



新坐标大学本科电子信息类专业系列教材

电路理论基础 (第2版)

潘双来 邢丽冬 龚余才 编著



清华大学出版社



新坐标大学本科电子信息类专业系列教材

电路理论基础 (第2版)

潘双来 邢丽冬 龚余才 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书内容符合工科电工课程教学指导委员会制订的高等工业学校《电路》课程教学基本要求,满足后续开设《信号与线性系统》、《自动控制原理》等课程的电类专业的课程设置。

全书共 11 章,内容为电路基本概念和电路定律,电阻电路分析,电路定理,正弦稳态分析,具有耦合电感的电路,非线性电路,非正弦周期电流电路的稳态分析,线性动态电路的时域分析,线性动态电路的复频域分析,二端口网络,磁路和有铁心线圈的交流电路。每章附有习题,书末有部分习题答案。

本书适合高等学校电类专业学生使用,也可供相关科技人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

电路理论基础/潘双来,邢丽冬,龚余才编著. —2 版. 北京:清华大学出版社,2007.8
(新坐标大学本科电子信息类专业系列教材)

ISBN 978-7-302-15361-0

I. 电… II. ①潘… ②邢… ③龚… 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 079948 号

责任编辑:陈国新

责任校对:白 蕾

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

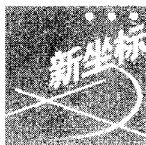
开 本:185×260 印 张:26.5 字 数:623 千字

版 次:2007 年 8 月第 2 版 印 次:2007 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:35.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:020623-01



编委会名单

顾问(按姓氏音节顺序):

- | | |
|-----|---------------|
| 李衍达 | 清华大学信息科学技术学院 |
| 邬贺铨 | 中国工程院 |
| 姚建铨 | 天津大学激光与光电子研究所 |

主任:

- | | |
|-----|-----------|
| 董在望 | 清华大学电子工程系 |
|-----|-----------|

编委会委员(按姓氏音节顺序):

- | | |
|-----|-------------------|
| 鲍长春 | 北京工业大学电子信息与控制工程学院 |
| 陈 怡 | 东南大学高教所 |
| 戴瑜兴 | 湖南大学电气与信息工程学院 |
| 方达伟 | 中国计量学院信息工程学院 |
| 甘良才 | 武汉大学电子信息学院通信工程系 |
| 郭树旭 | 吉林大学电子科学与工程学院 |
| 胡学钢 | 合肥工业大学计算机与信息学院 |
| 金伟其 | 北京理工大学信息科技学院光电工程系 |
| 孔 力 | 华中科技大学控制系 |
| 刘振安 | 中国科学技术大学自动化系 |
| 陆大缙 | 清华大学电子工程系 |
| 马建国 | 西南科技大学信息与控制工程学院 |
| 彭启琮 | 成都电子科技大学通信与信息工程学院 |
| 仇佩亮 | 浙江大学信电系 |
| 沈伯弘 | 北京大学电子学系 |

童家榕	复旦大学信息科学与技术学院微电子研究院
汪一鸣(女)	苏州大学电子信息学院
王福源	郑州大学信息工程学院
王华奎	太原理工大学信息与通信工程系
王 瑶(女)	美国纽约 Polytechnic 大学
王毓银	北京联合大学
王子华	上海大学通信学院
吴建华	南昌大学电子信息工程学院
徐金平	东南大学无线电系
阎鸿森	西安交通大学电子与信息工程学院
袁占亭	甘肃工业大学
乐光新	北京邮电大学电信工程学院
翟建设	解放军理工大学气象学院 4 系
赵圣之	山东大学信息科学与工程学院
张邦宁	解放军理工大学通信工程学院无线通信系
张宏科	北京交通大学电子信息工程学院
张 泽	内蒙古大学自动化系
郑宝玉	南京邮电学院
郑继禹	桂林电子工业学院二系
周 杰	清华大学自动化系
朱茂镒	北京信息工程学院



