

21世纪高等学校计算机系列规划教材



浙江省普通高校“十三五”新形态教材

电路与模拟电子技术 基础教程

龙胜春 主编

池凯凯 吴高标 李敏 孙惠英 副主编

清华大学出版社



21 世纪高等学校计算机系列规划教材

电路与模拟电子技术基础教程

龙胜春 主编

池凯凯 吴高标 李敏 孙惠英 副主编



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书分为电路理论与模拟电子线路两部分。电路理论部分主要介绍电路的基本概念及基本定律,内容包括直流电路的各种分析方法、正弦交流电路和过渡过程分析;模拟电子线路部分主要介绍模拟电路的基本概念和基本分析方法,内容包括半导体器件、分立元件放大电路分析、集成运放的组成及应用等。本书内容简明扼要,分析深入浅出,给出了各种解题技巧及实例应用,实用性强,便于自学。

本书既可作为高等院校计算机、机械、测控等非电类专业的专业课教材,也可作为工程技术人员的自学参考书。

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 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电路与模拟电子技术基础教程/龙胜春主编. —北京:清华大学出版社,2018

(21世纪高等学校计算机系列规划教材)

ISBN 978-7-302-50737-6

I. ①电… II. ①龙… 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(2018)第 172068 号

责任编辑:孟毅新

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘 静

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62770175-4278

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20 字 数:454千字

版 次:2018年9月第1版 印 次:2018年9月第1次印刷

定 价:49.00元

产品编号:077433-01

前 言

本书是高等院校计算机、机械、测控、医学电子信息等相关专业的电子类基础课程教材。众所周知，“电路理论”和“模拟电子技术”是这些学科和专业不可缺少的硬件基础课，是“数字逻辑电路”“计算机组成原理”和“微机原理”等课程的先修课程。但根据多年的教学经验总结，笔者认为无论从课时还是教学内容上，都不需要两门课程同时开设，但又不能缺少每门课程中必需的理论知识，为适应这一需求，我们编写了本书。

本书编写的原则是“基础概念清楚、必需理论完备、实用示例丰富、读者自学方便”。在编写时力求条理清晰，简明扼要。本书具有以下特点。

(1) 本书突出了电路理论的基本概念和常用分析方法，精简了传统电路理论中的内容，摒弃了电路分析中复杂的瞬态响应分析。

(2) 增加了半导体放大电路的分析设计实例，以缩小理论教学与实际应用之间的距离，努力使技术理论与工程实践相结合。

(3) 在体现内容先进性的同时，对基础理论部分适当加强。加强了对半导体器件的工作原理、电路模型的分析 and 讲解，便于学生和工程人员的自学。笔者认为，只有学好电子器件，对电子线路的理解和掌握才更容易、更深刻，今后使用工具软件设计与开发电路才能更加自如。

(4) 详略有别是本书面向素质教育在内容处理上的一种策略性尝试。书中多数内容讲解详细深入、浅显易懂，并伴有大量例题与习题；另外，有的内容只作简单介绍甚至点到为止，有的则作为“印象知识”，这样既可以避免内容的简单重复，又可以给学生留有一定的思考或探求空间，以利于培养学生的形象思维和举一反三的能力。

本书由浙江工业大学计算机科学与技术学院、台州学院数信学院计算机系、浙江中医药大学医学技术学院联合申报“浙江省普通高校十三五新形态教材”，由龙胜春任主编，池凯凯、吴高标、李敏、孙惠英任副主编。在编写本书时得到了浙江工业大学教科学院顾伟骝教授的鼎力支持，在此一并表示感谢。

