方向时,在电路图上只需标电流参考方向和电压参考极性中的任意一种即可。

电流和电压的参考方向选为相反时称为非关联参考方向,如图 1-5(b)所示。

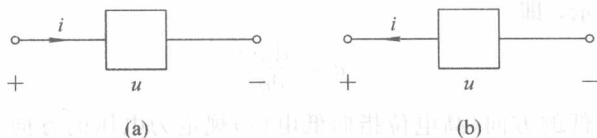


图 1-5 参考方向

(a) 关联参考方向; (b) 非关联参考方向

1.3.4 功率和能量

功率与电压和电流密切相关。正电荷从电路元件上电压“+”极经元件移到“-”极是电场力对电荷做功的结果,这时元件吸收能量;反之,正电荷从电路元件上电压“-”极经元件移到“+”极,必须由外力(化学力、电磁力等)对电荷做功以克服电场力,这时元件发出

能量。

单位时间内电场力所作的功称为功率，用字符 p 表示，即

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-5)$$

对于如图 1-5(a)所示的二端电路，当电压、电流参考方向关联时，得

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-6)$$

这说明，若电压与电流采用关联参考方向时，二端电路吸收的功率可用电压与电流的乘积来计算。

若二端电路的电压电流采用非关联参考方向，如图 1-5(b)所示，则可把电压或电流看成是关联参考方向时的负值，故电路吸收功率的公式应改为

$$p = -ui \quad (1-7)$$

根据电压电流是否为关联参考方向，可选用相应的功率计算公式。但不论是式(1-6)还是式(1-7)都是按吸收功率进行运算的。若计算出功率为正值，均表示吸收了功率；若计算出功率为负值，均表示供出了功率。

若二端电路为直流电路，则电路吸收功率亦不随时间而改变，式(1-6)和式(1-7)可分别改写为

$$P = UI \quad (1-8)$$

$$P = -UI \quad (1-9)$$

在国际单位制中，功率的单位是瓦[特](简称瓦，符号为 W)。1 瓦=1 焦/秒=1 伏·安。

对式(1-5)两边从 $-\infty$ 到 t 积分，可得

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\zeta) d\zeta = \int_{-\infty}^t u(\zeta)i(\zeta) d\zeta \quad (1-10)$$

式(1-10)表示电压与电流参考方向关联时从 $-\infty$ 到 t 时间内输入电路的总能量，或称电路吸收的总能量。

例 1-1 如图 1-6 所示电路，4 个方框分别代表一个元件。电流 $i_1 = i_2 = 2$ A, $i_3 = 3$ A, $i_4 = -1$ A, 电压 $u_1 = 3$ V, $u_2 = -5$ V, $u_3 = -u_4 = -8$ V。试求各元件的功率，并说明它们实际是吸收还是供出了功率。

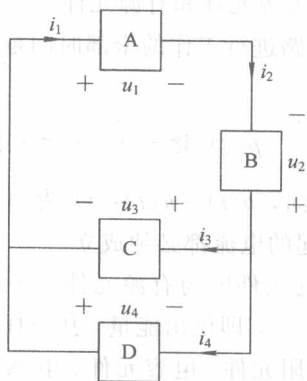


图 1-6 例 1-1 图

解 元件 A 上, 电压 u_1 和电流 i_1 的参考方向为关联参考方向, 故有

$$p_A = u_1 i_1 = 3 \times 2 = 6 \text{ W}$$

$p_A > 0$, 表明 A 吸收 6 W 功率。

元件 B 上, 电压 u_2 和电流 i_2 的参考方向为非关联参考方向, 故有

$$p_B = -u_2 i_2 = -(-5) \times 2 = 10 \text{ W}$$

$p_B > 0$, 表明 B 吸收 10 W 功率。

元件 C 上, 电压 u_3 和电流 i_3 的参考方向为关联参考方向, 故有

$$p_C = u_3 i_3 = (-8) \times 3 = -24 \text{ W}$$

$p_C < 0$, 表明 C 供出 24 W 功率。

元件 D 上, 电压 u_4 和电流 i_4 的参考方向为非关联参考方向, 故有

$$p_D = -u_4 i_4 = -8 \times (-1) = 8 \text{ W}$$

$p_D > 0$, 表明 D 吸收 8 W 功率。

从本例还可看到, 电路中各元件吸收功率的总和为

$$\sum p_{\text{吸}} = p_A + p_B + p_D = 6 + 10 + 8 = 24 \text{ W}$$

电路中各元件供出功率的总和为

$$\sum p_{\text{供}} = p_C = 24 \text{ W}$$

对于任何完整的电路, 吸收和供出功率的数值正好相等, 即 $\sum p_{\text{吸}} = \sum p_{\text{供}}$, 称为功率平衡, 这是能量守恒原理的具体体现。

