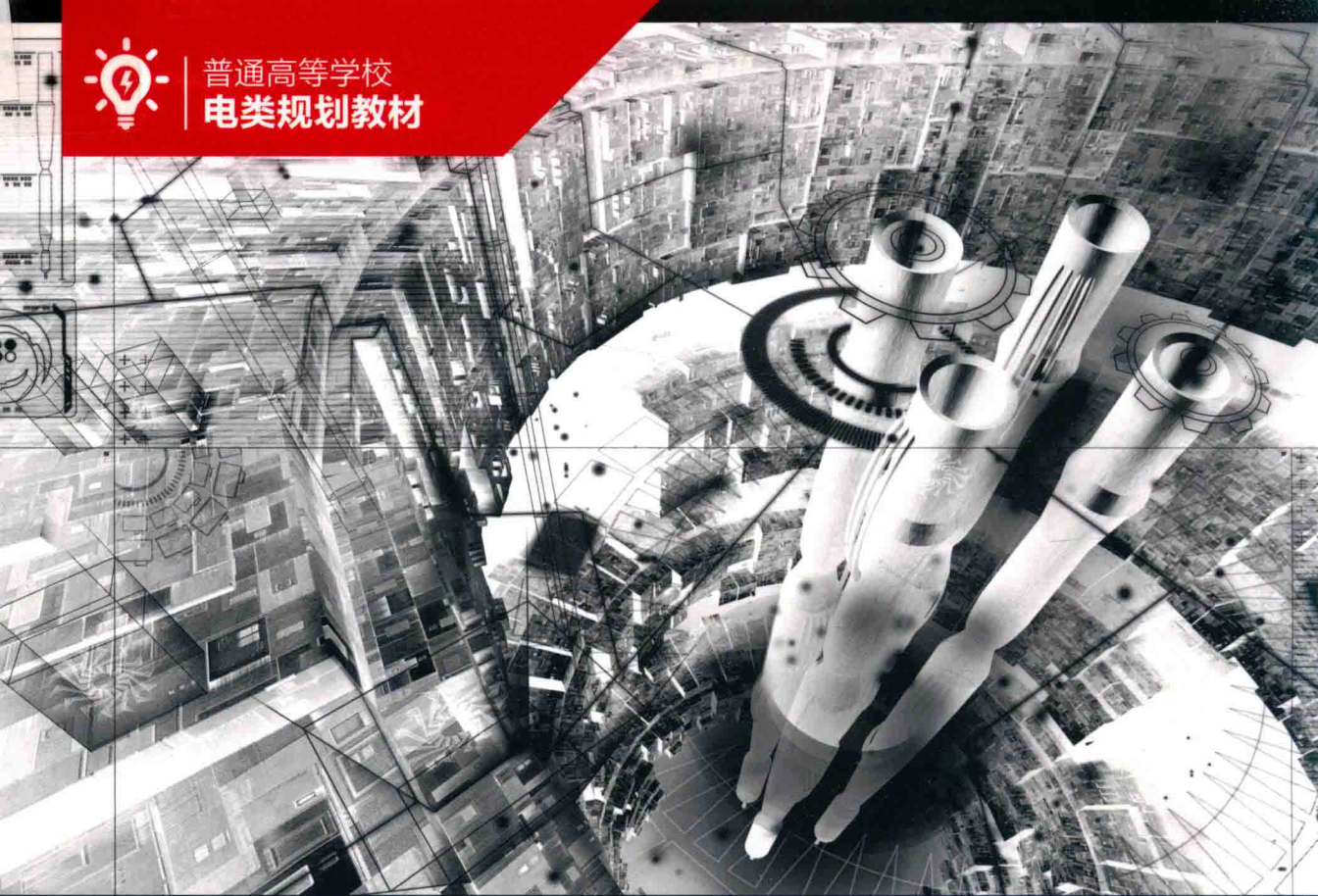




普通高等学校
电类规划教材



电路 与模拟电子技术

◎史学军 陆峰 张宇飞 李娟 编著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



普通高等学校
电类规划教材



电路

与模拟电子技术



◎史学军 陆峰 张宇飞 李娟 编著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

电路与模拟电子技术 / 史学军等编著. — 北京 :
人民邮电出版社, 2017. 8
普通高等学校电类规划教材
ISBN 978-7-115-45837-7

I. ①电… II. ①史… 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.
①TM13②TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第209903号

内 容 提 要

本书是根据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会制定的“电工学”课程教学基本要求, 结合计算机、计算数学、传媒技术等专业最新的“电路与模拟电子技术”的教学基本要求编写而成。全书分为电路分析基础和模拟电子技术两大部分。电路部分共分 4 章, 主要内容包括电路分析的基本概念和基本定律、电阻电路的分析、动态电路的暂态分析以及正弦稳态电路的分析; 模拟电子技术部分也分 4 章, 主要内容包括半导体二极管及其基本应用、晶体三极管及其基本放大电路、集成运算放大器的应用和直流稳压电源。各章均配有与基本内容密切相关的例题; 每章最后配有深浅适中、题型齐全的习题, 并给出了习题的参考答案, 便于学生自学和教师教学。

本书对基本概念、基本原理以及基本分析方法以讲解清楚够用为度, 同时兼顾应用, 并在各章的最后一节安排基于 NI Multisim 14 的电路仿真实例, 将理论和实践相结合。