欢迎读者对本书不足之处提出批评指正。

编 者

2018年6月

目 录

第一部分 电路理论基础

第 1 章 电路模型和电路定律	3
1.1 电路的组成及其作用	3
1.2 电路参数	4
1.2.1 电流及其参考方向	5
1.2.2 电压及其参考方向	6
1.2.3 电功率和电能	8
1.3 电路的三种工作状态	9
1.3.1 开路状态	9
1.3.2 有载状态	9
1.3.3 短路状态	9
1.4 无源电路元件	10
1.4.1 电阻元件	10
1.4.2 电感元件	10
1.4.3 电容元件	11
1.5 有源电路元件	12
1.5.1 独立电源	12
1.5.2 实际电源模型及其等效变换	13
1.5.3 受控源	15
1.6 基尔霍夫定律	16
1.6.1 支路、节点、回路及网孔	16
1.6.2 基尔霍夫电流定律	17
1.6.3 基尔霍夫电压定律	18
1.7 电阻的串联和并联	21
习题 1	25
第 2 章 线性电阻电路分析	29
2.1 支路电流法	29

2.2	叠加原理	31
2.3	等效电源定理	34
2.3.1	无源二端网络输入电阻	34
2.3.2	戴维宁定理	36
2.3.3	诺顿定理	39
2.4	分析方法应用实例	42
2.4.1	含电流源的支路电流分析法应用	42
2.4.2	开口电路的 KVL 应用	43
2.4.3	含受控源的叠加原理应用	44
2.4.4	等效电源定理在最大功率传输中的应用	46
	习题 2	48
第 3 章 正弦稳态电路分析		51
3.1	正弦交流电的基本概念	51
3.1.1	周期与频率	52
3.1.2	幅值与有效值	52
3.1.3	初相	53
3.2	正弦交流电的表示法	55
3.2.1	复数	55
3.2.2	旋转矢量法	57
3.2.3	相量表示法	57
3.3	单一元件的交流电路	59
3.3.1	纯电阻电路	59
3.3.2	纯电感电路	61
3.3.3	纯电容电路	63
3.3.4	单一元件交流电路特性比较	65
3.4	正弦交流电路分析	67
3.4.1	正弦交流电路无源二端网络阻抗	67
3.4.2	阻抗的串联与并联	68
3.4.3	正弦稳态电路的功率	70
3.4.4	功率因数的提高	72
3.5	正弦交流电路分析应用	75
3.5.1	正弦交流电路的相量解析法	75
3.5.2	正弦交流电路的相量图分析法	80
3.5.3	正弦交流电路分析的实际应用	82
	习题 3	84

第 4 章 线性动态电路的时频分析	90
4.1 过渡过程和换路定律	90
4.1.1 过渡过程	90
4.1.2 换路定律	91
4.2 一阶动态电路的瞬态响应	93
4.2.1 一阶动态电路的零输入响应	94
4.2.2 一阶动态电路的零状态响应	98
4.2.3 一阶动态电路的全响应	100
4.3 一阶动态电路的三要素法	101
* 4.4 电路的谐振	103
4.4.1 RLC 串联谐振电路	104
4.4.2 RLC 并联谐振电路	105
* 4.5 频率特性	106
4.5.1 幅频特性与幅频特性曲线	106
4.5.2 相频特性与相频特性曲线	107
4.5.3 通频带	108
习题 4	109

第二部分 模拟电子线路分析

第 5 章 电子技术基础绪论	115
5.1 模拟信号、模拟电路及模拟系统	115
5.1.1 模拟信号与模拟电路	115
5.1.2 模拟系统	116
5.2 模拟电子技术的发展及应用	116
习题 5	117
第 6 章 常用半导体器件	118
6.1 半导体基础知识和 PN 结	118
6.1.1 半导体的导电特性	118
6.1.2 N 型半导体和 P 型半导体	119
6.1.3 PN 结	119
6.1.4 PN 结的单向导电性	120
6.2 半导体二极管	121
6.2.1 基本结构	121
6.2.2 二极管的伏安特性	122
6.2.3 主要参数	123

