

第一章 电路模型和电路定律

电路分析是电路理论的一个分支。它研究的是在确定电路结构，已知元件参数的条件下，寻求电路输入（激励）与输出（响应）之间的关系。电路理论的另一个分支是电路综合，它研究的是在确定了输入（激励）与输出（响应）的条件下，如何寻求电路的结构和元件的参数。本书的内容是电路分析。

学习《电路分析基础》核心内容是掌握电路的基本规律和分析计算方法。本章将首先介绍电路的基础知识和基本概念。重点介绍电路理论中的模型、基本变量、基本元件、基本定律等重要概念。因为本章的内容是全书的基础，所有概念都要在以后的章节中用到，必须重视，加深理解。

第一节 电路及电路模型

本节介绍什么是电路及电路模型的概念。

一、电路

电路是电能传输和转换的电流通路，主要是由电源（提供电能）、负载（用电设备——取用电能的设备）及连接电源与负载

之间能量传送的导线等组成。实际电路是由电器元件相互连接而构成的。这里所说的电器元件泛指实际的电路部件，如电阻器、电容器、电感器、晶体管、变压器、电源、开关等。由于电路的设计目的、任务是各种各样的，所以电路的作用也是各种各样的。

在电路中，随着电流的通过，进行着电能的传输和分配，以及把电能转换成所需要的其它形式能量的过程。虽然电路是一个极其复杂的系统，但基本上可以将其分为两大类：一类是进行电能的传输或转换，另一类是实现信息的传输和处理。在通信技术中，电路的主要作用是用来传递，储存，加工和处理信号。通常把输入电路的信号称为激励，而把经过电路传输或处理后输出的信号称为响应。

二、电路模型

在实际电路中使用着的各种电器元件，种类繁多，所呈现的电磁性能也相当复杂。人们设计制作各种元器件是希望利用它的主要物理性质，如电阻器是要利用它的电阻，即对电流呈现阻力的性质，实际上当电流通过时，它也储藏了一定的磁能和电能，因此上，电阻器不仅有热效应，还有一定的磁场和电场效应。再如电感线圈，它的主要功能是用来存储和交换磁能，但当电流通过时还消耗一定的热能，同时还伴随着一定的电场能量。在电路分析中，如果将这些电磁性能都加以考虑，势必使分析过程复杂化。在工程上也没有这种精确的必要。因此，在一定条件下，对实际元件加以近似、理想化，并用一个表征其主要性能的元件模型（又称理想元件）来代替实际元件，从而构成了与实际电路相对应的电路模型。以后，分析计算中所涉及的各种元件都是指理想元件。电路分析中常用的三种最基本的理想元件分别是：只表

示消耗电能并将电能转换为热能的电阻元件；只表示存储电场能量特性的电容元件，以及只表示存储磁场能量特征的电感元件。图 1-1-1 所示为三种理想元件的符号模型。它们均为二端元件。



图 1-1-1 三种理想元件的符号模型

由理想元件组成的电路称为电路模型，简称电路。用理想元件的符号模型代替实际电路的各个部件，这样画出的图就称为电路模型图，简称电路图。在今后的电路分析中除非特别说明之外，所分析研究的对象均为电路模型而非实际电路。所画的电路图均为电路模型图。

理想元件是抽象的模型，对理想元件构成的电路进行分析、计算，其结果与其相对应的实际电路中测量所得到的结果基本是一致的。抽象就是理想的过程，元件的电磁特性都分别集总在各个元件内部某一点上。这样的元件称为集总参数元件，简称为集总元件。由集总元件构成的电路称为集总参数电路。

用集总参数电路模型来近似地描述实际电路是有条件的，它要求实际电路的几何尺寸 l 要远小于电路工作时工作频率所对应的波长 λ ，即

$$l \ll \lambda \quad \lambda = c/f \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s (光速)}$$

集总参数电路的特点是电路中任意两端点的电压和流入任一元件端点的电流是完全确定的，与元件的几何尺寸和空间位置无关。不满足 $l \ll \lambda$ 条件，实际电路就不能按集总参数电路模型来处理，我们把这一类电路称为分布参数电路，例如波导和传输线组成的电路，其电路中电压和电流不仅是时间的函数，与元

