

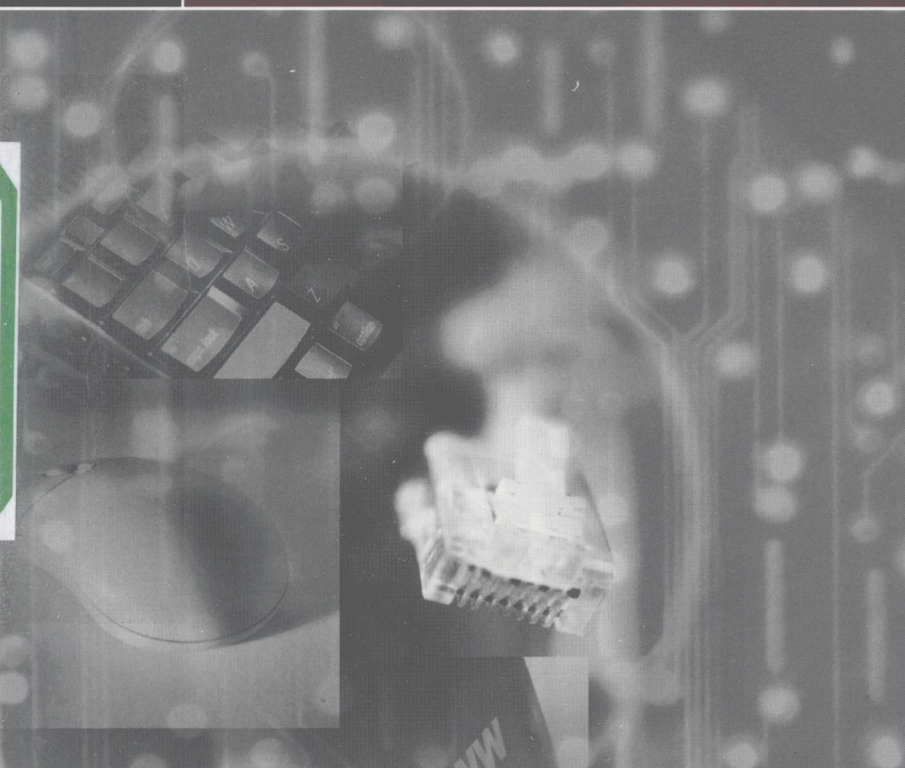
1
HZ BOOKS
华章教育

21
世纪

高等院校电子信息类本科规划教材

电路与模拟电子技术

黄锦安 付文红 蔡小玲 编



机械工业出版社
China Machine Press

21世纪

高等院校电子信息类本科规划教材

TM13/222

2009

电路与模拟电子技术

黄锦安 付文红 蔡小玲 编
周淑阁 主审



机械工业出版社
China Machine Press

本书是根据教育部高等学校电子电气信息类基础课程教学指导分委员会颁布的“电路分析基础”和“模拟电子技术”课程教学基本要求,结合计算机类专业的特点编写的。全书执行了国家关于量和单位的最新标准。

全书共 12 章。内容有电路模型与基本定律、电路的分析方法、正弦交流电路、三相交流电路、电路的频率特性、电路的暂态分析、半导体器件、分立元件放大电路、负反馈放大电路、集成运算放大器及其应用、正弦波振荡电路、直流稳压电源电路。另外,各章均配有习题并在书后附有参考答案,以帮助读者掌握教材内容。

本书兼顾了内容的广度和深度,适合作为计算机及相关专业对应课程的教材,也可作为相关科技人员的参考用书。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

电路与模拟电子技术/黄锦安,付文红,蔡小玲编. —北京:机械工业出版社,2008.9

(21 世纪高等院校电子信息类本科规划教材)

ISBN 978-7-111-25228-3

I. 电… II. ①黄… ②付… ③蔡… 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. TM13 TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 150134 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:盛东亮

北京慧美印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·20.5 印张

标准书号:ISBN 978-7-111-25228-3

定价:38.00 元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010)68326294

前 言

本书是根据教育部高等学校电子电气信息类基础课程教学指导分委员会颁布的“电路分析基础”和“模拟电子技术”课程教学基本要求,结合计算机类专业对课程内容的需求而编写的。计算机类专业与电子电气信息类专业不同,只要求学生扎实地掌握“电路”、“模拟电子技术”课程的基本原理和基本分析方法,来满足计算机应用中的接口电路分析与设计的要求;不要求作深入的研究。本书也是编者根据计算机类专业培养方案课程的具体设置情况,在总结多年教学实践的基础上编写而成。

全书的第1~6章为“电路”的基本内容,主要介绍电路的基本理论与基本分析方法。在选材上突出基本内容,强调基本概念和基本原理,力求少而精;在习题的选配上注重对基本概念及基本方法的综合训练。全书的第7~12章为“模拟电子技术”的基本内容,主要介绍模拟电子电路的基本概念与基本分析方法。内容的组织上,在半导体器件部分尽量精简涉及半导体物理的内容,重点通过特征曲线和主要参数的介绍,使学生掌握各种半导体器件的特性及获取相关特性的方法,为正确使用半导体器件打下基础;在分立元件放大电路部分重点介绍建立放大的基本概念、各种放大电路的静态偏置和动态在放大信号中的作用以及静态与动态的分析方法,同时也相应地压缩了图解法的内容;文中加强了对集成电路及其应用电路的介绍,给出了集成运算放大器多方面的应用实例。