6.2.4	二极管的电路模型	125
6.2.5	二极管的应用举例	128
6.3	特殊二极管	129
6.3.1	稳压二极管	129
6.3.2	光电二极管	132
6.3.3	发光二极管	132
6.4	晶体三极管	133
6.4.1	晶体三极管基本结构	133
6.4.2	电流分配和电流放大原理	136
6.4.3	晶体管的特性	138
6.4.4	晶体管的参数	143
6.4.5	晶体管的简单应用举例	145
6.5	特殊晶体管	146
6.5.1	光电晶体管	146
6.5.2	光电耦合器	146
6.6	MOS 绝缘栅场效应管	146
6.6.1	NMOS 场效应管的结构及工作原理	147
6.6.2	NMOS 场效应管的特性	149
6.6.3	NMOS 场效应管的参数	151
6.6.4	场效应管的应用举例	151
	习题 6	152
第 7 章	半导体放大电路分析基础	157
7.1	放大电路的性能表征	157
7.2	基本交流放大电路的直流分析	161
7.2.1	基本交流放大电路的组成	162
7.2.2	基本交流放大电路的直流工作点分析	162
7.2.3	基本交流放大电路的直流传输特性分析	170
*7.2.4	基本交流放大电路的直流敏感度分析	171
7.3	基本交流放大电路的交流分析	171
7.3.1	小信号放大的基本概念	171
7.3.2	交流小信号图解分析法	173
7.3.3	微变等效电路分析法	175
7.3.4	频率响应	181
7.4	静态工作点稳定电路	182
7.5	共集电极放大电路	185

7.6	场效应管放大电路	187
7.7	差动放大电路	190
7.7.1	多级放大电路的信号耦合	190
7.7.2	差动放大电路	194
	习题 7	201
第 8 章	功率放大电路	205
8.1	功率放大器的特点及分类	205
8.1.1	功率放大器的特点	205
8.1.2	功率放大器的分类	206
8.2	AB 类双电源互补功放电路	209
8.3	常用集成功放电路	210
8.3.1	双极型集成功放 LM380/LM384	210
8.3.2	BiCMOS 集成功放 SHM1150	211
8.3.3	其他常用功放芯片	211
	习题 8	213
第 9 章	放大电路中的反馈	216
9.1	反馈技术基础	216
9.2	交流负反馈的四种基本类型	218
9.2.1	电压串联负反馈	219
9.2.2	电压并联负反馈	220
9.2.3	电流串联负反馈	221
9.2.4	电流并联负反馈	222
9.2.5	反馈组态的判断	223
9.3	负反馈对放大器性能的影响	226
9.3.1	提高放大倍数稳定性	226
9.3.2	改善非线性失真	227
9.3.3	抑制噪声	227
9.3.4	扩展频带	228
9.3.5	改变输入阻抗和输出阻抗	228
*9.4	引入负反馈带来的问题	228
	习题 9	230
第 10 章	集成运算放大电路	235
10.1	集成运放概述	235
10.1.1	集成运放的组成	235
10.1.2	集成运放的参数	237
10.1.3	集成运放的电压传输特性	238

10.2	理想集成运算放大器	238
10.3	集成运放组成的负反馈	239
10.4	集成运放的应用	241
10.4.1	基本运算电路	242
10.4.2	采样保持电路	249
10.4.3	有源滤波电路	249
10.4.4	电压比较器	253
10.4.5	信号发生器	256
10.5	集成运放的实例应用	260
10.6	双极型通用集成运放	261
10.6.1	集成运放电路的识图	261
10.6.2	741 系列电路解读	262
10.6.3	741 系列运放电路的直流分析	265
10.6.4	741 系列运放电路的交流分析	267
10.6.5	集成运放的性能参数	273
	习题 10	274
第 11 章 直流稳压电源		278
11.1	单相整流电路	278
11.1.1	单相半波整流电路	278
11.1.2	单相全波整流电路	280
11.1.3	单相桥式整流电路	281
11.2	滤波电路	284
11.2.1	电容滤波电路	284
11.2.2	电感滤波电路	286
11.3	稳压管稳压电路	287
11.3.1	电路组成	287
11.3.2	稳压原理	288
11.4	串联型直流稳压电路	288
11.4.1	电路组成	288
11.4.2	稳压原理	290
11.4.3	输出电压可调节范围	290
11.4.4	三端固定输出集成稳压器	290
11.4.5	三端可调输出集成稳压器	293
11.5	开关型直流稳压电路	294
11.5.1	特点及分类	294
11.5.2	串联型开关稳压电路	295
11.5.3	并联型开关稳压电路	297