件的几何尺寸和空间位置有关，而且元件尺寸与工作频率对应的波长可以比拟，这样就不能采用集总参数概念，只能属于分布参数电路。本书只讨论集总参数电路。

第二节 电路的基本变量

在电路分析计算过程中，离不开电路变量的计算。讨论电路问题之前，建立并理解电路变量的基本概念是很重要和必须的。电路中的物理量主要有电荷，电流，电压，磁通，功率和能量。我们把这些物理量称为电路的变量。其中，电流和电压是电路中的基本变量，因为它们可以方便地表示出其它变量，而且如果电路中各部分的电流、电压是已知的，则其电性能是确定的。

一、电 流

电荷的定向移动形成电流。为了从量的方面度量电流的大小，人们引入了电流强度的概念。将单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度，简称为电流，用符号 i 表示，即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

式中 q 为通过导体横截面的电荷量。若 dq/dt 为常数，就是直流电流，常用大写字母 I 表示。当电流随时间变化时，用 $i(t)$ 表示。在国际单位制中，电流、电荷和时间的单位分别为安培 (A) 简称安，库仑 (C) 简称库和秒 (s)，因此，1 安 = 1 库/秒 (1A = 1C/s)。在电力系统中，有时用千安 (kA) 为单位来表示电流的大小。而在通信技术中，由于电流数值较小，常用毫安 (mA)、微安 (μ A) 为单位来表示电流的大小。它们之间的换算

关系是

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

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

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

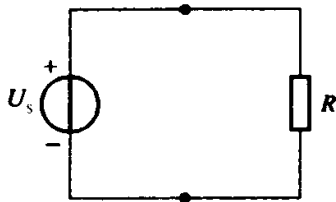


图 1-2-1 单一回路

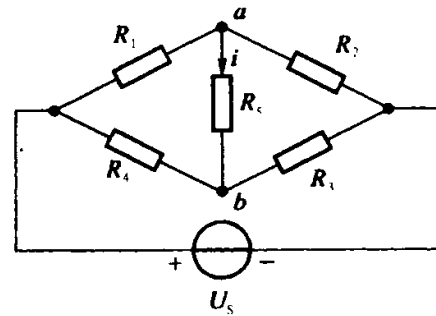


图 1-2-2 桥式电路

电流不但有大小，而且有方向。通常我们规定正电荷的运动方向为电流的实际方向，也叫真实方向，又称正方向。在图 1-2-1 所示的由单一电源构成的简单电路中：电流的实际方向是显而易见的，它是从电源正极流出，流向电源负极的。但在一些稍复杂的电路里，如图 1-2-2 所示桥式电路里，就难以确定 R_5 支路中电流的实际方向。为了电路分析和计算的需要，我们用参考方向解决这个难题。参考方向是人为选定，随便假设的正方向。所以参考方向又称选定正方向。参考方向用箭头标示在电路中，今后若无特殊说明，就认为电路图上所标箭头就是电流的参考方向。按图所标示的方向去分析计算得出电流为正值，说明所设参考方向与实际方向一致；若得出的电流为负值，说明所设参考方向与实际方向相反。显然电流值的正与负是在设定参考方向的前提下，才有意义。没有标明参考方向的电流是无法计算，也是没有实际意义的。因此在求解电路时，必须首先选定电流的参考方向。在图 1-2-2 中，假设 R_5 支路电流的参考方向由 a

指向 b 若计算出 $i > 0$ (为正值), 则参考方向就是电流的实际方向, 若计算出电流 $i < 0$ (为负值) 则表示电流的实际方向与假定的参考方向相反。

二、电压

物理学中将单位正电荷从电路中 a 点移到 b 点所获得或失去的能量, 称为 a 、 b 两点的电位差, 即 a 、 b 间的电压

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-2-2)$$

式中 dq 为从 a 点移到 b 点的电荷量, 单位为库仑 (C), dW 是电荷移动过程中, 所获得或失去的能量, 单位为焦耳 (J), 电压的单位为伏特, 用 V 表示。电压的单位还有千伏 (kV), 毫伏 (mV), 微伏 (μV), 它们的换算关系是:

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

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

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

若 dW/dq 为常数, 就是直流电压, 用 U 表示, $u(t)$ 表示电压随时间变化。将电路中任意一点作为参考点, 把 a 点到参考点的电位称为 a 点的电压, 用符号 u_a 或 U_a 表示。电路中 a 点到 b 点的电压, 就是 a 点电位与 b 点电位之差。即

$$u_{ab} = u_a - u_b \quad (1-2-3)$$

习惯上我们认为电压的实际方向是从高电位指向低电位。将高电位点称为正极, 低电位点称为负极。即电位降的方向为电压的正方向。

与电流类似, 电路中各电压的实际方向或极性往往不能事先确定。在分析电路时, 也需要规定电压的参考方向或参考极性。电压的参考极性用 “+”、“-” 号表示。分别标注在元件或电路

