



普通高等教育“十二五”规划教材  
高等学校规划教材

# 电路与信号分析基础

廖丽娟 主 编  
武淑红 郝晓丽 副主编  
彭新光 主 审

卓越工程师教育培养计划系列教材



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材  
卓越工程师教育培养计划系列教材  
高等学校规划教材

# 电路与信号分析基础

廖丽娟 主 编  
武淑红 郝晓丽 副主编  
彭新光 主 审

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是太原理工大学国家级特色专业、教育部“卓越工程师教育培养计划”建设成果。本书系统地介绍了电路、信号与系统的基本概念、基本理论和基本分析方法。全书共 6 章，内容包括基础知识、直流电路分析、一阶电路时域分析、正弦稳态电路分析、信号与系统的频域分析、信号与系统的复频域分析。各章配有适量的例题和习题，以利于学生更好地掌握基础理论知识和分析方法。本书配有 PPT 和习题解答等教学资源。

本书可作为高等学校相关专业的学生学习电路与信号分析课程的教材，也可供各电类相关专业的自学者、工程技术人员参考。

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

电路与信号分析基础 / 廖丽娟主编. —北京: 电子工业出版社, 2011.9

高等学校规划教材

ISBN 978-7-121-13712-9

I. ①电… II. ①廖… III. ①电路分析—高等学校—教材②信号分析—高等学校—教材 IV. ①TM133②TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 101172 号

策划编辑: 史鹏举

责任编辑: 史鹏举

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

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: 16.75 字数: 483 千字

印 次: 2011 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 33.00 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 [zlt@phei.com.cn](mailto:zlt@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 前 言

本书是顺应教育部“卓越工程师教育培养计划”的实施，并结合当前计算机类、电子信息类、通信工程、物联网等专业开设“电路与系统”课程的实际教学需要编写而成。作为高校相关专业的一门重要的技术基础课程，电路与系统的基本理论和分析方法已非常成熟。然而，在经济和科技高速发展的今天，知识更新加速，人才竞争加剧，新的学科领域和学科分支不断涌现，使高校人才培养的目标定位趋向于宽口径、厚基础、重实践的新格局，增开选修课、缩短授课时已成为高校各专业课程设置的普遍现象。因此，有必要重新整合内容、改革教材体系结构，以解决学时少、内容多、工程化要求高的矛盾。

本书在内容上仍以“直流电路、过渡过程和交流电路”作为教材的主干知识体系，本着必需、够用为度的指导思想，力求讲清概念、强化应用；在结构上采用“先直流后交流，先时域后频域”的顺序，既保持教材知识体系的完整性和连贯性，又能突出反映章节内容的独立性和特殊性；在分析方法上体现电路的“一般分析法、等效分析法、叠加分析法及变换域分析法”相得益彰的逻辑层次，使电路问题的求解在普遍性和特殊性上达到协调统一；在实践技能的训练上推行仿真实验与实物实验并举，全方位、多角度开发学生的创新意识和工程应用能力。

本书精选了适量的例题和习题，在每章后都附有小结，以便学生复习并学以致用。同时，每章中还结合相关内容介绍了仿真软件 Multisim 2001 在电路分析中的应用，使学生可以不受实验条件的限制，及时将所学理论及分析结论在仿真软件中得到验证，为进一步培养学生的电路分析与创新设计能力奠定基础。

本书共 6 章，参考教学学时为 40~50 学时，具体可参照下表并使用本书配套课件完成教学计划任务。

教 学 内 容	学 时
第 1 章 基础知识	4
第 2 章 直流电路及基本分析法	12
第 3 章 一阶电路的时域分析	6
第 4 章 正弦稳态电路分析	10
第 5 章 信号与系统的频域分析	4
第 6 章 信号与系统的复频域分析	4
实 验	8
机 动	2

**本书配有 PPT、习题解答等教学资源**，可登录电子工业出版社华信教育资源网 [www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn)，免费注册、下载。

本书由太原理工大学廖丽娟主编并编写第 4、5 章，武淑红和郝晓丽任副主编并分别编写第 2、3 章，相洁参编第 1 章，空军工程大学余侃民参编第 6 章，郝晓丽编写了附录 A，武淑红整理了习题参考答案。本书的编写思路与内容选择由所有作者共同讨论确定，全书由廖丽娟统稿，彭新光教授仔细审阅了全书，并提出了许多宝贵的意见，在此深表谢意。在本书的编写过程中，引用了一些相关资料，已将主要文献资料列于书末的参考文献中，在此一并向资料的作者致以诚挚的谢意。

在本书的编写过程中，还得到了陈俊杰、段富、冯秀芳、李海芳、彭新光、强彦、张兴忠等的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