11.6 晶闸管及可控整流电路	298
11.6.1 单向晶闸管的结构和工作原理	298
11.6.2 单相可控半波整流电路	299
11.6.3 单相半控桥式整流电路	301
习题 11	302
参考文献	305

电路理论基础

卷一 附錄

申 翹 野 金 基 斷

第一卷 西歐探險者馬察卡

第二卷 非洲探險者馬察卡

第三卷 非洲探險者馬察卡

第四卷 非洲探險者馬察卡

电路模型和电路定律

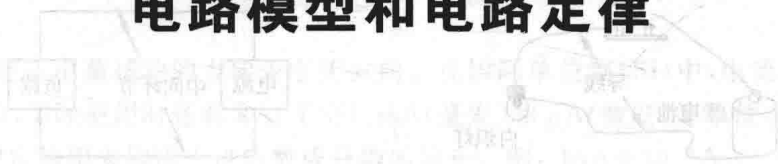


图 1.1(a) 所示是一个最简单的实际电路,它由三部分组成:①干电池;②白炽灯;

随着科学技术的发展,电工电子技术已被广泛应用于生产领域的各个部门。尽管目前使用的电子产品、电气设备种类日趋繁多,但绝大部分设备仍是由各式各样的基本电路组成的。因此,掌握电路的分析和计算方法是十分重要的,它是我们进一步学习电子技术的基础。

本章介绍电路模型、电路元件的概念,重点掌握电流和电压参考方向, R 、 L 、 C 元件的电流电压关系,依据基尔霍夫定律分析元件间的拓扑约束关系。

1.1 电路的组成及其作用

人们在工作和生活中会遇到很多实际电路,这些电路都是由一些电气元件或电气设备联接而成,能实现电能的传输、转换或者信号的传递和处理。其中电能或电信号的发生器称为电源,用电设备称为负载。由于电路中的电压、电流是在电源的作用下产生的,因此电源又称为激励源或者激励。由激励在电路中产生的电压、电流称为响应。有时根据激励与响应之间的因果关系,把激励称为输入,响应称为输出。

本书第一部分介绍的是电路理论的基础,它为第二部分的模拟电子线路分析及后续课程学习做准备。电路理论主要研究电路中发生的电磁现象,并用电流、电压、电荷、磁通等物理量描述其中的过程。电路理论中的电路分析主要任务是当电路的结构、参数及其他组件已经给定的条件下,对电路的电压、电流和功率进行分析计算。

本书讨论的对象不是实际电路,而是实际电路的电路模型。任何一个实际器件,在电流或电压作用下都包含有能量的消耗、电场能量的储存和磁场能量的储存三种基本效应,这些基本效应互相交织在一起,使实际电气器件呈现很复杂的性状。然而上述基本效应在电气器件上的表现又不是均衡的,在一定条件下,其中的某一种效应可能表现较强,处于主导地位,而别的效应可能表现较弱,处于次要地位,即使将其忽略,也不致使理论分析结果与实际情况有本质的差异。通常把呈现主导的单一电磁性质的电路元件称为理想电路元件。本书涉及的电路均指由理想电路元件构成的电路模型,同时把理想电路元件简称为电路元件,电路模型简称为电路。

图 1.1(a)所示是一个最简单的实际电路,它由三部分组成:①干电池;②白炽灯;

③连接导线及开关等。这三部分分别称为电源、负载和中间环节,它们是电路的基本组成部分。任何一个电路都可以表述成如图 1.1(b)所示的电路框图。各组成部分及其作用简述如下。

