

高等学校教材

电路 基础

下册

付永庆
主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

TM13/197

:2

2008

高等学校教材

电路 基础

下册

付永庆
主 编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书分为《电路基础》(上)、(下)两册。上册主要介绍电路的基本知识、概念、定理和分析问题、解决问题的方法,采取先直流后交流、先单相后三相、先单频后多频、先稳态后暂态的编写顺序,由浅入深、逐层深入地介绍直流电路、正弦交流电路、谐振电路、非正弦周期电路、动态电路、非线性电路等内容。下册主要以拓展基本电路理论知识体系和介绍现代电路分析方法为目的,较为深入地介绍二端元件、双口网络、网络图论和矩阵分析、电路的复频域分析、状态变量分析法、均匀传输线、磁路和铁心线圈等内容。

本书包括了电子信息科学类与电气信息类专业本科生电路理论基础课程所需要的全部内容,可作为大学本科电子信息工程、通信工程、电子科学技术、自动化、电气工程等专业的教材,也可供工程技术人员参考和自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

电路基础. 下册/付永庆主编. —北京:高等教育出版社,2008.3

ISBN 978-7-04-023627-9

I. 电… II. 付… III. 电路理论—高等学校—教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 021358 号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 许海平 封面设计 赵阳 责任绘图 朱静
版式设计 张岚 责任校对 张颖 责任印制 陈伟光

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	涿州市星河印刷有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	版 次	2008 年 3 月第 1 版
印 张	16.25	印 次	2008 年 3 月第 1 次印刷
字 数	300 000	定 价	19.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 23627-00

前 言

本书是在哈尔滨工程大学 2002 年出版的《电路基础》和 2004 年出版的《网络分析导论》本科教材的基础上重新编写的,内容除符合教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的《电路理论基础课程教学基本要求》外,也反映了我们在国家电工电子教学基地建设中,通过教学改革、探索和实践所取得的成果和经验。

全书分《电路基础》(上)、(下)两册,内容既相对独立,又有继承性,可供教师根据授课对象和学时的不同进行取舍。通常,全部内容的授课时数以 96 学时为宜。

上册共分 11 章,主要介绍电路的基本知识、概念、定理和分析问题、解决问题的方法,采取先直流后交流、先单相后三相、先单频后多频、先稳态后暂态的编写顺序,由浅入深、逐层深入地介绍直流电路(第一章至第三章)、正弦交流电路(第四章至第七章)、谐振电路(第八章)、非正弦周期电路(第九章)、动态电路(第十章至第十一章)等内容。考虑到非线性电路的特点,把它放在了附录中。

下册共分 7 章,主要以拓展基本电路理论知识体系和介绍现代电路分析方法为目的,较为深入地介绍二端元件(第一章)、双口网络(第二章)、网络图论和矩阵分析(第三章)、电路的复频域分析(第四章)、状态变量分析法(第五章)、均匀传输线(第六章)、磁路和铁心线圈(第七章)等内容。

与原有教材相比,本次编写在确保电路理论知识体系完整和经典内容不变的前提下,把电路分析对象从抽象的电路模型向带有实际工程背景的方向拓展,其目的是要增加电路理论服务于后继电子类课程的力度。

同时,对一阶电路内容的讨论加强了数学严谨性,没有采取传统的由特例(没有任何证明)逐步引出结论的方法,其目的是力图用全局的观点以简洁而严谨的数学形式来揭示问题的本质,这与现有国内外教材看问题的角度有所不同,也是本书独具特色之处。

此外,全书提供了大量具有实际工程背景(配有实物图片)的实例和习题,特别是几乎在每章末尾都提供一个工程应用范例,这将有助于缩短学习者认知实际电路元件和进入电路设计领域的过程。为配合教学和指导学生工程实践的需要,在附录中还列入了电阻、电容、电感元件的相关国家标准。

为便于教师教学,本书有配套的电子教案供参考。

本书编写大纲由付永庆教授拟定。上册第一章、第十章和附录 B 由付永庆

教授编写,第二章、第三章、第十一章和附录 A 由黄丽莲副教授编写,第四章、第五章和第九章由王丽敏副教授编写,第六章、第七章和第八章由王霖郁副教授编写。下册第一章和第三章由黄丽莲副教授编写,第二章由付永庆教授编写,第四章和第七章由王丽敏副教授编写,第五章和第六章由王霖郁副教授编写。全书由付永庆教授整理和定稿。