教材编写过程中参考了已出版的同类优秀教材,力求做到教材内容的系统性、完整性、科学性和教学适用性的有机结合,为培养学生分析问题和解决问题的能力,打下良好基础。

本书可作为高等学校计算机及相关专业对应课程的教材,也可作为相关科技人员的参考用书。

参加本书编写工作的分别是南京理工大学黄锦安(第1、2、6章)、付文红(第7、8、9、10、11、12章)和蔡小玲(第3、4、5章)。周淑阁教授仔细审阅了全部书稿,并提出了很多宝贵意见,在此表示深切的谢意。

限于编者水平,书中难免有疏漏与错误之处,希望使用本书的读者和教师给予批评指正,以便再版时更正。来函请寄南京理工大学1009教研室(邮编210094)。

编 者

2008年6月

目 录

前言	
第1章 电路的基本概念与基本定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.1.1 电路的作用	1
1.1.2 电路的组成与模型	2
1.2 电路的基本物理量及其参考方向	3
1.3 电阻元件	6
1.4 独立电源	8
1.4.1 电压源	8
1.4.2 电流源	9
1.5 基尔霍夫定律	11
1.6 电位的计算	14
1.7 受控源	16
习题	18
第2章 电路的分析方法	23
2.1 二端网络与等效变换	23
2.1.1 等效二端网络的概念	23
2.1.2 电阻的串联、并联和混联	23
2.1.3 电压源、电流源的串联和 并联	27
2.1.4 实际电源模型的等效变换	29
2.2 支路电流法	33
2.3 网孔电流法	35
2.4 结点电压法	37
2.5 叠加定理	42
2.6 等效电源定理	45
2.7 负载获得最大功率的条件	51
2.8 含受控源电路的分析	52
习题	56
第3章 正弦交流电路	65
3.1 正弦交流电的基本概念	65
3.1.1 正弦量	65
3.1.2 正弦量的有效值	69
3.2 正弦量的相量表示法	69
3.3 正弦交流电路中的电阻元件	74
3.4 正弦交流电路中的电感元件	76
3.4.1 电感元件	76
3.4.2 正弦交流电路中电感元件的 工作特性	78
3.5 正弦交流电路中的电容元件	80
3.5.1 电容元件	80
3.5.2 正弦交流电路中电容元件的 工作特性	82
3.6 基尔霍夫定律的相量形式	84
3.7 阻抗和导纳	85
3.7.1 阻抗和导纳的定义	85
3.7.2 阻抗、导纳的串联和并联	87
3.8 复杂正弦交流电路的分析与计算	94
3.9 正弦交流电路的功率及功率因数 的提高	97
3.9.1 正弦交流电路的功率	97
3.9.2 功率因数的提高	99
习题	101
第4章 三相交流电路	107
4.1 三相交流电源	107
4.2 对称三相电路的联接	108
4.3 对称三相电路的分析	111
4.4 不对称三相电路的分析	114
4.5 三相电路的功率	118
习题	121
第5章 电路的频率特性	123
5.1 非正弦周期交流电路的分析和 计算	123
5.2 RC串联电路的频率特性	132
5.3 RC串/并联电路的频率特性	134

5.4 RLC 串联电路的频率特性 与串联谐振	135	7.5.4 半导体三极管的主要参数	197
5.5 LC 并联电路的频率特性	140	7.5.5 半导体三极管的温度特性	199
习题	142	7.6 场效应三极管	200
第 6 章 电路的暂态分析	146	7.6.1 绝缘栅型场效应管的结构和 工作原理	200
6.1 换路定则与电压和电流初始值的 计算	146	7.6.2 绝缘栅型场效应管的特性 曲线	203
6.2 RC 电路的放电过程	149	7.6.3 绝缘栅型场效应管的主要 参数	204
6.3 RC 电路的充电过程	153	习题	206
6.4 一阶直流、线性电路瞬变过程的 一般求解方法——三要素法	158	第 8 章 分立元件放大电路	209
6.5 微分电路与积分电路	160	8.1 双极型三极管基本放大电路	209
6.6 RL 电路的瞬变过程	162	8.1.1 固定偏置放大电路	209
6.7 RLC 串联电路的放电过程	167	8.1.2 分压偏置放大电路	220
习题	172	8.1.3 共集电极放大电路——射极 输出器	225
第 7 章 半导体器件	178	8.1.4 共基极放大电路	227
7.1 半导体基础	178	8.2 场效应管放大电路	228
7.1.1 半导体的定义	178	8.2.1 自给栅偏置放大电路	229
7.1.2 半导体的导电特性	178	8.2.2 分压偏置放大电路	230
7.1.3 半导体的分类及其导电原理	179	8.3 多级放大电路	231
7.2 PN 结	182	8.3.1 多级放大电路的组成和 耦合方式	231
7.2.1 PN 结的形成过程	182	8.3.2 阻容耦合两级放大电路的 分析	232
7.2.2 PN 结的特性——单向导 电性	183	8.4 放大电路的频率特性	236
7.3 半导体二极管	184	8.5 差动放大电路	238
7.3.1 半导体二极管的结构特点	184	8.5.1 直接耦合放大电路存在的问题 及其解决办法	238
7.3.2 半导体二极管的伏安特性 曲线和特性方程	185	8.5.2 差动放大电路	241
7.3.3 半导体二极管的主要参数	186	8.6 功率放大电路	249
7.3.4 半导体二极管应用举例	186	8.6.1 概述	249
7.4 稳压二极管	189	8.6.2 变压器耦合功率放大电路 ——甲类功率放大电路	250
7.4.1 稳压二极管的伏安特性	189	8.6.3 无输出变压器乙类互补功率 放大电路	251
7.4.2 稳压二极管的主要参数	190	8.6.4 无输出电容乙类互补功率 放大电路	252
7.5 半导体三极管	192	8.6.5 复合管功率放大电路	253
7.5.1 半导体三极管的结构 特点	192	8.6.6 功率放大电路的分析计算	254
7.5.2 半导体三极管的电流放大 特性	193	习题	256
7.5.3 半导体三极管的伏安特性 曲线	195		

