

现代实用电子学

Paul B. Brown

〔美〕 Gunter N. Franz 著

Howard Moraff

王庭绍 李文虎 张 超 译
张德瑶 於协初 杨文泉

电子工业出版社

内 容 简 介

本书是一本供非电子技术专业用的大学电子学教材性书籍。它包含了近代电子学的有关基础理论知识。第一、二章是基本电子元器件的原理、性能和电路计算，第三章介绍分析信号与系统的基本数学方法，第四章、第五章是模拟电路和数字电路的各种基本单元的原理、计算和应用，第六章讲述了各种波型的电信号的产生、稳定和检测方法，第七章是模-数、数-模转换及数字信号的处理，第八章是空间电磁波的产生、传输和接收，第九章叙述了各种物理及化学量的传感技术。

本书可做为大专院校理工科非电子专业的电子学基础教材、各类非电子专业科技人员的电子学或进修用教材，也可供电子专业科技人员为提高电子基础知识或知识更新的参考书。

现代实用电子学

(美) Paul B. Brown

Gunter N. Franz

Howard Moraff

王庭绍 李文虎 张超
张德瑶 於协初 杨文泉 译

责任编辑：林培

电子工业出版社出版（北京海淀区万寿路）

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

中国科学技术情报研究所印刷厂印刷

*

开本 787×1092毫米 1/16 印张：23.75 字数：570千字

1989年6月第一版 1989年6月第一次印刷

印数：1—4,500册 定价：8.50元

ISBN7-5053-0531-X/TN·191

译 者 的 话

随着科学技术的发展，电子科学技术已经逐渐渗透到各传统科学技术领域里去。这主要表现在：与电子学相结合的边缘学科的出现、电子学的基本理论被应用来研究和处理其它学科的问题，以及通过各种传感器件大量的非电量可以由各种电子仪器来观察、测量和处理，并且随着电子计算机的广泛应用，这些现象愈来愈明显。因此，非电子学专业的科技工作者对于有关的电子学基本理论的掌握就成为十分迫切的事情了。

本书以一般科技工作者均熟悉的普通高等数学及物理概念为基础，介绍了近代电子学的基本理论知识，尤其对那些工作在非电子学专业岗位上的中、高级科技工作者来讲是十分需要的部分均有充分的论述，如“信号与系统分析”、“模拟和数字集成电路”、“多种波形电信号的产生和稳定”、“模拟-数字转换、数字-模拟转换及数字信号的处理”以及“传感技术”等。因此，把这样一本书推荐给需要的读者想必是有益的。

本书第一章由杨文泉、张超译，第二、四章由张德瑶译，第三、六章由王庭绍译，第五、七章由李文虎译，第八、九章由於协初译。全书由李开先、陆承麟审校。由于校、译者的水平所限，错误之处在所难免，敬祈指正。

译 者

前 言

现代科学工作者对电子技术的设计原理、信号分析及线性系统理论等实践知识的需要在日益增长，本教科书正是为了满足这一需要而编写的。自从出现了集成电路以及对信号分析和线性系统理论的应用作了广泛研究之后，上述认识已为一些科学教育工作者所接受。但由于师资的缺乏加以课程已被传统学科排满，要开设一门新课程实为困难。不过，一些有远见的大学至少已将这样的科目列为选修课；并且最终不可避免地会成为化学、物理及某些生物学科取得学位的必修课。

科学研究的进展需要电子学和系统分析的知识。也许最明显的例子就是科研仪器本身的电子化了。越来越多的电子检测仪器用于各种科学领域中，具有微处理机的仪器也与日俱增。当然并不是所有的科学工作者都要去改进自己的设备或亲自去动手修理。然而对复杂设备的设计和工作原理的了解将有助于研究者更有效地运用它。而且对这些原理有所了解的研究人员可以更好地向设计者提出必要的改进方案，并确保正确实施。否则，不仅使可以完成的各种实验受到限制，甚至使设想出来的实验类型也受到限制。

系统分析知识的需求甚至更为迫切。科学中的理论化包含了将模型用公式表达出来。系统分析不仅在“描述”的水平上（当描述系统的性能时，没有任何基本机理可供参考），而且在“假设机理”的水平上都需要对上述模型进行正规的推演。例如，在生理学领域内有些研究人员以正、负反馈来讨论生理控制系统时，他们却往往没有注意到控制系统理论的最简单的原理，也就更谈不上将其应用到生理学中去了。一个生物化学工作者定期地采取血样以确定生化基质随时间产生或消失的过程，所以他必须了解如何选择取样的频率以避免在推断出的以时间为函数的信号中可能丢失重要的频率分量；次数太少就可能实际上引入虚假的频率分量，以致造成与实际随时间而变化的过程有很大差异的波形。

我们认为科学教育不仅要使学生了解过去的研究内容，而且也要使他们具备从事长期科研的能力。电子学和系统分析与初等计算机科学、微积分、物理或统计学、概率论一样都是培养现代科学家的教育所不可缺少的。目前，有关的科研著作已大量问世，但由于许多大学毕业生不理解用于研究中的系统分析的概念或符号而不能对其加以利用。就此而论，他们在取得学位之前所受的教育是陈旧的。当前，一些医学院的大学生由于不具有足够的有关电学的知识而很难理解作为神经膜电位理论基础的有关物理概念；这表明甚至在进入医学院之前所受的教育就是落后的！

在本教科书中那些最重要的概念对于大学低班或高班学生可在一学期内学完，全部内容则可在两个学期内掌握。我们希望学生们在学完本课程后能对系统分析和电子技术的设计有足够的了解，以便在需要时可独立地或稍加帮助就可进一步掌握更高深的知识。为了使本书适用于各学科，我们仅仅采用了科技人员都必需熟悉的初等微积分。即使尚未掌握微积分知识的学生，如果教师能精心安排教学，他们也会理解大部分的内容。

