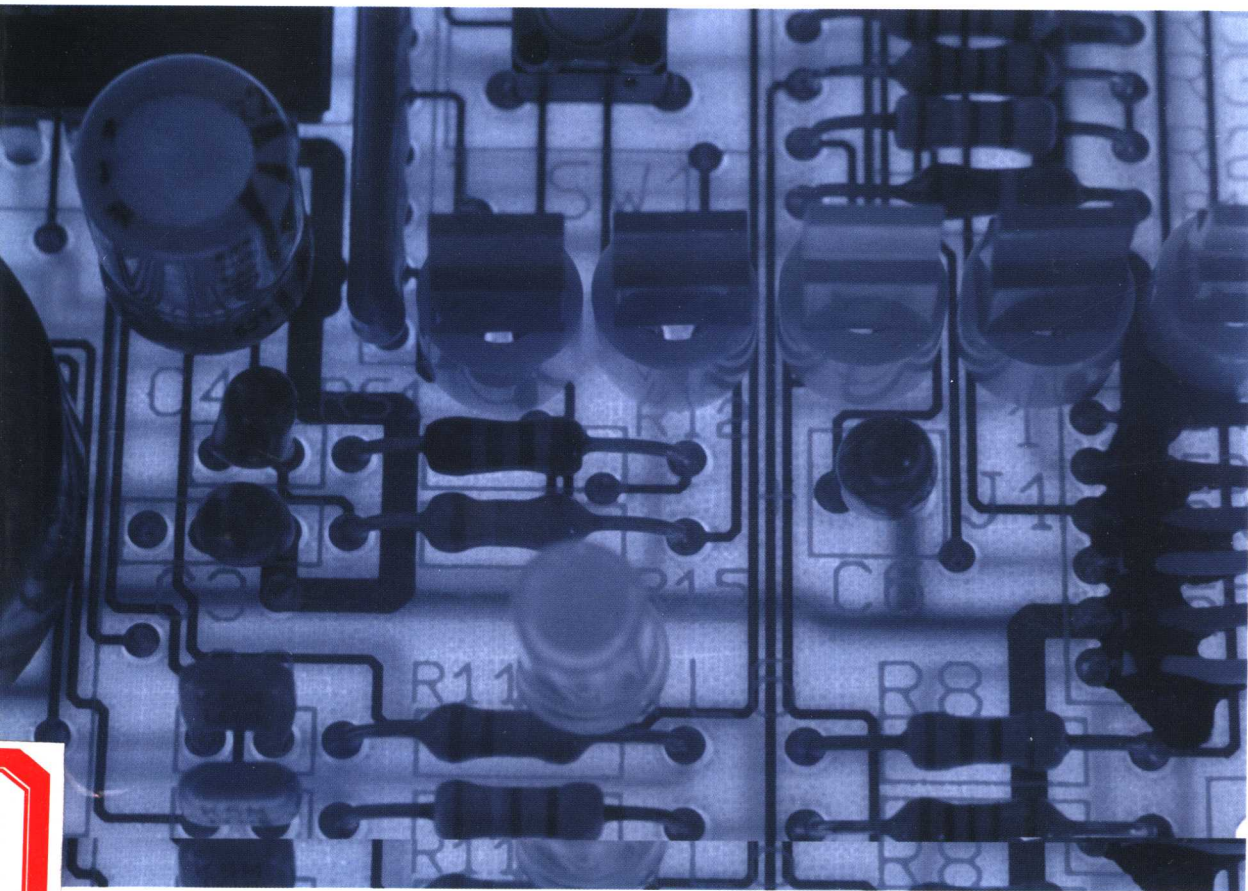


21 世纪高等院校教材

# 电路与模拟电子学

王成华 潘双来 江爱华 编著



 科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

21 世纪高等院校教材

# 电路与模拟电子学

王成华 潘双来 江爱华 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

“电路与模拟电子学”是计算机、电子、信息、自动控制等专业一门重要的技术基础课程。全书包括电路分析基础和模拟电子技术两大部分内容。本书着重于基本概念、基本原理和基本电路的分析和应用,引入了 PSpice、EWB 等电路设计与仿真的内容,同时介绍了可编程模拟器件的原理及应用。本书的例题与习题富于思考性和启发性。

本书兼顾了深度和广度,适合于计算机、电子、信息、自动控制等专业本科、大专两个层次的学生和各种类型的成人教育使用;对相关工程技术人员,也是一本实用的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电路与模拟电子学/王成华,潘双来,江爱华编著. —北京:科学出版社,2003  
(21 世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-011543-0

I. 电… II. ①王…②潘…③江… III. ①电路-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 (2003) 第 045496 号

责任编辑:巴建芬 / 文案编辑:彭 斌 姚 晖 / 责任校对:柏连海

责任印制:刘秀平 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2003 年 8 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2003 年 8 月第一次印刷 印张:23 1/2

