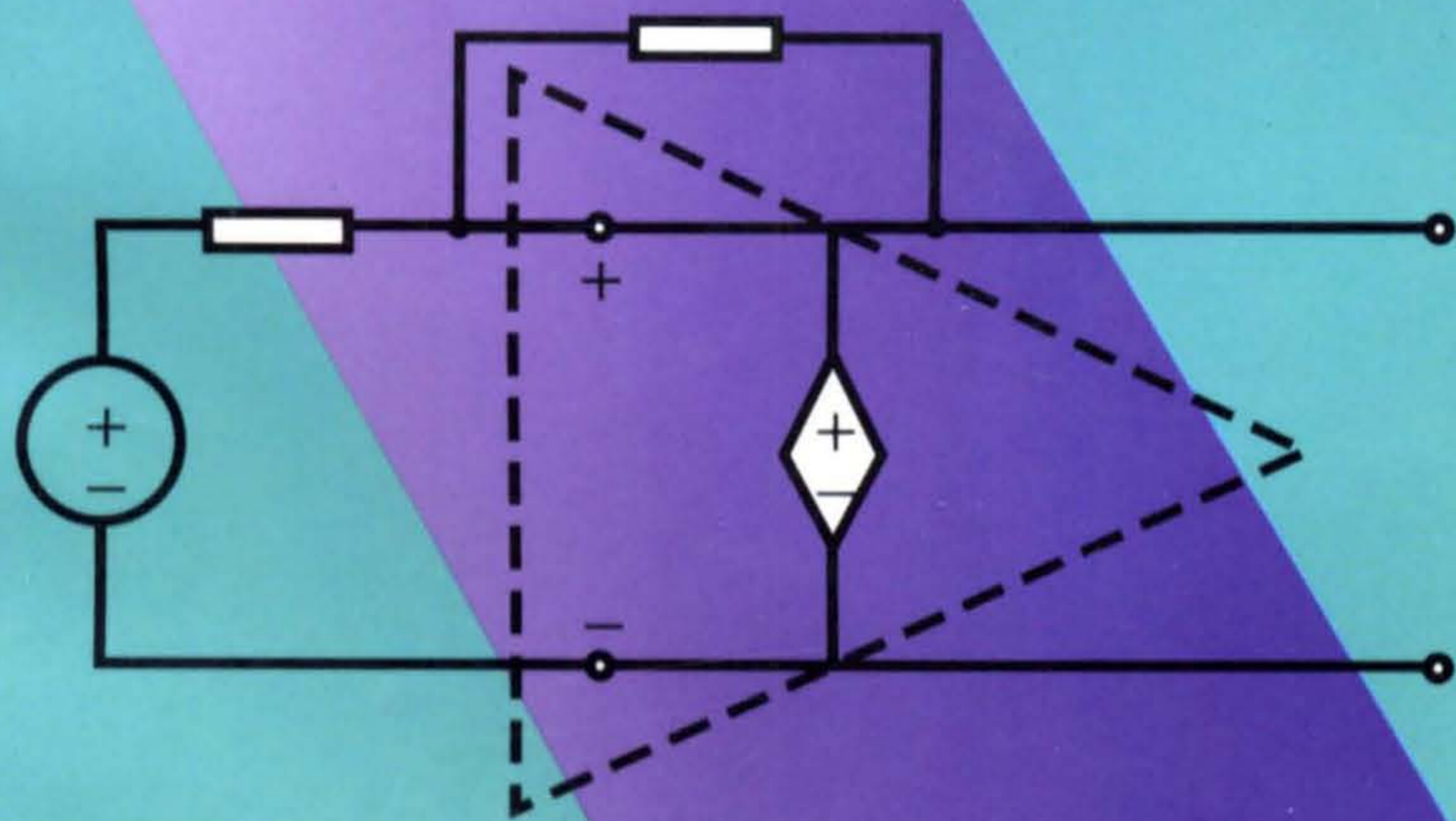


电路分析与器件基础

王文吉 编



北京理工大学出版社

电路分析与器件基础

王文吉 编

北京理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路分析与器件基础/王文吉编. —北京:北京理工大学出版社, 1997. 9

ISBN 7-81045-322-X

I. 电… II. 王… III. ①电路分析-高等学校-教材②电子器件-高等学校-教材 IV. TN711.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 15707 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 7 号)

邮政编码 100081 电话 (010) 68912824

各地新华书店经售

北京房山先锋印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 11.625 印张 298 千字

1997 年 9 月第一版 1997 年 9 月第一次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 17.50 元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

前 言

本书系根据我院计算机科学与工程系、信息管理系各专业多年试用的《电路分析与器件基础》讲义基础上编写的。

全书内容分电路分析基础和半导体器件基础两部分。电路分析基础部分是研究电路的基本概念,基本理论和基本分析方法。是为学习后续电类课程打下电路理论基础。其主要内容包括:电路的基本定律、直流电阻电路的分析方法、动态电路的时域分析、正弦稳态分析。通过这部分内容学习,使学生能够运用电路的基本理论对各种电路模型,特别是电子电路进行分析和计算。半导体器件基础部分首先是介绍半导体的基本知识,然后讨论PN结、半导体二极管、稳压管、双极型三极管、场效应管的工作原理、特性曲线和主要参数。通过这部分内容学习,使学生在掌握常用半导体器件基本工作原理基础上能合理地选择和使用器件,并为学习模拟电路和数字电路打下半导体器件基础。

本书可供高等院校非电子类专业《电路分析与器件基础》课程的教材,也可供大专院校师生和从事电类技术工作的工程技术人员参考。

全课程大约需用50学时左右。在编写中,内容力求少而精,力争做到由浅入深,循序渐进。重点放在培养学生分析问题和解决问题的能力上,所以在每章节中配有大量的例题、练习题和习题。并附有练习题和习题答案,便于学生做题时参考和自检。