本书承蒙大连理工大学陈希有教授审阅并提出宝贵的修改意见,谨此致以衷心的感谢。此外,作者要特别感谢高等教育出版社对本书出版所给予的大力支持,并感谢协助打印部分书稿的研究生王杨峰同学。

关于本书的撰写,我们在主观上倾注了极大的精力,力求严谨和紧密结合工程实际,但限于学识与教学经验,不足与疏漏之处仍恐难免,恳请同行专家和广大读者批评指正。意见请寄:哈尔滨工程大学信息与通信工程学院,邮编 150001 或发至电子信箱 fuyongqing@hrbeu.edu.cn。

编者

2007 年 9 月于哈尔滨

目 录

第一章	二端元件	1
§ 1-1	网络元件的分类	1
§ 1-2	二端电阻元件	4
§ 1-3	二端电容元件	12
§ 1-4	二端电感元件	16
§ 1-5	二端受控元件	20
	习题	21
第二章	双口网络	23
§ 2-1	双口网络概述	23
§ 2-2	双口网络的方程及参数	24
§ 2-3	双口网络的级联	38
§ 2-4	双口网络的串并联	40
§ 2-5	双口网络的开路阻抗和短路阻抗	46
§ 2-6	对称双口网络的特性阻抗	47
§ 2-7	线性无源双口网络的等效电路	50
§ 2-8	回转器	52
§ 2-9	理想变压器	55
§ 2-10	负阻抗变换器	57
	工程应用例	59
	习题	61
第三章	网络图论和矩阵分析	66
§ 3-1	图的基本概念	66
§ 3-2	基本回路与基本割集	70
§ 3-3	节点-支路关联矩阵	71
§ 3-4	基本回路矩阵与基本割集矩阵	73
§ 3-5	节点电压法	76
§ 3-6	改进节点法	83
§ 3-7	回路分析法	88
§ 3-8	割集分析法	92
§ 3-9	特勒根定理	95

工程应用例	96
习题	98
第四章 电路的复频域分析	104
§4-1 拉普拉斯变换	104
§4-2 拉普拉斯变换的基本性质	105
§4-3 用部分分式展开法进行拉普拉斯逆变换	111
§4-4 电路定律及元件模型的运算形式	115
§4-5 运算电路图及运算法	119
§4-6 网络函数	125
§4-7 网络函数的零、极点与时域响应	126
§4-8 网络函数的零、极点与频域响应	128
习题	129
第五章 状态变量分析法	132
§5-1 网络的状态和状态变量	132
§5-2 状态方程和输出方程	134
§5-3 状态方程的直观列写法	137
§5-4 状态方程的替代-叠加列写法	144
§5-5 状态方程的复频域解	150
§5-6 状态方程的时域解	154
§5-7 状态转移矩阵	155
工程应用例	159
习题	162
第六章 均匀传输线	165
§6-1 分布参数电路	165
§6-2 均匀传输线及其方程	166
§6-3 均匀传输线方程的正弦稳态解	169
§6-4 均匀传输线的行波及传播特性	174
§6-5 波的发射与终端匹配的均匀传输线	179
§6-6 无损耗线、驻波	182
§6-7 无损耗线方程的通解	192
§6-8 无损耗线的波过程	196
工程应用例	199
习题	201
第七章 磁路和铁心线圈	203
§7-1 磁场的基本物理量和基本性质	203

§ 7-2 铁磁物质的磁化曲线	206
§ 7-3 磁路的基本定律	211
§ 7-4 恒定磁通磁路的计算	213
§ 7-5 交流铁心线圈的功率损耗和波形畸变	219
§ 7-6 铁心线圈的相量图和电路模型	224
工程应用例	229
习题	231
部分习题答案	234
索引	247
主要参考书目	251

第一章 二端元件

网络元件是构成网络的基本单元。近代网络中应用的元件数量很多,类型也不少,如时变元件、非线性元件、有源元件和多端元件等。本章主要阐述网络元件的分类以及二端电阻元件、二端电容元件、二端电感元件和二端受控元件的定义和性质。