第9章 负反馈放大电路	260	10.4.2 集成运算放大器组成的有源 滤波电路	285
9.1 反馈的基本概念	260	10.5 集成运算放大器的非线性应用—— 电压比较器	288
9.1.1 反馈的定义	260	习题	289
9.1.2 反馈的方框图	260	第11章 正弦波振荡电路	292
9.1.3 反馈的极性——负反馈和正 反馈	260	11.1 产生自激振荡和正弦波的条件 ...	292
9.1.4 反馈的基本方程	261	11.2 RC正弦波振荡电路	293
9.2 反馈的类型	262	11.2.1 RC串并联选频网络的 频率响应	293
9.2.1 直流反馈和交流反馈	262	11.2.2 RC文氏桥振荡电路	294
9.2.2 组态的定义	263	习题	296
9.3 反馈组态和极性的判断方法	263	第12章 直流稳压电源电路	298
9.3.1 极性的判断方法——瞬 时极性法	263	12.1 整流电路	298
9.3.2 反馈组态的判断方法	265	12.1.1 半波整流电路	298
9.4 负反馈对放大电路的影响	267	12.1.2 桥式全波整流电路	299
9.4.1 直流负反馈对放大电路性 能的影响	267	12.2 滤波电路	302
9.4.2 交流负反馈对放大电路性 能的影响	267	12.2.1 电容滤波	302
9.5 深度负反馈放大电路电压放大 倍数的估算	269	12.2.2 电感滤波	304
习题	272	12.2.3 LC滤波电路	304
第10章 集成运算放大器及其应用 ...	275	12.2.4 π 型滤波电路	305
10.1 集成运算放大器简介	275	12.3 稳压电路	305
10.2 集成运算放大器的主要参数	277	12.3.1 硅稳压管稳压电路	305
10.3 理想集成运算放大器及其分析 依据	277	12.3.2 三极管串联型稳压电路	306
10.4 集成运算放大器的线性应用	278	12.3.3 三端集成稳压器及其应用 ...	307
10.4.1 集成运算放大器组成的运算 电路	278	习题	309
		部分习题参考答案	313
		参考文献	321

第 1 章 电路的基本概念与基本定律

本章介绍电路的基本概念与基本定律。它们源于物理，但又不同于物理。本章内容主要有电路模型的概念，电流、电压及其参考方向；重点介绍电路有源元件电压源和电流源以及基尔霍夫定律。本章内容将贯穿于整个电路理论的始终，必须深刻理解，熟练掌握。

1.1 电路和电路模型

现代社会中，电路几乎处处可见。电路是电流的通路，是根据特定需要，由相应的电工设备或电器元件按一定的方式连接而成。

1.1.1 电路的作用

实际电路的结构形式和所能完成的任务是多种多样的。电路的作用主要有以下几方面。

1. 实现能量的传输与转换

最简单的电路就是白炽灯照明电路，如图 1.1.1 所示。它是把电池的能量，经过导线的传输，送到白炽灯（统称负载），使之完成能量的转换。

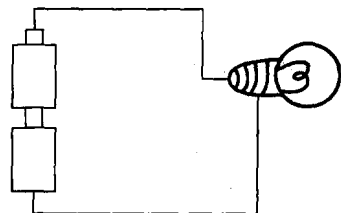


图 1.1.1 简单的照明电路

图 1.1.2 所示是一个较为复杂的电力系统示意图。虽然它具有较多的电气设备，电路结构也比较复杂，但基本作用仍然是进行能量的传输与转换。图 1.1.2 中，发电机部分称为电源，电动机、电灯、电炉等称为负载，其余部分如变压器、输电线、保护设备等用于连接电源与负载，称为中间环节。

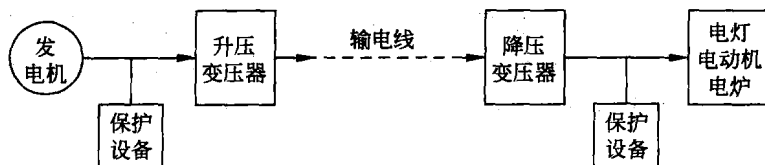


图 1.1.2 电力系统示意图

2. 进行信号的传递与处理

在电子技术和非电量的测量中，常会遇到一些用于传递和处理信息（例如语音、图像、压力、温度等）的电路。扩音机电路就是一种这样的电路，其电路示意图如图 1.1.3 所示。它的工作原理是话筒把接收的语音信息转换为相应的电流和电压，即电信号，然后通过电路传递给扬声器，再把电信号转换为对应的语音。话筒接收的信号