印数:1—3 000 字数:462 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

## 前 言

长期以来,“电路基础”和“模拟电子技术”是相互独立的两门课,教材是独立的两本书,内容庞杂,涉及面广。计算机专业和本科非电专业在选用这些教材时,不得不做一些内容的取舍和增补,以满足教学的需要。

早在 1993 年,中国计算机学会教育委员会和全国高等院校计算机教学研究会在研究、学习、借鉴了 1990 年 12 月 ACM 和 IEEE/CS 联合专题组发表的“Computing Curricula 1991”报告的基础上,结合我国高等院校计算机本科教学的实际情况,制定了“计算机学科教学计划 1993”。教学计划中明确规定,“电路与电子学”是计算机专业的一门技术基础课程,内容包括电路基础和模拟电子技术基础两方面,通过本课程的学习,应使学生掌握电路和电子学方面的基本知识。

本着“强化电路基本概念,突出集成电路应用,融入计算机仿真技术”的原则,结合教改的研究成果,我们在借鉴国内外教材成功经验的基础上,对原属于“电路基础”和“模拟电子技术”两门课程的内容进行优化组合,并适当扩展了一些包括模拟可编程器件的新知识。在编写时运用正文、例题、习题之间的分工与配合,达到使学生掌握概念、强化应用的目的。

本书由王成华主编,王成华、潘双来、江爱华共同编写。具体各章编写工作安排为:潘双来编写第一、二、三、四章,江爱华编写第五、六章,王成华编写第七、八、九、十章。

本书由教育部教学指导委员会委员、南京理工大学周淑阁教授主审。她认真负责地审阅了全稿,并提出了不少宝贵的意见与建议,特此表示衷心的感谢。

在编写过程中,我们得到了南京航空航天大学教务处领导的关心与帮助,研究生吕勇、毕未奇、姚远、叶佳、赵明等在文字录入和绘图方面做了大量的工作,特此致谢。

由于我们的水平有限,加之时间比较仓促,书中错误和不足之处在所难免,敬请使用本教材的师生和其他读者批评指正。

编 者

2003 年 3 月于南京航空航天大学

# 目 录

## 前言

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 第一章 电路的基本概念 .....        | (1)  |
| 1.1 电路和电路模型 .....        | (1)  |
| 1.2 电路的基本物理量 .....       | (2)  |
| 1.2.1 电路分析的基本变量 .....    | (2)  |
| 1.2.2 电流和电压的参考方向 .....   | (3)  |
| 1.3 电功率和电能 .....         | (5)  |
| 1.4 无源二端元件 .....         | (6)  |
| 1.4.1 电阻元件 .....         | (6)  |
| 1.4.2 电容元件 .....         | (9)  |
| 1.4.3 电感元件 .....         | (10) |
| 1.5 有源二端元件 .....         | (12) |
| 1.5.1 电压源 .....          | (12) |
| 1.5.2 电流源 .....          | (12) |
| 1.5.3 电压源与电流源的等效变换 ..... | (13) |
| 1.6 受控源 .....            | (17) |
| 1.7 基尔霍夫定律 .....         | (19) |
| 1.7.1 电路的几个名词 .....      | (19) |
| 1.7.2 基尔霍夫电流定律 .....     | (19) |
| 1.7.3 基尔霍夫电压定律 .....     | (20) |
| 习题 .....                 | (23) |
| 第二章 电阻电路分析 .....         | (28) |
| 2.1 简单电路的分析计算 .....      | (28) |
| 2.1.1 电阻的联接 .....        | (28) |
| 2.1.2 简单电阻电路的计算 .....    | (31) |
| 2.2 复杂电路的一般分析 .....      | (33) |
| 2.2.1 支路电流法 .....        | (33) |
| * 2.2.2 网络的线图和独立变量 ..... | (35) |
| 2.2.3 节点电位法 .....        | (38) |
| 2.3 电路基本定理及其应用 .....     | (41) |