限于编者的水平，书中错误和不足在所难免，欢迎使用本书的教师、学生和工程技术人员批评指正，以便改进和提高。

编 者



# 目 录

<b>第 1 章 基础知识</b> .....	(1)	2.2.1 支路电流法 .....	(39)
1.1 引言 .....	(1)	2.2.2 网孔电流法 .....	(40)
1.2 电路、信号与系统的基本概念 ..	(2)	2.2.3 节点电压法 .....	(42)
1.2.1 电路及电路模型 .....	(2)	2.3 线性电路的几个基本定理 .....	(44)
1.2.2 信号的基本概念 .....	(4)	2.3.1 叠加定理 .....	(44)
1.2.3 系统的基本概念 .....	(6)	2.3.2 替代定理 .....	(46)
1.3 电路的基本变量 .....	(7)	2.3.3 戴维南定理 .....	(47)
1.3.1 电流及其参考方向 .....	(7)	2.3.4 诺顿定理 .....	(49)
1.3.2 电压及其参考方向 .....	(8)	2.3.5 最大功率传输定理 .....	(51)
1.3.3 电路中的电位 .....	(8)	2.4 Multisim 直流电路分析 .....	(54)
1.3.4 电路中的功率和能量 .....	(9)	小结 .....	(57)
1.4 电路的基本元件 .....	(11)	习题 2 .....	(58)
1.4.1 电阻元件 .....	(11)	<b>第 3 章 一阶电路的时域分析</b> .....	(65)
1.4.2 电容元件 .....	(12)	3.1 电路的过渡过程及换路定则 ..	(65)
1.4.3 电感元件 .....	(15)	3.1.1 电路的过渡过程 .....	(65)
1.5 电源 .....	(17)	3.1.2 电路的换路定则 .....	(66)
1.5.1 独立源 .....	(17)	3.1.3 初始值的确定 .....	(67)
1.5.2 受控源 .....	(18)	3.2 一阶电路的过渡过程 .....	(69)
1.6 基尔霍夫定律 .....	(19)	3.2.1 一阶电路的零输入响应 .....	(69)
1.6.1 基尔霍夫电流定律 .....	(20)	3.2.2 一阶电路的零状态响应 .....	(73)
1.6.2 基尔霍夫电压定律 .....	(21)	3.3 一阶电路的全响应 .....	(75)
1.7 Multisim 仿真应用 .....	(23)	3.3.1 一阶电路的全响应 .....	(75)
1.7.1 Multisim 2001 软件简介 ..	(23)	3.3.2 三要素法 .....	(77)
1.7.2 Multisim 2001 实例 .....	(23)	3.4 一阶电路的阶跃响应 .....	(79)
小结 .....	(25)	3.4.1 单位阶跃信号 .....	(79)
习题 1 .....	(26)	3.4.2 阶跃响应 .....	(81)
<b>第 2 章 直流电路及基本分析法</b> .....	(29)	3.5 一阶电路的冲激响应 .....	(82)
2.1 电阻电路的等效变换分析法 ..	(29)	3.5.1 单位冲激信号的定义 .....	(82)
2.1.1 电阻串联、并联及混联的等效		3.5.2 冲激响应 .....	(83)
变换 .....	(29)	3.6 卷积积分 .....	(85)
2.1.2 电阻星形连接与三角形连接及其		3.6.1 信号的时域分解 .....	(85)
等效变换 .....	(32)	3.6.2 零状态响应——卷积	
2.1.3 含独立电源网络的等效		积分 .....	(86)
变换 .....	(35)	3.7 Multisim 动态电路分析 .....	(87)
2.2 复杂电路的一般分析法 .....	(39)	小结 .....	(88)
		习题 3 .....	(89)

第 4 章 正弦稳态电路分析 .....	(93)	4.10.2 用 Multisim 的 AC 频率扫描功能 分析电路 .....	(151)
4.1 正弦信号的基本概念 .....	(93)	小结 .....	(153)
4.1.1 正弦量的三要素 .....	(93)	习题 4 .....	(155)
4.1.2 有效值 .....	(94)		
4.1.3 同频率正弦量的相位差 ..	(95)		
4.2 正弦量的相量表示 .....	(97)	第 5 章 信号与系统的频域分析 .....	(162)
4.2.1 复数 .....	(97)	5.1 连续周期信号的傅里叶级数 展开 .....	(162)
4.2.2 相量 .....	(100)	5.1.1 信号分类 .....	(162)
4.3 正弦稳态电路的相量模型 .....	(101)	5.1.2 周期信号分解为傅里叶 级数 .....	(163)
4.3.1 基尔霍夫定律的相量形式 ..	(101)	5.1.3 信号对称性与傅里叶系数 的关系 .....	(165)
4.3.2 无源二端元件伏安关系的相量 形式 .....	(102)	5.2 连续周期信号的频谱 .....	(169)
4.3.3 电路的相量模型 .....	(105)	5.2.1 单边频谱 .....	(169)
4.4 无源二端网络的等效阻抗 与导纳 .....	(107)	5.2.2 双边频谱 .....	(170)
4.4.1 二端网络的阻抗与导纳 ..	(107)	5.2.3 典型矩形脉冲信号 的频谱 .....	(171)
4.4.2 阻抗与导纳的串、并联 ..	(109)	5.2.4 傅里叶级数在电路分析中 的应用 .....	(174)
4.4.3 RLC 串联的交流电路 .....	(111)	5.3 连续非周期信号的傅里叶 变换 .....	(178)
4.4.4 GLC 并联的交流电路 .....	(113)	5.3.1 非周期信号的傅里叶 变换 .....	(178)
4.5 复杂正弦稳态电路分析举例 ..	(116)	5.3.2 傅里叶变换的物理意义 .....	(179)
4.6 正弦交流电路的功率 .....	(119)	5.3.3 典型非周期信号的傅里叶 变换 .....	(179)
4.6.1 无源二端元件的功率 .....	(119)	5.4 傅里叶变换性质 .....	(183)
4.6.2 二端网络的功率 .....	(122)	5.4.1 线性 .....	(183)
4.6.3 复功率 .....	(125)	5.4.2 时移性 .....	(183)
4.6.4 功率因数的提高 .....	(126)	5.4.3 频移性 .....	(184)
4.6.5 最大功率传输 .....	(129)	5.4.4 尺度变换 .....	(185)
4.7 谐振电路 .....	(130)	5.4.5 对称性 .....	(186)
4.7.1 串联谐振电路 .....	(130)	5.4.6 时域微分性、积分性 .....	(187)
4.7.2 并联谐振电路 .....	(134)	5.4.7 频域微分性、积分性 .....	(188)
4.8 变压器 .....	(136)	5.4.8 卷积定理 .....	(189)
4.8.1 空心变压器 .....	(136)	5.5 线性系统的频域分析 .....	(190)
4.8.2 理想变压器 .....	(138)	5.5.1 系统的频率特性 $H(j\omega)$ .....	(190)
4.9 三相电路 .....	(141)	5.5.2 频域分析法 .....	(192)
4.9.1 三相电源 .....	(141)	5.5.3 电路无失真传输信号 的条件 .....	(194)
4.9.2 负载星形连接的三相 电路 .....	(144)		
4.9.3 负载三角形连接的三相 电路 .....	(147)		
4.9.4 三相电路的功率 .....	(148)		
4.10 Multisim 正弦稳态分析 .....	(149)		
4.10.1 用虚拟仪器做测量仿真 ..	(149)		