由于编者水平有限,书中必有缺点和不妥之处,恳请读者批评和指正。

编 者

1997年1月

目 录

第一章 电路的基本概念和基本定律	(1)
§ 1-1 电流、电压和功率	(1)
§ 1-2 电阻元件 欧姆定律	(11)
§ 1-3 电压源	(15)
§ 1-4 电流源	(19)
§ 1-5 基尔霍夫定律	(22)
§ 1-6 受控源	(28)
§ 1-7 电阻的串联、并联和混联	(31)
§ 1-8 分压、分流公式及其应用	(37)
§ 1-9 电源模型的等效变换	(45)
习题一	(52)
第二章 直流电阻电路的分析方法	(60)
§ 2-1 网孔分析法	(60)
§ 2-2 节点分析法	(70)
§ 2-3 叠加定理	(79)
§ 2-4 戴维南定理	(86)
§ 2-5 诺顿定理	(96)
§ 2-6 最大功率传输定理	(100)
习题二	(103)
第三章 动态电路的时域分析	(111)
§ 3-1 电容元件	(111)
§ 3-2 电感元件	(115)
§ 3-3 一阶电路的零输入响应	(119)
§ 3-4 一阶电路的零状态响应	(130)
§ 3-5 一阶电路的完全响应	(138)
§ 3-6 一阶电路分析的三要素法	(146)

§ 3-7	二阶 (RLC 串联) 电路的零输入响应	(155)
§ 3-8	二阶 (RLC 串联) 电路的零状态响应和完全响应	(170)
	习题三	(175)
第四章	正弦稳态分析	(185)
§ 4-1	交流电的基本概念	(186)
§ 4-2	正弦的电压和电流及其有效值	(187)
§ 4-3	复数的复习	(194)
§ 4-4	正弦量的相量表示法与相量图	(199)
§ 4-5	基尔霍夫定律的相量形式	(203)
§ 4-6	电阻、电感、电容元件上的伏安关系相量形式	(206)
§ 4-7	阻抗和导纳	(214)
§ 4-8	正弦稳态电路的分析	(222)
§ 4-9	电阻、电感和电容元件中的功率	(229)
§ 4-10	正弦交流电路中的功率	(236)
§ 4-11	正弦稳态最大功率传输定理	(244)
§ 4-12	耦合电感的伏安关系	(249)
§ 4-13	耦合电感的串联和并联	(258)
§ 4-14	空芯变压器	(264)
§ 4-15	理想变压器	(271)
	习题四	(279)
第五章	半导体器件基础	(290)
§ 5-1	半导体的基本知识	(290)
§ 5-2	PN 结	(297)
§ 5-3	半导体二极管	(303)
§ 5-4	稳压管	(315)
§ 5-5	双极型晶体管	(317)
§ 5-6	场效应管 (FET)	(334)
	习题五	(354)
	习题答案	(360)
	参考文献	(366)

第一章 电路的基本概念 和基本定律

本章主要讨论电路分析的基本变量和电路的基本定律。其中有些内容，虽然已在物理学中讲过，但这些内容是电路分析的基础内容，也是学好其它章节的基础，所以，希望读者不要轻视它，而应当在原有的基础上进一步巩固和加深这些内容，并能充分应用这些内容来提高解决问题的能力。

§ 1-1 电流、电压和功率

一、电流

带电粒子有秩序的移动称为电流。因此，电流是一种客观的物理现象，通过它的各种效应，例如：热效应、磁效应等，能够使我们观察到它的存在。

目前所研究的电流是指导体中的大量的自由电子，在电场作用下所作有秩序的运动，这种电流称为传导电流。实际上导体中自由电子的实际运动除作有秩序的运动外，一般还作无秩序的热运动。自由电子的实际运动是这两种运动的合成。但从宏观上看，由于热运动是杂乱无章的，故对外是不能显示出电流作用的。

由于金属中有大量的自由电子，所以金属是良导体。还有另一类导体，如酸、碱、盐等化合物的水溶液中，这些化合物分解成带正电和带负电的粒子，称为正离子和负离子。所以在电解液中的传导电流是由于正负离子在电场作用下向相反方向运动而形成的。

为了从量的方面来衡量电流的大小，引入电流强度一量。

它的定义是：单位时间内通过导体横截面的电量。用符号 I 或 i 表示。电流强度通常简称电流。

设在极短时间内穿过导体横截面的微量电荷为 dq ，则电流强度为

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

电流大小是随时间变化的，称为变化的电流。如果电流的大小随时间按正弦规律变化称为正弦电流，其波形如图 1-1(a) 所示。

如果电流大小不随时间变化，即在同样长的时间内通过导体横截面的电量都相同，则这种电流称为恒定电流，简称直流，简称为 dc 或 DC。在这种情况下，电流强度用大写 I 表示，且 (1-1a) 式可写为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-1b)$$

