

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

电路与模拟电子技术

高玉良

 高等教育出版社

TM13
144

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

电路与模拟电子技术

高玉良

高等教育出版社

内容简介

本书是根据计算机、机电等专业新的课程体系和教学内容编写的。全书分电路理论和模拟电子技术两部分,电路部分包括电路的基本概念和基本定律、电路的基本分析方法、正弦交流电路、非正弦周期电流电路和电路的暂态分析等五章,模拟部分包括二极管和晶体管、基本放大电路、放大电路中的负反馈、信号的运算与处理电路、信号产生电路和直流稳压电源等六章,为了让读者了解电子技术的最新发展,初步掌握电子电路的计算机辅助设计方法,最后专门安排一章介绍了 EDA 技术、EWB 电子工作平台和在系统可编程模拟器件的应用。

本书是教育科学“十五”国家规划课题研究成果,注重基础,兼顾应用,适合于普通高等院校计算机类、机电类及相关专业的本科教学,也可作为专科学生的教学参考书,对相关工程技术人员也是一本很好的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路与模拟电子技术/高玉良. —北京:高等教育出版社,
2004.7(2005重印)

ISBN 7-04-014536-7

I. 电... II. 高... III. ①电路理论—高等学校—教材
②模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM13
②TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 054763 号

策划编辑 刘激扬 责任编辑 李刚 封面设计 于文燕 责任绘图 朱静
版式设计 张岚 责任校对 金辉 责任印制 杨明

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网址	http://www.hep.edu.cn
总机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经销	北京蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印刷	煤炭工业出版社印刷厂		http://www.landaco.com.cn
开本	787×960 1/16	版次	2004年7月第1版
印张	22.5	印次	2005年12月第3次印刷
字数	420 000	定价	25.50元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 14536-00

总序

为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展需要,满足我国高校从精英教育向大众化教育的重大转移阶段中社会对高校应用型人才培养的各类要求,探索和建立我国高等学校应用型人才培养体系,全国高等学校教学研究中心(以下简称“教研中心”)在承担全国教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上,组织全国100余所以培养应用型人才为主的高等院校,进行其子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索,在高等院校应用型人才培养的教学内容、课程体系研究等方面取得了标志性成果,并在高等教育出版社的支持和配合下,推出了一批适应应用型人才培养需要的立体化教材,冠以“教育科学‘十五’国家规划课题研究成果”。

2002年11月,教研中心在南京工程学院组织召开了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题立项研讨会。会议确定由教研中心组织国家级课题立项,为参加立项研究的高等院校搭建高起点的研究平台,整体设计立项研究计划,明确目标。课题立项采用整体规划、分步实施、滚动立项的方式,分期分批启动立项研究计划。为了确保课题立项目标的实现,组建了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题领导小组(亦为高校应用型人才立体化教材建设领导小组)。会后,教研中心组织了首批课题立项申报,有63所高校申报了近450项课题。2003年1月,在黑龙江工程学院进行了项目评审,经过课题领导小组严格的把关,确定了首批9项子课题的牵头学校、主持学校和参加学校。2003年3月至4月,各子课题相继召开了工作会议,交流了各校教学改革的情况和面临的具体问题,确定了项目分工,并全面开始研究工作。计划先集中力量,用两年时间形成一批有关人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等理论研究成果报告和 In 研究报告基础上同步组织建设的反映应用型人才特色的立体化系列教材。

与过去立项研究不同的是,“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题研究在审视、选择、消化与吸收多年来已有应用型人才探索与实践成果基础上,紧密结合经济全球化时代高校应用型人才培养工作的实

实际需要,努力实践,大胆创新,采取边研究、边探索、边实践的方式,推进高校应用型人才培养工作,突出重点目标,并不断取得标志性的阶段成果。

教材建设作为保证和提高教学质量的重要支柱和基础,作为体现教学内容和教学方法的知识载体,在当前培养应用型人才中的作用是显而易见的。探索、建设适应新世纪我国高校应用型人才培体系需要的教材体系已成为当前我国高校教学改革和教材建设工作面临的十分重要的任务。因此,在课题研究过程中,各课题组充分吸收已有的优秀教学改革成果,并和教学实际结合起来,认真讨论和研究教学内容和课程体系的改革,组织一批学术水平较高、教学经验较丰富、实践能力较强的教师,编写出一批以公共基础课和专业、技术基础课为主的有特色、适用性强的教材及相应的教学辅导书、电子教案,以满足高等学校应用型人才的需要。