5.6 滤波器 .....	(196)	6.2.8 终值定理 .....	(219)
5.6.1 滤波器概述 .....	(196)	6.3 拉普拉斯反变换 .....	(221)
5.6.2 理想滤波器的频率特性 ..	(196)	6.3.1 实数单极点情况 .....	(221)
5.6.3 理想低通滤波器的单位冲激 响应 .....	(198)	6.3.2 重极点情况 .....	(223)
5.6.4 理想低通滤波器的单位阶跃 响应 .....	(198)	6.3.3 共轭复数极点情况 .....	(224)
5.6.5 实际的低通滤波器 .....	(199)	6.4 线性系统的复频域分析 .....	(225)
5.7 Multisim 频域分析 .....	(200)	6.4.1 微分方程的复频域分析 .....	(225)
5.7.1 用 Multisim 对信号进行傅里叶 分析 .....	(200)	6.4.2 电路的复频域模型 .....	(226)
5.7.2 用 Multisim 对网络的传输特性 进行分析 .....	(202)	6.5 网络函数与网络特性 .....	(231)
小结 .....	(204)	6.5.1 网络函数 .....	(231)
习题 5 .....	(207)	6.5.2 网络函数的零点、极点 .....	(232)
<b>第 6 章 信号与系统的复频域分析</b> .....	(210)	6.5.3 网络函数的零点、极点与 稳定性 .....	(233)
6.1 拉普拉斯变换 .....	(210)	6.5.4 网络函数的零点、极点与频率 特性 .....	(235)
6.1.1 拉普拉斯变换的定义 .....	(210)	6.6 Multisim 复频域分析 .....	(237)
6.1.2 典型信号的拉普拉斯 变换 .....	(212)	小结 .....	(241)
6.2 拉普拉斯变换的性质 .....	(214)	习题 6 .....	(243)
6.2.1 线性 .....	(214)	<b>附录 A Multisim 2001 软件简介</b> .....	(246)
6.2.2 时移性 .....	(215)	A.1 Multisim 2001 界面主窗口 简介 .....	(246)
6.2.3 尺度变换性 .....	(216)	A.2 用户界面设置 .....	(254)
6.2.4 频移性 .....	(216)	A.3 实验中用到的设备的使用 方法 .....	(255)
6.2.5 时域微分性 .....	(217)	A.4 仿真实验的基本步骤 .....	(258)
6.2.6 时域积分性 .....	(218)	<b>参考文献</b> .....	(260)
6.2.7 初值定理 .....	(219)		

# 第1章 基础知识

学习电路、信号与系统课程主要是掌握电路与系统的基本概念和分析方法。本章首先回顾在电路、信号与系统的发展历史中出现的著名科学家以及他们的成就，同时简单介绍本课程特点和地位；然后介绍电路、信号与系统的基本概念以及它们之间的关系，重点包括电路和电路模型、基本元件、基本变量以及电路的基本定律——基尔霍夫定律。

## 1.1 引言

当今高度信息化和自动化的社会中，小到家庭生活大到工农业生产以及科学研究，甚至是军事研究和航空航天探索，电路、信号与系统无处不在。人们听的收音机，通信用电话、手机，上网用的笔记本电脑以及各种功能的家用电器离不开电路，工厂企业自动生产线的控制离不开电路，大型医疗设备、水下核潜艇以及航天飞机等的控制更离不开电路、信号与系统。

电路、信号与系统的发展历史源远流长，在其发展长河中出现了许多世界著名的科学家，他们为电路、信号与系统的发展做出了杰出贡献，回顾他们的学术成就，学习他们的注重实验、重视观察、善于归纳总结和理论升华的科学严谨的研究态度，对于我们学好这门课程有着重要的意义。

1785年法国物理学家库仑(Charlse-Augustin de Coulomb, 1736—1806年)，利用自己发明的扭秤定量地研究了两个带电体之间的相互作用，建立了世界上最早的电学中的著名定律——库仑定律，库仑定律是电学发展史上的第一个定量规律，它使电学的研究从定性进入定量阶段，是电学史上的一个重要里程碑。电荷的单位库仑就是以他的姓氏命名的。

1800年意大利科学家伏特(Alessandro Volta, 1745—1827年)，发明了伏达电堆，也就是第一种化学电源——铜锌电池，它能把化学能不断地转变为电能，为人们获得稳定持续的电流提供了一种方法，使电学从对静电的研究转变到对动电的研究，具有划时代的意义，引起了电磁学的一场革命，后人为了纪念这位物理学家，把电压的单位定为伏特(Volt)。

安培(André-Marie Ampère, 1775—1836年)，法国著名的物理学家，1825年提出了著名的安培定律，他从1820年开始测量电流的磁效应，从中发现两个载流导线可以相互吸引又可以相互排斥，这一发现成为研究电学的基本定律，为电动机的发明做了理论上的准备。为了纪念他在电磁学上的杰出贡献，电流的单位“安培”以他的姓氏命名。

德国物理学家、数学家欧姆(Georg Simon Ohm, 1787—1854年)1826年提出了经典电磁理论中著名的欧姆定律。时至今日，电路教科书中无一例外地都保留、讲授这一精辟的电学定律，为纪念其重要贡献，人们将其名字作为电阻单位。

英国物理学家、化学家，也是著名的自学成才的科学家法拉第(Michael Faraday, 1791—1867年)发现了电磁感应现象，他认为电与磁是一对和谐的对称现象。既然电能生磁，他坚信磁亦能生电，他完成了在磁体与闭合线圈相对运动时在闭合线圈中激发电流的实验，发现在线圈内运动的磁体可以在导线中产生电流，这一发现成为发明和制造发电机和变压器的理论依据，从而使机械能转变为电能成为可能，推动了电在工业上的广泛应用，宣告了电气时代的到来。

英国物理学家焦耳(James Prescott Joule, 1818—1889年)一生都在从事实验研究工作，在电磁学、热学、气体分子动理论等方面均做出了卓越的贡献。他是靠自学成为物理学家的。从1840年起，焦



耳开始研究电流的热效应，把环形线圈放入装水的试管中，测量不同电流和电阻时的水温，通过实验发现：导体中一定时间内所生成的热量与导体的电流的二次方和电阻之积成正比。此后不久的 1842 年，俄国著名物理学家楞次也独立地发现了同样的规律，进一步验证了焦耳关于电流热效应结论的正确性，所以被称为焦耳—楞次定律。这一发现为揭示电能、化学能、热能的等价性打下了基础，敲开了通向能量守恒定律的大门。能量或功的单位就是以“焦耳”命名的。

德国物理学家基尔霍夫(Gustav Robert Kirchhoff, 1824—1887 年)，以他对光谱分析、光学和电学的研究而著名。1845 年，21 岁时他发表了第一篇论文，提出了稳恒电路中电流、电压、电阻关系的两条电路定律，即著名的基尔霍夫电流定律(KCL)和基尔霍夫电压定律(KVL)，解决了电器设计中电路方面的难题。后来又研究了电路中电的流动和分布，从而阐明了电路中两点间的电势差和静电学的电势这两个物理量在量纲和单位上的一致，使基尔霍夫电路定律具有更广泛的意义。直到现在，基尔霍夫电路定律仍旧是解决复杂电路问题的重要工具。基尔霍夫被称为“电路求解大师”。