每个教师可以按自己的方法去处理教材，选择本书的不同章节并以不同的顺序进行讲授。但是我们确信本教材的逻辑顺序是适于教学目的的，并且已将不重要的部分用小字体印

出以便在较短期的课程中进行删节。本教科书只讲述了理论，没有涉及到制造技术，某些商用集成电路及实验训练也未包含在内。当然这些内容也是重要的，但若编入教材会使本书篇幅过大而显得庞杂了。本书选进了很多电子学的重要内容，但不是全部。我们希望通过介绍这些“原理”能提供解决电子学中的关键概念和课题的方法，从而有助于读者在此基础上继续向更深奥的重要领域进取。

Paul B. Brown

目 录

第一章 电路元件、阻抗、网络分析…(1)

- 1.1 电路元件: 基本概念、定义及元件定律 …… (1)
 - 1.1.1 能量耗散: 电阻器 …… (3)
 - 1.1.2 电能的存储: 电容器 …… (8)
 - 1.1.3 磁能的存储: 电感器 …… (10)
 - 1.1.4 有源两端元件: 电源 …… (14)
- 1.2 欧姆定律概论: 阻抗和导纳… (15)
 - 1.2.1 正弦波和相位矢量 …… (16)
 - 1.2.2 用于正弦激励的无源元件定律: 阻抗和导纳 …… (18)
 - 1.2.3 用于指数激励的无源元件定律: 导纳的一般概念 …… (23)
- 1.3 克希霍夫定律…(27)
 - 1.3.1 电路和网络的定义…(27)
 - 1.3.2 克希霍夫电流定律…(29)
 - 1.3.3 克希霍夫电压定律…(30)
 - 1.3.4 克希霍夫定律的充分条件: 独立方程的数目…(32)
 - 1.3.5 串联的无源元件: 复数阻抗…(32)
 - 1.3.6 并联的无源元件: 复数导纳…(36)
 - 1.3.7 非理想源: 有源和无源元件的组合…(41)
 - 1.3.8 “黑盒子”问题: 亥姆霍兹(Helmholtz), 戴维南(Thevenin)及诺顿(Norton)定律 …… (43)
- 1.4 简单电路的分析…(46)
 - 1.4.1 分压器…(46)
 - 1.4.2 一阶电路: 伯德图…(49)
 - 1.4.3 二阶电路…(56)
- 1.5 复杂网络的分析…(67)
 - 1.5.1 克希霍夫定律和元件定律的直接应用…(67)
 - 1.5.2 简化法 I: 使用等效电路…(70)
 - 1.5.3 简化法 II: 利用网眼电流作网眼分析…(72)
 - 1.5.4 简化法 III: 利用节点电压作节点分析…(72)
 - 1.5.5 简化法 IV: 叠加原理…(73)

- 1.5.6 简化法 V: 与频率有关的电路的近似分析…(76)

- 1.6 二端对、耦合器和受控源…(77)
 - 1.6.1 无源二端对: 理想变压器…(78)
 - 1.6.2 有源二端对 I: 理想受控源…(81)
 - 1.6.3 有源二端对 II: 放大器模型…(84)
 - 1.6.4 普通二端对…(85)

附录 I A 复数…(87)

习题 ……(89)

第二章 受控器件: 晶体管…(91)

- 2.1 半导体…(91)
 - 2.2 半导体结: 结型二极管…(92)
 - 2.3 场效应晶体管…(94)
 - 2.3.1 结型场效应晶体管…(94)
 - 2.3.2 结型场效应管的输出特性…(95)
 - 2.3.3 单级结型场效应管电路, 直流分析…(96)
 - 2.3.4 结型场效应管等效电路和小信号分析…(98)
 - 2.3.5 绝缘栅场效应晶体管(IGFET) (101)
 - 2.3.6 场效应管的偏置方法…(102)
 - 2.3.7 阻容耦合放大级…(103)
 - 2.4 双极结型晶体管…(105)
 - 2.4.1 结型晶体管的等效电路…(108)
 - 2.4.2 结型晶体管的三种基本放大器结构…(110)
 - 2.4.3 结型晶体管的偏置方法…(113)
 - 2.4.4 阻容耦合共发射极放大级…(114)
 - 2.5 特殊晶体管电路…(115)
 - 2.5.1 电流源…(115)
 - 2.5.2 达林顿晶体管…(116)
 - 2.5.3 推挽级…(116)
 - 2.5.4 差分放大器…(116)
 - 2.5.5 作为压控电阻和开关用的晶体管…(117)
- ## 习题 ……(119)

第三章 信号和系统引论…(120)

- 3.1 周期性信号: 傅里叶级数…(120)
 - 3.1.1 傅里叶级数的展开式…(120)