其波形如图 1-1(b) 所示。其中：电荷 q 的单位为库仑(C)；时间 t 的单位为秒(s)；电流 i 的单位为安培(A)。

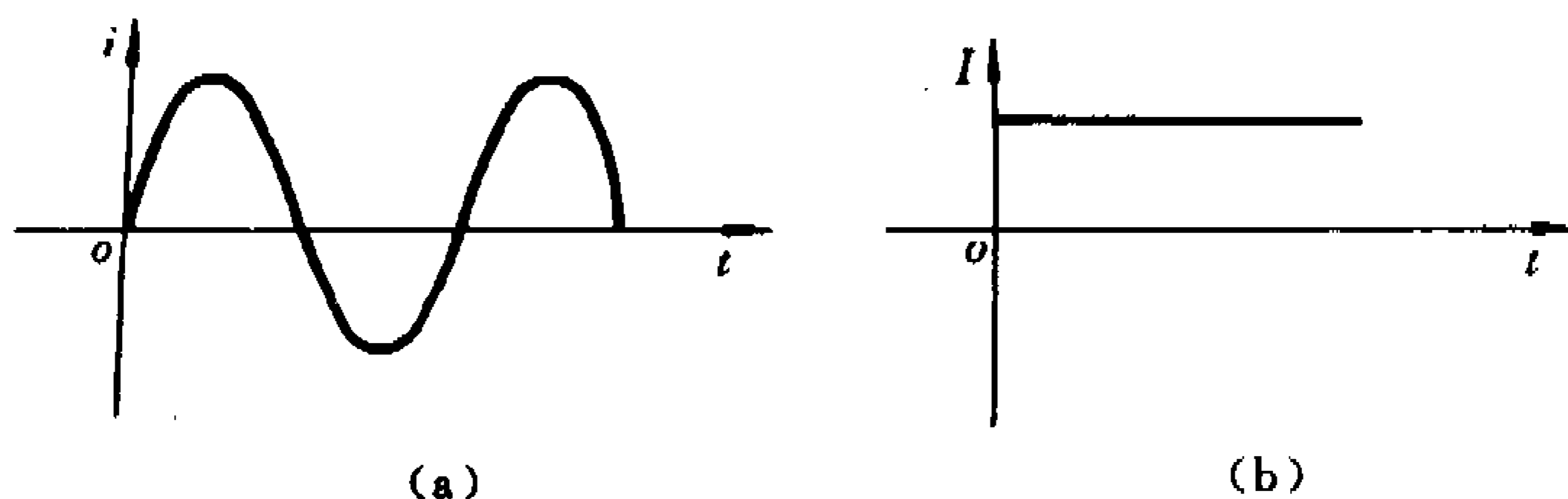


图 1-1 电流波形

一安培电流相当于在 1 秒内穿过导体横截面一库仑电量的电流。在计量微弱电流时，往往采用毫安(mA)或微安(μ A)作为电流的单位

$$1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$$

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。在实际电路中，往往电流的真实方向难以在电路图中判定。如图 1-1(a)所示的正弦电流，其大小和方向是随时间而变化的，难以用一个固定的箭头来表示它的真实方向。就是在直流电流中，当电路较为复杂时，各支路的电流也往往难以判断其真实方向。因此，引入参考方向的概念。

在电路图中可以任意用箭头表示电流的方向，这一任意假定的方向称为电



图 1-2

流的参考方向。如图 1-2

所示。图中箭头表示电流 i 的参考方向。如果电流的真实方向与所标的参考方向一致，电流为正值。如果相反，电流为负值。这样，可以根据电流的正负值并结合参考方向来断定电流的真实方向。

所以电流的正负离开参考方向是毫无意义的。

例 1-1 10 库仑的正电荷在 2 秒钟内由 $a \rightarrow b$ 转移，如何表示电流？如 10 库仑的负电荷在 2 秒钟内由 $a \rightarrow b$ 转移，又如何表示电流？

解：习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的真实方向。所以

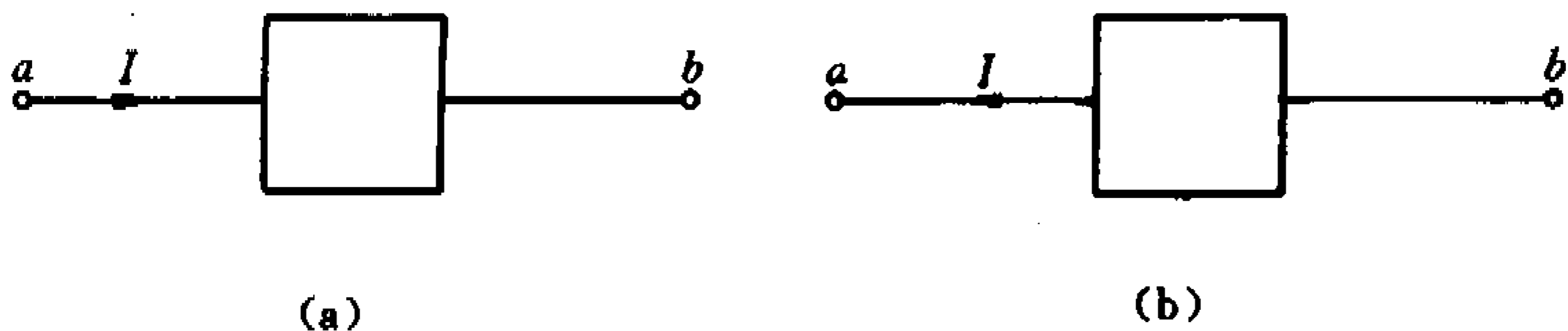


图 1-3

(1) 图(a)中电流的参考方向和正电荷运动方向(电流真实方向)均由 $a \rightarrow b$ ，故电流为正值，即 $I=5A$ 。

图(b)中电流的参考方向和正电荷运动方向相反,故电流为负值,即 $I = -5\text{A}$ 。

(2)当 10 库仑的负电荷在 2 秒钟内由 $a \rightarrow b$ 转移,相当于正电荷由 $b \rightarrow a$ 转移。

图(a)中电流的参考方向由 $a \rightarrow b$,正电荷由 $b \rightarrow a$,二者相反,故电流为负值,即 $I = -5\text{A}$ 。

图(b)中电流的参考方向由 $b \rightarrow a$,正电荷由 $b \rightarrow a$,二者方向相同,故电流为正值,即 $I = 5\text{A}$ 。

练习题

1-1 进入某元件的总电荷为 $q(t) = 4e^{-2t}\text{C}$,问当 $t = 0$ 时,元件中的电流 i 是多少?

(-8A)

1-2 若流过电路中某点的电流为 $i(t) = 4e^{-4t}\text{A}$, $t \geq 0$ 。试求流经该点电荷 $q(\text{A})$ 的表示式。当 $t = 0.25\text{s}$ 时,流过该点的总电荷?