序言

“新坐标大学本科电子信息类专业系列教材”是清华大学出版社“新坐标高等理工教材与教学资源体系创新与服务计划”的一个重要项目。进入 21 世纪以来,信息技术和产业迅速发展,加速了技术进步和市场的拓展,对人才的需求出现了层次化和多样化的变化,这个变化必然反映到高等学校的定位和教学要求中,也必然反映到对适用教材的需求。本项目是针对这种需求,为培养层次化和多样化的电子信息类人才提供系列教材。

“新坐标大学本科电子信息类专业系列教材”面向全国教学研究型 and 教学主导型普通高等学校电子信息类专业的本科教学,覆盖专业基础课和专业课,体现培养知识面宽、知识结构新、适应性强、动手能力强的人才的需要。编写的基本指导思想可概括为:

1. 教材的类型、选题和大纲的确定尽可能符合教学需要,以提高适用性。教材类型初步确定为专业基础课和专业课,专业基础课拟按电子信息大类编写,以体现宽口径;专业课包括本专业和非本专业两种,以利于兼顾专业能力的培养与扩展知识面的需要。选题首先从目前没有或虽有但不符合教学要求的教材开始,逐步扩大。

2. 重视基础知识和基础知识的提炼与更新,反映技术发展的现状和趋势,让学生既有扎实的基础,又了解科学技术发展的现状。

3. 重视工程性内容的引入,理论和实际相结合,培养学生的工程概念和能力。工程教育是多方面的,从教材的角度,要充分利用计算机的普及和多媒体手段的发展,为学生建立工程概念、进行工程实验和设计训练提供条件。

4. 将分析和设计工具与教材内容有机结合,培养学生使用工具的能力。

5. 教材的结构上要符合学生的认识规律,由浅入深,由特殊到一般。叙述上要易读易懂,适合自学。配合教材出版多种形式的教学辅助资料,包括教师手册、学生手册、习题集和习题解答、电子课件等。

本系列教材已经陆续出版了,希望能被更多的教师和学生使用,并热忱地期望将使用过程中发现的问题和改进的建议告诉我们,通过作者和读者之间的互动,必然会形成一批精品教材,为我国的高等教育作出贡献。欢迎对编委会的工作提出宝贵意见。



前言

本书第1版于2000年出版,此次出版的第2版,主要目标是适应面向21世纪电工电子课程体系和教学内容的改革以及高等教育迅速发展的形势。参照教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会2004年制订的《电路理论基础》和《电路分析基础》课程教学基本要求,瞄准“宽口径、厚基础、强能力、高素质”的培养目标。全书共有11章。

新版保持重视基本内容、基本概念和基本分析方法的特点;明确本课程主要任务是为信号与系统、自动控制和模拟电路等后续课程及学生今后工作需要准备必要的基础知识;虽然本课程总学时有所减少,新版在教材内容上力求保持课程知识体系的完整性和系统性,并适当补充电路理论的应用范例,以启发学生的创新思维。另外,与新版配套,已出版了《电路学习指导与习题精解》、《电路实验与实践》,后者作为实验实践教材,以方便广大学生学习和教师教学参考。

新版在内容上作了一定的补充,主要有:考虑电路课程知识系统的完整性,增加了线性动态电路的复频域分析一章,拓宽了教材的适用面;加强了诸如运算放大器、谐振、滤波等知识的应用,增加了脉冲序列作用下的RC电路一节,删去了第5章中有关耦合谐振电路等内容;为配合双语教学,在正文第一次出现有关名词和术语时就给出其英文词汇,使学生在阅读时能够直接接触和熟悉相应的英文词汇,为今后阅读相关的英文资料打下基础。

新版保留了第1版中的大部分习题,补充了一些设计应用性的习题,使习题类型有所增加。书后给出了部分习题的答案。部分习题分析计算可参考与本书配套的《电路学习指导与习题精解》。

本书适合作为高等学校电气工程及其自动化、工业自动化、测试技术与仪器、生物医学工程、电子科学与技术、电子信息科学与工程等电气、电子信息类专业电路相关课程的教材和参考书,参考学时为72~96学时(不含实验)。书中加注“*”的章节内容可供课外选用或自学时参考。教材可依学时多少和学生水平的不同选择使用。