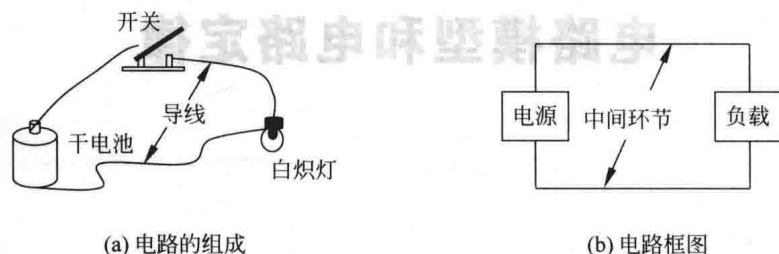


图 1.1 一个简单电路及其框图

电源是供电设备,它是将其他形式的能量转换为电能或者把电能转换成另一种形式的电能或信号的装置。常见的电源设备有发电机、干电池和信号发生器等。

负载是用电设备,它是将电能转换为其他形式能量,或者接收、传递电信号的装置。实际用电设备有电阻器、电感器、电容器、电动机、扬声器等各种电路元件及电气设备。

中间环节除了连接导线和开关外,还可以是各种复杂的电子线路。它们在电路中的作用是连接电源和负载,控制电能的传送和分配等。

电路的作用常从以下两个方面考虑。

(1) 在电力工程中,电路起着电能的传输与转换作用。通常,发电机发电、输电线输电、变电站变配电、电力拖动、电气照明、电热等都属于电力工程范畴。

(2) 电路还起着信号的传递与处理作用,就是对输入信号进行加工处理,使之成为需要的输出信号。由于对信号进行加工处理,必须经过电流和电压的变化才能实现,因此就其本质而言,信号的传递和处理仍属于能量的转换。这方面的例子很多,例如,将一个微弱的信号输入放大电路,在其输出端得到了一个较大的而形状并未改变的信号,如图 1.2 所示。常见的收音机、扩音器电路便是放大电路的实例。

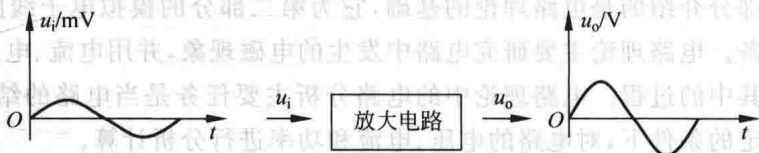


图 1.2 信号波形放大

1.2 电路参数

电路理论中的电路参数主要指电流、电压、功率、电荷、磁通等物理量。在这些物理量中,电流、电压和功率是描述电路特性的三个基本变量,这是因为电流、电压和功率是电路中比较容易测量的三个物理量,同时电路的基本定律大多叙述的是一个电路中各部分的电流和电压之间的关系,一旦一个电路中各部分的电流和电压被确定,那么这一电路的特性也就很容易被掌握了。

1.2.1 电流及其参考方向

由物理学可知,电场的作用是使电荷运动或者移动,电荷的有规则定向运动或移动形成电流(电荷流)。单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流,用 i 表示,即

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

习惯上规定正电荷移动的方向为电流方向。在国际单位制(SI)中,电流的单位为 A(安培,简称安),实际使用时还有 kA(千安)、mA(毫安)和 μA (微安)等单位。表 1-1 列出了 SI 单位中规定的用来构成十进倍数或分数的词头。例: $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$ 。

表 1-1 SI 倍数与分数词头

倍率	词头名称词		词头符号	倍率	词头名称词		词头符号
10^{24}	尧[它]	Yotta	Y	10^{-1}	分	Deci	d
10^{21}	泽[它]	Zetta	Z	10^{-2}	厘	Centi	c
10^{18}	艾[可萨]	Exa	E	10^{-3}	毫	Milli	m
10^{15}	拍[它]	Peta	P	10^{-6}	微	Micro	μ
10^{12}	太[拉]	Tera	T	10^{-9}	纳[诺]	Nano	n
10^9	吉[咖]	Giga	G	10^{-12}	皮[可]	Pico	p
10^6	兆	Mega	M	10^{-15}	飞[母托]	Femto	f
10^3	千	Kilo	k	10^{-18}	阿[托]	Atto	a
10^2	百	Hecto	h	10^{-21}	仄[普托]	Zepto	z
10	十	Deca	da	10^{-24}	幺[科托]	Yocto	y

如果电流的大小和方向不随时间的变化而变化,则这种电流称为恒定电流或直流电流,变量用大写字母 I 表示;如果电流的大小和方向随着时间呈周期性变化,并在一周期内的电流平均值等于零,则这种电流称为交变电流,变量用小写字母 i 表示。