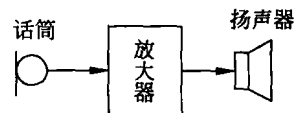


图 1.1.3 扩音机电路示意图

往往很弱，因此中间还要用放大器将其放大。信号的这种转换、传递和放大就是信号的传递和处理过程。

在图 1.1.3 中，话筒的作用是将接收的语音声波信号转换为电信号输出，这种设备称为信号源。扬声器是接收和转换信号的装置，也就是负载。

3. 进行信息的存储

例如计算机的存储器电路，可以用来存放数据、程序等。

1.1.2 电路的组成与模型

一个基本的电路通常由电源、负载和中间环节等三个部分组成。

电源是产生电能和电信号的装置，如各种发电机、稳压源、信号源等。

负载是取用电能并将其转换为其他形式能量的装置，如电灯、电炉、电动机、扬声器等。

中间环节是传输、控制电能或信号的部分，如连接导线、控制电器、保护电器、放大器等。

电工设备和电器元件的种类很多，即便是很简单的实际器件，在工作时所发生的物理现象也往往是很复杂的。例如，一个实际的绕线电阻器有电流通过时，除了对电流呈现阻力之外，还在导线周围产生磁场，因而兼有电感的性质；在线匝之间还会存在电场，因而又兼有电容的性质。这些现象在高频电路中是绝不能忽视的。又如连接导线总会有电阻，甚至还有电感和电容，所以直接对实际器件和设备组成的电路进行分析和研究，往往是困难的，有时甚至是不可能的。为了便于对电路进行分析和计算，常常将实际器件加以理想化，即忽略它的次要性质，用一个足以表征其主要物理性质的“模型”（或称理想元件）来表示。电路模型具有以下特点：首先是每一种电路模型所反映的物理性质可以用数学表达式精确地描述；其次是任何一个实际器件中所发生的物理现象都可用各种电路模型的适当组合来表示。

理想电路元件主要有电阻元件、电感元件、电容元件、独立电源与受控源等。电阻元件是一种只表示消耗电能并将其转换为热能或其他形式能量的元件，用 R 表示，图形符号如图 1.1.4a 所示。电感元件是一种表示储存磁场能量的元件，用 L 表示，图形符号如图 1.1.4b 所示。电容元件是一种表示储存电场能量的元件，用 C 表示，图形符号如图 1.1.4c 所示。理想电压源是一种表示电压恒定、内阻为零的独立电源元件，图形符号如图 1.1.4d 所示。理想电流源是一种表示电流恒定、内电导为零（即内电阻为无限大）的独立电源元件，图形符号如图 1.1.4e 所示。

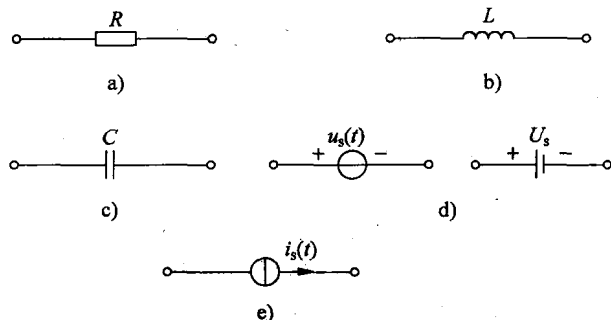


图 1.1.4 理想电路元件

引入了电路模型,那么图 1.1.1 所示的实际电路就可以用相应的电路模型来表示,如图 1.1.5 所示。

应当指出的是,图 1.1.5 中连接导线的电阻是忽略的,看做是理想导体。如不加特别说明,本书后面章节所讨论的电路都是指电路模型。

当对一个电路进行分析时,就是在已知电路结构、元件参数和激励形式的条件下,去确定电路的响应,这将涉及到电流、电压、电动势、功率和能量等物理量的概念。

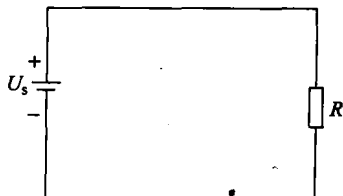


图 1.1.5 图 1.1.1 的电路模型

1.2 电路的基本物理量及其参考方向

电路的基本物理量之一是电流强度,简称为电流,用符号 i 表示。电流强度在数值上等于单位时间内通过某导体横截面的电荷量,即

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

式(1.2.1)表示电流是随时间而变化的,是电流的瞬时值表达式。

当电流不随时间变化时称为直流电流,用 I 表示。此时

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

式中, q 的单位是库(C); t 的单位是秒(s); I 与 i 的单位是安培,简称为安(A)。

电流的辅助量纲有千安(kA)、毫安(mA)和微安(μ A),它们的关系是

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

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

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

在物理学中规定:正电荷的运动方向为电流的方向(实际方向)。但在复杂的直流电路分析中,有时对某一段电路中电流的实际方向很难判断。而在交流电路中,电流的实际方向又是不断变化的,因此很难在电路中标出电流的实际方向。由于这些原因,引入了“电流的参考方向”这个重要概念。

在一段电路中,我们可以在连接导线上任意选定一个箭头方向作为电流的参考方向。当然所选定的参考方向,并不一定就是电流的实际方向。在指定参考方向下,当电流为正值($i > 0$)时,则表示电流的实际方向与所选定的电流的参考方向相同;当电流为负值($i < 0$)时,则表示电流的实际方向与所选定的电流的参考方向相反,如图 1.2.1a、b 所示。