3.1.2 周期性函数的分离的傅里叶频谱..... (121)	4.8.2 传递特性..... (191)
3.2 非周期性信号: 傅里叶变换... (125)	4.8.3 输出特性..... (191)
3.2.1 傅里叶变换..... (125)	4.9 输入输出特性的改善..... (192)
3.2.2 傅里叶变换的性质..... (127)	4.9.1 输入电路的改变..... (192)
3.2.3 傅里叶变换的应用..... (127)	4.9.2 输出的改善..... (193)
3.2.4 离散的傅里叶变换 (DFT) 和快速傅里叶变换 (FFT) (128)	4.10 仪器放大器 (194)
3.3 拉普拉斯变换..... (130)	4.11 较高水平的组合模块..... (194)
3.3.1 拉普拉斯变换..... (130)	习题 (195)
3.3.2 阶跃和脉冲函数的拉普拉斯变换..... (131)	第五章 数字器件 (197)
3.3.3 拉普拉斯变换的性质, 变换表... (134)	5.1 模拟与数字信号..... (197)
3.3.4 拉普拉斯变换的应用..... (135)	5.2 二进制逻辑原理..... (197)
3.4 脉冲函数, 广义导数, 抽样函数..... (138)	5.2.1 逻辑定律..... (199)
3.4.1 脉冲函数..... (139)	5.2.2 逻辑算符的应用实例 (204)
3.4.2 广义导数..... (140)	5.3 二进制、八进制和十六进制算法..... (206)
3.4.3 周期性信号频谱 (脉冲频谱) ... (142)	5.3.1 十进制算法..... (206)
3.4.4 抽样信号和它的频谱..... (144)	5.3.2 二进制算法..... (209)
3.5 线性网络和系统分析..... (146)	5.3.3 八进制算法..... (211)
3.5.1 线性、常系数网络: 变换网络... (146)	5.3.4 十六进制算法 (212)
3.5.2 阶跃响应..... (143)	5.3.5 各系数之间的换算..... (214)
3.5.3 脉冲响应..... (150)	5.4 数的其它表示系统..... (217)
3.5.4 系统或转换函数..... (154)	5.4.1 负数的二进制反码和补码表示法 (217)
3.5.5 频率响应函数..... (155)	5.4.2 二-十进制码 (BCD) (218)
3.5.6 方框图..... (157)	5.4.3 优化码..... (219)
3.5.7 反馈..... (153)	5.5 硬件逻辑的实现..... (219)
习题 (163)	5.5.1 门..... (219)
第四章 模拟集成电路的设计 (164)	5.5.2 门电平设计..... (222)
4.1 集成电路的介绍..... (164)	5.5.3 维奇 (Veitch) 图..... (221)
4.2 运算放大器和负反馈结构... (165)	5.5.4 逻辑方程的化简..... (227)
4.3 模拟计算..... (171)	5.5.5 “无关紧要”条件的处理..... (228)
4.3.1 加法器..... (171)	5.6 中规模集成电路组合逻辑器件..... (229)
4.3.2 减法器..... (172)	5.7 总线..... (234)
4.3.3 加-减器..... (172)	5.8 触发器和寄存器..... (236)
4.3.4 微分和积分..... (175)	5.8.1 触发器 (236)
4.3.5 对数..... (179)	5.8.2 寄存器 (239)
4.4 模拟计算符号与图解..... (180)	5.9 计数器..... (247)
4.5 一些非线性函数..... (83)	5.10 其它某些中规模集成电路器件 (254)
4.6 乘法和除法..... (187)	5.10.1 奇偶发生器..... (254)
4.7 正反馈..... (188)	5.10.2 比较器..... (255)
4.8 模拟积木式部件性能说明... (190)	5.10.3 译码器/驱动器..... (255)
4.8.1 输入特性..... (190)	5.11 预置计数器 (256)

5.12 二进制算法的实现	(257)	6.11.1 模拟噪声发生	(332)
5.12.1 利用计数器的计算方法	(257)	6.11.2 类随机噪声的数字形成	(333)
5.12.2 利用组合逻辑电路的计算方法	(259)	6.12 滤波器	(306)
5.13 状态逻辑的设计	(260)	6.12.1 低通滤波器	(305)
5.13.1 利用逐位交替相乘和部分积相加实现的乘法	(261)	6.12.2 高通滤波器	(307)
5.13.2 在16个12位的数中查找最大数	(263)	6.12.3 带通滤波器	(308)
5.14 大规模集成电路器件: 存储器	(266)	6.13 事件检测	(309)
5.14.1 码的转换和表的查找	(268)	6.13.1 窗孔鉴别	(309)
5.14.2 逻辑功能的产生	(269)	6.13.2 最大斜率检测	(309)
5.14.3 时序机的控制	(270)	6.13.3 峰值检测	(310)
习题	(272)	6.13.4 事件抽样	(310)
第六章 波形产生和信号调整	(275)	6.13.5 复杂事件检测	(311)
6.1 电平检测	(275)	习题	(311)
6.2 开关技术	(278)	第七章 数字信号的处理	(312)
6.3 脉冲发生器	(278)	7.1 模拟信号的离散时间和离散幅度的表示形式	(312)
6.4 振荡器	(282)	7.1.1 离散时间信号	(312)
6.4.1 方波振荡器	(283)	7.1.2 离散幅度信号	(314)
6.4.2 三角波振荡器	(284)	7.2 离散幅度信号的二进制表示法	(317)
6.4.3 正弦波振荡器	(285)	7.3 D/A转换	(318)
6.4.4 锯齿波振荡器	(285)	7.4 A/D转换	(319)
6.5 幅度调制和频率调制	(286)	7.5 多路传输	(321)
6.5.1 幅度调制和解调	(286)	7.6 数字信号处理	(322)
6.5.2 频率调制	(287)	7.6.1 信号平均	(322)
6.6 自动增益和频率控制	(289)	7.6.2 数字滤波	(323)
6.6.1 自动增益控制	(289)	习题	(326)
6.6.2 自动频率控制	(290)	第八章 射频电子学和电磁辐射原理	(327)
6.7 分频与倍频	(291)	8.1 电磁频谱	(328)
6.7.1 分频: 晶体管-晶体管逻辑(TTL)	(291)	8.1.1 应用	(328)
6.7.2 锁相环	(292)	8.2 射频信号	(329)
6.7.3 用锁相环路(PLLs)分频	(293)	8.2.1 发生	(330)
6.8 频率合成	(293)	8.2.2 调制	(331)
6.9 可触发的波形	(295)	8.2.3 发射	(339)
6.9.1 通用触发线路	(295)	8.2.4 接收	(340)
6.9.2 三角波	(296)	8.2.5 解调	(343)
6.9.3 锯齿波	(297)	8.2.6 标准	(345)
6.9.4 波形定时的数字控制: 脉冲	(297)	8.3 电磁场和电磁波	(345)
6.9.5 模拟脉冲	(298)	8.3.1 麦克斯韦尔场方程	(346)
6.10 复杂波形	(299)	8.4 天线和传播	(348)
6.11 噪声	(302)	8.4.1 基本天线	(348)
		8.4.2 波的传播	(352)
		8.5 传输线	(353)
		8.6 射频的干扰和噪声	(354)