(0.632C)

二、电压与电位

电荷在电场力的作用下运动的物理过程,实际上就是电场对电荷做功的物理过程。为了衡量电场力做功的大小,引用电压这个物理量。电压是电路分析中的又一个基本变量。

电压的定义:电场中单位正电荷从 a 点转移到 b 点时,电场力所作的功称为 a 、 b 两点间的电压。即

$$V_{ab} = \frac{dW_{ab}}{dq} \quad (1-2)$$

其中: W_{ab} 是电场力将单位正电荷由 a 点转移到 b 点时所作的功,单位为焦耳(J)。 q 是被移动的正电荷的电量,单位为库仑(C), V_{ab} 是电路中 a 、 b 两点之间的电压,单位为伏特(V)。即

$$1 \text{ 伏特} = \frac{1 \text{ 焦耳}}{1 \text{ 库仑}}$$

计量微弱电压时可用毫伏($1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$)及微伏($1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$), 而计量高压时则可用千伏($1\text{kV} = 10^3\text{V}$)。

电压和能量的关系很密切。如果正电荷由 a 转移到 b , 获得能量, 则 a 点为低电位即负极, b 点为高电位, 即正极。如图 1-4(a)所示。如果正电荷由 a 转移到 b 失去能量, 即 a 点为高电位, 即正极, b 点为低电位, 即负极。如图 1-4(b)所示

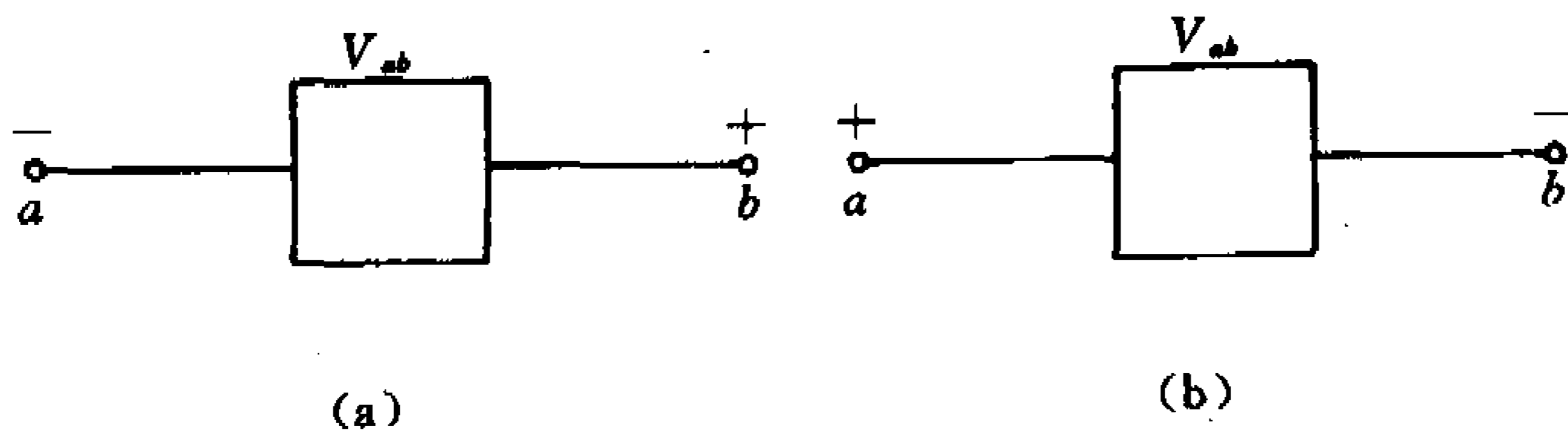


图 1-4

因此, 正电荷在移动时, 能量的得或失体现为电位的升高或降落, 即电压升或电压降。

电压的大小和极性不随时间而变化的电压称为恒定电压或直流电压。用符号 V 来表示。

电压的大小和极性都随时间而变化的电压称为交流电压。用符号 $v(t)$ 来表示。

同理, 在电路中, 事先也难以知道电压的真实极性, 即 $a \rightarrow b$ 是电压升还是电压降。这样, 在分析电路时和电流一样, 也需要为电压规定参考极性。电流参考方向用箭头表示, 电压的参考极性用“+”“-”号表示。“+”号表示高电位端,“-”号表示低电位端。如图 1-5 所示。

电压的参考极性是可以任意假定的, 一旦假定好以后, 就应该根据假定的参考极性进行分析计

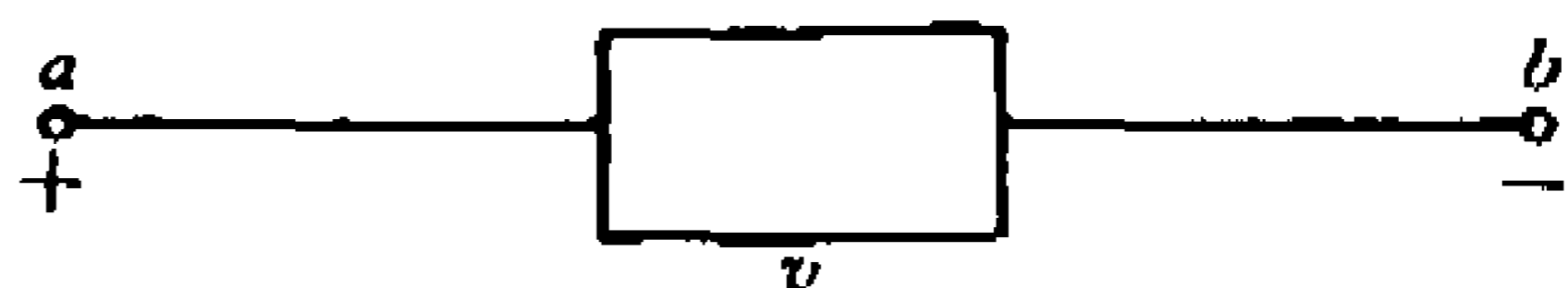


图 1-5

算，如果算得的电压为正值，说明电压的真实极性与所标的参考极性相同；如果算得的电压为负值，则说明电压的真实极性与所标的参考极性相反。所以，电压的正负离开参考极性是毫无意义的。电压的参考极性有时也称电压参考方向或正方向。