本书可作为高等学校计算机、传媒技术、工程管理等相关专业的教材, 也可作为相关专业自学者及相关技术人员的参考用书。

◆ 编 著 史学军 陆 峰 张宇飞 李 娟

责任编辑 李 召

责任印制 陈 桦

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 19.75

2017 年 8 月第 1 版

字数: 496 千字

2017 年 8 月河北第 1 次印刷

定价: 54.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京东工商广登字 20170147 号

“电路与模拟电子技术”是高等学校电子信息及相关专业的一门重要基础课，它的任务是介绍电路与模拟电子技术的基本概念、基本理论、基本电路及基本分析方法，为后续课程的学习打下扎实的基础。

本教材是依据教育部制定的相关课程教学基本要求，结合计算机等相关专业教学的具体要求以及各高校对专业基础课学时的压缩需要，对原有的“电路分析基础”和“模拟电子技术基础”两门课程进行整合编写的。在内容遴选和组织上，力求做到保证理论，兼顾应用，突出重点，分散难点，便于学生对基本内容的理解和掌握，节省教学时间。在结构编排上，采用先直流后交流，先器件后电路，先原理后应用的顺序。同时，本教材精选了各类典型例题，每章配备了较为丰富的习题，并在书后给出了习题的参考答案，以便于学生能通过实例更好地理解 and 掌握所学知识。

本教材的参考学时为 48~64 学时，建议采用理论实践一体化教学模式，各章的参考学时见下面的学时分配表。

学时分配表

项 目	课 程 内 容	学 时
第一章	电路分析的基本概念和基本定律	3~4
第二章	电阻电路的分析方法	8~10
第三章	动态电路的暂态分析	7~8
第四章	正弦稳态电路的分析	8~10
第五章	半导体二极管及其基本应用	4~6
第六章	晶体管及其基本放大电路	8~10
第七章	集成运算放大器及其应用	8~12
第八章	直流稳压电源	2~4
课时总计		48~64

本教材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几十年教学经验积累的基础上编写而成的。全书由史学军、陆峰、张宇飞和李娟老师合作编写。其中史学军编写了第 1 章、第 2 章、第 5 章和第 7 章；陆峰编写了第 3 章和第 6 章；张宇飞编写了第 4 章和第 8 章；李娟编写了各章的 NI Multisim 14 仿真部分内容。全书由史学军统稿。

目 录

第 1 章 电路分析的基本概念和基本定律

1.1 实际电路和电路模型	1
1.2 电路的基本物理量	3
1.2.1 电流及其参考方向	3
1.2.2 电位、电压及其参考方向	4
1.2.3 关联参考方向	6
1.2.4 功率和能量	6
1.3 电路元件	8
1.3.1 电阻元件	9
1.3.2 独立电源	10
1.3.3 受控电源	12
1.4 电路的工作状态	13
1.5 基尔霍夫定律	14
1.5.1 基尔霍夫电流定律	15
1.5.2 基尔霍夫电压定律	17
*1.6 Multisim 仿真应用实例	18
1.6.1 界面简介	18
1.6.2 电路仿真过程	19
1.6.3 基尔霍夫定律仿真实例	20
习题 1	21
习题 1 答案	24

第 2 章 电阻电路的分析方法

2.1 简单电阻电路的分析	25
2.1.1 单回路电路的分析	25
2.1.2 单节偶电路的分析	26
2.2 电阻电路的等效变换	26
2.2.1 电路等效的概念	27
2.2.2 电阻的串联、并联等效	28
2.2.3 电阻的星形连接和三角形连接的等效互换	33
2.2.4 含独立电源电路的等效变换	35
2.2.5 实际电源的两种模型及其等效转换	36
2.3 电阻电路的一般分析法	40
2.3.1 网孔分析法	40

2.3.2 节点分析法	44
2.4 电路定理及其应用	47

2.4.1 叠加定理与齐次性定理	47
2.4.2 替代定理	50
2.4.3 等效电源定理	51
2.5 含受控源电路的分析	56
2.5.1 含受控电源网络的等效变换	57
2.5.2 含受控源网络的一般分析法	58
2.5.3 含受控源电路的电路定理分析	59

*2.6 Multisim 仿真在直流电路分析中的应用实例

2.6.1 平衡桥电路仿真实例	61
2.6.2 节点分析法仿真实例	62
2.6.3 叠加定理仿真实例	63
2.6.4 戴维南定理实例	63
习题 2	65
习题 2 答案	70

第 3 章 动态电路的暂态分析

3.1 储能元件	72
3.1.1 电容元件	72
3.1.2 电感元件	78
3.1.3 电容器与电感器的模型	82
3.2 换路定则及初始值的计算	82
3.3 一阶电路的响应	86
3.3.1 一阶电路的零输入响应	86
3.3.2 一阶电路的零状态响应	92
3.3.3 一阶电路的全响应	96
3.4 一阶电路的三要素分析法	98
*3.5 阶跃函数与阶跃响应	102
3.5.1 阶跃函数	102
3.5.2 阶跃响应	103
*3.6 二阶电路的零输入响应	105
*3.7 Multisim 仿真在动态电路分析中的应用实例	108