§ 1-1 网络元件的分类

网络元件按其各种特性进行分类,一般有下列七种分类。

1. 按元件尺寸与工作波长相比来分类

设以 l 表示元件的尺寸,以 λ 表示与工作频率(f)对应的波长,则有

$$\lambda = \frac{c}{f}, c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

式中, c 是真空中光速,也是电磁波传播的速度。若

$$l \ll \lambda$$

即元件尺寸远远小于工作波长,电磁波通过这个尺寸所需的时间可以忽略,或者说同时到达,如图 1-1 所示,对任何时刻 t ,都有

$$i_1 = i_2 = i$$

和

$$u = v_1 - v_2$$

式中, i_1 为流入元件的电流, i_2 为流出元件的电流,则此元件为集中参数元件(lumped element)。



图 1-1 集中参数元件

如果元件尺寸与波长可以比拟,甚至较大,则电磁波在该元件上传播的时间

便不能忽略,此时元件的电流、电压将不仅是时间的函数,而且也是空间的函数。这类元件称为分布参数元件(distributed parameter element)。

应该指出,有的元件尺寸虽大,但工作频率低,仍可视为集中参数元件;有的尺寸虽小但工作频率较高(如电视天线),则应视为分布参数元件。本书只讨论集中参数元件。

2. 按其具有的能量形式或物理过程来分类

反映能量损耗的元件为电阻元件;储存电场能和磁场能的元件则分别为电容元件和电感元件。若从电网络理论所关心的四个物理量,即电压 u 、电流 i 、电荷 q 和磁链 Ψ 之间的关系来定义的话,则电压和电流间存在确定关系的元件是电阻元件(resistor);电荷和电压间存在确定关系的元件是电容元件(capacitor);磁链和电流间存在确定关系的元件是电感元件(inductor);电荷和磁链间存在确定关系的元件是忆阻元件 $M(R)$ (memory resistor)。这些关系从图 1-2 可以清楚地看到。

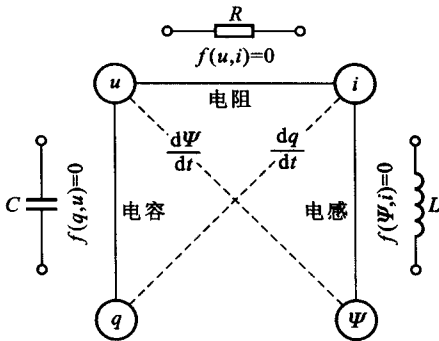


图 1-2 u, i, q 和 Ψ 之间的关系

因忆阻元件较为少见,故本书不予讨论。至于 $i-q$ 和 $u-\Psi$ 的关系,则受公式

$$i = \frac{dq}{dt}$$

和

$$u = \frac{d\Psi}{dt}$$

所约束,与元件性质是无关的。

3. 按有无记忆作用来分类

如果元件中任一时刻的响应仅与该瞬时的激励有关,称为无记忆元件(no memory element)或瞬时元件(moment element),电阻元件和理想变压器均属于这种元件。在 t_1 时的响应与 $t \leq t_1$ 的激励有关(与“历史”有关)的元件,则称为记忆元件(memory element),电容元件和电感元件即属此类。实质上,因电容元件和电感元件分别具有储存电场能和磁场能的作用,故有记忆本领,亦称储能元件(energy storing element)。此外,又因为这两种元件的电压与电流的关系具有导数的形式,即

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt}$$

$$\text{和} \quad u = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di_L}{dt}$$

所以它们又有动态元件(dynamic element)之称。

4. 按元件特性曲线来分类

如元件的参数值与 u 、 i 、 q 和 Ψ 无关,即为一常数,也就是说其特性曲线是一条通过 $u-i$ 平面(或 $u-q$ 平面或 $i-\Psi$ 平面或 $q-\Psi$ 平面)原点的直线,则这种元件称为线性元件(linear element)。反之,元件的参数值不为常数,即其特性曲线不是一条通过 $u-i$ 平面(或 $u-q$ 平面或 $i-\Psi$ 平面或 $q-\Psi$ 平面)原点的直线,则这种元件称为非线性元件(non-linear element)。如非线性电阻器(non-linear resistor)可用 $u(i)$ 或 $i(u)$ 来表示;非线性电容器(non-linear capacitor)可用 $q(u)$ 或 $u(q)$ 来表示;非线性电感器(non-linear inductor)可用 $\Psi(i)$ 或 $i(\Psi)$ 来表示等。