我们相信,随着我国高等教育的发展和高校教学改革的不断深入,特别是随着教育部“高等学校教学质量和教学改革工程”的启动和实施,具有示范性和适应应用型人才培的精品课程教材必将进一步促进我国高校教学质量的提高。

全国高等学校教学研究中心

2003年4月

前言

近几年来,随着各校教学计划的调整,越来越多的高校将计算机、机电等专业的“电路”和“模拟电路”两门课程合成一门——“电路与模拟电子技术”,调整了教学要求,教学时数也进行了压缩。本书就是在这个背景下根据计算机类、机电类专业新的课程体系和教学内容编写的。

本书分电路基础和模拟电子技术两部分,电路部分包括电路的基本概念和基本定律、电路的基本分析方法、正弦交流电路、非正弦周期电流电路和电路的暂态分析等五章,主要介绍电路的基本概念、基本理论和基本分析方法;模拟部分包括半导体二极管和晶体管、基本放大电路、放大电路的负反馈、信号的运算与处理、信号产生电路和直流稳压电路等六章,主要介绍各种应用电路的分析、设计,其中放大电路以分立元件电路为主,其他应用电路以集成电路为主。在教学要求的取舍上,强调基本概念、基本理论、基本的电子电路分析方法,并力图使两部分内容有机结合起来。考虑到教学时数的限制,有些内容安排为例题和习题的形式。

为了让学生了解电子技术的新发展,掌握最基本的 EDA 技术,本书最后一章介绍了 EDA 技术基础、EWB 软件、可编程模拟器件及应用。

本书按课程总学时 80 学时编写,各章参考学时如下:第 1 章为 4 学时;第 2 章为 8~10 学时;第 3 章为 10~12 学时;第 4 章为 2 学时;第 5 章为 4~6 学时;第 6 章为 4 学时;第 7 章为 10~14 学时;第 8 章为 4 学时;第 9 章为 4~6 学时;第 10 章为 4 学时;第 11 章为 4~6 学时;第 12 章为 2 学时。除理论教学外,还应安排一定数量的实验,包括应用 EWB 的设计、仿真实验。

华南理工大学殷瑞祥教授审阅了本书的全稿,提出了不少很好的修改意见,对此谨致以衷心的感谢。刘焰、付润江、易国华等同志参加了本书的部分编写工作,刘开健、刘畅同志为本书的编写提供了不少帮助,在此表示感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在缺点和错误,恳请使用本书的教师和学生提出意见和建议,以便今后不断改进。

编者

2004. 3

第1章 电路的基本概念和基本定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.1.1 电路	1
1.1.2 电路模型	2
1.2 电路中的基本物理量	3
1.2.1 电流、电压及其参考方向	3
1.2.2 电位	5
1.2.3 电功率和电能	5
1.3 电阻、电感、电容元件	7
1.3.1 电阻元件	7
1.3.2 电感元件	8
1.3.3 电容元件	9
1.4 电压源和电流源	10
1.4.1 电压源	10
1.4.2 电流源	11
1.4.3 电源的功率	12
1.5 基尔霍夫定律	14
1.5.1 基尔霍夫电流定律	14
1.5.2 基尔霍夫电压定律	16
习题	17
第2章 电路的基本分析方法	20
2.1 电阻电路的等效变换	20
2.1.1 电路等效变换的概念	20
2.1.2 电阻的等效变换	21
2.1.3 电源的等效变换	26
2.2 电阻电路的一般分析方法	30
2.2.1 支路电流法	30