德国物理学家赫兹(Heinrich Rudolf Hertz, 1857—1894 年)通过放电线圈的火花放电实验，发现近旁未闭合的绝缘线圈中有电火花跳过，便敏锐地认识到这可能是电磁感应现象，证实了无线电波的存在。1887 年 11 月 5 日，赫兹在一篇题为《论在绝缘体中电过程引起的感应现象》的论文中，总结了这个重要发现。赫兹还通过实验确认了电磁波是横波，具有与光类似的特性，如反射、折射、衍射等，并且实验了两列电磁波的干涉，同时证实了在直线传播时，电磁波的传播速度与光速相同，从而全面验证了麦克斯韦的电磁理论的正确性，并进一步完善了麦克斯韦方程组，因为对电磁学有很大的贡献，故频率的国际单位赫兹以他的名字命名。

法国电报工程师和教育家戴维南(Léon Charles Thévenin, 1857—1926 年)，在基尔霍夫定律和欧姆定律的基础上，提出了戴维南等效定理，于 1883 年发表在法国科学院刊物上，论文篇幅仅一页半，是在直流电源和电阻的条件下提出的，然而由于其证明所带有的普遍性，实际上它适用于当时未知的其他情况，如含电流源、受控源及正弦交流、复频域等电路，目前已成为一个重要的电路定理。定理的对偶形式 50 余年后由美国贝尔电话实验室工程师诺顿(E.L.Norton)提出，即诺顿定理。

法国数学家、物理学家傅里叶(Jean Baptiste Joseph Fourier, 1768—1830 年)，是傅里叶定律的创始人，1807 年向巴黎科学院呈交《热的传播》论文，推导出著名的热传导方程，并在求解该方程时发现解函数可以由三角函数构成的级数形式表示，从而提出任何一个函数都可以展成三角函数的无穷级数。由此创立了傅里叶级数(即三角级数)、傅里叶分析等理论。傅里叶变换的基本思想首先由傅里叶提出，所以以其名字来命名以示纪念。正是由于它的良好性质，傅里叶变换在物理学、数论、组合数学、信号处理、概率、统计、密码学、声学、光学等领域都有着广泛的应用。时至今日，在任何一本信号与系统的教科书中都能找到傅里叶级数和傅里叶变换的内容，而近代出现的离散傅里叶变换、快速傅里叶变换又赋予了傅里叶分析更强大的生命力。

法国数学家拉普拉斯(Laplace, 1749—1827 年)提出了一种新的积分变换，即拉普拉斯变换，它是为简化计算而建立的实变量函数和复变量函数间的一种函数变换。条件更宽松、应用范围更广泛，在电学、线性系统、控制自动化等领域都有广泛的应用。

## 1.2 电路、信号与系统的基本概念

### 1.2.1 电路及电路模型

电路是电气设备或电气元件按一定的方式组成并具有一定功能的连接整体，电路为电流提供了通路。

在现代化农业生产、国防建设、科学研究及日常生活中,使用着各种各样的电气设备,例如电动机、雷达导航设备、计算机、电视机以及手机等。广义上说,这些电气设备都是实际电路。

图 1.1(a) 是一个简单的照明电路,由电池、开关、连接导线、灯泡组成。其作用是把由电池提供的电能传送给灯泡并转换成光能。电池就是该照明电路的电源,提供电能,它的作用是将化学能转换为电能;灯泡是负载,将电源提供的电能转换为光和热能;导线和开关是电源与负载的中间环节,起着连接电源与负载、传输电能及控制的作用。电源、负载和连接导线是任何实际电路不可缺少的组成部分。

图 1.1(b) 是计算机电路组成的简化框图,它的基本功能是通过处理输入信号实现数值计算。人们在键盘上输入计算数据和步骤,编码器将输入信号表示成二进制数码,经运算、存储、控制部件处理得到计算结果,然后在显示器上输出。

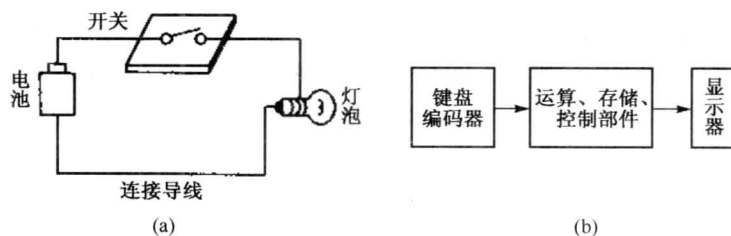


图 1.1 实际电路

实际电路种类繁多,其结构形式多种多样,但从电路的组成和功能上来看,可将电路分为两大类。一类完成能量的产生、传输、分配和转换,典型的例子就是电力系统。一般电力系统包括发电厂、输变电环节和负载三个组成部分。在各类发电厂中,发电机组分别把不同形式的能量(热电厂的热能、水电厂的水能和核电厂的原子能)转换为电能,并通过输变电环节将电能输送给各用户,通过用户的电灯、电动机、电炉等用电设备把电能转化为其他形式的能量,如灯泡将电能转换为光能,电动机将电能转换为机械能,电炉则将电能转换为热能。这类电路具有电压高(如我国电力系统的运行电压已达 750 kV)、电流大、功率强的特点,所以称为强电系统。另一类电路实现信息的传递和处理,如手机、电话、收音机、电视机、计算机等电路。这类电路对输入信号(如声音、音乐、图像等)进行变换或处理成为人们需要的输出信号送到扬声器或显像管等输出设备中进行播出或显示。由于这类电路所涉及的电压和电流都较小,所以称为弱电系统。

在实际电路中使用着各种各样的电气元器件,如电阻器、电容器、电感器、灯泡、电池、晶体管、变压器等。对于一个实际元件来说,其电磁性能也不是单一的。例如滑线变阻器由导线绕制而成,但有电流通过时,不仅具有电阻的性质会消耗电能,而且具有电感的性质还会产生磁场;不仅如此,导线的匝与匝之间还存在着分布电容,具有电容的性质。上述电性质交织在一起共同产生作用,而且电压、电流频率不同时,其表现程度也不一样。