本教材的修订由潘双来主持,参加修订工作的有潘双来、邢丽冬,全书经潘双来修改、补充和定稿。本书承清华大学王树民教授主审,他对全书的修订做了仔细的审阅,提出许多宝贵意见,在此我们表示

最诚挚的谢意。

这里要感谢为本教材的建设做出重要贡献的所有编者,特别是艾燃、龚余才老师,对所有在本书的编写和出版过程中给予热情帮助和支持的同志们,我们在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中不足与错误之处,恳请广大同行和读者批评指正。意见请寄南京航空航天大学自动化学院(邮编:210016),也可发送电子邮件至 PSL307@nuaa.edu.cn。

编者

2007 年 4 月于南京



第1版前言

《电路理论基础》课程是电类专业的一门重要的技术基础课。通过本课程的学习,使学生掌握电路的基本理论和分析计算电路的基本方法,为后续课程准备必要的电路知识。

本书是在我校使用多年的自编《电路》教材的基础上重新编写而成的。为适应面向 21 世纪电工电子课程体系改革,根据工科电工课程教学指导委员会制订的《电路》课程教学基本要求,对原《电路》教材的内容进行重新编排和编写,删减了部分内容:均匀传输线全部删除;对网络图论、三相电路和状态方程等内容进行了较大的精简和重组;拉普拉斯变换和网络函数放到后续课程“信号与线性系统”中。增加了第 11 章磁路和有铁心线圈的交流电路。本教材满足电气工程与自动化、信息工程、计算机科学与技术、测控技术与仪器等电类专业的教学要求,计划教学时数 80 学时。教材内容的选择与编排力求与有关专业的前设和后续课程良好衔接。各专业可根据本专业的特点取舍教学内容。

本书初稿以讲义形式在电气工程与自动化及测控技术与仪器等专业教学中试用过六遍,经过三次修改,反映效果良好。初稿主要由张明一等编写,周璧玉编写了部分初稿,曹作维、郑步生、潘双来在初稿编写过程中做了不少工作。这次重新编写由龚余才、潘双来完成,也得到了教研室其他老师的支持和协助,可以说该书是教研室电路课程组集体劳动的成果。

编写大纲经过电路课程组的多次讨论,吸收了许多合理的建议。书稿蒙艾燃教授仔细审阅,提出许多具体修改意见,这些意见基本上都采纳了。对所有关心和热情帮助的同志,在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,本书中的缺点与错误在所难免,恳请广大同行和读者不吝赐教。

编者

1999 年 9 月



目 录

第 1 章 电路基本概念和电路定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电流和电压的参考方向	2
1.3 电功率和电能量	4
1.4 电阻元件	6
1.5 电容元件	9
1.6 电感元件	11
1.7 电压源和电流源	14
1.8 受控源	17
1.9 运算放大器	19
1.10 基尔霍夫定律	21
习题	25
第 2 章 电阻电路分析	32
2.1 电阻的联接	32
2.2 电源的模型及其等效变换	36
2.3 含受控源一端口网络的等效电阻	38
2.4 支路分析法	39
2.5 网络的线图和独立变量	42
2.6 网孔分析法和回路分析法	44
2.7 节点分析法	50
2.8 具有运算放大器的电阻电路	54
习题	58
第 3 章 电路定理	66
3.1 叠加定理	66
3.2 替代定理	70
3.3 戴维南定理和诺顿定理	71
3.4 最大功率传输定理	75
3.5 特勒根定理	76

*3.6 互易定理	79
*3.7 对偶原理	80
习题	81

第4章 正弦稳态分析..... 88

4.1 正弦量及其描述	88
4.1.1 正弦量的时域表示	88
4.1.2 正弦量的频域(相量)表示	90
4.2 正弦电路中的电阻、电感和电容	93
4.3 电路定律的相量形式 复阻抗与复导纳	96
4.4 正弦稳态功率	106
4.5 正弦稳态电路分析	111
4.6 最大功率传输	115
4.7 串联谐振电路	117
4.8 并联谐振电路	122
4.9 三相电路	126
4.9.1 电源配送	127
4.9.2 三相电源及其联接	127
4.9.3 三相负载及其联接	130
4.9.4 对称三相电路的计算	131
4.9.5 不对称三相电路的概念	134
4.9.6 三相电路的功率	136
习题	139