|                            |              |
|----------------------------|--------------|
| 2.3.1 叠加定理 .....           | (41)         |
| 2.3.2 等效电源定理 .....         | (44)         |
| 2.4 含受控源电阻电路的分析 .....      | (49)         |
| 2.4.1 受控源的等效变换 .....       | (50)         |
| 2.4.2 含受控源电阻电路的分析 .....    | (51)         |
| 2.5 非线性电阻电路 .....          | (53)         |
| 2.5.1 非线性电阻元件 .....        | (53)         |
| 2.5.2 非线性电阻电路的图解法 .....    | (55)         |
| 2.5.3 小信号分析法 .....         | (56)         |
| 2.6 用 EWB 分析直流电路 .....     | (59)         |
| 习题 .....                   | (61)         |
| <b>第三章 动态电路分析</b> .....    | <b>(71)</b>  |
| 3.1 动态电路的基本概念 .....        | (71)         |
| 3.1.1 动态电路及其方程 .....       | (71)         |
| 3.1.2 换路定律和初始条件的计算 .....   | (72)         |
| 3.2 一阶电路的分析 .....          | (75)         |
| 3.2.1 一阶电路的零输入响应 .....     | (75)         |
| 3.2.2 一阶电路的零状态响应 .....     | (82)         |
| 3.2.3 一阶电路的全响应 .....       | (86)         |
| 3.3 阶跃信号与阶跃响应 .....        | (90)         |
| 3.3.1 阶跃函数 .....           | (90)         |
| 3.3.2 阶跃响应 .....           | (92)         |
| 3.4 二阶电路简介 .....           | (94)         |
| 3.4.1 二阶电路的零输入响应 .....     | (94)         |
| 3.4.2 二阶电路的零状态响应和全响应 ..... | (100)        |
| 3.5 用 EWB 分析动态电路 .....     | (102)        |
| 习题 .....                   | (103)        |
| <b>第四章 交流电路分析</b> .....    | <b>(110)</b> |
| 4.1 交流信号的基本概念 .....        | (110)        |
| 4.1.1 正弦量及其描述 .....        | (110)        |
| 4.1.2 正弦量的相量表示 .....       | (113)        |
| 4.2 正弦电路中的电阻、电感和电容 .....   | (115)        |
| 4.3 正弦稳态电路的分析 .....        | (118)        |
| 4.3.1 基尔霍夫定律的相量形式 .....    | (118)        |
| 4.3.2 阻抗和导纳 .....          | (119)        |

|                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| 4.3.3 正弦稳态电路的分析 .....         | (124)        |
| 4.4 正弦稳态电路的功率 .....           | (128)        |
| 4.5 正弦交流电路中的谐振 .....          | (132)        |
| 4.5.1 串联电路的谐振 .....           | (132)        |
| 4.5.2 并联谐振电路 .....            | (135)        |
| * 4.6 含有耦合电感的电路 .....         | (137)        |
| 4.6.1 互感 .....                | (137)        |
| 4.6.2 含有耦合电感电路的计算 .....       | (140)        |
| 4.6.3 空心变压器 .....             | (144)        |
| 4.7 三相交流电路 .....              | (146)        |
| 4.7.1 三相电源及其联接 .....          | (146)        |
| 4.7.2 三相电路的联接 .....           | (149)        |
| 4.7.3 三相电路的功率 .....           | (152)        |
| 4.8 非正弦周期电流电路 .....           | (153)        |
| 4.8.1 非正弦量的谐波分析 .....         | (153)        |
| 4.8.2 有效值、平均值和平均功率 .....      | (154)        |
| 4.8.3 非正弦周期电流电路的稳态分析 .....    | (157)        |
| 4.9 用 PSpice 分析正弦稳态电路 .....   | (159)        |
| 习题 .....                      | (161)        |
| <b>第五章 半导体二极管及其应用电路 .....</b> | <b>(169)</b> |
| 5.1 半导体基础知识 .....             | (169)        |
| 5.1.1 导体、绝缘体和半导体 .....        | (169)        |
| 5.1.2 本征半导体 .....             | (169)        |
| 5.1.3 杂质半导体 .....             | (170)        |
| 5.1.4 PN 结的形成及特性 .....        | (172)        |
| 5.2 半导体二极管 .....              | (175)        |
| 5.2.1 半导体二极管的结构 .....         | (175)        |
| 5.2.2 半导体二极管的伏安特性及其参数 .....   | (176)        |
| 5.2.3 半导体二极管的等效电路 .....       | (178)        |
| 5.3 单相整流滤波电路 .....            | (180)        |
| 5.3.1 单相半波整流电路 .....          | (180)        |
| 5.3.2 单相桥式整流电路 .....          | (181)        |
| 5.3.3 滤波电路 .....              | (182)        |
| 5.4 稳压二极管及其稳压电路 .....         | (184)        |
| 5.4.1 稳压二极管 .....             | (184)        |