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。为此,在电路理论中采用了模型的概念,对于组成实际电路的各种器件,我们忽略其次要因素,只抓住其主要电磁特性,对实际元件加以近似使之理想化,用具有单一电磁性能的理想电路元件来代表它。这与经典力学中的采用质点作为小物体的模型一样,用理想电路元件模型进行电路问题的研究与分析可以使问题的处理大为简化,从而便于人们认识和掌握。

对于电路模型的概念特别需要强调的有下面几点:

(1) 理想电路元件是一种理想的模型,它在物理上具有某种确定的电磁性能,在数学上也具有严格的定义,但实际中并不存在。理想电阻元件只消耗电能而没有电场和磁场特性,其元件模型如

图1.2(a)所示；理想电容元件只储存电能，既不消耗电能也不储存磁能，其元件模型如图1.2(b)所示；理想电感元件只储存磁能，既不消耗电能也不储存电能，其元件模型如图1.2(c)所示。

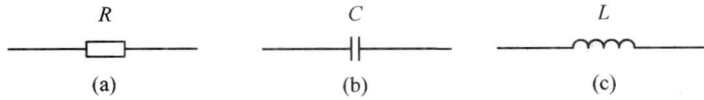


图 1.2 理想元件模型

(2) 不同的实际电路部件只要具有相同的主要电磁特性，在一定的条件下可用同一个电路模型来表示。比如电阻器、灯泡、电炉等，这些器件在电路中的主要特性都是消耗电能，因此都可用理想电阻元件作为它们的模型。

(3) 同一个实际电路部件在不同的条件下可以用不同的模型来表示。例如，一个线圈在工作频率较低时，用理想电感元件作为模型；在需要考虑能量损耗时，使用理想电阻和电感元件串联电路作为模型；而在工作频率较高时，则应进一步考虑线圈绕线之间相对位置的影响，这时模型中还应包含理想电容元件。图 1.3 表示线圈在不同条件下的理想模型。

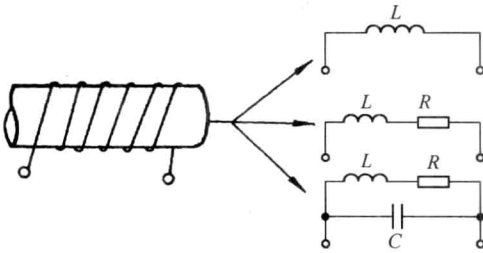


图 1.3 实际电感的不同模型

通常，当实际电路的几何尺寸远小于电路工作时电磁波长时，可以认为元件的参数都“集总”在一个点上，形成所谓的集总参数元件。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。我们用能足够精确反映其电磁性质的一些理想电路元件或它们的组合来模拟实际元件。

在集总参数电路中，电路元件的电能消耗及电能、磁能的储存等现象可以分开研究，而且这些电磁过程都集中在元件的内部进行，任何时刻该电路任何地方的电流、电压都是与空间位置无关的确定值。

本书只讨论集总参数电路。后面所说的“元件”、“电路”均指理想化的集总参数的元件和电路。

## 1.2.2 信号的基本概念

在当今的信息化社会，人们无时无刻不在使用信号传递各种各样的消息。一般用某种方式传递的文字、符号、数据、声音、图片或图像等都称为消息(Message)。例如，电报中传送的报文，电话中传送的话音，传真系统传送的图文，广播电台传送的新闻、音乐，电视系统传送的图像等。我们从所传递的消息中提取各种有用信息(Information)。但是信息的传递都不是直接的，它必须借助一定形式的信号，才能远距离快速传输并进行各种处理。

什么是信号(Signal)呢？广义地说，任何随时间变化的物理量都可以看做一种信号，信号是运载消息的工具，是消息的载体，人们真正感兴趣的是内含于信号中的信息。这就是说，信号是信息的载体，是信息的表现形式；信息内含于信号，是信号表达的具体内容。具体地讲，信号包含光信号、声信号和电信号等。例如，古代人利用点燃烽火台而产生的滚滚狼烟，向远方军队传递敌人入侵的消息，这属于光信号；当我们说话时，声波传递到他人的耳朵，使他人了解我们的意图，这属于声信号；遨游太空的各种无线电波、四通八达的电话网中的电流等，都可以用来向远方表达各种消息，这属于电信号。人们通过对光、声、电信号进行接收，才知道对方要表达的信息。信号分析的目就是从信号中提取信息，即从所获得的消息中，通过减少不确定性获取知识。

在众多的可以作为信号的物理量中,电量容易产生、传输和控制,同时和非电量之间的转换也比较容易,因而成为现今应用最广的信号。本书仅讨论电信号,并把它简称为信号。它通常是指随时间变化的电压或电流,在某些情况下也可以是磁通或电荷等。

信号是随时间变化的,在数学上信号可以用函数表示。因此,可以把信号与函数等同起来看待。

按照函数变化规律确定与否,信号可分为确定性信号和随机信号。如果信号的变化规律是确定的,能用确定的数学函数表示,即对任一确定的时间(或空间),信号有确定的函数值,则称其为确定性信号,如大家熟知的正弦信号。相反,如果信号的变化规律是随机的,不能用确定的数学函数表示,只能用统计规律来描述其随机特性,则称其为随机信号,如各种噪声、随机正弦函数等。本书只研究确定性信号的分析,它也是随机信号分析的基础。图 1.4 给出了几种简单信号的波形,其中图 1.4(a)是确定性信号,而图 1.4(b)是随机信号。

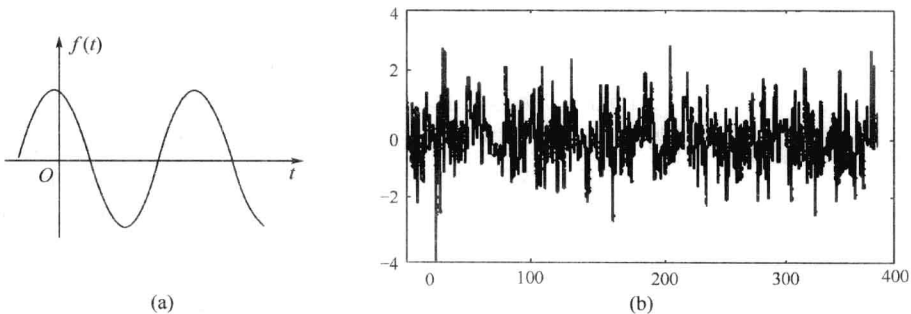


图 1.4 确定性信号与随机信号

按照函数是否具有周期性,信号可以分为周期信号和非周期信号。周期信号是以一定时间间隔而复始、循环往复变化的信号,只要给出信号在一个周期内的变化规律,便可确知它在任一时刻的数值。如图 1.5(a)所示的是周期信号,图 1.5(b)所示为非周期信号。