5. 按元件参数与时间关系来分类

元件参数与时间 t 无关,这种元件称为时不变(或定常)元件(time-invariant element)。定常元件的响应与激励所加的时刻无关。例如激励为 $f(t)$ 时,所引起的响应为 $y(t)$;而激励为 $f(t-t_0)$ 时,所引起的响应为 $y(t-t_0)$ 。元件参数与时间 t 有关,则这种元件称为时变元件(time-variant element)。如线性时变电阻元件可用 $R(t)$ 表示,即在不同的时刻呈现不同的阻值。

定常元件和时变元件又有线性和非线性之分。定常非线性元件与时变线性元件的参数都不是常数,但前者是网络变量的函数,后者则是时间的函数,其本质是不同的。时变非线性元件既是网络变量的函数又是时间的函数,如时变非线性电阻应以 $u(i,t)$ 或 $i(u,t)$ 来表示。

6. 按提供或吸收能量来分类

不提供能量的元件为无源元件(passive element)。对于所有 $t \geq -\infty$ 的时间区间以及 $i(t)$ 和 $u(t)$ 的可能组合,当且仅当

$$\int_{-\infty}^t u(\tau) i(\tau) d\tau = W(t) \geq 0 \quad (1-1)$$

时,即进入元件的能量 $W(t)$ 是非负的,称这种元件为无源元件。这里认为,当

$$t \rightarrow -\infty \text{ 时, } W(-\infty) = 0$$

若当

$$t \geq -\infty \text{ 时, } W(t) < 0$$

则称为有源元件(active element)。

7. 按元件的端钮数目来分类

若与外电路连接的端钮只有两个的元件,则称为二端元件(two-terminal element);若有多个端钮与外电路连接的元件,则称为多端元件(multi-terminal element)。例如固定电阻器和一般电容器是二端元件,双极型晶体管是三端元件,

理想变压器是四端元件。

下面将分别介绍二端电阻、电容、电感元件,同时讨论线性、非线性、定常和时变等情况。

§ 1-2 二端电阻元件

流经二端元件的电流 $i(t)$ 与端电压 $u(t)$ 可用代数关系式 $f[u(t), i(t), t] = 0$ 表示,或者说可用 $u-i$ 平面上的一条确定曲线来表示,这种元件称为二端电阻元件(two-terminal resistor),简称电阻元件或电阻器。由定义可知,这种元件在 t_1 时的电流 $i(t_1)$ 只与该时的电压 $u(t_1)$ 有关,它是一种瞬时元件,没有记忆作用,也没有储能作用。

根据电阻元件的伏安特性(volt-ampere characteristic)曲线形状及其与时间的关系,可将其分成下列几种情况来讨论。

1. 线性定常电阻元件

对于线性定常电阻元件来说,它的伏安特性可用欧姆定律

$$u = Ri \quad (1-2)$$

或

$$i = Gu \quad (1-3)$$

来表示。若把它表示在 $u-i$ 平面上,则得到一条通过原点的直线,如图 1-3 所示。在图 1-3(a) 所示的 u, i 参考方向下,若 $R > 0$,称为正电阻元件(positive resistor);若 $R < 0$,则称为负电阻元件(negative resistor);若 $R = 0$,此时电阻元件短路,它的伏安特性曲线与 $u-i$ 平面的电流坐标轴重合;若 $R \rightarrow \infty$,则此电阻元件开路,它的伏安特性曲线则与电压轴重合。