电压有时也叫电位差。

电位的定义：电路中某一点到参考点的电压降叫这一点的电位。

参考点本身的电位为零。参考点的选择是任意的，一般选定无限远处或地面作为参考点，但在计算上则常选择电路中某点作为参考点以使计算简便。应当注意：当选定的参考点不同时，各点电位也会不同，但任何两点间的电位差或电压都仍保持不变。

在电子电路图中经常采用电位的画法。如图 1-6(a)(b)所示。

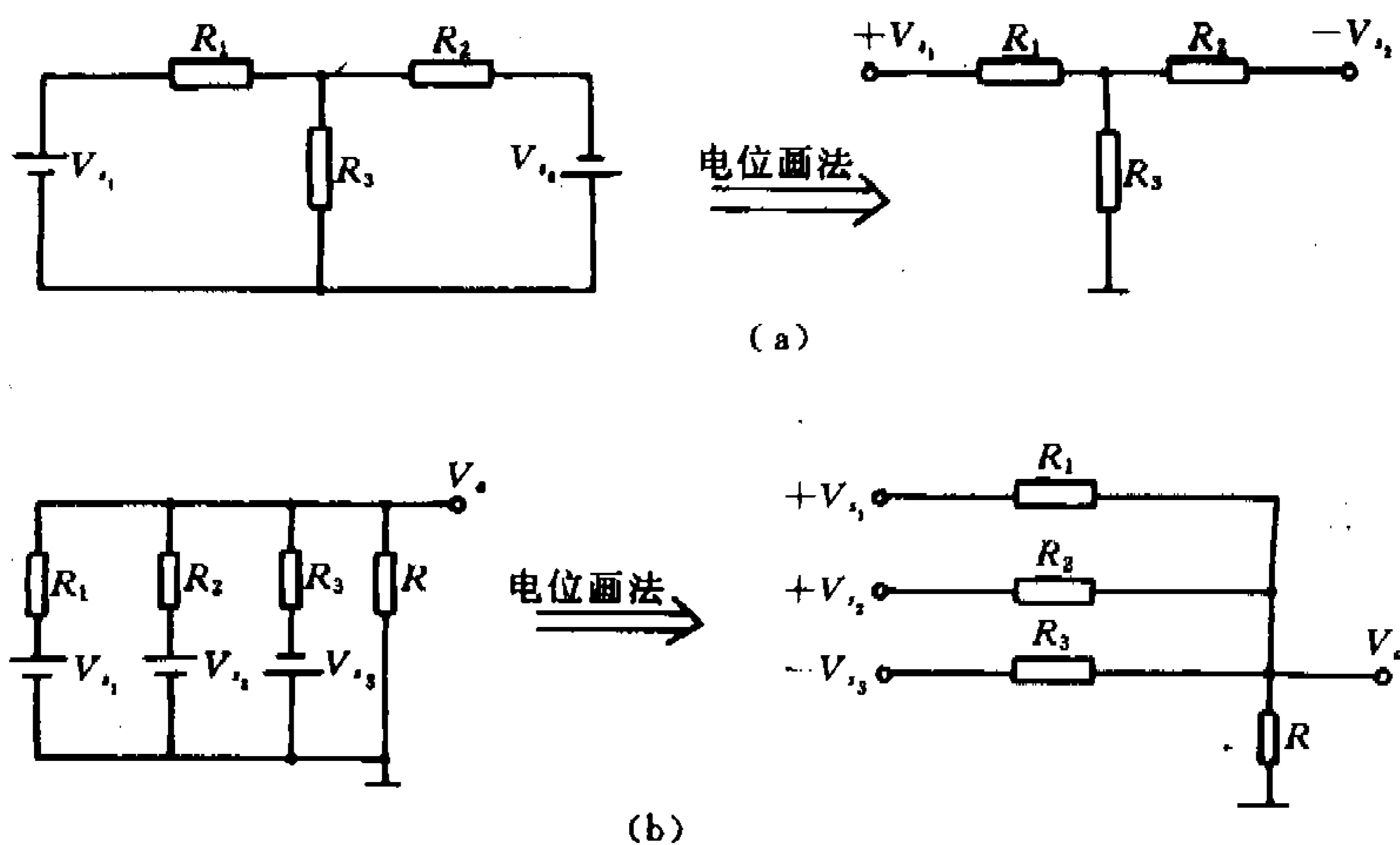


图 1-6

电流的参考方向是可以任意假定的，电压的参考极性也是可

以任意假定的，它们之间互不相关。但是，为了方便清楚起见，常采用关联的参考方向，即电流参考方向(箭头方向)和电压参考极性(“+”极到“-”极)的方向一致。如图 1-7(a)所示。这样，在采用关联的参考方向下，电路图上只需标出两个参考方向中任何一个参考方向即可，另一个可省略不标。如图 1-7(b)(c)所示

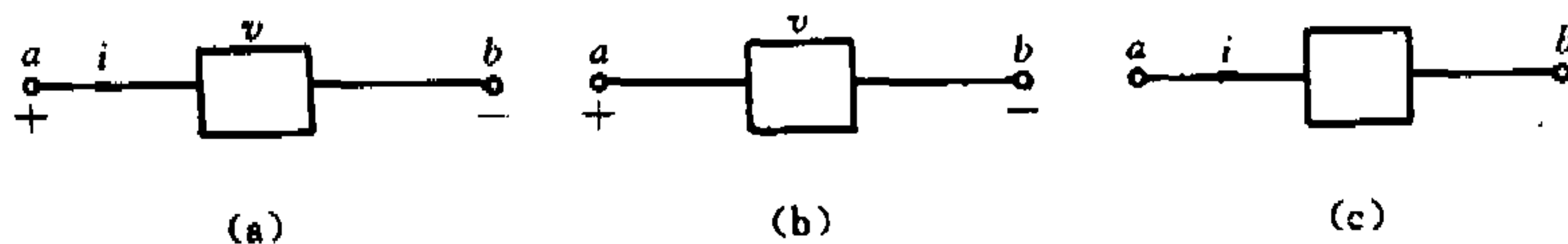


图 1-7

例 1-2 10 库仑的正电荷由 $a \rightarrow b$ 失去 10 焦耳能量，试标出电压的真实极性。试为该电压假定参考极性，并写出相应的电压表达式。