|                            |              |
|----------------------------|--------------|
| 5.4.2 稳压管稳压电路 .....        | (185)        |
| 5.5 用 EWB 分析整流滤波电路 .....   | (187)        |
| 习题 .....                   | (188)        |
| <b>第六章 放大电路基础</b> .....    | <b>(192)</b> |
| 6.1 半导体三极管 .....           | (192)        |
| 6.1.1 三极管的结构及符号 .....      | (192)        |
| 6.1.2 三极管的工作原理 .....       | (193)        |
| 6.1.3 三极管的特性曲线 .....       | (195)        |
| 6.1.4 三极管的微变等效电路 .....     | (197)        |
| 6.1.5 三极管的主要参数 .....       | (198)        |
| 6.2 共射放大电路 .....           | (199)        |
| 6.2.1 放大电路的基本概念与技术指标 ..... | (199)        |
| 6.2.2 共射放大电路的组成 .....      | (200)        |
| 6.2.3 共射放大电路的工作原理 .....    | (201)        |
| 6.2.4 共射放大电路的分析方法 .....    | (202)        |
| 6.2.5 射极偏置电路 .....         | (207)        |
| 6.3 共集放大电路与共基放大电路 .....    | (210)        |
| 6.3.1 共集放大电路 .....         | (211)        |
| 6.3.2 共基放大电路 .....         | (213)        |
| 6.3.3 三种组态放大电路的比较 .....    | (214)        |
| 6.4 多级放大电路 .....           | (214)        |
| 6.4.1 多级放大电路的组成 .....      | (214)        |
| 6.4.2 多级放大电路的耦合方式 .....    | (215)        |
| 6.4.3 多级放大电路的分析计算 .....    | (216)        |
| 6.5 功率放大电路 .....           | (218)        |
| 6.5.1 功率放大电路的特点 .....      | (219)        |
| 6.5.2 互补推挽功率放大电路 .....     | (219)        |
| 6.6 场效应管及其放大电路 .....       | (225)        |
| 6.6.1 结型场效应管 .....         | (225)        |
| 6.6.2 绝缘栅型场效应管 .....       | (230)        |
| 6.6.3 场效应管的主要参数 .....      | (232)        |
| 6.6.4 场效应管的微变等效电路 .....    | (232)        |
| 6.6.5 场效应管放大电路 .....       | (233)        |
| 6.6.6 场效应管与三极管的比较 .....    | (236)        |
| 6.7 差动放大电路 .....           | (237)        |



|                                       |              |
|---------------------------------------|--------------|
| 6.7.1 直接耦合放大电路中的主要问题 .....            | (237)        |
| 6.7.2 差动放大电路的工作原理 .....               | (237)        |
| 6.7.3 差动放大电路的分析计算 .....               | (239)        |
| 6.8 集成运算放大电路 .....                    | (244)        |
| 6.8.1 集成运算放大电路的组成 .....               | (244)        |
| 6.8.2 集成运算放大电路的主要参数 .....             | (244)        |
| 6.8.3 集成运算放大电路的分类及选用原则 .....          | (246)        |
| 6.8.4 理想集成运算放大电路 .....                | (246)        |
| 6.9 用 EWB 分析放大电路 .....                | (248)        |
| 习题 .....                              | (250)        |
| <b>第七章 负反馈放大电路</b> .....              | <b>(259)</b> |
| 7.1 反馈的概念 .....                       | (259)        |
| 7.1.1 反馈的基本概念 .....                   | (259)        |
| 7.1.2 反馈的分类与判断 .....                  | (259)        |
| 7.1.3 反馈放大器的一般表达式 .....               | (265)        |
| 7.2 负反馈对放大器性能的影响 .....                | (266)        |
| 7.2.1 提高放大倍数的稳定性 .....                | (266)        |
| 7.2.2 减小非线性失真 .....                   | (267)        |
| 7.2.3 扩展通频带 .....                     | (267)        |
| 7.2.4 对输入电阻和输出电阻的影响 .....             | (268)        |
| 7.3 深度负反馈放大器的分析计算 .....               | (270)        |
| 7.4 用 EWB 分析负反馈放大电路 .....             | (274)        |
| 习题 .....                              | (276)        |
| <b>第八章 集成运放的应用</b> .....              | <b>(282)</b> |
| 8.1 集成运放在数学运算中的应用 .....               | (282)        |
| 8.1.1 比例运算电路 .....                    | (282)        |
| 8.1.2 求和运算电路 .....                    | (286)        |
| 8.1.3 积分和微分运算电路 .....                 | (289)        |
| 8.1.4 对数和反对数运算电路 .....                | (292)        |
| 8.1.5 乘法和除法运算电路 .....                 | (293)        |
| 8.1.6 电压-电流(V/I)和电流-电压(I/V)变换电路 ..... | (293)        |
| 8.2 有源滤波器电路 .....                     | (294)        |
| 8.2.1 有源滤波器的分类 .....                  | (294)        |
| 8.2.2 有源低通滤波器 .....                   | (295)        |
| 8.2.3 有源高通滤波器 .....                   | (297)        |