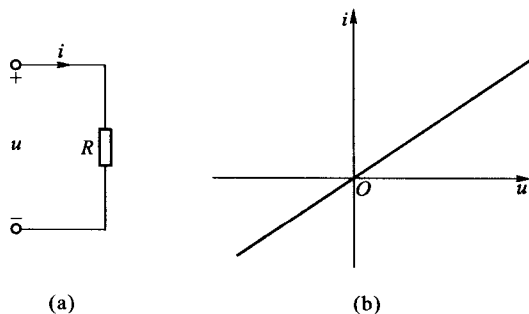


图 1-3 线性定常电阻元件及其伏安特性曲线

2. 线性时变电阻元件

如果电阻元件的伏安特性仍是通过原点的直线,但在不同时刻此直线的斜

率不同,这种电阻元件称为线性时变电阻元件(linear time-variant resistor)。它的伏安特性可表示为

$$u = R(t) \cdot i \quad (1-4)$$

或

$$i = G(t) \cdot u \quad (1-5)$$

式中, $R(t)$ 和 $G(t)$ 是此电阻元件在某一时刻的电阻值和电导值。

图1-4(a)为一线性时变电阻器的实例。图中伺服电动机牵引着电位器活动触头来回运动,电位器的电阻值就随时间而改变。但在任何时刻,它的特性曲线总是通过原点的一条直线,只是其斜率随时间而变化。满足这种要求的特性曲线为一直线族,如图1-4(b)所示。

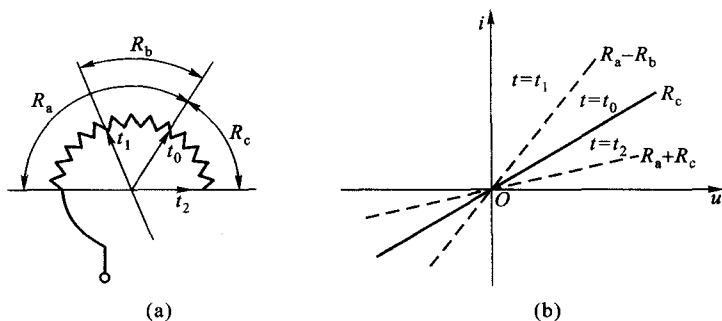


图1-4 线性时变电阻元件及其伏安特性曲线

3. 非线性定常电阻元件

如果电阻元件的伏安特性是在 $u-i$ 平面上通过原点的一条直线,则这种元件为线性定常电阻元件,否则为非线性定常电阻元件,有时简称为非线性电阻元件(non-linear resistor)。显然,非线性电阻元件中的电压与电流的关系不服从欧姆定律,而是遵循某种特定的非线性函数关系。图1-5(a)和(b)分别表示非线性定常电阻元件的图形符号和一种非线性定常电阻元件的伏安特性曲线。

非线性电阻元件的阻值是随着电流(或电压)的大小而变化的。在特性曲线某一点 p 可定义两个参数,即静态电阻 R_p (static resistor)和动态电阻 R_d (dynamic resistor)。如图1-5(b)所示的 p 点,其静态电阻为

$$R_p = \frac{u_p}{i_p} = \frac{m_u}{m_i} \tan \alpha \quad (1-6)$$

式中, m_u 和 m_i 分别为电压和电流坐标的比例尺。

其动态电阻为

$$R_d = \lim_{\Delta i_p \rightarrow 0} \frac{\Delta u_p}{\Delta i_p} = \left. \frac{du}{di} \right|_p = \frac{m_u}{m_i} \tan \beta \quad (1-7)$$

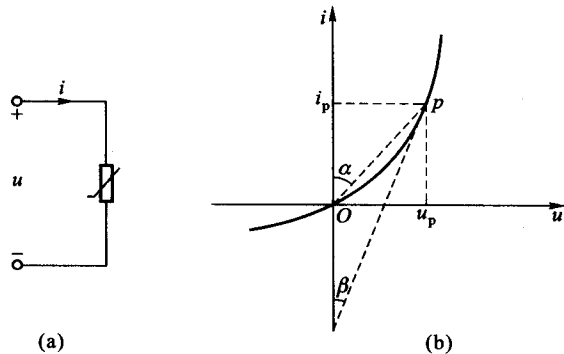


图 1-5 非线性定常电阻元件及其伏安特性曲线

动态电阻主要用来分析电路在小信号激励下的响应。

可见,对非线性电阻来说,其静态电阻与动态电阻是不相等的,且各点的静态电阻、动态电阻也不一样。

非线性定常电阻又可分为以下几种:

(1) 严格单调型

对于严格单调型的元件,若只考虑单调增加的情况,则在其伏安特性曲线上任取两点 (u_1, i_1) 和 (u_2, i_2) ,当 $u_1 > u_2$ 时,则 $i_1 > i_2$ 。真空二极管的伏安特性近似为

$$i = Ku^{\frac{3}{2}} \quad u \geq 0$$

式中, K 为常数,它与真空二极管的尺寸有关。其图形符号和伏安特性曲线如图 1-6(a)和(b)所示。

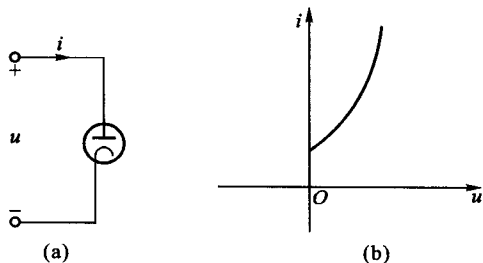


图 1-6 真空二极管及其伏安特性曲线

半导体(结型)二极管的伏安特性可近似地用下式表示,即

$$i = I_0(e^{Ku} - 1)$$

式中, I_0 和 K 均为常数, 由半导体二极管的实际参数来确定。其图形符号和伏安特性曲线如图 1-7(a) 和 (b) 所示。

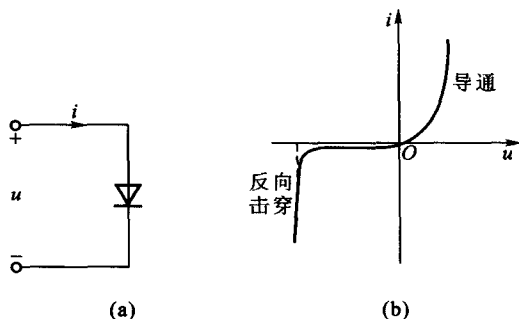


图 1-7 半导体二极管及其伏安特性曲线

由图可见, 它们的伏安特性曲线都是严格单调增加的, 均属于严格单调型的非线性电阻元件。

(2) 单调型

对于单调型元件, 在其伏安特性曲线上任取两点 (u_1, i_1) 和 (u_2, i_2) , 若 $u_1 > u_2$ 时, 则 $i_1 \geq i_2$ 。

稳压二极管和恒流二极管都属于单调型的非线性电阻元件, 它们的图形符号和伏安特性曲线分别如图 1-8(a) 与 (b) 和图 1-9(a) 与 (b) 所示。

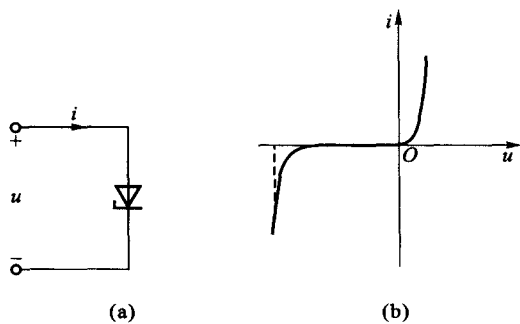


图 1-8 稳压二极管及其伏安特性曲线

(3) 局部负阻型

有些非线性电阻元件的伏安特性曲线具有一段负斜率, 即在这段中, 有 $\frac{du}{di} < 0$, 也就是动态电阻 R_d 为负, 称为局部负阻型电阻元件 (local negative resis-

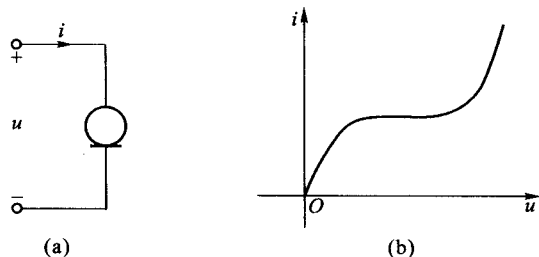


图 1-9 恒流二极管及其伏安特性曲线

tor)。这种电阻元件又可分为电压控制电阻元件和电流控制电阻元件。若电流 i 是电压 u 的单值函数,即

$$i = i(u) \quad (1-8)$$

而电压却不是电流的单值函数,这种电阻元件称为电压控制电阻元件,简称压控电阻(voltage-controlled resistor)。例如隧道二极管就属于压控电阻,其图形符号和伏安特性曲线如图 1-10(a)与(b)所示。