8.6.1 射频干扰源及其影响·····	(355)	9.1.2 电容·····	(361)
8.6.2 噪声源及其影响·····	(355)	9.1.3 电感·····	(361)
8.6.3 射频干扰和噪声的控制·····	(356)	9.1.4 电压转换·····	(363)
8.7 电视·····	(356)	9.1.5 电流转换·····	(366)
8.7.1 视频信号·····	(357)	9.1.6 电离辐射转换·····	(366)
第九章 转换作用·····	(359)	9.2 转换器电路的研究·····	(368)
9.1 转换的原理·····	(360)	9.3 转换器性能对系统的影响···	(368)
9.1.1 电阻·····	(360)		

第一章 电路元件、阻抗、网络分析

为许多不同的用途而设计了众多的电子仪器，似乎不可能将其设计规则简化为几个基本原理。然而，当我们检查一下每个电子仪器时，就会发现它们中的大多数都由类似的元件构成，主要差别仅在于这些元件构成整体的方式不同而已。为某种目的而连接到一起的一组电子元件通常称为电子电路，或简称为电路。这些元件是根据电路图或原理图进行连接的。

电路图的各种元件都有简单的图示符号表示（不是实体外貌的仿形）。为了简化电路的分析和设计，我们通常是用元件符号表示理想化的元件。这些理想化元件是真实“硬件”的概念化模型，并被称为电路元件或模型元件。由理想化电路元件构成的电路又称为网络。

为了分析电路或者网络，我们从讨论两组定量关系式开始。第一组以单个元件的定量描述为基础，称为元件定律。第二组是从电路元件互连成整个电路的方式中得到的，它用来描述网络布局技术。将两者结合起来就得出了网络方程式。解出网络方程就完成了对所给网络的分析。本章的内容是对网络分析的基本方法进行讲解。

1.1 电路元件：基本概念、定义及元件定律

我们根据电路元件处理电能的不同方式可将它们分为：有源元件即电能的来源；无源元件即所有能存储、耦合、消耗或转换电能的元件。由于电流要从电路元件的一端输入，再从另一端流出，所以最简单的元件应该具有两个端，并且共同组成一个端对。无源的两端元件或一个端对可存储电磁能或消耗电磁能而变为热。耦合电能，如变压器则要有两个端对，就是说这种元件应有三个或四个端头。有源两端元件是独立的电源。受授电源，如放大器则一般要有三个或四个端头。

对元件的定量描述要求我们知道流入（或流出）各端的电流及相应端对上的电压之间的关系。所得到的元件定律利用方程式或图对两端元件的单个电流—电压对的关系做出描述。

为了简化电路分析，在电路图中典型元件用特定符号表示，并标出电压和电流的极性。图1.1a示出一个两端元件（用矩形框表示），并标出定义元件定律所需的二个测量参数。如果流进入端点1，则串联的测量仪器（安培计）正向偏转。电流的这一方向意味着端点1的电势（ e_1 ）高于端点2（ e_2 ），因此并联的测量仪器（电压计）显示出正向偏转，我们设定端点1为正极性（+），端点2为负极性（-）。为了避免差错应始终如一地坚持采取这些习惯用法。图1.1b到1.1d是对两端元件参考方向（极性，习惯标志）的三种普通示法。

注意：习惯上把电荷从高电势端点1向低电势端点2移动而产生的电流定为电流“方向”或标以正号。这完全是一种习惯的规定。实际上，电荷载体的流动方向是由其极性决定的。正电荷（如电解液中的正离子）将按图1.1中电流箭头所指的方向流动。负电荷（如金属导体中的电子）则以反方向流动，并完成总的电荷传输。做为电路分析，电荷如何流动实际上是无关重要的。只要依照图1.1a中所作的定义就可以了。所以即使电子实际上是以相反方向流动，但电流的方向仍然被指定为是从1（+）指向2（-）的。