3.7.1 一阶电路的全响应仿真实例	109	4.10.2 电路频率特性仿真实例	158
3.7.2 二阶电路的全响应仿真实例	111	习题 4	160
习题 3	113	习题 4 答案	165
习题 3 答案	117	第 5 章 半导体二极管及其基本应用	167
第 4 章 正弦稳态电路的分析	119	5.1 半导体的基础知识	167
4.1 正弦量的基本概念	119	5.1.1 本征半导体	167
4.1.1 正弦量的三要素	119	5.1.2 杂质半导体	169
4.1.2 正弦量的相位差	121	5.1.3 PN 结及其特性	169
4.1.3 正弦量的有效值	122	5.2 半导体二极管	171
4.2 正弦量的相量表示	123	5.2.1 二极管的几种常见结构及 电路符号	172
4.2.1 复数及其基本运算	123	5.2.2 半导体二极管的伏安特性	173
4.2.2 正弦量的相量表示法	124	5.2.3 半导体二极管的主要参数	173
4.3 基尔霍夫定律的相量形式	125	5.2.4 半导体二极管的等效电路 模型	174
4.3.1 KCL 的相量形式	125	5.3 半导体二极管的基本应用电路	175
4.3.2 KVL 的相量形式	126	5.3.1 二极管整流电路	175
4.4 正弦稳态电路的相量模型	127	5.3.2 二极管限幅电路	176
4.4.1 RLC 元件伏安关系的 相量形式	127	5.3.3 二极管开关电路	176
4.4.2 电路的相量模型	130	5.4 特殊二极管	177
4.5 阻抗与导纳	131	5.4.1 稳压二极管及稳压电路	177
4.5.1 阻抗和导纳的概念	131	5.4.2 发光二极管	179
4.5.2 RLC 元件的阻抗和导纳	133	5.4.3 光电二极管	180
4.5.3 阻抗和导纳的串、并联	133	*5.5 Multisim 在二极管应用电路 中的仿真实例	180
4.6 正弦稳态电路的相量分析法	135	5.5.1 二极管特性测量仿真实例	180
4.7 正弦稳态电路的功率	137	5.5.2 二极管应用电路仿真实例	181
4.7.1 二端网络的功率	137	习题 5	182
4.7.2 功率因数的提高	141	习题 5 答案	185
4.7.3 最大功率传输	142	第 6 章 晶体管及其基本放大电路	186
4.8 谐振电路	144	6.1 晶体管	186
4.8.1 RLC 串联谐振	144	6.1.1 晶体管的结构和类型	186
4.8.2 GCL 并联谐振	146	6.1.2 晶体管的电流放大作用	187
4.8.3 谐振电路的频率特性	147	6.1.3 晶体管的共射特性曲线	189
*4.9 三相电路	149	6.1.4 晶体管的主要参数	191
4.9.1 三相电路的概念	149	6.1.5 温度对晶体管的特性及 参数的影响	194
4.9.2 对称三相电路的分析	150	6.2 放大电路的基本概念	194
4.9.3 不对称三相电路的概念	153	6.2.1 放大的概念	194
4.9.4 三相电路的功率	154	6.2.2 放大电路的性能指标	195
*4.10 Multisim 仿真在正弦稳态 电路分析中的应用实例	155	6.3 晶体管放大电路的放大原理	196
4.10.1 正弦稳态电路参数测定 仿真实例	155		

6.3.1 基本共射放大电路的组成	196	7.3 放大电路中的负反馈	248
6.3.2 基本共射放大电路的工作原理及波形分析	196	7.3.1 反馈的基本概念	249
6.4 放大电路的分析方法	197	7.3.2 反馈放大电路的分类及判别	249
6.4.1 直流通路和交流通路	198	7.3.3 负反馈放大电路的四种组态及其特点	254
6.4.2 图解法	199	7.3.4 负反馈放大电路的框图及一般表达式	259
6.4.3 等效电路法	203	7.3.5 负反馈对放大电路性能的影响	260
6.5 静态工作点的稳定	206	7.4 集成运算放大器的线性应用	264
6.5.1 静态工作点稳定的必要性	206	7.4.1 比例运算电路	264
6.5.2 典型的静态工作点稳定电路	207	7.4.2 求和运算电路	266
6.6 三种组态的基本放大电路	210	7.4.3 积分和微分运算电路	270
6.6.1 基本共集放大电路	210	7.5 集成运算放大器的非线性应用	272
6.6.2 基本共基放大电路	212	7.5.1 单门限电压比较器	272
6.6.3 三种接法的比较	214	7.5.2 迟滞比较器	273
6.7 多级放大电路	214	*7.6 Multisim 在集成运算放大器应用电路中的仿真实例	277
6.7.1 多级放大电路的耦合方式	214	7.6.1 负反馈放大电路仿真实例	277
6.7.2 多级放大电路的动态分析	216	7.6.1 比例运算电路仿真实例	281
6.8 场效应管及其放大电路	217	习题 7	282
6.8.1 场效应管及其主要参数	217	习题 7 答案	287
6.8.2 场效应管放大电路的接法	222	第 8 章 直流稳压电源	289
6.8.3 场效应管放大电路的动态分析	222	8.1 直流电源概述	289
*6.9 Multisim 在放大电路中的仿真实例	224	8.2 整流电路	290
6.9.1 三极管特性测量仿真实例	224	8.2.1 单相半波整流电路	290
6.9.2 单管放大电路仿真实例	226	8.2.2 单相全波整流电路	291
习题 6	230	8.2.3 单相桥式整流电路	292
习题 6 答案	236	8.3 滤波电路	295
第 7 章 集成运算放大器及其应用	238	8.3.1 电容滤波电路	295
7.1 差动放大电路	238	8.3.2 电感滤波电路	297
7.1.1 直接耦合放大电路中的零点漂移现象	238	8.3.3 复合型滤波电路	298
7.1.2 差动放大电路的结构特点及工作原理	239	8.4 稳压电路	298
7.1.3 差动放大电路的性能分析	240	8.4.1 稳压电路的主要指标	298
7.2 集成运算放大器的简单介绍	245	8.4.2 线性串联型直流稳压电路	299
7.2.1 集成运算放大器的组成及电路符号	245	8.4.3 开关型直流稳压电路	302
7.2.2 集成运算放大器的主要参数及电压传输特性	246	*8.5 Multisim 在直流稳压电路中的仿真实例	303
7.2.3 理想集成运算放大器	247	习题 8	305
		习题 8 答案	307
		参考文献	308