因此电路中的电流,在选定的参考方向下,经过电路的计算所得电流的正负值就反映出电流的实际方向。显然,在未选定电流的参考方向的情况下,电流的正负值是没有意义的。

电路的另一个基本物理量就是电压。由物理学可知,电荷在电场力的作用下产生电流。电荷在移动过程中会发生能量的转换,使电荷失去能量。例如图 1.2.2 所示电路接通时就有电流 i 产生,电场力将单位正电荷由电路的端点 A 经过电阻 R 移动到另一端 B 所做的功,定义为该两点之间的电压 u_{AB} 。

$$u_{AB} = \frac{dw}{dq} \quad (1.2.3)$$

式中, dw 为电荷 dq 移动过程中所做的功, 单位为焦耳(J); 电压的单位为伏特, 简称为伏(V)。

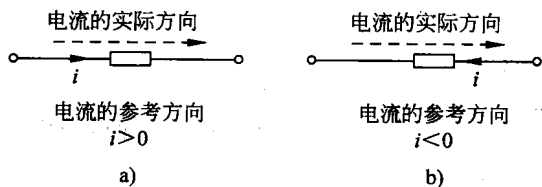


图 1.2.1 电流的参考方向

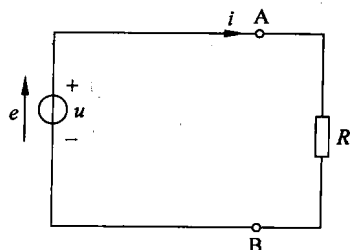


图 1.2.2 电压与电动势的参考方向

电压的辅助单位有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV), 它们的关系是

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

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

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

由上述基本定义可知: 正电荷在 A 点所具有的能量高, 在 B 点所具有的能量低。因此我们说 A 点的电位高, 表示为正极; B 点的电位低, 表示为负极。将 A、B 两点之间的电压称为 A、B 两点间的电位差。即

$$u_{AB} = u_A - u_B \quad (1.2.4)$$

式中, u_A 为 A 点的电位; u_B 为 B 点的电位。

规定从高电位端指向低电位端的方向为电压的实际方向, 即为电位降低的方向。

在图 1.2.2 中, 如果单位正电荷由 B 点经过电源内部移动到 A 点, 正电荷获得能量, 此时是由其他形式的能量转换为电能, 则必有局外力(电源力)对正电荷做功, 使它从低电位移到高电位。我们将这种局外力对正电荷做的功称为电源电动势。电源电动势 e 在数值上等于局外力(电源力)把单位正电荷由电源的低电位端 B, 经过电源内部移动到高电位端 A 所做的功。电动势的单位和电压一样用伏(V)表示。

规定在电源内部由低电位端指向高电位端的方向为电动势的实际方向, 即为电位升高的方向。

如同需要为电流规定参考方向一样, 我们也需要为电压与电动势规定参考方向(也称为参考极性)。

电压与电动势的参考方向, 一般可任意选定。在电路图中通常有两种标定方法: 一种是用“+”、“-”极性表示, 称为参考极性, 如图 1.2.3a 所示; 另一种是用带箭头的短线表示, 称为参考方向, 如图 1.2.3b 所示。当然也可以把电压用“+”、“-”极性, 电动势用带箭头的短线表示, 如图 1.2.3c 所示。在书写时也可以用双下标表示, 如 u_{AB} 则表示电压的参考方向为由 A 点指向 B 点。用电压、电动势代数值的正负结合参考方向可表示其实际方向。当电压或电动势为正值时, 则实

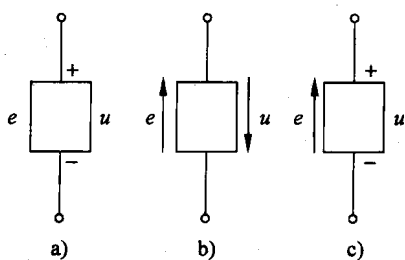


图 1.2.3 电压、电动势参考方向的表示法

实际方向与参考方向一致；当电压或电动势为负值时，则实际方向与参考方向相反。

在电路的分析与计算中，电流、电压与电动势的参考方向可以任意标定，但一经标定，电路方程的列写就必须在标定的参考方向下进行，不应改变。

对一段电路或一个元件上电压的参考方向和电流的参考方向可以独立地任意选定。若选定的电流参考方向从标有电压“+”极性的一端流入，而从标有电压“-”极性的一端流出，则电流的参考方向与电压的参考方向选取一致。这种情况称为关联参考方向，如图 1.2.4 所示。采用关联参考方向，在未加说明的情况下，只要选定一段电路的电压或者电流中的任何一个物理量的参考方向后，另一个物理量的参考方向也就随之而定了。

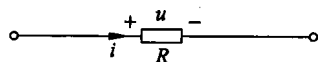


图 1.2.4 电压与电流的关联参考方向

由前所述，正电荷从电路中的 A 点经元件移到 B 点时，将失去能量或得到能量。若 A 点为元件电压的“+”极，B 点为元件电压的“-”极，则正电荷释放能量，即此元件吸收能量；若 A 点为元件电压的“-”极，B 点为元件电压的“+”极，则正电荷获得能量，即此元件向外释放能量。因此元件吸收的能量可以根据电压的定义，由式(1.2.3)得

$$dw = u dq$$

根据电流的定义，由式(1.2.1)得

$$dq = i dt$$

于是在电压、电流的关联参考方向条件下，如图 1.2.4 所示，该元件在 dt 时间内吸收的能量为

$$dw = u i dt$$

式中， dw 的单位为焦耳，简称焦(J)。

该元件吸收能量的速率，即吸收能量的功率为

$$p = \frac{dw}{dt} = ui \quad (1.2.5)$$

功率的单位为瓦特，简称瓦(W)。辅助单位有千瓦(kW)和毫瓦(mW)，它们的关系是

$$1\text{kW} = 10^3\text{W}$$

$$1\text{mW} = 10^{-3}\text{W}$$

元件采用关联参考方向后，我们可以用式(1.2.5)计算元件的功率。由于电压、电流均为代数量，所以计算得到的功率也将是一个代数量。若 $p > 0$ ，则表示该元件吸收功率；若 $p < 0$ ，则表示该元件产生功率。