1.4 电路元件

电路元件是组成电路模型的最小单元。电路元件的特性是由它端子上的电压、电流关系来表征的, 通常称为伏安关系, 记为 VCR (Voltage Current Relation), 它可以用数学关系式表示, 也可以描绘成电压、电流的关系曲线——伏安特性曲线。

电路元件可以分为两大类: 无源元件和有源元件。

无源元件是指在接入任一电路进行工作的全部时间范围内, 总的输入能量不为负值的元件, 用数学式表示为

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\zeta) d\zeta = \int_{-\infty}^t u(\zeta) i(\zeta) d\zeta \geq 0 \quad (1-11)$$

式中电压、电流采用关联参考方向, $p(t) = u(t) i(t)$ 为输入该元件的功率。这个关系式对所有的 t , 对任何电压和由此引起的电流都必须成立。

任何不满足式(1-11)条件的元件即为有源元件。有源元件在它接入电路进行工作的某个时间 t , 式(1-11)中, $w(t) < 0$, 即供出能量, 甚至任何时刻一直供出能量。

本课程涉及的无源元件有电阻元件、电容元件、电感元件、互感元件和理想变压器元件, 涉及的有源元件有独立电源、受控电源。本节将介绍电阻元件、独立电源和受控电源, 其余元件将在后面的有关章节中陆续介绍。

1.4.1 电阻元件

电阻元件是无源元件,是实际电阻器如滑杆电阻器、电灯泡、半导体二极管等所有消耗能量的器件的理想化模型。电阻元件的 VCR 可用 $u-i$ 上的一条曲线表示,因而它是一个 $u-i$ 相约束的元件。

电阻元件按其特性曲线是否为通过原点的直线可分为线性电阻元件和非线性电阻元件;按其特性曲线是否随时间变化又可分为时变电阻元件和非时变电阻元件。故电阻元件共有线性非时变、非线性非时变、线性时变、非线性时变四种类型,如图 1-7 所示。

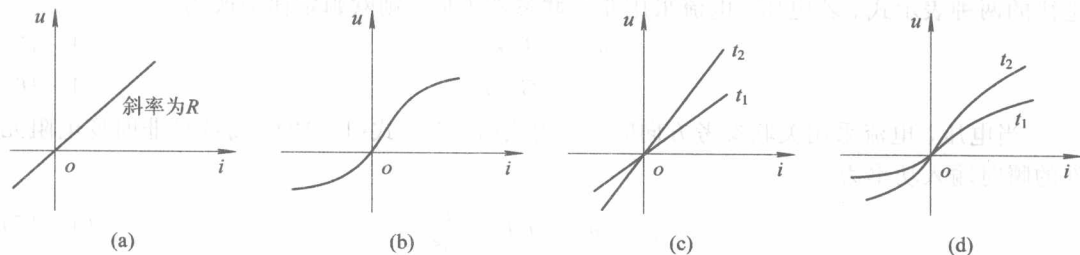


图 1-7 电阻元件的伏安特性曲线

(a) 线性非时变电阻; (b) 非线性非时变电阻; (c) 线性时变电阻; (d) 非线性时变电阻

通常所说的电阻元件,习惯上指的是线性非时变电阻元件,又简称电阻,其图形符号如图 1-8 所示。电压、电流在关联参考方向下,如图 1-7(a)所示的线性非时变电阻的特性曲线的数学描述为

$$u = R \cdot i \quad (1-12)$$

即欧姆定律,也称线性非时变电阻元件的约束方程。式中 R 的数值为该直线的斜率,是一个与电压、电流无关的正常量,称为电阻元件的电阻量,简称电阻。式(1-12)表明在一定电压下电阻 R 的增大将使电流减小。可见电阻 R 是表征电阻元件阻碍电流能力大小的参量。电阻的单位为欧[姆](简称欧,符号为 Ω), 1 欧=1 伏/安。

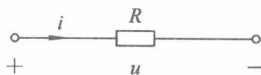


图 1-8 线性非时变电阻元件的图形符号

式(1-12)也可以用另一形式表示:

$$i = G \cdot u \quad (1-13)$$

式中 G 称为电阻元件的电导量,简称电导。式(1-13)表明,在一定电压下,电导的增大使电流增大,可见电导 G 是表征电阻元件传导电流能力大小的参量。电导的单位为西[门子](简称西,符号为 S), 1 西=1 安/伏。

显然,电阻元件的电导与电阻互为倒数,即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-14)$$

在电路分析中究竟用电阻还是电导来表征电阻元件,应视有利于表达式的简洁和运算方便来确定。