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| 8.2.4 带通滤波器 .....               | (298)        |
| 8.2.5 带阻滤波器 .....               | (299)        |
| 8.3 电压比较器 .....                 | (300)        |
| 8.3.1 单门限比较器 .....              | (301)        |
| 8.3.2 迟滞比较器 .....               | (301)        |
| 8.3.3 窗口比较器 .....               | (304)        |
| 8.4 用 EWB 分析集成运放应用电路 .....      | (304)        |
| 习题 .....                        | (306)        |
| <b>第九章 波形产生电路与直流稳压电源</b> .....  | <b>(315)</b> |
| 9.1 正弦波产生电路 .....               | (315)        |
| 9.1.1 振荡的基本原理 .....             | (315)        |
| 9.1.2 文氏电桥振荡器 .....             | (316)        |
| 9.1.3 石英晶体振荡器 .....             | (317)        |
| 9.2 非正弦波产生电路 .....              | (319)        |
| 9.2.1 方波发生器 .....               | (319)        |
| 9.2.2 三角波发生器 .....              | (321)        |
| 9.2.3 锯齿波发生器 .....              | (322)        |
| 9.2.4 压控振荡器 .....               | (323)        |
| 9.3 直流稳压电源 .....                | (326)        |
| 9.3.1 串联反馈式线性稳压电路 .....         | (327)        |
| 9.3.2 三端集成稳压器 .....             | (330)        |
| 9.4 用 EWB 分析波形产生电路 .....        | (333)        |
| 习题 .....                        | (335)        |
| <b>第十章 模拟可编程器件的原理及其应用</b> ..... | <b>(341)</b> |
| 10.1 模拟可编程器件的原理 .....           | (341)        |
| 10.2 模拟可编程器件的应用研究 .....         | (344)        |
| 习题 .....                        | (348)        |
| <b>“电路与电子学”模拟考试试卷一</b> .....    | <b>(349)</b> |
| <b>“电路与电子学”模拟考试试卷二</b> .....    | <b>(351)</b> |
| <b>本书常用符号表</b> .....            | <b>(353)</b> |
| <b>中英名词对照表</b> .....            | <b>(357)</b> |
| <b>参考文献</b> .....               | <b>(366)</b> |

# 第一章 电路的基本概念

本章介绍电路模型和一般电路的基本物理量,电压、电流参考方向的概念;介绍电阻、电容、电感、独立电源和受控电源等电路元件;讨论电路的基本定律。

## 1.1 电路和电路模型

电路就是电流所通过的路径。实际上电路是由若干电气器件按照一定的方式互相连接而构成的总体。构成电路的器件如电阻器、电容器、电感器、晶体管、变压器、开关和电池等统称为实际的电路器件。为了便于对实际电路进行分析,将实际电路器件理想化(或称模型化),即在一定条件下突出其主要的电磁性质,忽略其次要因素,将其近似地看做理想电路元件。由一些理想化元件组成的电路,就是实际电路的电路模型。一般将理想电路元件简称为元件,将电路模型简称为电路。本课程的任务不是研究如何建立实际器件的理想化模型,而是根据电路模型来探讨其基本定律、定理及分析方法。

电路的功能是实现电能的传输与分配。如在电力系统里,电子电路的作用是进行电信号的传输与处理;日常使用的收音机、电视机和移动电话等,能把接收到的微弱的无线电信号进行加工处理,最后给出人们需要的声音和图像;又如计算机可对输入的数据进行指定的计算或对各种机械进行控制等。电路中所应用的各种元件,按其工作时表现出的电特性可分为两类:一类元件工作时可以向电路提供电能,称之为电源;另一类元件工作时吸收电能并将电能转化为其他形式的能量,这类元件称为负载。电阻、电容和电感三种元件就是电路中常见的元件。实际的某个器件在工作时的特征可以用一种理想元件或几种理想元件的组合来表示。

图 1.1.1 是手电筒电路的模型。其中,电池可看做是能提供恒定电压  $U_S$  的理想电压源和具有内电阻值  $R_S$  的电阻元件组成的串联组合,电阻元件  $R_L$  表示小灯泡,连接导线则是无电阻的理想导线, $S$  是开关。同一个实际器件在不同的条件下可以用不同的理想元件来表示。比如该例中的电池,在电流比较小或使用时间较短时,因内部能量损耗较小,在忽略其损耗时,则可用一个理想电压源表示。

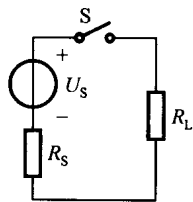


图 1.1.1 电路模型示例

元件通过端子与外电路相连,按端子的数目可将元件分为二端元件、三端元件、四端元件等。比如,电阻、电感、电容是二

端元件,晶体三极管是三端元件。具有三个或三个以上端子的元件统称为多端元件,如受控源、理想变压器和运算放大器等。电路元件按其对外提供还是不提供能量又可分为有源元件和无源元件。

比较复杂的电路称为电网络,简称网络。本书只讨论集总参数元件构成的所谓集总参数电路,上述电路元件均为集总参数元件,集总参数元件的电磁过程被认为都是集中在元件内部进行。工程中遇到的大量电路都可作为集总参数电路来处理。可以这样处理的条件是:若电路元件及其连接成的电路尺寸远小于电路最高工作频率  $f$  所对应的电磁波的波长  $\lambda$ ,则电路的实际尺寸可以忽略不计而看做是集总参数电路。例如,若计算机电路工作频率高达 500MHz,电磁波的传播速度(光速)为  $v$ ,则对应的波长为  $\lambda = v/f = 0.6\text{m}$ ,因采用大规模和超大规模集成电路,器件和电路被集成在几毫米的硅片上,这时电路就属于集总参数电路。