表1.1给出了我们感兴趣的电学变量的文字符号及其量变单位。关于这些参量的严格定

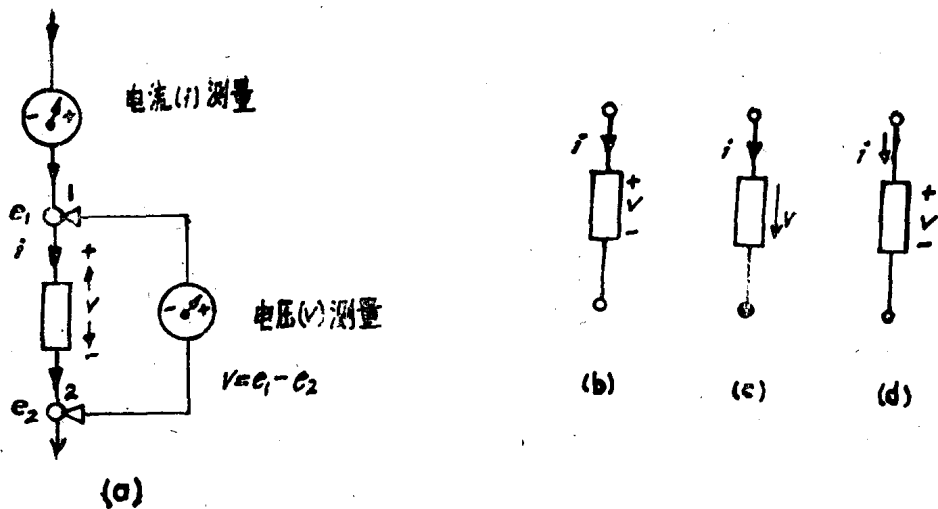


图1.1 普通两端元件（一个端对）的极性或连通的参考方向

(a) 电压—电流的测量；(d) 本文中常用的参考标志 (c) 和 (b) 可采取的参考标志

义可查阅有关的物理书籍。

通常是以1000为因子在电学单位前加写一个词头用来标定量值。表1.2列出了因子和词头的对应关系。

以后，为了简化对测量单位的讨论，我们介绍下面一个简便的表示方法

表达式 $[x]$ 是指“量值 x 的量纲或度量的单位”，这里的 x 可以是一个变量或是一个参数。

表1.1 电学变量的单位

表示圆括号内的单位在数值上与上面所列的单位（国际系统单位或SI单位）相等。

变量	文字符号	单位	单位符号
电荷	Q, q	库仑 (安培·秒) ^a (A·S) ^a	C
电流	I, i	安培	A
电压	V, v	伏特	V
带电体	E, e		
电势差	U, u		
功率	N, n	瓦特	W
	P, p	(伏特·安培) ^a (焦耳/秒) ^a	(V·A) ^a (J·S ⁻¹) ^a
磁通量	Φ, φ	韦伯 (伏特·秒) ^a	Wb (V·S)

例1.1 量纲或单位符号的应用

$$[u] = \text{伏特 (V)}$$

$$[i] = \text{安培 (A)}$$

在提出这些概念后，我们继续对主要的两端元件（耗能器、存储器和电源）进行讨论。

表1.2 因子和单位词头*

因子	单位词头	符号
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	P
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a

例： $10^{-3}\text{A} = 1\text{mA}$ ； $10^3\text{V} = 1\text{kV}$ ； $0.68\text{A} = 680\text{mA}$ ； $1200\text{W} = 1.2\text{kW}$ 。

1.1.1 能量耗散：电阻器

能量的耗散与这样的一个事实有关，即实际的导体在传送电流时不可能不损耗能量。根据欧姆定律，导体两端单位电荷能量的下降或电势差是与流过导体的电流成正比的。为了说明在导体内电荷流动的情况，我们在这里用一个简单的摩擦阻力模式为例。运动的电荷遇到摩擦会造成电能的衰减而变为热。事实上，每单位时间内所转变的能量或者说消耗的电能等于电流（经过导体的）和电压（跨越导体的）的乘积。

作为耗能的最典型的电路元件就是电阻器。在大多数情况中，这种元件按下述两个条件进行理想化；（1）满足欧姆定律；（2）温度的影响可忽略不计。（除阻值变化外，过热实际上可以烧毁电阻器。为避免出现这种情况，对电阻器要标上额定功率或瓦数，在使用时不得超过该值）。

注意：我们假定电路中连结各种电路元件的导线所具有的电阻可以忽略不计。所以只有当此种电阻“累积”到必须给予考虑的可观量值时才采用电阻器符号（图1.2a）标出。

1.1.1.1 欧姆定律及线性电阻

我们假定电阻器是“欧姆性”的，就是说它们符合欧姆定律。电阻器及其参考方向的符号在图1.2a中给出。（图1.2b中的符号有时也使用。对未加以说明的或广义的两端元件，我们也保留这种符号）。图1.2c是元件定律的图解。我们从通过原点的直线可以推导出下面的元件定律。

用于线性电阻器的元件定律（欧姆定律）

$$v = Ri \quad (1.1)$$

或

$$i = \frac{1}{R}v = Gv \quad (1.2)$$

其中 R ——电阻， G ——电导。

注意：我们可以将电阻器与电阻参数 R 或电导参数 G 联系起来，它们表示同一物理过程，所以我们仅采用如图1.2a中的一种电路符号。通过附加的字母 R 或 G ，我们就可以表明所采用的是哪种参数了。

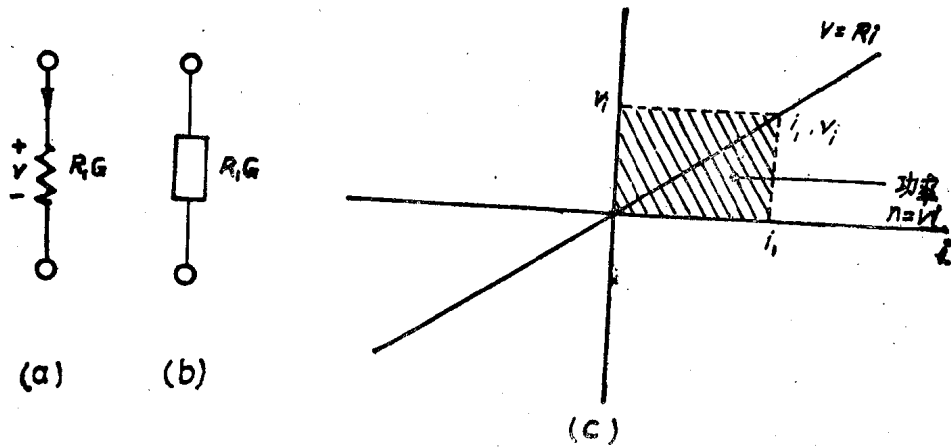


图1.2线性电阻元件(欧姆电阻器)