解 10 库仑正电荷由 $a \rightarrow b$ 失去 10 焦耳能量

$$V_{ab} = \frac{10(\text{J})}{10(\text{C})} = 1\text{V}$$

电压的真实极性是 a 端为“+”而 b 端为“-”。

电压参考极性是可以任意假定的，因而有二种选定的方式，分别为图 1-8(b)(c)所示。

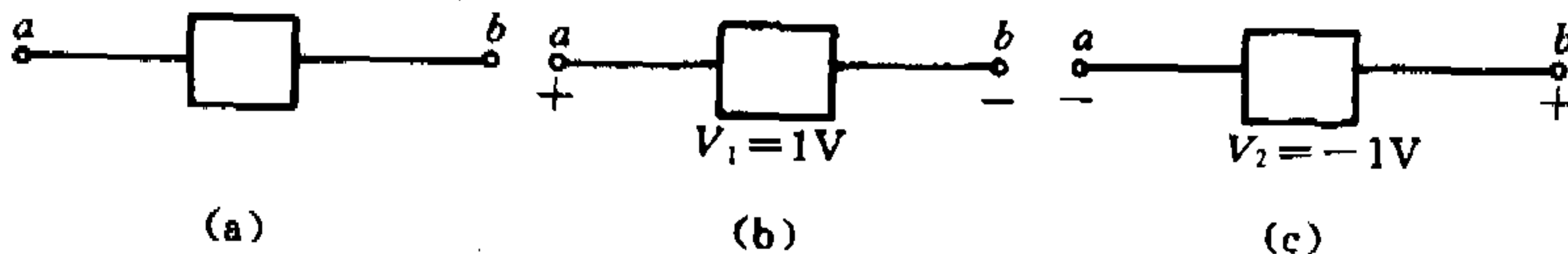


图 1-8

图(b)中由于电压的真实极性和参考极性一致，故电压 V_1 为正值，其表示式为

$$V_1 = 1V$$

图(c)中电压的真实极性和参考极性不一致, 故电压 V_2 为负值, 其表示式为

$$V_2 = -1V$$

参考极性选择不同, 两电压表达式差一负号。

练习题

1-3 1C 电荷由 $a \rightarrow b$, 能量的改变为 10J, 求 V_{ab} 。

若(1)电荷为正, 且为失去能量; (2)电荷为正, 且为获得能量; (3)电荷为负, 且为失去能量; (4)电荷为负, 且为获得能量。

(10V, -10V, -10V, 10V)

三、功率

在电力系统及设备中, 我们所需要的并不是电流本身, 而是需要使电流作功。如发电站的主要任务在于发出和输送大量功率, 而不在于输送大量电流。因此, 电路分析中另一个物理量——功率也成为电路计算的一个重要内容。

功率的定义: 单位时间内能量的变化。即

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (1-3)$$

其中: W 是能量, 单位为焦耳(J); t 是时间, 单位为秒(s); P 是功率, 单位为瓦特(W)。

功率也可用电压、电流来表示。即

$$P = \frac{dW}{dt} = V \frac{dq}{dt} = V \cdot i \quad (1-3a)$$

在直流情况下:

$$P = V \cdot I \quad (1-3b)$$

其中: 电压单位为伏特, 电流单位为安培, 功率单位为瓦特。

当电压、电流采用关联参考

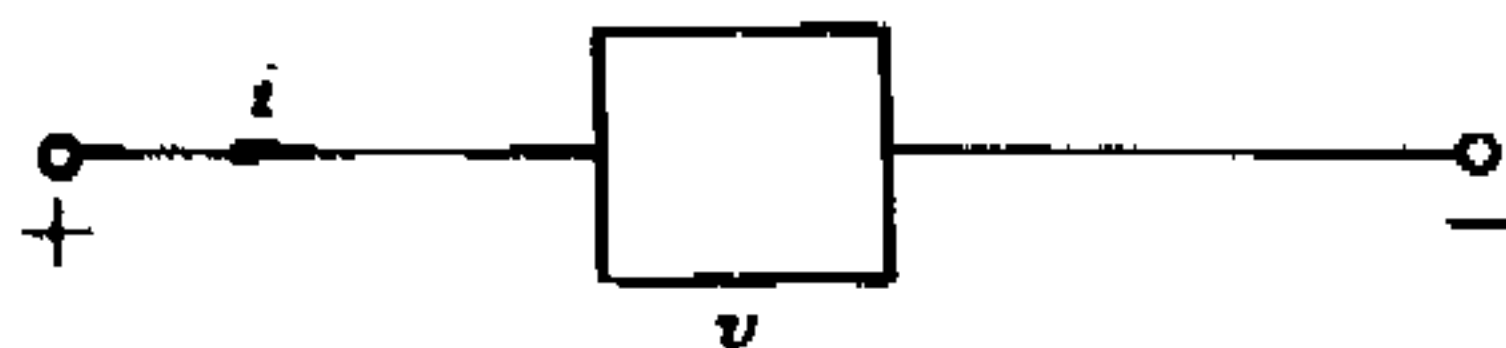


图 1-9

方向，如图 1-9 所示。其计算功率的公式为

$$P = v \cdot i \quad (1-4a)$$

若算得的功率为正值($P > 0$)，表示该元件为吸收或消耗功率。

若算得的功率为负值($P < 0$)，表示该元件为释放或产生的功率。

当电压、电流采用非关联参考方向，如图 1-10 所示。则计算功率的公式为

$$P = -v \cdot i \quad (1-4b)$$

图 1-10

若算得的功率为正值($P > 0$)，表

示该元件为吸收或消耗功率。若算得的功率为负值($P < 0$)，表示该元件为释放或产生的功率。

例 1-3 计算图 1-11 各元件的功率，并说明是产生功率还是吸收功率。

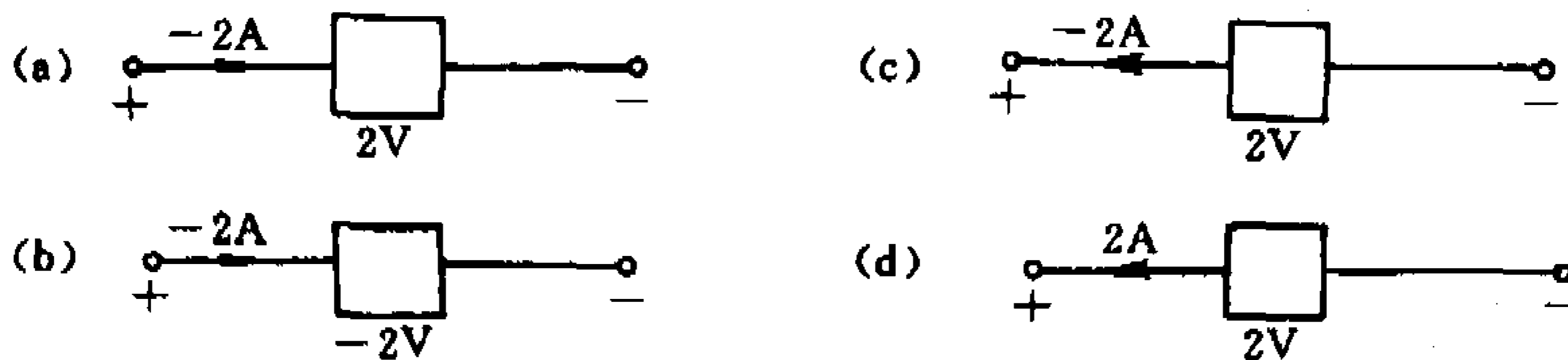


图 1-11

解 图(a) 电压、电流为关联参考方向。故

$$P = VI, P = 2 \times (-2) = -4W$$

$P < 0$ 为产生功率

图(b) 电压、电流也为关联参考方向。故

$$P = VI = (-2) \times (-2) = 4W$$

$P > 0$ 为消耗功率

图(c) 电压、电流为非关联参考方向。故

$$P = -VI = -(2) \times (-2) = 4W$$

$P > 0$ 为消耗功率

图(d) 电压、电流为非关联参考方向。故

$$P = -2 \times (2) = -4\text{W}$$

$P < 0$ 为产生功率

练习题

1-4 试计算图 1-12 所示各元件吸收或产生的功率，其电压、电流为

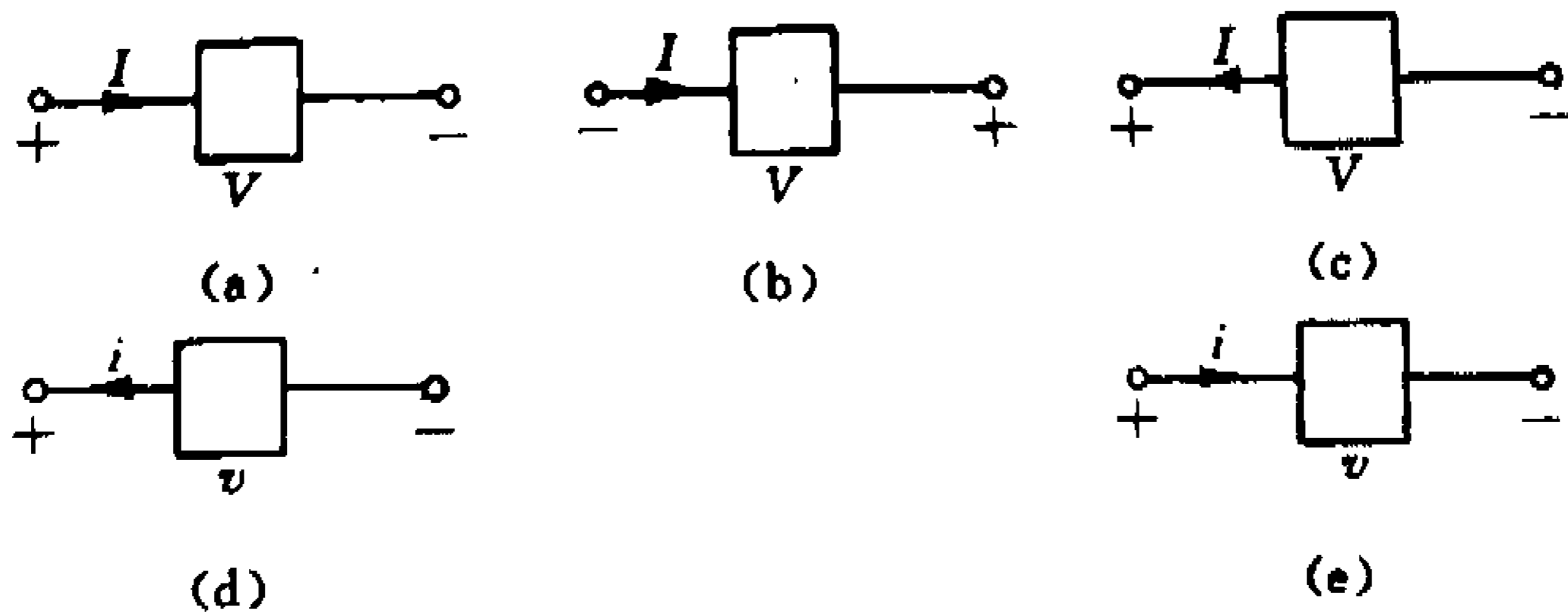


图 1-12

图(a) $V = -4\text{V}$, $I = 2\text{A}$ 图(b) $V = -1.5\text{V}$, $I = 1\text{A}$

图(c) $V = 4\text{V}$, $I = -6\text{A}$

图(d) $V = 20\text{V}$; $i = 10e^{-2t}\text{mA}$

图(e) $V = 20\text{V}$; $i = 4\sin t \text{ mA}$

(-8W 产生; 1.5W 吸收; 24W 吸收)