## 1.2 电路的基本物理量

### 1.2.1 电路分析的基本变量

电路中基本的物理量是电流、电压及电功率。一般情况下,它们都是时间  $t$  的函数,分别用  $i(t)$ 、 $u(t)$  及  $p(t)$  表示,简写成  $i$ 、 $u$ 、 $p$ 。电路分析的基本内容是已知电路的结构及元件参数,计算确定电路各部分的电压和电流。即在给出激励下,求给定电路的响应。这里所谓的“激励”,可理解为电源的作用,所谓“响应”,则可理解为电路各部分对电源作用的反应,如电压或电流等。电流和电压作为电路分析的基本变量,它们是分析电路的主要求解对象。此外,有时还要分析电路中的功率和能量。

#### 1. 电流

电荷在电路中有规则的定向运动便形成电流。电流的大小用电流强度来衡量。电流强度在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

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

在国际单位制中,时间  $t$  的单位为秒(s),电量  $q$  的单位是库仑(C),电流  $i$  的单位是安培(A)。习惯上,常常将电流强度简称为电流。

大小和方向都不随时间变化的电流称为恒定电流或直流电流(DC),用大写字母  $I$  表示。大小和方向随时间变化的电流称为交流电流(AC),用小写字母  $i$  表示。

#### 2. 电压与电位

A、B 两点间的电压在数值上等于电场力把单位正电荷从 A 点移动到 B 点所

做的功(work),也就是单位正电荷从A点(高电位)移到B点(低电位)所失去的能量,即

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1.2.2)$$

在国际单位制中,功的单位是焦耳(J),电压的单位是伏特(V)。

大小和极性(方向)随时间变化的电压称为交流电压,用小写字母  $u$  表示。大小和方向不随时间变化的电压称为恒定电压或直流电压,用大写字母  $U$  表示。

在电场内两点间的电压也称为两点间的电位差,即

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

式中,  $V_A$  为A点的电位,  $V_B$  为B点的电位。

电路中某点的电位,是将单位正电荷沿电路中任一路径移到参考点时,电场力所做的功。参考点的电位常设为零,所以某点的电位,就是该点到参考点的电压。电位的单位也是伏特。讨论电路中各点的电位时,必须先选定一个参考点,否则是无意义的,因为电位与参考点的选择有关,而任意两点间的电压与参考点的选择无关。参考点的选择,分析电路时可任意选择。而实际电气设备一般常有一个连接到机壳的电路公共端,工程上常以这个公共点为参考点,习惯上也称该点为“接地点”,但实际上并不真正接地,电子电路图中经常采用电位电路的画法。如图1.2.1(a)常画成图1.2.1(b)所示形式,“ $\perp$ ”为参考点,  $V_{S1}$ 、 $V_{S2}$ 表示电位。

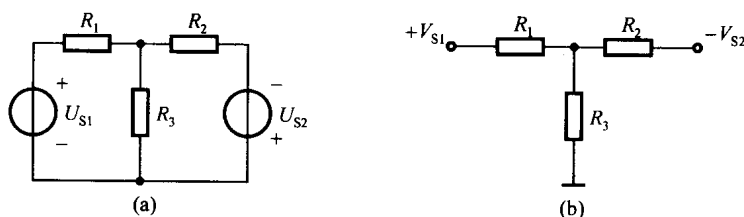


图 1.2.1 电路和电子电路图的习惯画法

### 1.2.2 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。电流是有方向的,电流的实际方向规定为正电荷移动的方向。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改变,因此很难在电路中标明电流的实际方向。为此,分析电路时,首先要给电流一个假定方向,以便列出电路方程,然后才能对电路进行分析计算。这个假定方向称为参考方向,它是分析电路前任意指定的,并在电路图中用箭头将它标出,参考方向一经选定,就不再改变。经过计算,电流值为负,说明参考方向与实际方向相反;电流

值为正,表示参考方向与实际方向一致,即说明参考方向就是实际方向。所以,参考方向又称为正方向。这样,根据计算值的正或负,结合参考方向就能确定电流的实际方向(见图 1.2.2)。电流是代数量,既有数值又有方向,才有明确的物理意义。电流参考方向在电路中一般用画在元件旁或元件引线上的箭头表示,也可用双下标表示,如  $i_{AB}$ ,其参考方向是由 A 指向 B。需要说明,电路图中标出的方向都是指参考方向。