(a)具有参考方向的常用符号; (b)在欧洲文献中流行的符号;
 (c)体现欧姆定律的元件特性。 R——电阻G 电导1/R

比例常数或器件的电阻参数 R (或电导 G)是由测量的一对电压和电流值决定的。如果电压和电流的量纲分别为 V 和 A (见表1.1),我们就得到

电阻量纲: $[R] = \text{欧姆} (\text{符号为}\Omega)$

电导量纲: $[G] = \text{西门子} (\text{符号为}S)$

到此为止,如果我们将等式(1.1)和(1.2)代入量纲等式,则所介绍的变量和参数两者间的量纲关系就很明确了

$$[u] = [R] \times [i]$$

或

$$\text{伏特} = \text{欧姆} \times \text{安培}$$

或

$$V = \Omega \times A$$

因此

$$\Omega = \frac{V}{A} \tag{1.3}$$

以及

$$[i] = [G] \times [v]$$

或

$$A = S \times V$$

因此

$$S = \frac{A}{V} = \frac{1}{\Omega} \tag{1.4}$$

表1.2中的比例词头也可用作参数单位。

例1.2用欧姆定律计算电阻和电导。

(A) $v = 10V$ 、 $i = 1A$, $R = ?$ $G = ?$

利用等式(1.1)和(1.3)

$$R = \frac{10V}{1A} = 10\Omega$$

利用等式 (1.2) 和 (1.4)

$$G = \frac{1A}{10V} = 0.1S$$

或

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{10} S$$

$$(B) v = 100mV \quad i = 5nA \quad R = ?$$

$$R = \frac{100mV}{5nA} = \frac{100 \times 10^{-3} V}{5 \times 10^{-9} A} = \frac{1}{5} \times 10^8 \Omega = 20M\Omega$$

下面让我们重新讨论电阻器中能量的消耗问题。在一个无限短的时间间隔 dt 内，通过电阻器的电荷量 Δq 等于每单位时间流动的电荷量 (= 电流) 与间隔时间 dt 的乘积

$$dq = idt \quad (1.5)$$

从场论中可知在 dt 内所消耗的能量 de 等于电压 (单位电荷的能量变化) 和电荷量的乘积

$$de = vdq \quad (1.6)$$

利用式 (1.5) 和 (1.6)，我们得到

$$de = vidt$$

从而能量消耗的速率或功率就是每单位时间内能量的变化值

$$n = \frac{de}{dt} = vi \quad (1.7)$$

公式 (1.7) 正规地表达了上面所论断的内容。功率值的单位已在表1.1中给出。

用欧姆定律的适当形式取代电压或电流项，我们就可以进一步改变功率的表达式。从公式 (1.1) 和 (1.7) 可得到

$$n = Ri^2 \quad (1.8)$$

并且从公式 (1.2) 和 (1.8) 中，我们得到

$$n = \frac{v^2}{R} = Gv^2$$

应当注意，功率是两个电学变量的乘积。因此，在图1.2c的电压—电流图表中功率的图象是二维的，即消耗的功率值等于边长为 v 和 i 所构成的矩形面积。

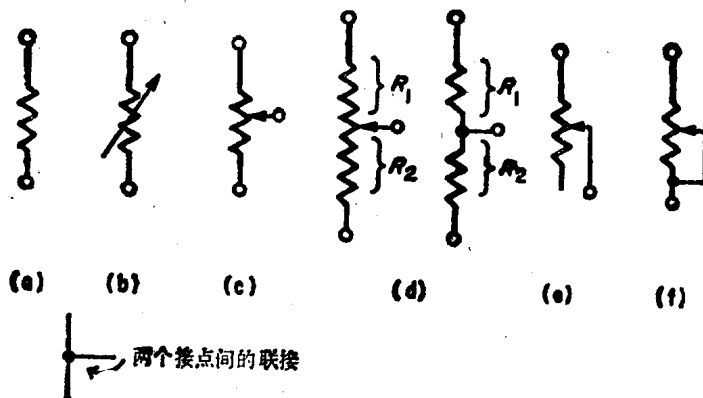


图1.3 固定和可变电阻的符号

- (a) 固定电阻器；(b) 可变电阻器；(c) 具有可移动的第三触点 (滑动片) 或抽头的电阻器、通常称为电位器；(d) 等效于两个相联的固定电阻器的电阻器；(e) 和 (f) 用抽头电阻器或电位器改成的可调电阻器

在实际的电路中电阻器的电阻值有固定的、也有可变的，它们以图1.3a和图1.3b所给出的两个符号加以区别。一般的可变电阻器为滑动触头结构，它的第三个端（即滑动触头）可在电阻材料上移动，并在任意位置上都能接触。这种可调电阻器称为电位器（或分压器），其符号如图1.3c所示。

这种电位器实际上相当于两个串联的电阻器（图1.3a）。它也可以如图1.3e和1.3f中所标出的那样作为一个两端可变电阻器使用。

从网络分析的观点看，人们总是喜欢线性电阻器，因为非线性元件定律会给分析造成困难。但是也有一些网络元件正是由于它们具有非线性的特性而被采用。下一章将对这两种元件进行讨论。

1.1.1.2 非线性电阻元件

本章中所要论述的非线性元件有一共同特点，即它们都是由半导体材料构成的。半导体材料处于金属导体和绝缘体两者中间，其电阻率或比电阻（等于0℃时单位截面和单位长度的电阻）要较金属导体高一个或几个数量级，但又低于绝缘体的电阻率。半导体材料的电阻与温度及材料中所存在的杂质有密切关系。要得到特殊的非线性性能，通常是有意地将一定的杂质“掺”到半导体材料中，并在两种不同掺杂的材料间形成“结”来实现的。在第二章中将对半导体作更广泛地讨论。为了更好地说明问题，选择了下面这些最常用的非线性元件作为例子。