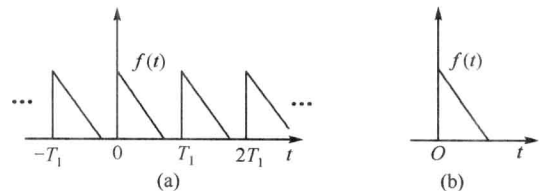


图 1.5 周期信号和非周期信号

按照函数自变量取值的连续与否,信号又可以分为连续时间信号和离散时间信号。在所讨论的任意时刻,函数都有确定的值与之对应,这种信号称为连续时间信号。而离散时间信号在时间上是离散的,它只在某些时间的离散点上给定函数值,而在其他时间点上没有定义。如图 1.6(a)所示的是连续时间信号,图 1.6(b)则为离散时间信号。

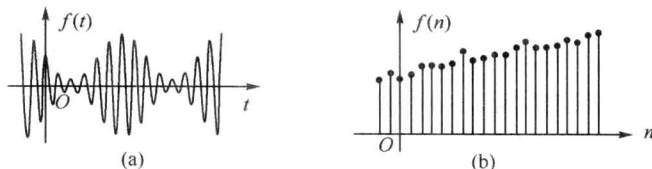


图 1.6 连续时间信号和离散时间信号

信号可以从时间特性和频率特性两个方面来描述。信号的时间特性可以用时间域的数学表达式即时域函数来描述,也可以用函数图像即信号波形来直观表示。信号的时间特性通常通过信号的形状、出现时间的先后、持续时间的长短、随时间变化的快慢、重复周期的大小等信息来表示。信号除了可以用数学表达式和波形来表示时域特性外,还可以用频域特性来描述,即应用相应的正交变换,如傅

里叶变换、拉普拉斯变换、Z 变换等工具将信号从时间域变换到频率域，分析信号由哪些频率成分构成、每个频率分量所占的比例、主要频率分量占有的频带范围等。信号的频域特性与时域特性之间有着密切的关系，在后续的章节中我们将深入地学习和讨论。

### 1.2.3 系统的基本概念

系统是由若干相互依赖和相互作用的事物组合而成的具有特定功能的有机整体。系统涉及的范围十分广泛，这一定义包含着极其丰富的内涵，不仅包括了诸如通信、电力、水力、机械、计算机等物理系统以及财政、金融、交通、信息管理、生态、教育等社会、经济、文化系统，甚至还包含了高科技的宇宙飞船系统、人造卫星系统、自然界中的太阳系统、人的神经系统等。本课程只讨论电路系统。

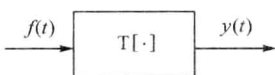


图 1.7 系统的方框图表示

抽象地说，系统就是能够对信号完成变换或运算的整体，即它是一个转换器。通常把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）。系统可用如图 1.7 所示的方框图来表示，用  $T[\cdot]$  表示这种转换关系。它把特定的输入信号  $f(t)$  转换成另一个满足特定要求的输出信号  $y(t)$ 。研究系统在外加激励作用下产生的响应称为系统分析；而研究在特定的某种激励下，如何设计一个系统使其产生期望的响应称为系统综合，本书的侧重点是系统分析。

要想对系统有比较透彻的理解，首先需要对实际系统建立规范化的数学模型，数学模型的建立要用到具体物理系统所涉及的相关知识，并且在一定的假设条件下，突出主要矛盾，忽略次要矛盾的基础上近似得到，然后运用数学方法对其进行求解，最后回到实际系统对结果做出物理解释。

系统分类有多种方法。常用的方法有两种：一是按输入/输出特性分类；二是按系统特性分类。

若系统的输入信号和输出信号均为连续时间信号，则这样的系统称为连续时间系统，简称连续系统。如各种实时信号的采集、放大和处理电路就属于连续时间系统。若系统的输入信号和输出信号均为离散时间信号，则这样的系统称为离散时间系统，简称离散系统。数字计算机就是典型的离散时间系统。由连续时间系统与离散时间系统组合而成的系统称为混合系统。连续时间系统用微分方程描述，离散时间系统用差分方程描述。

信号、电路与系统之间存在着密切的联系，是相互作用的整体。信号作为待传递消息的表现形式，是运载消息的工具，需要由电路或系统来实现传输或加工，离开了信号，电路和系统将失去意义；同样，电路或系统也离不开信号，电路或系统的重要功能就是对信号进行加工、变换与处理。没有信号，电路和系统就没有存在的意义。从传输的观点来看，信号通过电路或系统后，由于电路或系统的作用使信号的时间特性和频率特性发生变化，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，将必然做出相应的反应，从而完成相应的功能。

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，给系统与电路等名词的划分带来了困难。有时认为系统比电路更复杂，规模更大。然而确切地说，系统和电路的主要差异体现在处理问题的角度和观察问题的着眼点不同，系统关注的是全局，而电路则关注局部。例如，在有一个电阻和电容组成的简单电路中，对于电路分析，注重的是各支路、回路的电流和电压；而从系统的角度来看，可以研究它如何构成微分或积分功能的运算器。

因此在实际应用中，信号与系统必须成为相互协调的整体，才能实现信号与系统各自的功能。



## 1.3 电路的基本变量

在电路分析中, 电流、电压、功率与能量是描述电路工作状态和特性的变量, 一般都是时间的函数。其中人们所关心的物理量有电流和电压, 它们是电路分析中最常用的两个基本变量。在具体展开分析和讨论之前, 建立和深刻理解与这些电路基本变量相关的概念是非常重要的。本节重点讨论电流、电压的定义和参考方向, 以及电路功率和能量的计算。

### 1.3.1 电流及其参考方向

电荷有规则的定向运动, 形成传导电流。虽然看不见摸不着, 但人们可通过电流的各种效应(如磁效应、热效应)来感觉它的客观存在。所以, 毫无疑问, 电流是客观存在的物理现象。