电路分析的基本概念和基本定律

1.1 实际电路和电路模型

电和磁是无处不在的自然现象，例如，夏季雷雨天常见的打雷和闪电。认识这些自然现象的本质，并且科学而有目的地运用自然规律来制造有意义的物理系统，这就是电与磁的工程应用。我们身边随处可见的如手机、计算机、手电筒、电子表、电话等都是电与磁的实际工程应用系统，都是我们常说的实际电路。

Figure 1-10 consists of two circuit diagrams. Diagram (a) is the actual circuit diagram of a handheld flashlight, showing a battery, a switch, a light bulb, and a coil. Diagram (b) is the circuit model of the flashlight, showing a voltage source U_s in series with an internal resistance r , and two resistors R_s and R_l representing the switch and bulb respectively.

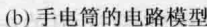


图 1-1 手电筒电路

由于实际电路的电气器件在工作时的电磁现象较为复杂，如图 1-1（a）所示的灯泡在工作时除了将电能转化为热能及照明用的光能外（消耗电能），还将在周围产生磁场，灯泡两端产生电场，但此时的磁场能和电场能都很小。显然，图 1-1 的灯泡工作时的主要电磁过程是将电能转化为非电能，而储存电场能及磁场能相对而言很弱，可以忽略。若我们在分析电路时把所有的电磁现象都进行考虑的话，电路的分析会变得非常复杂甚至不可能。因此，我们在对实际电路进行分析时，为了方便分析往往会对电路中的实际器件进行理想化和模型化，即在一定条件下忽略实际器件次要的电磁特性，突出其主要的电磁特性，并用一种抽象的理想电路元件来表征其某种电磁特征，图 1-1（a）所示的灯泡仅考虑主要的消耗电能的特性，就可用一理想电阻元件作为其模型。经过理想化和模型化后的实际电路称为电路模型，简称电路。图 1-1（b）给出了图 1-1（a）所示实际手电筒电路的电路模型。显然，电路模型是由各种理想电路元件按一定方式连接而成的总体。

所谓理想电路元件是一种可以用数学表达式精确定义的假想元件，是组成电路模型的最小单元。每一种理想电路元件表示实际器件所具有的一种主要电磁性能（物理性质）。例如，理想电阻元件仅表示消耗电能并转化为非电能的特征；理想电容元件仅表示储存电场能量的特征；理想电感元件仅表示储存磁场能量的特征。这 3 种理想元件是电路的基本元件，其电路符号如图 1-2 所示。

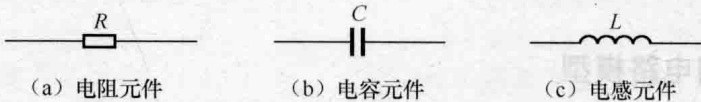


图 1-2 3 种基本电路元件的电路符号

电路中的实际电路器件工作时不仅电磁现象复杂，而且它们交织在整个器件中，因此在电路理论中做这样一个假设：假设实际器件工作时的各种电磁现象可以分开研究，并且这些电磁过程都分别集中在各理想元件之中，并假设理想元件没有体积，其特性集中表现在空间的一个点上，称理想电路元件为集总参数元件，简称集总元件。由集总元件构成的电路称为集总参数电路，简称集总电路。在集总参数电路中，任一时刻该电路中任一处的电流、电压都是与其空间位置无关的确定值。

用集总参数电路模型来近似描述实际电路是有条件的，它要求实际电路的尺寸 l （长度）要远小于电路最高工作频率 f 所对应的波长 λ ，即

$$l \ll \lambda, \quad \text{其中} \quad \lambda = c/f, \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s (光速)}$$

例如，我国用电的频率是 50Hz（赫兹），对应的波长为 6000km，对以此为工作频率的实验室设备来说，其尺寸与这一波长相比可以忽略不计，因而实际电路可采用集总参数电路模型来近似描述。但对于远距离的通信线路来说，就不满足上述条件，因此需考虑电场、磁场沿传输线的分布情况，不能按集总参数电路来处理，而按分布参数电路来处理。本教材仅对集总参电路进行分析，因此，所指电路模型均为集总参数电路模型，由理想电路元件连接构成。

本教材在电路分析部分的主要目标就是对集总参数电路模型进行分析，通过对电路中反映电路工作状态的电压、电流及电功率的各种分析计算方法的探讨，培养判断实际电路电气性能的能力，为今后电路设计相关电类课程的学习打下基础。