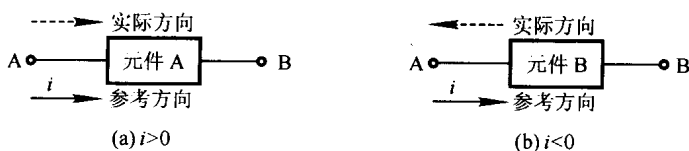


图 1.2.2 电流参考方向与实际方向之间的关系

与电流参考方向类似,可以任意选取电压的参考方向。当实际方向与参考方向相同时,电压为正值;当实际方向与参考方向相反时,电压为负值,如图 1.2.3 所示。

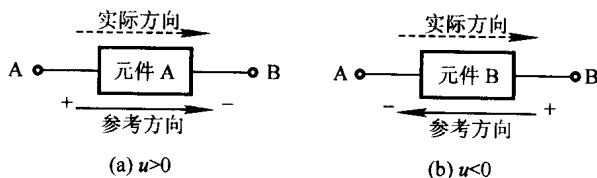
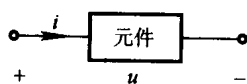


图 1.2.3 电压的参考方向

电压的方向还可以用极性表示。若 A 点电位高于 B 点电位,则 A 点为正极性,用“+”表示,B 点为负极性,用“-”表示。于是,在分析电路时电压的参考方向也可以用参考极性表示。参考极性也可任意假定,其电压的真实极性与假定的参考极性的判别方法同上所述。

与电流的参考方向可用双下标表示一样,电压也可以用双下标表示,如  $u_{AB}$ ,其参考极性是 A 点为“+”,而 B 点为“-”。如图 1.2.3(a)所示。

对于一个元件或一段电路中电流和电压的参考方向均可任意假定,二者可以一



致,也可以不一致。如果一致,称之为关联参考方向,若不一致,称之为非关联参考方向。在分析电路时常选取关联参考方向,简称关联方向,如图 1.2.4。参考方向在电路分析中起着十分重要的作用,没有参考方向,复杂电路的分析将难以进行。

图 1.2.4 电压和电流的关联参考方向

### 1.3 电功率和电能

在电路中,有的元件吸收电能,并将电能转换成其他形式的能量,有的元件将其他形式的能量转换成电能,即元件向电路提供电能。电功率是指单位时间内元件所吸收或发出的电能,在电路中,电功率简称为功率。功率的定义可推广到任何一段电路,而不局限于一个元件,当然,一个元件可看做是一段电路的特例。

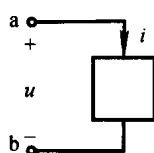


图 1.3.1 电功率

图 1.3.1 中方框表示一段电路,电流  $i$  和电压  $u$  为关联参考方向,如图中所示。由电压定义可知,当正电荷  $dq$  由  $a$  点移到  $b$  点时,这部分电路吸收的电能为

$$dw = u dq$$

这些能量被这一段电路所吸收。因此,电路在单位时间内吸收的能量,即它吸收的功率为

$$p = \frac{dw}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1.3.1)$$

上式指出:任意时刻,电路(或元件)吸收的功率等于该时刻电路(或元件)两端的电压与通过它的电流的乘积。在直流情况下,上式写为

$$P = UI \quad (1.3.2)$$

在国际单位制中,功的单位是焦耳(J),功率的单位是焦/秒,又称瓦特,简称瓦(W)。

应该注意的是:用上式计算功率时,若  $u$ 、 $i$  采用关联参考方向,则功率值  $p > 0$ ,表示这段电路(或元件)吸收(或消耗)的功率; $p < 0$ ,表示这段电路(或元件)产生(或提供)的功率。若  $u$ 、 $i$  采用非关联参考方向,则  $p > 0$ ,表示这段电路(或元件)产生的功率; $p < 0$ ,表示这段电路(或元件)吸收的功率。

设这段电路(或元件)吸收的功率为  $p(t)$ ,则从  $t_0$  到  $t$  时刻这段电路(或元件)吸收的总能量为

$$W(t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi \quad (1.3.3)$$

式中积分上限为  $t$ ,为了区别,积分式内的时间变量改用  $\xi$ 。当  $p$  的单位为瓦(W)时,能量的单位为焦耳,简称焦(J)。

在国际单位制中的一些单位,如伏特、电荷的单位库仑、功率的单位瓦特等,在实际应用中有时感到太大,如计量电子电路中的电压和电流;有时又显得太小,如计量大容量电机的功率和高压设备的电压。所以常常在这些单位前加词头,形成辅助单位,如

$$2\text{kV}(\text{千伏}) = 2 \times 10^3 \text{ V}(\text{伏})$$

$$8\mu\text{A}(\text{微安}) = 8 \times 10^{-6} \text{ A}(\text{安})$$

常用国际单位词头如表 1.3.1 所示。在日常用电及工程上,还常用千瓦时(KW·h)作电能量的单位,生活中称 1 千瓦小时为“1 度电”。

表 1.3.1 常用国际单位词头

| 因数   | $10^9$ | $10^6$ | $10^3$ | $10^{-3}$ | $10^{-6}$ | $10^{-9}$ | $10^{-12}$ |
|------|--------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 符号   | G      | M      | k      | m         | $\mu$     | n         | p          |
| 中文名称 | 吉      | 兆      | 千      | 毫         | 微         | 纳         | 皮          |