第5章 具有耦合电感的电路..... 152

5.1 耦合电感的伏安关系	152
5.1.1 互感系数 M 和耦合系数 k	152
5.1.2 互感电压和同名端	154
5.1.3 互感元件的串联、并联和互感消去法	155
5.2 具有耦合电感的正弦电路分析	161
5.3 空心变压器	163
5.4 理想变压器	165
*5.5 全耦合变压器和变压器的模型	168
5.5.1 全耦合变压器的等效电路	168
5.5.2 全耦合变压器的工作分析	170
5.5.3 变压器的电路模型	172
习题	173

第 6 章 非线性电路	179
6.1 非线性元件	179
6.1.1 非线性电阻元件	179
6.1.2 非线性电容元件	181
6.1.3 非线性电感元件	182
6.2 非线性电阻的串联和并联	182
6.3 非线性电阻电路的解析法和图解法	184
6.3.1 解析法	184
6.3.2 图解法	185
6.4 分段线性化法	187
6.5 小信号分析法	190
* 6.6 非线性电路方程的列写	193
6.6.1 非线性电阻电路的节点方程	193
6.6.2 非线性动态电路的状态方程	194
* 6.7 牛顿-拉夫逊法	195
习题	198
第 7 章 非正弦周期电流电路的稳态分析	202
7.1 非正弦周期函数的傅里叶级数展开式	202
7.2 非正弦周期量的有效值和平均值 平均功率	206
7.2.1 非正弦周期电流或电压的有效值和平均值	206
7.2.2 非正弦周期电流电路的平均功率	207
7.3 非正弦周期电流电路的稳态分析	209
* 7.4 对称三相电路中的高次谐波	213
习题	216
第 8 章 线性动态电路的时域分析	220
8.1 动态电路及其方程	220
8.2 初始条件和初始状态	221
8.3 一阶电路的零输入响应	224
8.3.1 RC 电路的零输入响应	224
8.3.2 RL 电路的零输入响应	227
8.4 一阶电路的零状态响应	230
8.4.1 RC 电路在恒定输入时的零状态响应	230
8.4.2 RL 电路在恒定输入时的零状态响应	232
8.4.3 RL 电路接入正弦电压的零状态响应	232
8.5 一阶电路的全响应 三要素法	236

8.6	脉冲序列作用下的 RC 电路	242
8.7	单位阶跃函数和单位冲激函数	243
8.7.1	单位阶跃函数	244
8.7.2	单位冲激函数	245
8.7.3	单位冲激函数与单位阶跃函数之间的关系	247
8.8	一阶电路的阶跃响应和冲激响应	247
8.8.1	阶跃响应	247
8.8.2	冲激响应	249
8.9	二阶电路的零输入响应	253
8.9.1	$\left(\frac{R}{2L}\right)^2 > \frac{1}{LC}$, 即 $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ (非振荡放电过程)	254
8.9.2	$\left(\frac{R}{2L}\right)^2 < \frac{1}{LC}$, 即 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ (振荡放电过程)	255
8.9.3	$\left(\frac{R}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC}$, 即 $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ (临界情况)	256
8.10	二阶电路的零状态响应和全响应	261
8.10.1	激励为阶跃函数的零状态响应	261
8.10.2	激励为冲激函数的零状态响应	262
8.10.3	二阶电路的全响应	264
*8.11	电容电压和电感电流的跃变	264
*8.12	任意激励下的零状态响应——卷积积分	267
8.12.1	卷积积分	268
8.12.2	卷积积分的图解	271
8.13	状态方程	272
8.13.1	状态和状态变量	272
8.13.2	状态方程和输出方程	273
8.13.3	状态方程的列写	274
习题		276

第 9 章 线性动态电路的复频域分析

9.1	拉普拉斯变换的定义	289
9.2	拉普拉斯变换的基本性质	291
9.3	拉普拉斯反变换	297
9.3.1	部分分式展开法	297
9.3.2	留数法(围线积分法)	301
9.4	电路定律的复频域形式	302
9.4.1	电路的 s 域模型	302
9.4.2	复频域阻抗与复频域导纳	305
9.5	应用拉普拉斯变换分析线性动态电路	306