若采用非关联参考方向，如图 1.2.5 所示。由于此时电流为关联参考方向时电流的负值，因此在应用功率计算公式时，前面应加一个负号，即

$$p = -ui \quad (1.2.6)$$

若用式(1.2.6)计算所得的功率 $p > 0$ ，表示该元件吸收功率；若计算所得的功率 $p < 0$ ，表示该元件产生功率。

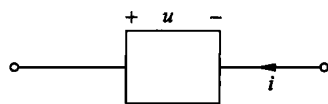


图 1.2.5 电压、电流的非关联参考方向

【例 1.2.1】 计算图 1.2.6a ~ d 所示各元件的功率，并判别该元件是吸收功率还是产生功率。

解：1) 对图 1.2.6a 所示元件， u 与 i 为关联参考方向，则

$$p = ui = (5 \times 2)\text{W} = 10\text{W}$$

$p > 0$, 表示该元件吸收功率。

2) 对图 1.2.6b 所示元件, u 与 i 为非关联参考方向, 则

$$p = -ui = (-5 \times 2) \text{ W} = -10 \text{ W}$$

$p < 0$, 表示该元件产生功率。

3) 对图 1.2.6c 所示元件, u 与 i 为关联参考方向, 则

$$p = ui = [5 \times (-2)] \text{ W} = -10 \text{ W}$$

$p < 0$, 表示该元件产生功率。

4) 对图 1.2.6d 所示元件, u 与 i 为非关联参考方向, 则

$$p = -ui = -[(-5) \times 2] \text{ W} = 10 \text{ W}$$

$p > 0$, 表示该元件吸收功率。

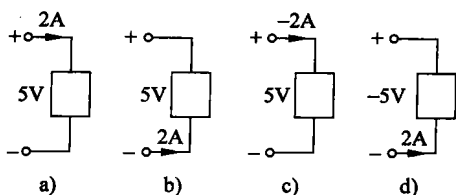


图 1.2.6 例 1.2.1 的电路

1.3 电阻元件

电阻元件是从实际电阻器抽象出来的电路模型, 是一种二端元件。如果在任何时刻, 它两端的电压与通过它的电流的关系服从欧姆定律, 则称为线性电阻元件。对图 1.3.1a 所示电阻元件的电压、电流为关联参考方向, 则有

$$u = Ri \quad (1.3.1)$$

在直流电路中

$$U = RI \quad (1.3.2)$$

式中, R 为电阻元件的电阻值。 R 的单位为欧姆, 简称欧(Ω), 它的辅助单位有千欧($\text{k}\Omega$)和兆欧($\text{M}\Omega$), 它们的关系是

$$1\text{k}\Omega = 10^3\Omega$$

$$1\text{M}\Omega = 10^6\Omega$$

以电流为横坐标, 以电压为纵坐标所形成的平面称为 i - u 平面。电阻元件的电压与电流之间的关系, 可以用此平面上的一条曲线表示。这条曲线称为电阻元件的伏安特性曲线。线性电阻元件的伏安特性曲线是通过原点的一条直线, 如图 1.3.1b 所示。

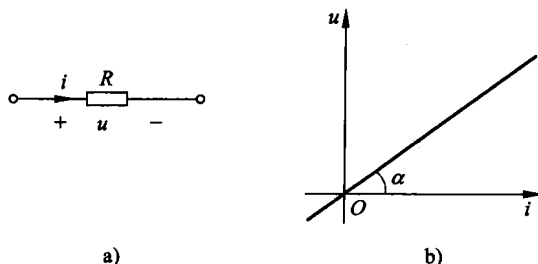


图 1.3.1 线性电阻元件及其伏安特性曲线

电阻元件也可以用另一个参数——电导来表示, 定义为

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.3.3)$$

电导的单位是西门子, 简称西(S)。

式(1.3.2)也可以写成

$$I = GU \quad (1.3.4)$$

应当指出式(1.3.2)与式(1.3.4)是在电压、电流参考方向关联时得到的。若电压、电流的参考方向非关联, 则式(1.3.2)与式(1.3.4)应分别改为

$$U = -RI \quad (1.3.5)$$

$$I = -GU \quad (1.3.6)$$

在电压和电流的关联参考方向下, 电阻元件吸收的功率为

$$P = UI = RI^2 = U^2/R \quad (1.3.7)$$

或
$$P = UI = GU^2 = I^2/G \quad (1.3.8)$$

由电阻元件的伏安特性曲线可知, 电阻元件的 u 和 i 的实际方向总是一致的, 因此功率总是正值。这说明电阻元件总是吸收功率, 是耗能元件。

电阻器吸收的能量往往转换为热能, 导致电阻器的温度升高, 温度升高就有可能将电阻器烧坏。所以一般电阻器除了标明电阻值之外, 还要标出它的额定功率值或额定电流值。

应当注意: 电气设备或电工器件在给定的工作条件下, 规定的工作电压叫做额定电压, 用 U_N 表示; 允许通过的最大电流叫做额定电流 I_N ; 在额定电压、额定电流下工作时的功率叫做额定功率, 用 P_N 表示。

【例 1.3.1】 有一盏白炽灯, 标有 220V, 100W 的字样。问:

(1) 能否将其接到 380V 的电源上使用?