1.2 电路的基本物理量

电路分析的任务是由给定的具体电路得到它们的电性能,即求出描述电路特性的物理量——电路变量。这些变量中最常用的是电流、电压和功率,还有电荷、磁通和能量。由于在电路分析过程中,我们不仅要分析电流、电压及功率的大小,还需确定它们的真实方向,但一般而言,电路中电压、电流的真实方向很难事先判断出,因而本节引入参考方向的概念。这是非常重要的基本概念,我们在学习过程中要注意区分实际方向和参考方向。

1.2.1 电流及其参考方向

1. 电流的定义

电子和质子都是带电的粒子,电子带负电荷,质子带正电荷。电荷 q 的定向移动形成电流。单位时间 t 内通过导体横截面的电荷量定义称为电流强度,简称电流,用符号 i 表示,其数学表达式为

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

习惯上规定正电荷移动的方向为电流的方向(真实方向或实际方向)。

大小和方向都不随时间改变的电流称为恒定电流,简称直流电流(Direct Current, DC),并用大写字母 I 表示;如果电流的大小和方向都随时间改变,则称为时变电流,用小写字母 i 表示;时变电流的大小和方向若都随时间作周期变化,则称为交变电流,或称交流电流(Alternating Current, AC)。

在国际单位制(SI)中,电荷的单位为库仑(简称库,符号为C),时间的单位为秒(符号为s),电流的单位为安培(简称安,符号为A), $1A=1C/s$ 。

在通信和计算机技术领域,电路中的电流一般较小,常用毫安(mA),微安(μA)作为电流的单位;而电力系统中的电流一般较大,有时用千安(kA)作为电流单位。它们之间的换算关系是

$$1kA=10^3 A, \quad 1mA=10^{-3} A, \quad 1\mu A=10^{-6} A$$

显然,电流的大小和方向是描述电流变量的两个要素。

2. 电流的参考方向

前面介绍正电荷运动的方向为电流的真实方向。但导体中电流的真实方向有两种可能。对于给定的简单电路,如图1-1(b)所示手电筒电路,电路中电流的真实方向是容易判定的;但当电路较为复杂时,我们往往很难事先确定电路中某元件上电流的真实方向,如图1-3所示电桥电路,当电桥不平衡时,电流表中的电流是从c流到d还是从d流到c就无法简单判定,必须通过计算得到。况且,在交流电路中电流的真实方向在不断改变。基于上述原因,我们引入电流参考方向的概念。

所谓电流的参考方向是指事先任意规定的支路电流的方向。可见电流的参考方向是人为假定的电流方向,但一经选定就不能改变。如图1-4所示二端电路中,任意规定流经电路的电流 i 的方向从a到b为电流参考方向,并如图1-4中所示用箭头表示,或用双下标 i_{ab} 表示。

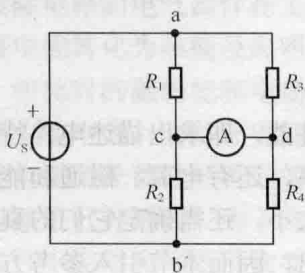


图 1-3 电桥电路



图 1-4 电流的参考方向

规定了电流的参考方向，将电流用代数值表示。当电流的真实方向与参考方向一致，则电流的代数值为正值；当电流真实方向与参考方向相反时，电流的代数值为负值。

以后不加说明，电路中所标电流方向均指电流的参考方向。

1.2.2 电位、电压及其参考方向

1. 电位

电场中某点 A 的电位（电势）等于单位正电荷从该点沿任意路径移至参考点（即零电位点或零电势点）电场力所做的功，用符号 U_A 表示。电路中的电位与电场中的电位具有相同的物理意义。在国际单位制（SI）中，电位的单位是伏特（简称伏，符号为 V），除此之外，常用的单位还有千伏（kV）、毫伏（mV）和微伏（ μV ）。

电路中某点的电位是相对物理量，只有在确定了参考点后，电位才是一个确定值，否则讨论电位是没有意义的。在同一电路中，即使同一点，参考点选择不同，该点的电位也是不同的。因此，在分析电路时，参考点一旦选定不能改变，因为只有这样电路中各点的电位值才是唯一的，具有单值性。在电力系统中通常选大地为参考点，而在电子电路中一般选机壳、金属地板、公共线或公共点等作为参考点，并且参考点通常在电路图上用符号“ $\perp$ ”表示。

最后说明一点，电位也是代数值，当某点电位比参考点高，则电位的代数值为正值；当某点电位比参考点低，则电位的代数值为负值。

2. 电压

电压即两点之间的电位之差，用符号 u 表示。在电路中，若 a 点电位为 U_a ，b 点电位为 U_b ，则 a、b 两点间的电压为

$$u_{ab} = U_a - U_b \quad (1-2)$$

电压还可以从电场力做功的角度定义，电路中 a、b 两点间的电压等于将单位正电荷由 a 点转移到 b 点时电场力所做的功，即单位正电荷由 a 点转移到 b 点时获得或失去的电势能。数学表达式为

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

式（1-3）中， dq 表示由 a 点移到 b 点的电荷量，单位为库伦（C）； dw 表示 dq 电荷量由 a 点移到 b 点时电场力所作的功，或者表示 dq 电荷量由 a 点移到 b 点时所获得或失去的电势能，单位为焦耳（J）。

习惯上把电位降落的方向（高电位指向低电位）规定为电压的真实方向。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，通常用大写字母 U 表示。如果电压的大小和方向都随时间变化，则称为时变电压。时变电压的大小和方向若都随时间作周期变化，则称为交变电压，或称交流电压。