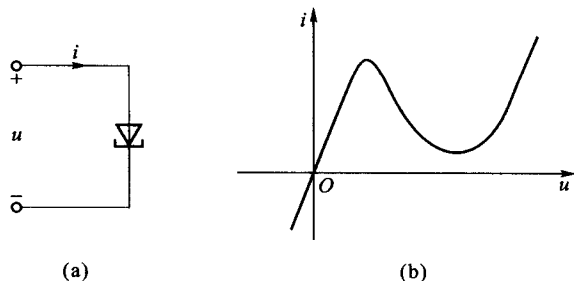


图 1-10 隧道二极管及其伏安特性曲线

如果电压 u 是电流 i 的单值函数,即

$$u = u(i) \quad (1-9)$$

而电流却不是电压的单值函数,这种电阻元件称为电流控制电阻元件,简称流控电阻(current-controlled resistor)。例如辉光二极管就属于流控电阻,其图形符号和伏安特性曲线如图 1-11(a)与(b)所示。

由此可见,严格单调型的电阻元件既是压控的又是流控的。因为其电流既是电压的单值函数,而电压又是电流的单值函数,即

$$i = i(u)$$

或

$$u = u(i)$$

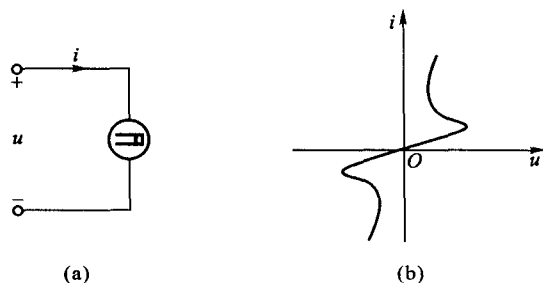


图 1-11 辉光二极管及其伏安特性曲线

(4) 双向型和单向型

若电阻元件的伏安特性曲线对称于原点,则这种电阻元件称为双向电阻元件(bidirectional resistor)。如前面所提及的辉光二极管便属于双向电阻元件,这种电阻元件的两个端点可互换而不影响 $u-i$ 曲线。

如果电阻元件的伏安特性曲线不对称于原点,则这种元件称为单向电阻元件(unilateral resistor)。如真空二极管和半导体二极管都属于单向型的。

例 1-1 设一非线性电阻元件的伏安特性可近似为 $u = 50i + 0.5i^3$, 试求通过它的电流分别为 $i_1 = 2 \text{ A}$, $i_2(t) = 2\sin 314t \text{ A}$, $i_3 = 10 \text{ mA}$ 情况下的电压值。

解 (1) 当 $i_1 = 2 \text{ A}$ 时, 则

$$u_1 = (50 \times 2 + 0.5 \times 2^3) \text{ V} = 104 \text{ V}$$

(2) 当 $i_2(t) = 2\sin 314t \text{ A}$ 时, 则

$$u_2(t) = (50 \times 2\sin 314t + 0.5 \times 8\sin^3 314t) \text{ V} = (100\sin 314t + 4\sin^3 314t) \text{ V}$$

因为

$$3\sin \theta - 4\sin^3 \theta = \sin 3\theta$$

所以

$$\begin{aligned} u_2(t) &= (100\sin 314t + 3\sin 314t - \sin 942t) \text{ V} \\ &= (103\sin 314t - \sin 942t) \text{ V} \end{aligned}$$

(3) 当 $i_3 = 10 \text{ mA}$ 时, 则

$$u_3 = [50 \times 0.01 + 0.5 \times (0.01)^3] \text{ V} = (0.5 + 0.5 \times 10^{-6}) \text{ V} \approx 0.5 \text{ V}$$

即在小电流的情况下, 该非线性电阻可用 $R = \frac{u_3}{i_3} = 50 \Omega$ 的线性电阻来近似。

该例可以说明非线性电阻元件的一些主要性质:

- ① 它能产生与输入信号频率不同的新频率信号。
- ② 在工作范围充分小时, 它常可以用线性电阻来近似。
- ③ 齐次性和可加性均不适用于非线性电阻元件。

4. 非线性时变电阻元件

如果非线性电阻元件的伏安特性是随时间变化的, 则这种电阻元件称为非