(2) 若将其接到 127V 的电源上使用, 其消耗功率为多少?

解: (1) 白炽灯上标有 220V, 100W 字样, 表示其额定工作电压为 220V, 额定功率为 100W, 所以不能将其接到 380V 的电源上使用, 否则会因电压过高而烧坏。

(2) 白炽灯的额定工作电流为

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{100}{220} \text{A} = \frac{5}{11} \text{A}$$

白炽灯灯丝的电阻为

$$R = \frac{U_N}{I_N} = \frac{220}{\frac{5}{11}} \Omega = 484 \Omega$$

将它接到 127V 的电源上时, 白炽灯的电阻不变, 所以此时消耗的功率为

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{127^2}{484} \text{W} = 33.32 \text{W}$$

可见, 将该灯接到 127V 的电源上, 虽然能安全工作, 但其消耗的功率只有 33.32W, 白炽灯的亮度不够。

【例 1.3.2】 在电路中需要一个能通过 300mA, 电阻值为 100Ω 的电阻器, 现有下列电阻器: 100Ω , 5W; 100Ω , 7.5W; 100Ω , 10W。试问选用哪种电阻器为宜?

解: $P = RI^2 = 100 \times (0.3)^2 \text{W} = 9 \text{W}$

故选用 100Ω , 10W 的电阻器为宜。

1.4 独立电源

要使电路中有电流流动，电路中必须有独立电源。独立电源是电路中的有源元件，它能够连续不断地提供电压和电流。

独立电源有两种不同的类型：一种是电压源，如电池、直流发电机、交流发电机、信号源等；还有一种是电流源，如光电池等。

1.4.1 电压源

电压源通常指理想电压源，是从实际电源抽象出来的一种电路模型。这种电源不论流过电流为多少，其两端总能保持一定的电压。

因此，电压源具有两个基本性质：①电压源的端电压是一个定值 U_s 或是一定的时间函数 $u_s(t)$ ，与流过它的电流大小无关；②流过电压源的电流大小取决于与它相连接的外电路。

电压源的电路符号如图 1.4.1 所示，其中 $u_s(t)$ 为电压源的电压，而“+”、“-”是其参考极性。如果电压源的电压为常数，即 $u_s(t) = U_s$ ，就称为直流电压源。直流电压源的电路符号还可以用图 1.4.2a 的符号来表示。图中长线段表示电压源的高电位端，即正极；短线段表示电压源的低电位端，即负极。图 1.4.2a 的电路符号也可以用来表示电池。图 1.4.2b 给出了某直流电压源的伏安特性曲线，它是 i - u 平面上一条不通过原点且与电流轴平行的直线。

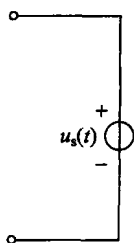


图 1.4.1 电压源的
电路符号

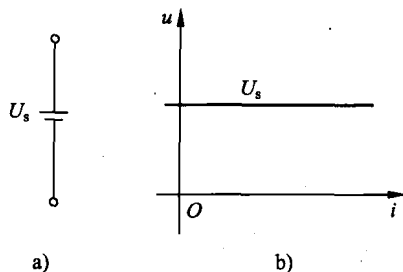


图 1.4.2 直流电压源的电路符号及
其伏安特性曲线

电压源实际上是不存在的，只有在实际电压源（如电池、发电机等）的内电阻可以忽略不计的情况下，才可以视为电压源。因此我们可以用一个电压源 U_s 与一个电阻元件 R_0 相串联的电路模型来表示实际电压源。例如一个实际直流电压源就可以用图 1.4.3 中虚线框内的部分表示。

当实际电压源接上负载电阻 R_L 以后，就有电流流过电源。对于实际直流电压源，按图 1.4.3 中所标参考方向，则有

$$U = U_s - R_0 I \quad (1.4.1)$$

式中， U_s 为电压源的电压； R_0 为实际电压源的内阻； I 为流过负载的电流； U 为实际电压源

的端电压,亦即负载电阻 R_L 两端的电压。其中 U_s 、 R_o 是常数,而 U 和 I 是随负载电阻 R_L 的变化而变化的。

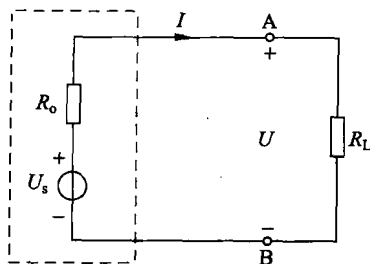


图 1.4.3 实际电压源供电的电路

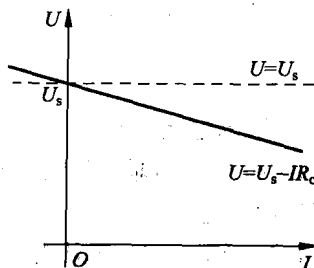


图 1.4.4 实际电压源的伏安特性曲线

由式(1.4.1)可知,实际直流电压源的伏安特性曲线是一条如图 1.4.4 所示的实直线。由图中可以看出:在 I 不等于零的情况下,电源的端电压 U 低于电压源的电压 U_s ,其差值与电流 I 成正比。通常实际电压源的内阻 R_o 很小。若 $R_o \ll R_L$,则内电阻的电压 $I R_o \ll U$,故有 $U \approx U_s$,此时可以把一个实际电压源看做为一个电压源。