($-200e^{-2t} \text{ mW}$ 产生; $80\sin t \text{ mW}$ 吸收)

1-5 在图 1-13 中

(a) 元件 A 吸收功率 20W , 求 I_1 。

(b) 元件 B 吸收功率 30W , 求 I_2 。

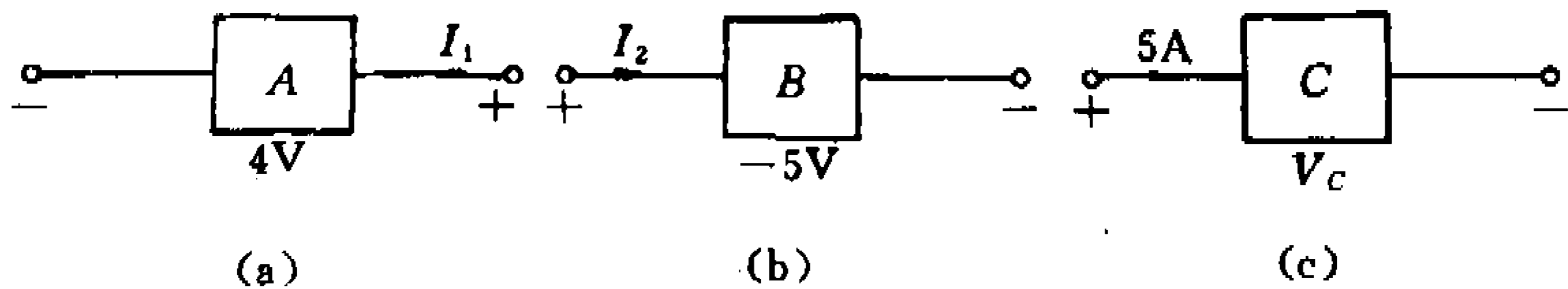


图 1-13

(c) 元件 C 产生功率 40W, 求 V_c 。

(5A, -6A, -8V)

§ 1-2 电阻元件 欧姆定律

电阻元件, 是从实际电阻器抽象出来的理想化的模型。在物理课程中, 只研究服从于欧姆定律的电阻元件, 但在工程中有很多电子器件, 它们并不服从于欧姆定律, 然而却具有类似的特性。这些器件在计算机、控制系统和通讯系统中愈来愈广泛的被应用, 所以, 为了更好的认识和使用它们, 从更广义的观点来研究电阻元件是十分重要的。

如果一个二端元件在任一瞬间 t 的电压 $V(t)$ 和电流 $i(t)$ 之间的关系由 Vi 平面(或 iV 平面)上一条曲线所决定, 则此二端元件称为电阻元件。这条表示元件电压电流关系的曲线称为元件的伏安特性曲线。电阻元件简称电阻。

电阻元件根据它是线性还是非线性, 是时变还是非时变, 可以分为四类。

线性电阻元件的伏安特性是一条通过坐标原点的直线。电阻值 R 是一个常数, 与 V 和 i 的大小及方向均无关系。如图 1-14 (b)。

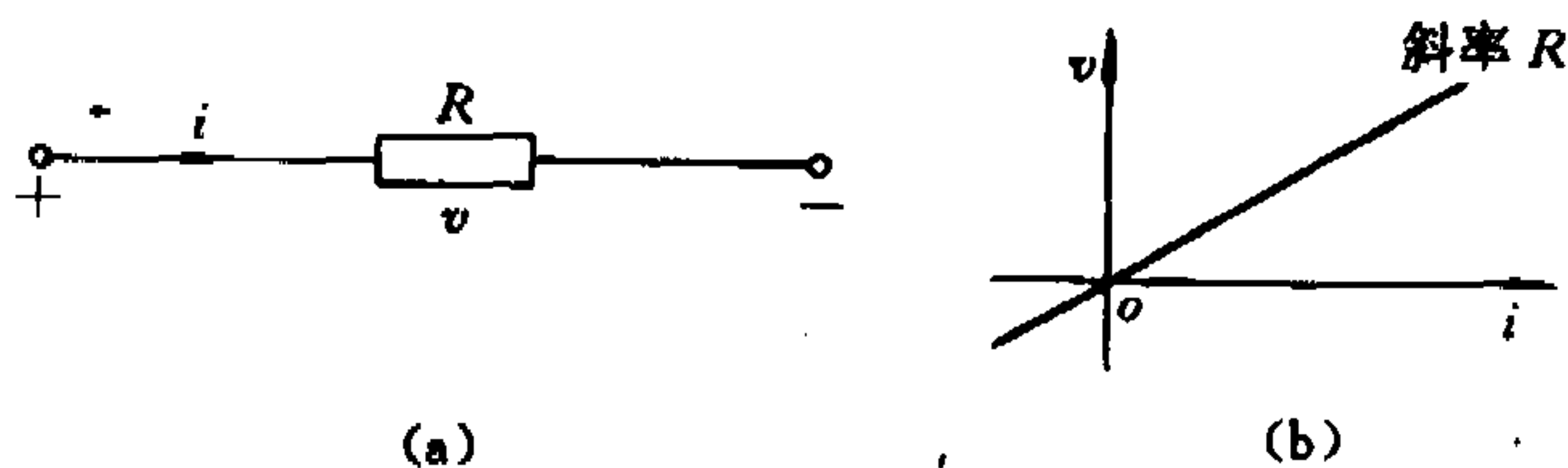


图 1-14

线性电阻元件是由欧姆定律定义的。如图 1-14(a)所示

$$V = Ri \quad (1-5a)$$