二极管或整流器是最重要的非线性两端元件。现代的二极管是半导体结型二极管，即在半导体基体的两个不同掺杂区之间的结上产生二极管效应。硅是最常用的半导体的材料。早期的“整流器”用语是指可有选择地单方向过电流，如图1.4b所示。与通常的电阻器不同（这些电阻器是双向性的），二极管是单向元件。就是说由于其电流从阳极A端流向阴极K端，故其端点的连结是不可逆的。如果所施加的电压极性如图1.4a所示，则二极管为正向偏置且是导通的。若电压极性相反时，则二极管为反向偏置，实际上是不导通的。在反向偏置时（如图1.4b第三象限中所示）只有很小的漏电流。我们可以将二极管想象为一个电的单通道阀门。

图1.4b中元件特性曲线的一个很好的近似表达式为

$$i = I_s (e^{qv/kT} - 1) \quad (1.9)$$

其中 I_s 是漏电流或饱和电流， $q = 1.59 \times 10^{-19} \text{C}$ 是一个电子的电荷， $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 是波尔兹曼常数， T 是二极管结上的绝对温度（K）。

硅二极管的 I_s 很小，所以公式（1.9）可以简化成

$$i \approx I_s e^{qv/kT} = I_s e^{v/\sigma} \quad (1.10)$$

其中 $\sigma = kT/q = 26 \text{mV}$ （当 $T = 300 \text{K}$ 时），我们也可得到

$$v = \sigma \ln \left(\frac{i}{I_s} \right) \quad (1.10a)$$

公式（1.10）和（1.10a）表明二极管可用来进行指数或对数的计算（见第四章）。但通常我们仅对二极管的单向阀门作用感兴趣，而不注意元件定律的细节。所以图1.4c中的简单直线近似就满足需要了。我们一般假定正向偏置的二极管的电导为无限大，即其特性曲线与正的电流轴及负的电轴重合，相当于 $v < 0$ 时为开路及 $v > 0$ 时为短路。对这种理想化二极管，我们可采用涂黑的二极管符号。在其他近似中，我们认为正向偏置二极管的电导是有限的。如图1.4c所示一个理想的二极管和一个电阻器（G）相串联就是其很好的模型。

在某些例子中，由于*i-v*特性曲线有很大的曲率，所以“拐点”电压不能忽略。在这种情况下，图 1.4d 的直线近似是有用的。硅二极管的“拐点”电压约 600mV，而锗二极管的“拐点”电压为 200mV。

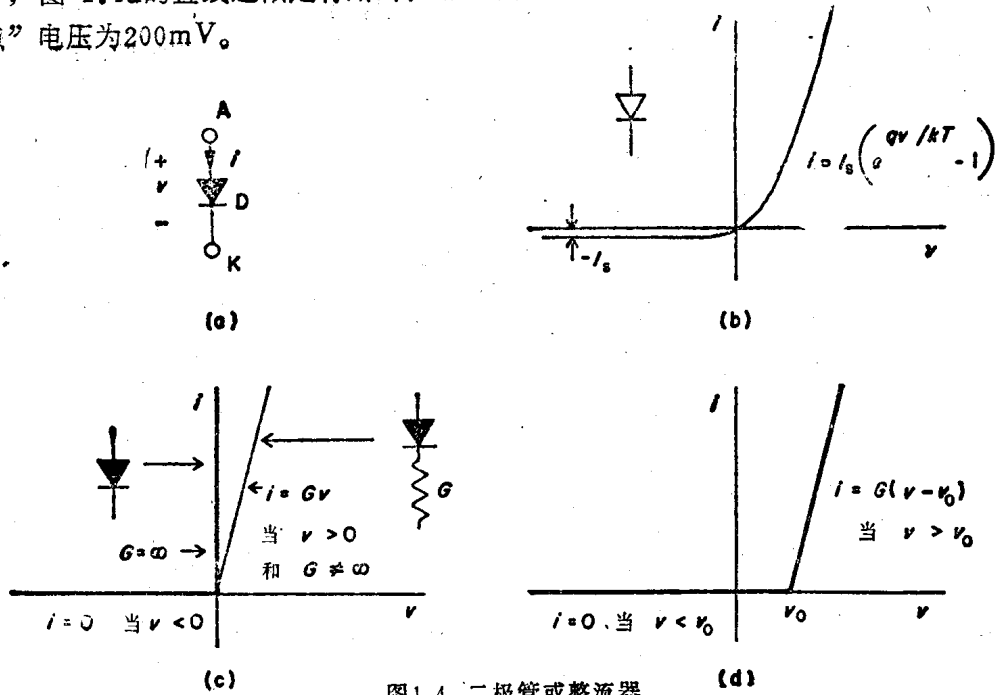


图 1.4 二极管或整流器

- (a) 理想的二极管元件（黑三角符号）和参考方向（A 为阳极；K 为阴极）的符号；
- (b) 实际半导体二极管（空三角符号）的特性曲线，见本文；
- (c) 具有无限大 ($G = \infty$) 和有限的正向电导的理想二极管的特性曲线；
- (d) 具有“拐点”电压 v_0 的理想二极管的特性曲线

稳压二极管：齐纳二极管。 这些元件可用于建立参考电压及利用齐纳效应挪动或限制电平。该效应反向偏置半导体的结上发生的特殊击穿现象有关：在到达击穿电压（或齐纳电压） v_z 之前，反向偏置齐纳二极管的作用有如一个关闭的“阀”当到达击穿电压时二极管就会出现高导电性，且电流迅速增大。根据图 1.5a 做参考方向。*i-U* 特性曲线的这一部分位于图 1.5b 的第三象限内。当正向偏置时齐纳二极管的性能与普通二极管相同（在图 1.5b 中的第一象限内）。