电流的强弱用单位时间内通过导体横截面的电荷量定义。设在  $dt$  时间内通过导体某一横截面的电荷量为  $dq(t)$ , 通过该截面的电流为  $i(t)$ , 则

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

若  $dq(t)/dt$  为常数, 即是直流电流, 用大写字母  $I$  表示, 这时通过导体的横截面的电荷量  $q$  与时间  $t$  成正比, 即

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.2)$$

在国际单位制中, 电流的单位是安培(A), 简称“安”。电力系统中嫌安培单位小, 有时取千安(kA)为电流的单位。而无线电系统中(如晶体管电路中)又嫌安培这个单位太大, 常用毫安(mA)、微安( $\mu$ A)作电流单位。它们之间的换算关系是

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$$

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

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

电流不但有大小, 而且有方向。我们规定正电荷运动的方向为电流的真实方向。在一些很简单的电路中, 电流的实际方向是显而易见的, 它是从电源正极流出, 流向电源负极的。对于比较复杂的直流电路, 往往事先不能确定电流的实际方向; 对于交流电, 其电流的实际方向是随时间而改变的。为分析方便, 需引入电流的参考方向这一概念。参考方向是人们任意选定的一个方向, 在电路图中用箭头表示。当然, 所选的电流参考方向不一定就是电流的实际方向。当所设的电流参考方向与实际方向一致时, 电流为正值( $i > 0$ ); 当所设的电流参考方向与实际方向相反时, 电流为负值( $i < 0$ )。这样, 在选定的电流参考方向下, 根据电流的正负, 就可以确定电流的实际方向, 如图1.8所示。电流虽是代数量, 但其数值的正负只有与参考方向的假定相对应才有明确的物理意义。所以在分析电路时, 首先要假定电流的参考方向, 并以此为标准去分析计算, 最后从答案的正负值来确定电流的实际方向。

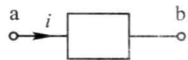


图 1.8 电流参考方向

今后若无特殊说明, 就认为电路图上所标箭头是电流的参考方向。

### 1.3.2 电压及其参考方向

将单位正电荷从 a 点移至 b 点电场力做功的大小称为 a、b 两点间的电位差，即 a、b 两点间的电压。用符号  $u(t)$  表示，即

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \quad (1.3)$$

式中  $dq(t)$  为由 a 点移至 b 点的电荷量，单位为库仑(C)； $dw(t)$  是为移动电荷  $dq(t)$  电场力所做的功，单位为焦耳(J)。电位、电压的单位都是伏特(V)，1V 电压相当于为移动 1C 正电荷电场力所做的功为 1J。在电力系统中嫌伏特单位小，有时用千伏(kV)。在无线电电路中嫌伏特单位太大，常用毫伏(mV)、微伏( $\mu$ V)作电压单位。它们之间的换算关系是

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$$

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

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

电压大小、方向均恒定不变时为直流电压，常用大写  $U$  表示。这种情况下，电场力做的功与电荷量成正比，即

$$U = \frac{w}{q} \quad (1.4)$$

电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点，是电位真正降低的方向。电位、电压都是代数，也有参考方向问题。和电流一样，电路中两点间的电压也可任意选定一个参考方向。所谓电压参考方向，就是所假设的电位降低的方向，在电路图中用“+”、“-”号标出，“+”表示参考极性的高电位端，“-”表示参考极性的低电位端，如图 1.9 所示。参考方向和电压的正负值来反映该电压的实际方向。当电压的参考方向与实际方向一致时，电压为正( $u > 0$ )；相反时，电压为负( $u < 0$ )。

也可以用带下脚标的字母表示。如电压  $u_{ab}$ ，脚标中第一个字母 a 表示假设电压参考方向的正极性端，第二个字母 b 表示假设电压参考方向的负极性端。同电流参考方向一样，不标注电压参考方向的情况下，电压的正负是毫无意义的，所以求解电路时必须首先要假定电压的参考方向。

对一个元件或一段电路上的电压、电流的参考方向可以分别独立地任意指定，但为了方便，常常采用关联参考方向，即电流的参考方向和电压的参考方向一致，如图 1.10(a) 所示。这时在电路图上只需标明电流参考方向或电压参考极性中的任何一种即可。电流、电压参考方向相反时称为非关联参考方向，如图 1.10(b) 所示。

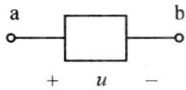


图 1.9 电压参考方向

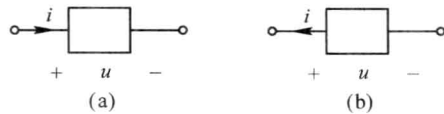


图 1.10 电流、电压的关联与非关联参考方向

### 1.3.3 电路中的电位

电位是在电场中定义的概念。电场力把单位正电荷从电路中某点移到参考点所做的功称为该点的电位，用大写字母  $V$  表示，单位是伏特(voltage)。电位是相对的，与参考点(即零电位点)的选择有关，电路中某点的电位等于该点与参考点之间的电压，即两点间的电压等于这两点的电位的差。

为了确定电路中各点的电位，就必须在电路中选择一个参考点。它们之间的关系如下：

(1) 参考点的电位为零, 即  $V_o=0$ , 比该点高的电位为正, 比该点低电位为负。如图 1.11 (a) 所示的电路中, 选取  $o$  点为参考电位点, 则  $a$  点的电位为正,  $b$  点的电位为负。

(2) 其他各点的电位为该点与参考点之间的电位差。如图 1.11 (a) 中  $a$ 、 $b$  两点的电位分别为

$$\begin{aligned} V_a &= V_a - V_o = u_{ao} = 1 \text{ V} \\ V_b &= V_b - V_o = u_{bo} = -2 \text{ V} \end{aligned}$$

(3) 参考点选取不同, 电路中各点的电位也不同, 但任意两点间的电位差(电压)不变。如选取  $b$  点为参考点, 如图 1.11 (b) 所示, 则

$$\begin{aligned} V_b &= 0 \\ V_a &= V_a - V_b = u_{ab} = 3 \text{ V} \end{aligned}$$

但  $a$ 、 $b$  两点间的电压不变, 仍然为  $u_{ab} = 3 \text{ V}$ 。

(4) 在研究同一电路系统时, 只能选取一个电位参考点。电位概念的引入给电路分析带来了方便, 因此, 在电子线路中往往不再画出电源, 而改用电位标出。图 1.12 是电路的一般画法与电子线路的习惯画法示例。