9.6 网络函数	312
9.6.1 网络函数的定义与分类	312
9.6.2 网络函数的物理意义与求法	313
9.7 网络函数的应用	314
9.7.1 $H(s)$ 的零点和极点	314
9.7.2 $H(s)$ 的极点、零点与冲激响应	316
9.7.3 $H(s)$ 与频率特性	318
9.7.4 对给定激励 $f(t)$ 求系统的零状态响应 $y_f(t)$	322
9.7.5 根据 $H(s)$ 写出微分方程	323
*9.8 用拉普拉斯变换解微积分方程	323
习题	327
第10章 二端口网络	336
10.1 二端口网络的概念	336
10.2 二端口网络的方程和参数	337
10.2.1 Z 参数方程	338
10.2.2 Y 参数方程	339
10.2.3 传输参数方程(T 参数方程)	341
10.2.4 H 参数(混合参数)方程	342
10.2.5 二端口网络各参数之间的关系	342
10.3 二端口网络的等效电路及联接	344
10.3.1 T 形等效电路	344
10.3.2 Π 形等效电路	344
10.3.3 非互易网络的等效电路	345
10.3.4 二端口网络的联接	347
10.4 有载二端口网络和特性参数	349
10.5 回转器和负阻抗变换器	353
10.5.1 回转器	353
10.5.2 理想变压器与理想回转器的比较	356
10.5.3 负阻抗变换器	357
10.5.4 用运算放大器实现回转器和负阻抗变换器	358
*10.6 RC 有源滤波器	359
10.6.1 RC 有源低通滤波器	359
10.6.2 RC 有源高通滤波器	360
10.6.3 RC 有源带阻滤波器	360
10.6.4 RC 有源带通滤波器	361
习题	362

第 11 章 磁路和有铁心线圈的交流电路	368
11.1 磁路的概念和铁磁材料的磁特性	368
11.1.1 磁路的概念	368
11.1.2 铁磁材料的主要特性及磁滞回线	369
11.2 磁路的基本定律	372
11.2.1 磁路的欧姆定律	372
11.2.2 基尔霍夫磁通定律	373
11.2.3 基尔霍夫磁位差(磁压)定律	374
11.3 恒定磁通磁路的计算	374
11.3.1 无分支磁路的计算	374
11.3.2 分支磁路的计算	378
11.4 磁饱和与磁滞对电压、电流及磁通波形的影响	379
11.4.1 磁饱和对电压电流及磁通波形的影响	379
11.4.2 磁滞对电压电流及磁通波形的影响	381
11.5 铁心中的功率损耗	381
11.5.1 涡流和涡流损耗	381
11.5.2 磁滞损耗	382
11.5.3 磁损耗(铁损耗)	384
11.6 有铁心线圈的交流电路	384
11.7 小功率变压器的设计	388
习题	393
部分习题答案	399
参考文献	407



第 1 章

电路基本概念和电路定律

由电阻、电容、电感等集总参数元件组成的电路称为集总参数电路,简称集总电路。本书主要讨论集总电路的分析。最后第 11 章讨论与电路密切相关的磁路和有铁心线圈的交流电路。

本章首先介绍元件的伏安关系,在此基础上将阐明集总电路中各电压、电流应服从的基本规律,即它们之间的约束关系,这是分析集总电路的基本依据。

1.1 电路和电路模型

实际电路是由若干电气器件按照一定的方式相互联接而构成的总体。构成电路的器件如电阻器、电容器、线圈、晶体管、变压器及电源等统称为实际的电路部件。

实际电路的种类很多,其主要功能有二:一是实现电力的传输和分配,如电力系统;二是传输和处理各种电信号,如收音机及通信系统等。按其用途不同还可细分为:控制电路、测试电路、通信电路、电气照明电路等。不论哪种电路,随着电流在其中通过,都同时进行着电能与其他形式能量之间的相互转换过程。