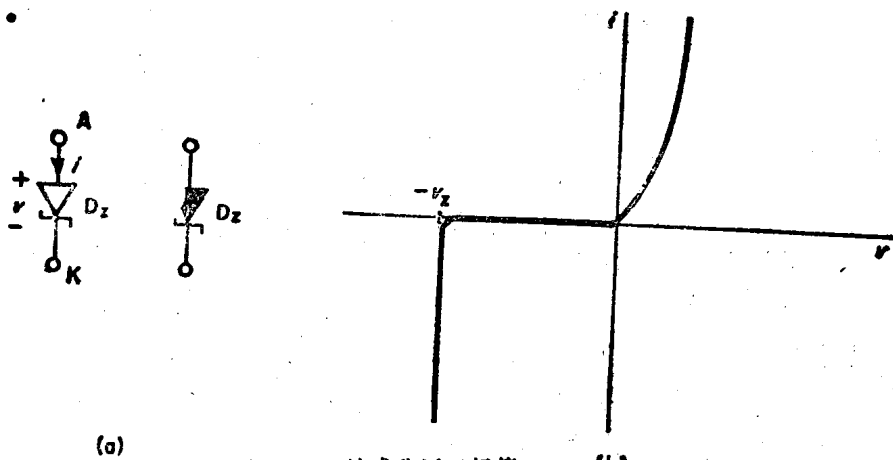


图 1.5 齐纳或稳压二极管

- (a) 符号和参考方向（A 为阳极；K 为阴极）
- (b) 元件的特性曲线，稳压区（齐纳电压 v_z ）在反向偏压条件下位于第三象限内

1.1.2 电能的存储：电容器

一个简单的电容器具有两个相距很近的导体、即两块金属板。在两个导体间可为真空，但更多的是绝缘材料或电介质。在两个导体之间不存在导电的途径。电容器的符号是用两条线中间有一条空隙的图形来表示的，这两条直线表示两个导体（图1.6a）。

对电容器的存储作用可作如下解释。假如将一个电池联接到电容器的两个导体上，使一个导体为正极，另一个导体为负极（图1.6b）。当电池以等量的、电性相反的电荷（ q^+ ， q^- ）提供给电容器的这两个导体时，就是使电容器充电过程。只要充电过程持续进行，则电流 i 就会流入电容器的正端使正电荷聚集在正极导体上（或除去负电荷）。与这一电流相对应，由负极流出等量电流从另一导体上除去正电荷（或聚集负电荷）。一旦电容器的两端的电势差与电池的电压相等时充电过程也就结束了，电流为零。如果这时将电池与电容器分开，则电容器依然为充电状态，也就是说电荷会无限期地继续分别存在下去。当电容器的两端与别的元件联接时，存储的电荷可作为一个电源使用。该电容能够通过跨接其两端的导线或电阻器进行放电。放电电流以相反方向流动，并导致电荷的分隔状态消除。

在充电或放电期间，流入电容器一端的电流与从另一端流出的电流量值相等。这样，即使在两个导体间具有绝缘层也仍然如同出现了一个“通过”电容器的电流。因此如同对其他两端元件那样，我们可以定义电流和电压有关的参考方向（图1.6c）。

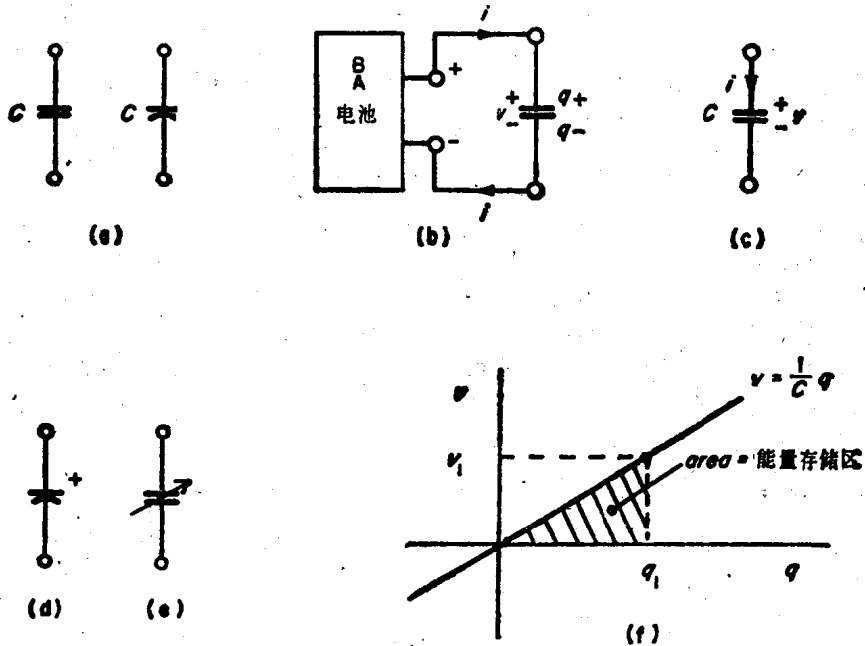


图1.6 电容器

- (a) 元件符号；(b) 充电过程；(c) 电容器的参考方向；(d) 电解电容器的极性标志；
(e) 可变电容器的符号；(f) 电容器的元件特性（电压—电荷曲线）

只要电荷还在移动，那么电容器的电压变化就是时间的函数。若电容器的电压不变就表示电荷的流动已经停止，电流为零。这时电容器就如同绝缘体或开路；这就是说作为耦合元件，电容器传递的只是电容器电压的变化。

在给定某一电压下所需隔离的电荷量是由构成电容器的两个导体的几何形状及两个导体间绝缘层的性质决定的。电容器的几何形状和材料的参数可合为一个参数，即电容量 C 。通