在分析较为复杂的直流电路时,往往事先难以判断某条支路电流的实际方向。对交流而言,其方向随时间而变,在电路图上也无法用一个箭头来表示它的实际方向。这时,可任意选定某一方向作为电流的参考方向或称正方向。所选电流的参考方向并不一定与电流的实际方向一致。当电流的实际方向与其参考方向一致时,则电流为正值,如图 1.3(a)所示;反之,当电流的实际方向与其参考方向相反时,则电流为负值,如图 1.3(b)所示。因此,在参考方向选定之后,电流值才有正负之分,在未标示电流参考方向的情况下,电流的正、负是没有意义的。

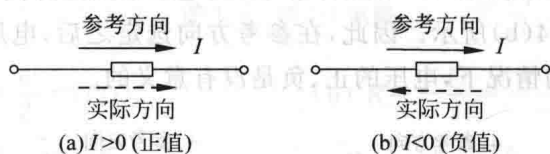


图 1.3 电流的参考方向和实际方向

电流的参考方向除用箭头表示外,还可以采用双下标字母表示,如 I_{AB} 表示正方向是由 A 指向 B 的电流。如果正方向选定为由 B 指向 A,则为 I_{BA} 。两者之间相差一个负号,

即 $I_{AB} = -I_{BA}$ 。

1.2.2 电压及其参考方向

在电场力作用下电荷发生运动或移动,当把电荷从电场的一点移动到另一点时,电场对电荷做功,电压就是衡量电场力对正电荷做功能力的物理量。处在电场中的电荷具有电位(势)能,恒定电场中的每一点都有一定电位,由此引入两个重要的物理量——电压与电位。

电场中某两点 A、B 间的电压(或称电压降) U_{AB} 等于将单位正电荷从 A 点移动到 B 点电场力所做的功,即

$$U_{AB} = \frac{dW_{AB}}{dq} \quad (1-2)$$

在电场中可取一点作为参考点,记为 P,设此点的电势为零,也称该参考点为参考零点。电场中的一点 A 到 P 点的电压 U_{AP} 规定为 A 点的电位,记为 V_A ,即

$$U_{AP} = V_A - V_P \quad (1-3)$$

注:为了区分电压与电位,本书中电压统一使用符号 $U(u)$ 表示,电位使用符号 $V(v)$ 表示。

在电路中,可以任意选择电路中的一点作为参考零点,电路中其他的点相对于参考零点的电压降就是该点的电位。电位与电压是两个既有联系又有区别的物理量。电位是针对电路中某点而言的,选择不同的参考零点,电路中其他各个点的电位不同;而电压是针对电路中某两点而言的,其值与参考零点无关,两点间的电压不会随参考零点的不同而改变,为两点的电位差,即

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1-4)$$

电压的方向规定为高电位端指向低电位端,即为电位降低的方向。在国际单位制(SI)中,电压的单位为 V(伏特,简称伏),实际使用时还有 kV(千伏)、mV(毫伏)和 μ V(微伏)等单位。

如果电压的大小和方向不随时间的变化而变化,则这种电压称为恒定电压或直流电压,变量用大写字母 U 表示;如果电压的大小和方向随着时间呈周期性变化,并在一周期内的电压平均值等于零,则这种电压称为交变电压,变量用小写字母 u 表示。

与电流相似,在复杂电路中很难判断电压的实际方向。为了便于分析和计算,电压也引入参考方向。参考方向可以任意设定,通常采用“+”“-”极性来表示电压的参考方向。所选电压的参考方向并不一定与电压的实际方向一致。当电压的实际方向与其参考方向一致时,则电压为正值,如图 1.4(a)所示;反之,当电压的实际方向与其参考方向相反时,则电压为负值,如图 1.4(b)所示。因此,在参考方向选定之后,电压值才有正负之分,在未标示电压参考方向的情况下,电压的正、负是没有意义的。

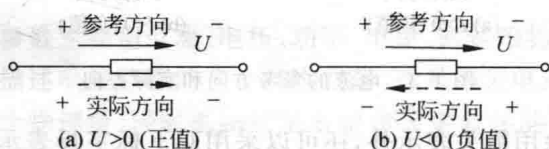


图 1.4 电压的参考方向和实际方向