在国际单位制 (SI) 中，电压的单位为伏特 (简称伏，符号为 V)。在电子电路中电压一般较小，常用毫伏 (mV)，微伏 (μV) 作为电压单位。在电力系统中电压一般较大，有时用千伏 (kV) 作为单位。它们之间的换算关系是

$$1\text{mV}=10^{-3}\text{V}, 1\mu\text{V}=10^{-6}\text{V}, 1\text{kV}=10^3\text{V}$$

3. 电压的参考方向

和电流类似，电路两点间电压的真实方向也有两种可能，因此，和电流引入参考方向一样，为了判断和表明电压的真实方向也需要为电压选定参考方向 (也称参考极性)，并且电压的参考极性同样是任意选定的；但一经选定，在分析电路过程中就不能改变。如图 1-5 (a) 所示二端电路中，任意规定电压 u 的参考方向 a 端为高电位，b 端为低电位，则可如图 1-5 (a) 所示用 “+” 表示参考方向的高电位端，“-” 表示参考方向的低电位端，或者用双下标 u_{ab} 表示。在电子电路中，电压的参考方向也用箭头表示，如图 1-5 (b) 所示，箭头的指向即为电压降的方向。设定了电压的参考方向，同样电压也用代数值表示，若计算出的电压的代数值为正值，表明电压的真实方向与参考方向一致；若计算出的电压的代数值为负值，则表明电压真实方向与参考方向相反。

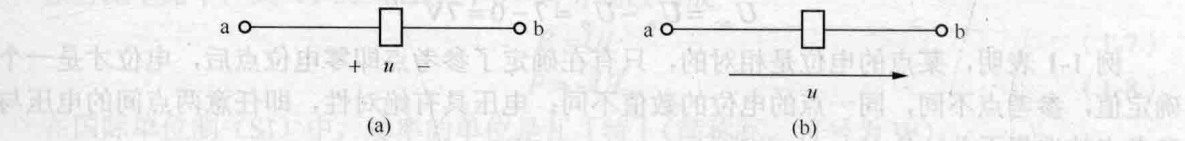


图 1-5 电压的参考方向

需要强调的是：在分析电路时，我们必须首先选定电压的参考方向，并且在整个分析过程中不能改变，否则计算出的电压是没有意义的。

由前面的介绍可知，电压即是两点之间的电位之差。若把电路中的某一点选为参考点，那么电路中任一点到参考点的电压即为该点的电位。由于在研究电路问题时，经常需要讨论电路的某些部分获得或失去能量的问题，因此用电压的概念比用电位的概念更加方便；而在分析电子电路时，则应用电位的概念更方便，如当我们要判断电路中二极管的工作状态时就必须先确定二极管两端的电位，然后才能判断二极管是处于导通还是截止工作状态。

例 1-1 图 1-6 所示电路，已知 2C 正电荷从 a 移到 b，电场力做功 8J，从 b 移到 c 电场力做功 6J，

(1) 若选 b 点为参考点，试求 a、b、c 各点的电位及电压 U_{ab} 、 U_{ac} 。

(2) 若选 c 点为参考点，试求 a、b、c 各点的电位及电压 U_{ab} 、 U_{ac} 。

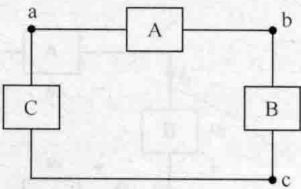


图 1-6 例 1-1 图

解：(1) 选 b 点为参考点，即 $U_b=0$

由于 2C 正电荷从 a 移到 b (参考点)，电场力做功 8J，因此 a 点电位为

$$U_a = \frac{W_{ab}}{q} = \frac{8}{2} = 4\text{V}$$

又由于 2C 正电荷从 b 移 c 到电场力做功 6J，相当于 2C 正电荷从 c 移到 b（参考点），电场力做功-6J，因此 c 点电位为

$$U_c = \frac{W_{cb}}{q} = \frac{-6}{2} = -3V$$

由式 (1-2) 得电压

$$U_{ab} = U_a - U_b = 4 - 0 = 4V$$

$$U_{ac} = U_a - U_c = 4 - (-3) = 7V$$

(2) 选 c 点为参考点，即 $U_c=0$

由于 2C 正电荷从 b 移到 c（参考点），电场力做功 6J，因此 b 点电位为

$$U_b = \frac{W_{bc}}{q} = \frac{6}{2} = 3V$$

2C 正电荷从 a 移至 c（参考点），电场力做的功应等于电场力将 2C 正电荷从 a 移到 b 做的功及从 b 移到 c 做的功的和，因此 a 点电位为

$$U_a = \frac{W_{ab} + W_{bc}}{q} = \frac{8 + 6}{2} = 7V$$

由式 (1-2) 得电压

$$U_{ab} = U_a - U_b = 7 - 3 = 4V$$

$$U_{ac} = U_a - U_c = 7 - 0 = 7V$$

例 1-1 表明，某点的电位是相对的，只有在确定了参考点即零电位点后，电位才是一个确定值，参考点不同，同一点的电位的数值不同；电压具有绝对性，即任意两点间的电压与参考点的选择无关。

1.2.3 关联参考方向

在分析电路时，原则上电压与电流的参考方向是可以分别独立地任意选定，但为了分析方便，对同一元件或同一段电路，其电压与电流常选择图 1-7（a）所示的参考方向，即电流参考方向的选择是从电压参考方向的“+”极流入“-”极流出。称此时电压、电流选择关联参考方向或一致参考方向；否则称电压、电流选择非关联参考方向，如图 1-7（b）所示。