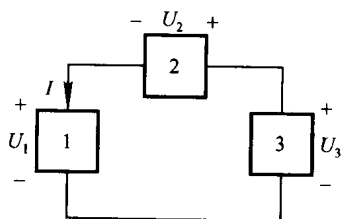


图 1.3.2 例 1.3.1 图

**例 1.3.1** 在图 1.3.2 中,电流和各元件两端电压的正方向如图中所示。今测得:  $I = -4\text{A}$ ,  $U_1 = 140\text{V}$ ,  $U_2 = -80\text{V}$ ,  $U_3 = 60\text{V}$ 。试说明电流和各电压的实际方向。并计算各元件的功率,指明哪些元件是电源,哪些是负载。

**解:** 电流  $I$  和电压  $U_2$  的实际方向与图 1.3.2 所示正方向相反,  $U_1$  和  $U_3$  的实际方向则与正方向相同。

元件 1 的功率为:  $P_1 = U_1 I = 140 \times (-4) = -560\text{W}$ , 元件 1 产生功率, 是电源。

元件 2 的功率为:  $P_2 = U_2 I = (-80) \times (-4) = 320\text{W}$ , 元件 2 吸收功率, 是负载。

元件 3 的电流、电压取非关联参考方向, 它的功率为:  $P = U_3 I = 60 \times (-4) = -240\text{W}$ , 元件 3 吸收功率, 也是负载。

## 1.4 无源二端元件

电路元件按其对外提供还是不提供能量分为有源元件和无源元件。按其对外引出端钮的数目还可分为二端元件和多端元件。本节先讨论线性无源二端元件(电阻元件、电容元件和电感元件), 随后两节将分别讨论有源二端元件和受控源。

### 1.4.1 电阻元件

电阻元件简称电阻, 其特性由通过它的电流  $i$  和它两端电压  $u$  之间的关系, 即  $i = f(u)$  表征。这个关系表现在  $u-i$  平面上电阻的伏安

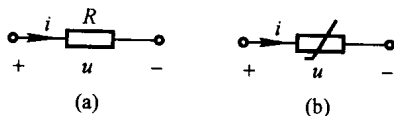


图 1.4.1 电阻元件的符号



特性曲线。若伏安特性是通过坐标原点的一条直线,则称为线性电阻,否则称为非线性电阻。电阻元件的电路符号如图 1.4.1 所示,其中图 1.4.1(a)表示线性电阻,图 1.4.1(b)表示非线性电阻。线性电阻和非线性电阻的伏安特性如图 1.4.2 所示,图 1.4.2(a)表示线性电阻,图 1.4.2(b)所示是半导体二极管的伏安特性,半导体二极管就是一个具有非线性电阻特性的器件。

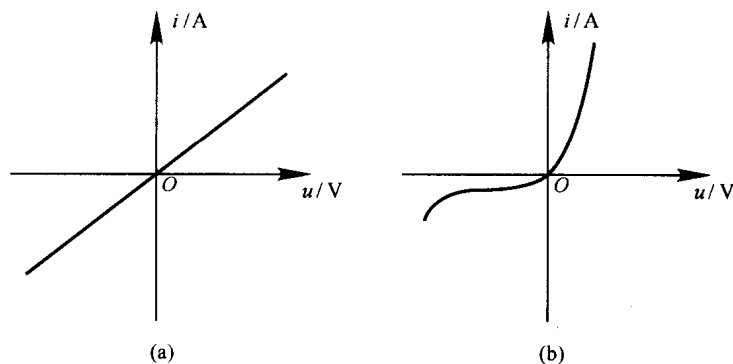


图 1.4.2 电阻的伏安特性

线性电阻的特点是元件的电阻值为一常数,与通过它的电流和其两端电压的大小无关。非线性电阻的电阻值不是常数,与通过它的电流或作用其两端的电压大小有关。

线性电阻,在电压和电流为关联方向时,按欧姆定律,电阻  $R$  的电压、电流关系可写为

$$\begin{cases} u = Ri \\ i = u/R \\ R = u/i \end{cases} \quad (1.4.1)$$

式中, $R$  称为元件的电阻。电压  $u$  的单位为伏特,电流  $i$  的单位为安培,电阻  $R$  的单位为欧姆,简称欧( $\Omega$ )。

令  $G = \frac{1}{R}$ ,则式(1.4.1)变为

$$\begin{cases} u = i/G \\ i = Gu \\ G = i/u \end{cases} \quad (1.4.2)$$

式中, $G$  称为电阻元件的电导,电导的单位为西门子,简称西(S)。

如果电阻元件的电压和电流为非关联方向,如图 1.4.3 所示,则欧姆定律应写为

$$\begin{cases} u = -Ri \\ i = -Gu \end{cases}$$