2.2.2	网孔电流法	31
2.2.3	结点电压法	33
2.3	电路定理	37
2.3.1	叠加定理	37
2.3.2	替代定理	40
2.3.3	等效电源定理	41
2.4	受控源和含受控源电路的分析	46
2.4.1	受控源	46
2.4.2	含受控源电路的分析	48
	习题	51
第3章	正弦交流电路	57
3.1	正弦交流电的基本概念	57
3.1.1	正弦交流电的三要素	58
3.1.2	正弦交流电的有效值	58
3.1.3	同频率正弦交流电的相位差	59
3.2	正弦量的相量表示	61
3.2.1	复数的表示形式和四则运算	61
3.2.2	正弦量的相量表示法	63
3.3	正弦交流电路中的电阻、电感和电容元件	65
3.3.1	电阻元件的交流电路	66
3.3.2	电感元件的交流电路	68
3.3.3	电容元件的交流电路	70
3.4	基尔霍夫定律的相量形式	73
3.4.1	KCL的相量形式	73
3.4.2	KVL的相量形式	74
3.5	阻抗与导纳	76
3.5.1	阻抗	76
3.5.2	导纳	77
3.5.3	阻抗与导纳的串并联	77
3.5.4	阻抗与导纳的等效变换	80
3.6	一般正弦交流电路的计算	81
3.7	正弦交流电路的功率	86
3.7.1	平均功率和功率因素	86
3.7.2	无功功率和视在功率	88
3.7.3	功率因数的提高	89

3.8 谐振电路	91
3.8.1 串联谐振	91
3.8.2 并联谐振	94
3.9 互感电路	96
3.9.1 耦合电感及其伏安特性	96
3.9.2 互感电路的计算	99
3.9.3 变压器	101
3.10 三相交流电路	104
3.10.1 三相交流电源	104
3.10.2 对称三相电路的计算	106
3.10.3 不对称三相电路的计算	109
3.10.4 三相电路的功率	111
习题	114
第4章 非正弦周期电流电路	120
4.1 非正弦周期量的分解	120
4.2 非正弦周期量的有效值、平均值和平均功率	123
4.2.1 有效值	123
4.2.2 平均值	124
4.2.3 平均功率	124
4.3 非正弦周期电流电路的计算	125
习题	127
第5章 电路的暂态分析	128
5.1 换路定则及初始值的计算	128
5.1.1 换路定则	128
5.1.2 初始值的计算	129
5.2 一阶电路的零输入响应	130
5.2.1 RC电路的零输入响应	131
5.2.2 RL电路的零输入响应	133
5.3 一阶电路的零状态响应	135
5.3.1 RC电路的零状态响应	135
5.3.2 RL电路的零状态响应	136
5.4 一阶电路的全响应及三要素分析法	138
5.5 一阶电路的阶跃响应	142
5.5.1 阶跃函数	142
5.5.2 阶跃响应	144

5.6	一阶电路的正弦响应	145
5.7	二阶电路的零输入响应	147
	习题	151
第6章	二极管和晶体管	155
6.1	半导体基础知识	155
6.1.1	本征半导体	155
6.1.2	杂质半导体	157
6.1.3	PN结	158
6.2	二极管	160
6.2.1	二极管的结构与特性	160
6.2.2	二极管的主要参数	161
6.3	稳压二极管	162
6.3.1	稳压二极管的伏安特性	163
6.3.2	稳压二极管的主要参数	163
6.3.3	稳压二极管稳压电路	164
6.4	晶体管	165
6.4.1	晶体管的结构与电流放大原理	165
6.4.2	晶体管的特性曲线	168
6.4.3	晶体管的微变等效电路	170
6.4.4	晶体管的主要参数	172
	习题	173
第7章	基本放大电路	176
7.1	共射放大电路	176
7.1.1	放大电路的基本概念	176
7.1.2	共射放大电路的组成和工作原理	178
7.2	放大电路的基本分析方法	179
7.2.1	放大电路的静态分析	179
7.2.2	放大电路的动态分析	180
7.3	静态工作点的稳定	186
7.4	共集放大电路	189
7.5	功率放大电路	192
7.5.1	功率放大电路概述	192
7.5.2	互补对称放大电路	194
7.6	多级放大电路	198
7.6.1	多级放大电路的耦合	198