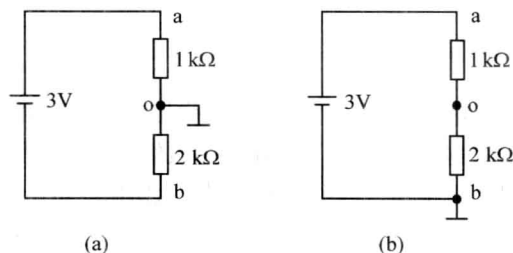


图 1.11 电位的计算

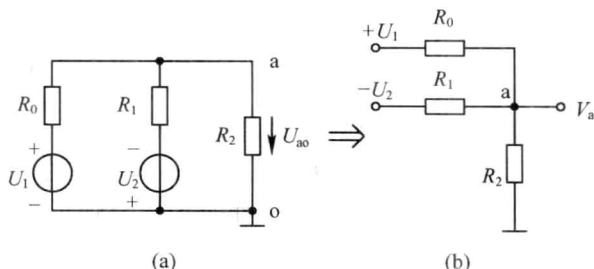


图 1.12 电路的一般画法与习惯画法

**例 1.1** 如图 1.13 所示电路, 已知,  $R_0 = R_1 = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 8 \text{ k}\Omega$ , 求开关  $S$  打开闭合时各点的电位。

**解:** 当  $S$  打开时,  $V_c = 0 \text{ V}$ ,  $V_a = 16 \text{ V}$ 。因为电阻上没有电流流过, 所以没有电压降, 故  $V_a = V_b = V_c = V_d = 16 \text{ V}$ ;

当  $S$  闭合时,  $V_a = 16 \text{ V}$ , 由于  $R_2$  上仍然没有电流流过, 故有

$$V_b = V_c = \frac{2}{2+2} \times 16 \text{ V} = 8 \text{ V}$$

此时,  $V_d = V_e = 0 \text{ V}$ 。

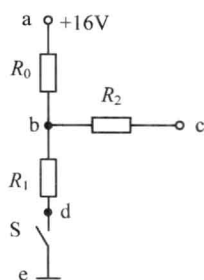


图 1.13 例 1.1 图

### 1.3.4 电路中的功率和能量

单位时间内做功的大小称做功率, 也称为做功的速率。在电路问题中涉及的电功率即是电场力做功的速率, 以符号  $p(t)$  表示。功率的数学定义式可写为

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (1.5)$$

式中  $dw(t)$  为  $dt$  时间内电场力所做的功。功率的单位为瓦 (W)。1 瓦功率就是每秒做功 1 焦耳, 即  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ 。

当电压电流参考方向关联时, 得

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1.6)$$

如果元件电压电流取非关联参考方向，可以把电压或电流看成关联参考方向时的负值，只需在式(1.6)中冠以负号，即

$$p(t) = -ui \quad (1.7)$$

其计算结果的意义与式(1.6)相同。

根据电压电流参考方向是否关联，可以选择不同的公式计算功率，但不论使用哪个公式，都是计算的吸收功率。当  $p > 0$  时，表示  $dt$  时间内电场力对电荷  $dq$  做功  $dw$ ，这部分能量被元件吸收，所以  $p$  是元件的吸收功率；在  $p < 0$  时，表示元件吸收负功率，实际上是该元件向外电路提供功率或产生功率。

在直流情况下，电压和电流都是常数，则式(1.6)和(1.7)可分别改写为

$$P = UI \quad (1.8)$$

$$P = -UI \quad (1.9)$$

若已知元件吸收功率为  $p(t)$ ，并设  $w(-\infty) = 0$ ，则对式(1.5)从  $-\infty$  到  $t$  积分，可求得从  $-\infty$  到  $t$  的时间内元件吸收的能量 ( $u$ 、 $i$  为关联参考方向) 为

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1.10)$$

如果对于任意时刻  $t$ ，均有  $w(t) \geq 0$ ，则称该元件(或电路)是无源元件，否则就称其为有源元件。所以，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；而有源元件在它接入电路进行工作的某个时刻  $t$ ， $w(t) < 0$ ，即供出能量，甚至任何时刻一直供出能量。

**例 1.2** 如图 1.14 所示电路，方框分别代表一个元件，各电压、电流的参考方向均已设定。已知  $I_1 = 2 \text{ A}$ ， $I_2 = -1 \text{ A}$ ， $I_3 = -1 \text{ A}$ ， $U_1 = 7 \text{ V}$ ， $U_2 = 5 \text{ V}$ ， $U_3 = 4 \text{ V}$ ， $U_4 = -3 \text{ V}$ ， $U_5 = 8 \text{ V}$ 。求各元件吸收或向外提供的功率。

**解：** 元件 2、3、4 的电压、电流为关联方向，

$$P_2 = U_2 I_3 = 5 \times (-1) = -5 \text{ W}$$

$P_2 < 0$ ，表明元件 2 向外提供功率。

$$P_3 = U_3 I_1 = 4 \times 2 = 8 \text{ W}$$

$$P_4 = U_4 I_2 = (-3) \times (-1) = 3 \text{ W}$$

$P_3 > 0$ ， $P_4 > 0$ ，表明元件 3、4 均吸收功率。

元件 1、5 的电压、电流为非关联方向。

$$P_1 = -U_1 I_1 = -7 \times 2 = -14 \text{ W}$$

$P_1 < 0$ ，表明元件 1 向外提供功率。

$$P_5 = -U_5 I_3 = -8 \times (-1) = 8 \text{ W}$$

$P_5 > 0$ ，表明元件 5 吸收功率。

电路向外提供的总功率为

$$P_{\text{供}} = P_1 + P_2 = 5 + 14 = 19 \text{ W}$$

电路吸收的总功率为

$$P_{\text{吸}} = P_3 + P_4 + P_5 = 8 + 8 + 3 = 19 \text{ W}$$

计算结果表明对于任何完整的电路，吸收功率等于供出功率，这正是能量守恒定律的具体体现。

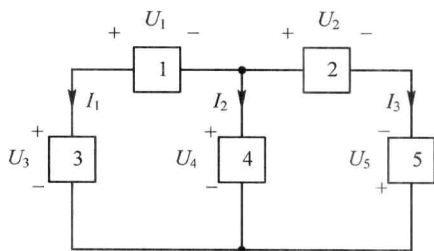


图 1.14 例 1.2 图