当电压、电流采用关联参考方向时，在电路图上只需标出电流的参考方向或电压参考极性中的任意一个即可。

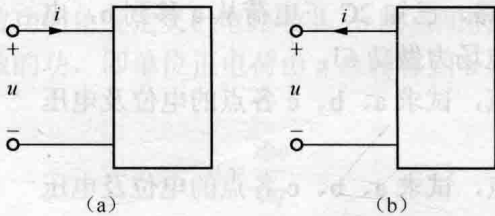


图 1-7 参考方向关系

1.2.4 功率和能量

电路工作时总伴随有电能与其他形式能量的相互交换，为了衡量电能与其他形式能量转换的速率，定义能量对时间的变化率为功率，用字符 p 表示，即

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-4)$$

在电路中，功率还可以用电压及电流来表示，下面进行推导。首先，讨论图 1-8 (a) 所示二端电路（网络）的功率，电压、电流选择图示关联参考方向。根据电压和电流的定义：电压 u 表示单位正电荷从 a 端高电位移到 b 端低电位时失去的电势能，电流 i 表示单位时间里从 a 移到 b 的正电荷量。因此， ui 表示在单位时间里正电荷量 i 流过二端网络所失去的电，根据能量守恒原理，正电荷失去的能量正是二端网络吸收的能量，因此，该二端电路吸收的功率为

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

式 (1-5) 给出了当电压、电流为关联参考方向时，二端电路（网络）吸收功率的表示式。若二端网络的电压、电流选择非关联参考方向，如图 1-8 (b) 所示，将图 1-8 (a) 中电流的参考方向反向，则前后两个电流相差一负号，故图 1-8 (b) 吸收功率的表示式改为

$$p = -ui \quad (1-6)$$

需要指出的是：无论是式 (1-5)，还是式 (1-6) 都是指吸收功率的计算式。由于 u 、 i 都是代数值，因而 p 也是代数值。只有计算出的功率为正值，才表明二端网络实际吸收了功率；若计算出的功率为负值，则表示该二端网络实际发出功率。

在直流电路中，式 (1-5) 和式 (1-6) 可分别改写成

$$P = UI \quad (1-7)$$

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

在国际单位制 (SI) 中，功率的单位是瓦 [特] (简称瓦，符号为 W)。

$$1 \text{ 瓦} = 1 \text{ 焦 [耳]} / \text{秒} = 1 \text{ 伏} \cdot \text{安}$$

当电压、电流为关联参考方向时，从 t_0 到 t 时间内电路吸收的能量为

$$w_0(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-9)$$

在国际单位制 (SI) 中，能量的单位为焦耳，简称焦 (J)。在实际生活中，常以千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) 为单位，如电力系统用千瓦时测量用户的用电情况，1 千瓦时 (1 度电) 是指功率为 1 千瓦的用电设备在 1 小时内消耗的电能，即 $1 \text{ 度电} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3600000 \text{ J}$ 。

例 1-2 图 1-9 所示，在电路中，已知电流 $i_1 = i_2 = i_3 = 3 \text{ A}$ ， $u_1 = 8 \text{ V}$ ， $u_2 = 5 \text{ V}$ ， $u_3 = -3 \text{ V}$ ，求各段电路的功率，并说明它们实际是吸收功率还是产生功率。

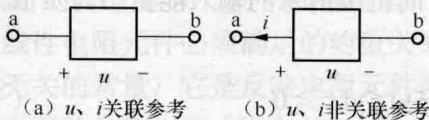


图 1-8 二端网络功率的计算

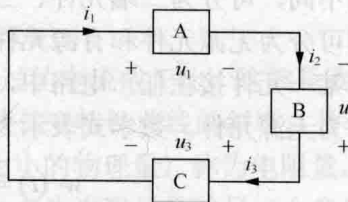


图 1-9 例 1-2 图

解：A 段电路上电压、电流为关联参考方向，由式 (1-5)，得

$$p_A = u_1 i_1 = 3 \times 8 = 24 \text{ W} > 0 \text{ W}$$

表明 A 段电路实际为吸收功率。

B 段电路上电压、电流为非关联参考方向, 由式 (1-6), 得

$$p_B = -u_2 i_2 = -5 \times 3 = -15 \text{ W} < 0 \text{ W}$$

表明 B 段电路实际为产生功率, 产生功率为 15W。

C 段电路上电压、电流为关联参考方向, 由式 (1-5), 得

$$p_C = u_3 i_3 = 3 \times (-3) = -9 \text{ W} < 0 \text{ W}$$

表明 C 段电路实际为产生功率, 产生功率为 9W。

例 1-2 中各段电路吸收功率的总和为

$$\sum p_{\text{吸收}} = p_A = 24 \text{ W}$$

各段电路产生功率的总和为

$$\sum p_{\text{产生}} = -(p_B + p_C) = -(-15 - 9) = 24 \text{ W}$$

显然, 整个电路吸收的功率等于它产生的功率, 即 $\sum p_{\text{吸收}} = \sum p_{\text{产生}}$, 这一现象称为电路中的功率守恒, 这也正是能量守恒原理在电路中的具体体现。