7.6.2 多级放大电路的动态分析	200
7.7 差分放大电路	202
7.7.1 差分放大电路的工作原理	202
7.7.2 典型差分放大电路	203
7.7.3 理想电流源式的差分放大电路	205
7.8 集成运算放大电路	208
7.8.1 集成运算放大器的组成	209
7.8.2 集成运算放大电路的主要参数与分类	210
7.8.3 理想运算放大电路及特点	213
7.9 场效晶体管及其放大电路	215
7.9.1 绝缘栅场效晶体管	215
7.9.2 场效晶体管的主要参数及微变等效电路	217
7.9.3 场效晶体管放大电路	219
习题	222
第8章 放大电路中的负反馈	228
8.1 反馈的基本概念和分类	228
8.1.1 反馈的基本概念	228
8.1.2 反馈的分类	229
8.1.3 负反馈的四种组态	230
8.1.4 反馈放大电路的基本方程	231
8.2 负反馈对放大电路性能的影响	233
8.2.1 提高放大倍数的稳定性	233
8.2.2 减小非线性失真和抑制干扰	233
8.2.3 展宽频带	234
8.2.4 负反馈对输入电阻和输出电阻的影响	236
8.3 负反馈放大电路的分析计算	237
习题	241
第9章 信号的运算与处理电路	244
9.1 运算电路	244
9.1.1 比例运算电路	244
9.1.2 加法运算电路	246
9.1.3 减法运算电路	247
9.1.4 积分和微分运算电路	250
9.1.5 对数和指数运算电路	252
9.1.6 乘法和除法运算电路	253

9.2 有源滤波电路	255
9.2.1 滤波电路概述	255
9.2.2 低通滤波器	256
9.2.3 高通滤波器	259
9.2.4 带通滤波器	260
9.2.5 带阻滤波器	261
9.3 电压比较器	263
9.3.1 过零比较器	263
9.3.2 单门限比较器	264
9.3.3 滞回比较器	265
9.3.4 窗口比较器	267
习题	268
第10章 信号产生电路	274
10.1 产生正弦振荡的条件	274
10.2 RC 正弦振荡电路	275
10.3 LC 正弦振荡电路	279
10.3.1 变压器反馈式 LC 振荡电路	279
10.3.2 三点式 LC 振荡电路	280
10.3.3 石英晶体振荡电路	281
10.4 非正弦波产生电路	283
10.4.1 矩形波产生电路	283
10.4.2 三角波产生电路	285
10.4.3 锯齿波产生电路	286
10.4.4 压控振荡电路	287
习题	288
第11章 直流稳压电源	291
11.1 单相整流电路	291
11.1.1 单相半波整流电路	292
11.1.2 单相桥式整流电路	292
11.2 滤波电路	293
11.2.1 电容滤波电路	294
11.2.2 电感滤波电路	295
11.3 串联型稳压电路	296
11.3.1 电路的组成和工作原理	296
11.3.2 输出电压的调节范围	297

11.3.3 保护电路	297
11.3.4 技术指标	298
11.4 集成稳压器	298
11.5 开关型稳压电路	301
习题	303
第12章 EDA 技术基础	306
12.1 EDA 技术概述	306
12.1.1 EDA 简介	306
12.1.2 EDA 的设计方法	307
12.1.3 常用的 EDA 软件简介	308
12.2 EWB 及其应用	309
12.2.1 EWB 简介	309
12.2.2 EWB 的软件菜单	312
12.2.3 EWB 的虚拟仪器	317
12.2.4 EWB 应用举例	319
12.3 在系统可编程模拟器件及其应用	323
12.3.1 概述	323
12.3.2 在系统可编程器件的基本组成	323
12.3.3 在系统可编程器件的应用举例	324
参考答案	330
名词索引	337
参考文献	344

第 1 章

电路的基本概念和基本定律

电路理论是电工技术和电子技术的基础,它的研究对象是电路模型。本章首先介绍电路和电路模型的概念,然后介绍电路的一些基本物理量,引入电流、电压的参考方向的概念。在此基础上,介绍电阻、电感、电容、电压源和电流源等常用的电路元件及其电流与电压的关系即伏安特性,最后给出电路的基本定律——基尔霍夫定律。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路