当输出电流 $I=0$ 时,实际电压源处于开路状态,此时输出电压称为开路电压,用 $U_{oc}^{\ominus}$ 表示,可知 $U_{oc} = U_s$ 。当输出电压 $U=0$ 时,实际电压源处于短路状态,此时输出电流称为短路电流;用 $I_{sc}^{\ominus}$ 表示,可知 $I_{sc} = U_s/R_o$ 。对于化学电池而言,其内阻 R_o 非常小,而电压源电压 U_s 一定,故短路电流 I_{sc} 非常大,在短时间内即可毁坏此电源。因此,实际电压源器件不允许短路使用。

1.4.2 电流源

电流源通常指理想电流源,是以实际电源抽象出来的另一种电路模型。这种电源不论两端的电压为多少总能向外提供一定的电流。

因此电流源应具有两个基本性质:①电流源发出的电流是一个定值 I_s 或是一定的时间函数 $i_s(t)$,与两端的电压无关;②电流源两端电压的大小取决于与它相连接的外电路。

电流源的电路符号如图 1.4.5a 所示,其中 $i_s(t)$ 为电流源的电流,箭头所指的方向为 $i_s(t)$ 的参考方向。如果电流源的电流为常数,即 $i_s(t) = I_s$,就称为直流电流源。图 1.4.5b 给出了某直流电流源的伏安特性曲线,它是 $i-u$ 平面上一条不通过原点且与电压轴平行的直线。

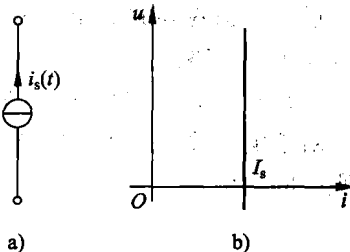


图 1.4.5 电流源的电路符号与伏安特性曲线

与电压源相似,电流源实际上也是不存在的。只有当实际电流源(如光电池等)的内电阻为无穷大时,才可以视为电流源。因此我们用一个电流源 $i_s(t)$ 和一个电阻元件 R_o 相并联的电路模型来表示实际电流源。例如,一个实际直

⊖ 下标 oc 是开路(open circuit)的简写。

⊖ 下标 sc 是短路(short circuit)的简写。

流电流源就可以用图 1.4.6 中虚线框内的部分表示。

当实际电流源接上负载电阻 R_L 以后, 就有电流流过 R_L 。对于实际直流电流源, 按图 1.4.6 中所标参考方向, 则有

$$I = I_s - \frac{U}{R_0} \quad (1.4.2)$$

式中, I_s 为电流源的电流; R_0 为实际电流源的内电阻; I 为流过负载电阻 R_L 的电流; U 为实际电流源的端电压, 亦即负载电阻 R_L 两端的电压。其中 I_s 和 R_0 是常数, 而 U 和 I 随负载电阻 R_L 的变化而变化。

由式(1.4.2)可知: 实际电流源的伏安特性曲线也是一条如图 1.4.7 所示的实直线。

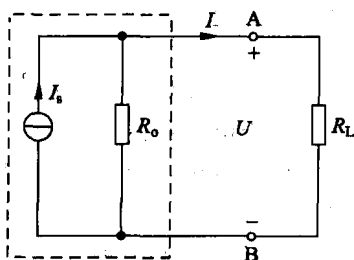


图 1.4.6 实际电流源供电的电路

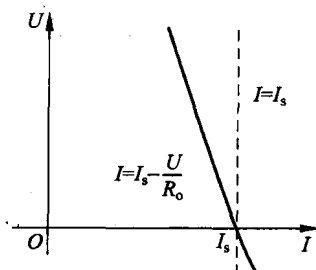


图 1.4.7 实际电流源的伏安特性曲线

通常实际电流源的内阻 R_0 很大, 若 $R_0 \gg R_L$, 则流过 R_0 的电流 $\frac{U}{R_0} \ll I$, 故有 $I \approx I_s$ 。此时就可以把一个实际电流源看做是一个电流源。

当输出电压 $U=0$ 时, 实际电流源处于短路状态, 此时短路电流 $I_{sc} = I_s$ 。当输出电流 $I=0$ 时, 实际电流源处于开路状态, 此时开路电压 $U_{oc} = R_0 I_s$ 。对于光电池而言, 其并联电阻 R_0 非常大, 而电流源电流 I_s 一定, 故开路电压 U_{oc} 非常大, 在短时间内即可毁坏此电源。因此, 实际电流源不允许开路使用。

【例 1.4.1】 计算图 1.4.8 所示电路中各电源发出的功率。

解: 根据理想电流源的基本性质, 流过电阻 R 的电流 $I=2A$ 。

设电流源两端的电压为 U , 参考方向如图所示, 其值取决于外电路, 即

$$U = -RI + 12V = (-5 \times 2 + 12)V = 2V$$

对于电流源, 电压与电流为关联参考方向, 则电流源吸收的功率为

$$P_I = 2 \times 2W = 4W$$

可知电流源发出的功率为 $-4W$ 。

对于电压源, 电压与电流为非关联参考方向, 则电压源吸收的功率为

$$P_U = -12 \times 2W = -24W$$

可知电压源发出的功率为 $24W$ 。

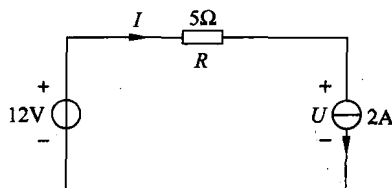


图 1.4.8 例 1.4.1 图