需要指出: 在电工电子中, 由于电能转化成多种其它形式的能量也可以说是电流做的功, 因此称为电功, 单位时间内所做的电功称为电功率, 简称功率。

对理想元件来说, 功率数值的范围不受任何限制, 但是在实际应用中, 电流通过导体就会发热, 即产生电流的热效应。因此, 当实际器件通过过大的电流, 则会由于电流热效应而产生的过高的温度, 使元件的绝缘材料损坏, 严重时甚至会烧毁电气设备; 如果电压过高, 则会使绝缘击穿。因此, 为了保证电子器件及电气设备如电灯、电阻器等能长期正常工作, 需要规定功率、电压、电流的允许值, 分别称为这些电子器件及电气设备的额定功率、额定电压、额定电流, 使用时不得超过额定值。通常电气设备或元件的额定值会标注在产品的名牌上, 由于功率、电压、电流之间存在一定的联系, 故额定值一般不会全部给出。如灯泡只给出额定电压 (220V)、额定功率 (40W), 电阻器只标明电阻值 (500Ω) 和额定功率 (5W)。各种电器设备在使用时, 实际值不一定等于它们的额定值, 但一般不应超过额定值。

1.3 电路元件

由 1.1 节的介绍可知, 电路元件是组成电路的基本单元, 电路是由电路元件连接而成。电路元件的特性可以通过与端子有关的物理量描述, 进而可确定电路元件端子上电压、电流的关系—伏安关系, 记为 VCR (Voltage Current Relation)。根据电路元件与外电路相连的端子数的不同, 可分为二端元件、三端元件、四端元件等; 根据电路元件在电路中的作用效果的不同可分为无源元件和有源元件两大类。

若某一元件接在任一电路中, 在其工作的全部时间范围内总的输入能量不为负值, 则称该元件为无源元件。数学式表示为

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \geq 0 \quad (1-10)$$

不满足式 (1-10) 的元件称为有源元件。

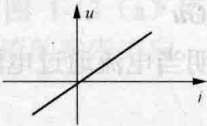
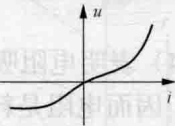
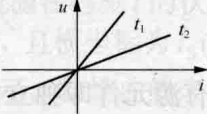
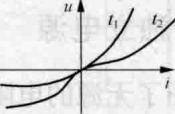
本教材在电路部分涉及的无源元件有电阻元件、电感元件、电容元件等。有源元件有独立电源, 受控电源。本小节只介绍电阻元件、独立电源和受控电源。其余元件将在后续章节中介绍。

1.3.1 电阻元件

电阻元件是一个二端元件，是从实际电阻器如可调电阻器、白炽灯泡、半导体二极管等抽象出来的模型，它是表示实际电阻器对电流的阻碍能力以及消耗电能的一种理想元件。电阻元件简称电阻，其特性可以用它端子上电压、电流的伏安关系也称伏安特性来描述，也能用 u - i 平面上过原点的一条曲线即伏安特性曲线来描述，因而它是一个 u - i 约束的元件。

若电阻的伏安特性曲线是 u - i 平面上一条过原点的直线，则称该电阻为线性电阻，否则为非线性电阻；若电阻的伏安特性曲线不随时间而变化，则称该电阻为时不变电阻，否则称为时变电阻。因此，电阻元件共分四种类型，如表 1-1 所示。

表 1-1 电阻元件的四种类型

u - i 特性	线 性	非 线 性
时不变电阻		
时变电阻		

在电路分析中，一般不特别说明，所说的电阻均指线性时不变电阻元件。

图 1-10 给出了线性时不变电阻的元件符号及电压、电流选择关联参考方向时的伏安特性曲线。

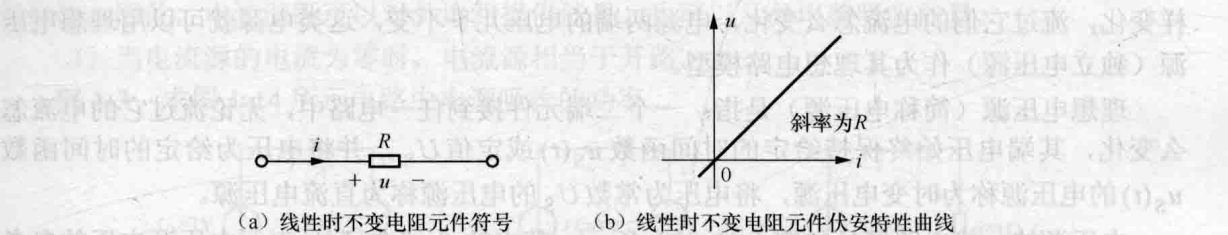


图 1-10 线性时不变电阻的元件符号及伏安特性曲线

由图 1-10 (b) 可以写出在电压、电流选择关联参考方向时，线性时不变电阻的 VCR 关系为

$$u = Ri \quad \text{或} \quad i = Gu \tag{1-11}$$

式 (1-11) 表明，对于线性电阻，元件上的电压与通过的电流成正比，这就是欧姆定律，也是线性电阻元件必须满足的约束关系。式中 R 的数值为伏安特性曲线的斜率，是与电压、电流无关的常量，它是反映电阻元件阻碍电流通过能力大小的物理量，称为电阻量，简称电阻。电阻的单位为欧 [姆] (符号为 Ω)。式 (1-11) 中的 G 为电阻元件的另一个参量，称为电阻元件的电导，电导的单位为西 [门子] (符号为 S)。

显然，电阻元件的电导与电阻互为倒数的关系，即

$$G = \frac{1}{R} \tag{1-12}$$