电路是指为了某种需要由若干电气器件按一定方式连接起来的电流的通路。

电路的结构形式及所具有的功能是多种多样的。按电路的功能,电路可分为两大类,第一类是实现电能的传输和转换的电路。最简单的电路之一是手电筒电路,它由干电池、电珠、连接导线及开关组成,如图 1.1.1(a)所示。

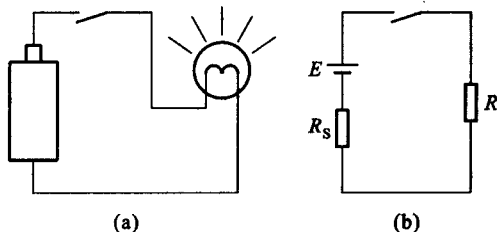


图 1.1.1 手电筒电路及其电路模型

干电池是一种电源,它将化学能转换成电能,在其正、负极间保持一定的电压,为电路提供电能;电珠由电阻丝制成,当电流流过电阻丝时,电阻丝会发热而使电珠发光,它是一种消耗电能的器件。通常把消耗电能的用电器件或设备称为负载。连接导线构成电流的通路,开关则起控制电路接通和断开的作用,开关和导线是连接电源和负载的中间环节。

第二类电路是实现信号的传递和处理的电路。常见的电路如扩音机。扩音机由话筒、放大电路、扬声器组成。话筒将声音变成电信号,经过放大电路放大,送到扬声器再变成声音输出。这里话筒是产生信号的设备,称为信号源,它相当于电源,扬声器是接收和转换信号的设备,也就是负载。由于话筒输出的电信号很微弱,不足以推动扬声器发音,需要采用中间环节对信号进行放大和处理。

由此可见,电路主要由电源、负载以及从电源到负载的中间环节三部分组成。电源是提供电能或电信号的设备,负载是用电或输出电信号的设备,中间环节用于传输电能或传输、处理电信号,一般来说,中间环节是电路中最复杂的部分。在电路分析中,为方便起见,通常将信号源或电源输出的电压或电流称为激励,在电路中由激励而产生的电压或电流称为响应。有时,根据激励和响应的因果关系,激励可以称为输入,响应可以称为输出。

1.1.2 电路模型

组成电路的实际器件,其电磁性能的表现往往是多方面交织在一起的,例如常用的电阻器,它不仅消耗电能,还会在其周围产生一定的磁场;再如电容器,它不仅可以储存电场能,还会因其介质不是理想的绝缘体而产生漏电,从而消耗电能。这样用数学来描述电阻器或电容器时就会很复杂,不利于对电路进行深入分析。而在使用电阻器和电容器时,电阻器一般只利用其消耗电能的功能,电容器一般只利用其储存电场能的功能,而忽略两者其他次要的性能。

基于上述考虑,可以定义一些理想化的电路元件,每一种电路元件只体现一种基本电磁现象,具有精确和简单的数学定义,这些元件称为理想元件。电路分析中常用的理想元件有电阻、电感、电容、理想电压源和理想电流源等,它们将在后面几节中分别介绍。

定义了理想元件后,在一定条件下,电路中的实际器件就可以用理想元件及它们的组合来表示,这就是元件模型。一个实际器件可以有多个元件模型,按电路分析要求的精度和工作条件来选择一种模型。一般来说,模型越复杂,精度就越高,分析就越困难。例如一个电感线圈,一般情况下可以看作是理想电感(简称电感)。当通过的电流的频率较低时,就应考虑线圈的能量损耗,这时可把线圈看作是电感和电阻的串联,如图 1.1.2(b)所示。如果电流的频率很高,要求的精度也较高时,则应考虑电场的影响,电路模型如图 1.1.2(c)所示。

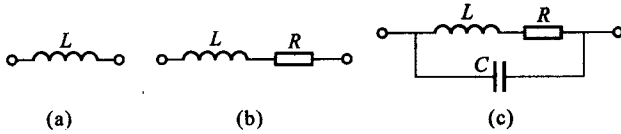


图 1.1.2 电感线圈模型

一个实际器件用元件模型来表示,总是在一定的假设条件下,即器件的尺寸远小于正常工作频率所对应的波长,这就是集总假设。因此理想元件也称为集总参数元件。举例说,我国电力用电的频率是 50 Hz,对应的波长为 6 000 km,对以此为工作频率的实验室设备来说,其尺寸与该波长相比可忽略不计,因而用集总参数的概念是完全可以的,但对远距离的输电线来说,就必须考虑电场、磁场沿电路分布的情况,不能用集总参数描述,而只能用分布参数描述,通过电磁场理论求解。