电路分析并不是直接研究一个实际电路或一个实际的电路部件,而是将实际电路抽象为理想化的**电路模型(circuit model)**,用对电路模型的分析代替对实际电路的分析。在电路理论中,将这种理想化的模型称为**电路(circuit)**,可见“实际电路”和“电路”在概念上是有差异的,不可混为一谈。

因为电路模型是由理想电路元件(简称电路元件)相互联接而构成的,所以对实际电路的抽象实质上是将构成实际电路的电气器件抽象成为一些理想电路元件的组合。例如:实际电阻器通有电流时,主要表现为电能的损耗(转变为热能),因而可将它理想化为反映电能损

耗的电路元件——电阻元件；实际电感线圈在电路中主要表现为磁场能量的储存，因而可理想化为储存磁场能量的电路元件——电感元件；如果线圈的能量损耗不可忽略，则可将它抽象为电感元件和电阻元件的串联组合；电路器件的电场储能性质可用电容元件来抽象。

应当指出，用理想元件的组合来模拟实际电路，只能在一定条件下近似地反映实际器件中所发生的物理过程。根据工作条件及要求精确度的不同，同一器件可能用不同的电路元件组合来模拟。如一个电感线圈用于高频，线圈匝间的电容效应不能忽略时，表征此线圈的较精确的模型除了前述电感元件及电阻元件外，还应包含电容元件。本课程的任务不是研究如何建立实际器件的理想化模型问题，而是根据电路模型来探讨其基本定律、定理及分析方法。

上述电路元件(模型)均为集总参数元件，即认为电路中某一物理现象是集中在一个元件中发生的。例如电能损耗、磁场储能和电场储能是分别集中在电阻元件、电感元件和电容元件中进行的。于是在任何时刻从具有两个端子的集总元件的一个端子流入的电流，将恒等于从另一端子流出的电流，且该元件的端电压是单值的。由满足上述条件的元件构成的电路称为集总参数电路(circuit with lumped parameters)。然而在实际电路中，能量损耗和电磁场都是连续分布在器件内部及电路中的。若电路工作频率较低，确切地说，当实际电路的各向尺寸较之电路工作时电磁波的波长可以忽略不计时，从电磁波传输的观点看，可将该电路视为集中在空间的一个点，这样的实际电路可抽象为一个集总参数电路，或者说该电路满足集总化的条件。如电路的工作频率为 f ，电磁波的传播速度为 v ，则电磁波的波长 $\lambda = v/f$ ，电路集总化的条件就是：电路的各向尺寸 $d \ll \lambda$ 。一个实际电路的工作频率越高，电磁波波长越短，符合集总化条件的电路尺寸就越小；反之，若电路尺寸越大，则符合集总化条件的工作频率就越低。

例如，2m 长的一段馈线，在工频 50Hz 时，如馈线周围介质是空气，电磁波的速度(光速)为 3×10^8 m/s，电磁波波长 $\lambda = v/f = 6 \times 10^6$ m，可视为集总参数元件；若将此馈线作为电视机天线的引线，电视信号频率一般在 50MHz 以上，若以 $f = 50$ MHz 计算，波长 $\lambda = 6$ m，显然不能满足集总化条件。本书只研究集总参数电路。

1.2 电流和电压的参考方向

在电路分析中，不仅要求出电流或电压的大小，而且还要知道它们的方向。

电流在导线或一个电路元件中流动的实际方向是指正电荷定向移动的方向，因此在一段电路中电流的实际方向有两种可能。在电路分析中，往往对某一段电路中电流的实际方向无法预先判断，有时电流的实际方向还在不断地改变，因此很难在电路中标明电流的实际方向。由于这些原因，引入了“参考方向”的概念。参考方向(reference direction)是分析电路前任意指定的，因而所选的参考方向并不一定就是电流的实际方向。有了参考方向还必须借助电流的表达式才能说明实际方向。这里所讲的表达式，以后将会知道是根据所假定的参考方向和电路的各种约束关系求解出来的。

例如在图 1-1 中，用实线箭头标出了元件 A 与元件 B 中的电流参考方向。若解出的