当电路中的实际器件都用理想元件或理想元件的组合表示后,由理想元件构成的电路图就称为实际电路的电路模型。在手电筒电路中,电珠用电阻表示,干电池用电压源表示,开关和导线可视为理想导体,这样手电筒电路的电路模型如图 1.1.1(b)所示。

电路理论研究的对象是由理想元件构成的电路模型,目的是找出电路中具有普遍意义的规律和电路分析的一般方法。

1.2 电路中的基本物理量

电路中的基本物理量有电流、电压及功率。

1.2.1 电流、电压及其参考方向

带电粒子有规律的运动形成电流。电流的大小用电流强度(简称电流)表示,其定义为:单位时间内通过导体截面的电荷量。用符号 i 表示电流强度,则表示式为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.1)$$

如果电流强度不随时间变化,即 $\frac{dq}{dt}$ 为常数,则这种电流称为直流电流。直流电流用大写字母 I 表示,表示式为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.2.2)$$

在国际单位制中,电流强度的单位是安[培](A),习惯上将正电荷运动的方向规

定为电流的方向,电流的方向是客观存在的。

在简单的电路中,可以很容易地直接确定电流的方向,但在较复杂的电路中,就很难预先判定电流的方向。特别是在交流电路中,电流的大小和方向均随时间变化,很难表示出实际方向。在这种情况下,可以事先任意假定某一方向为电流的正方向,亦即参考方向,并用箭头标出,根据假定的电流正方向进行计算,若求得的电流是个正值,说明电流的实际方向与参考方向一致;若求得的电流是一个负值,则说明实际方向与参考方向相反,如图 1.2.1 所示。

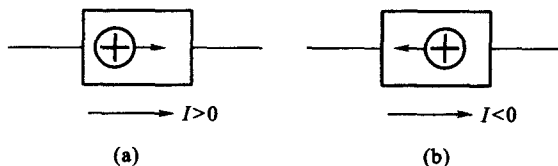


图 1.2.1 电流的实际方向与参考方向

电荷之所以能在电路中流动,是由于电荷在电路中受电场力的作用,即电场力对电荷作了功。为了衡量电场力做功的大小,引入电压这一物理量,单位正电荷从 a 点移到 b 点时电场力作的功称为 ab 两点间的电压,表达式为

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1.2.3)$$

如果电压不随时间变化,即 $\frac{dW}{dq}$ 为常数,则这种电压称为直流电压。直流电压用大写字母 U 表示,表达式为

$$U_{ab} = \frac{W}{Q} \quad (1.2.4)$$

在国际单位制中,电压的单位是伏[特](V)。

式(1.2.3)中, dW 为 dq 从 a 点移至 b 点时电场力作的功,也就是 dq 在运动过程中失去的电势能。按电磁学理论,电荷在电场中某一点的电势能等于该点的电位与电量的乘积。因此在 dq 为正值时,若 $dW > 0$,则表示 a 点的电位比 b 点高,故电压又称为电位差。电压的实际方向由高电位点指向低电位点,即电位降低的方向。在电路分析中,由于往往难于事先判定元件两端电压的实际方向,因此也要像电流一样先任意设定某一方向为电压的正方向,即参考方向。若计算结果电压为正值,说明电压的实际方向与参考方向一致;若为负值,则说明实际方向与参考方向相反。电压的参考方向可采用极性表示,在元件两端标出正(+)、负(-)极性,从正极指向负极的方向就是电压的参考方向,如图 1.2.2(a)所示。电压的参考方向还可用双下标表示,如 U_{ab} 表示电压的参考方向是由 a 指向 b,如

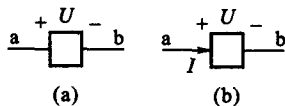


图 1.2.2 电压的参考方向
和关联参考方向