的两端，如图 1-2-3 所示。通常情况下，如无特殊说明，电路图中的“+”、“-”标号就认为是电压的参考方向。在设定电压的参考方向以后，经过计算得出 $u_{ab} > 0$ ，表明该时刻 a 点的电位比 b 点的电位高；若 $u_{ab} < 0$ ，表明该时刻 a 点的电位比 b 点电位低。可见，有了电压的参考极性和电压的正负值，就可以判断电位的高低，在不标明电压参考极性的情况下，电压的正负毫无意义。当电路中同一电压规定相反参考极性时，相应的电压表达式相差一个负号，即

$$u_{ab} = -u_{ba}$$

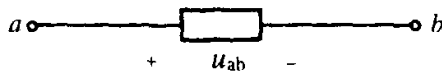


图 1-2-3 电压的参考方向

三、关联参考方向

如前所述，在电路分析中电流的参考方向和电压的参考方向都是随意选定的，所以互不相干。但通常为了分析计算方便，采用关联参考方向，即将两者的参考方向选为一致。也就是说，当电压的参考极性已规定时，电流参考方向从“+”指向“-”；当电流参考方向已规定时，电压参考极性“+”号标在电流参考方向的进入端，如图 1-2-4 (a)、(b) 所示。

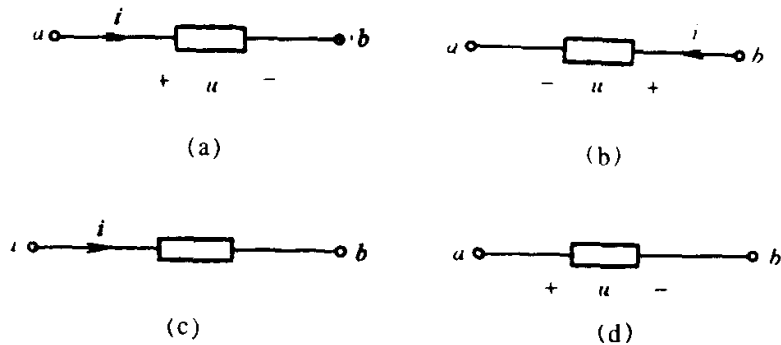


图 1-2-4 关联参考方向

在电流电压采用关联参考方向的条件下，可以只标明电流参考方向，或只标明电压的参考方向。如图 1-2-4 (c)、(d) 所示。若无特殊说明，本书今后均采用电流电压的关联参考方向。

四、电功率

单位时间内电场力做功的大小称为电功率，电功率是描述电路中能量变化速率的物理量，称为瞬时功率，简称功率，用符号 p 表示。功率的数学表达式可写为

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-2-4)$$

功率的单位为瓦 (W)。

在电路中，人们更关注的是功率与电流、电压之间的关系。由式(1-2-1)和式(1-2-2)可知。

$$p = u \cdot i \quad (1-2-5)$$

在直流电路中，功率是恒定不变的，用大写字母 $P = UI$ 表示。在电压和电流关联参考方向下，计算出 $P > 0$ 时，元件吸收电能，吸收功率或称消耗功率； $P < 0$ 时，元件实际上是释放电能，产生功率或称供出功率。

当电压和电流为非关联参考方向时，如图 1-2-5 所示，则其公式为

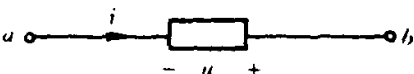
$$p = -u \cdot i \quad (1-2-6)$$


图 1-2-5 非关联参考方向

提醒注意的是，一定要根据电压、电流参考方向是否关联，再运用相应的计算功率的公式。但无论是式(1-2-5)还是式(1-2-6)只需将 i 和 u 本身的数值直接代入即可。因为 u 和 i 本

身也是有方向的也有正负值之分。因此，算出功率为正，均表示吸收了功率。若算出功率为负，均表示供出了功率。需要说明的是以上有关功率的讨论同样适用于任何一段电路，而不局限于某一个元件。

例 1-2-1 试计算图 1-2-6 所示各元件的功率。已知：图 1-2-6 (a) 中 $i = 2\text{A}$, $u = 5\text{V}$ ；图 1-2-6 (b) 中 $i = 2\text{A}$, $u = 5\text{V}$ 。

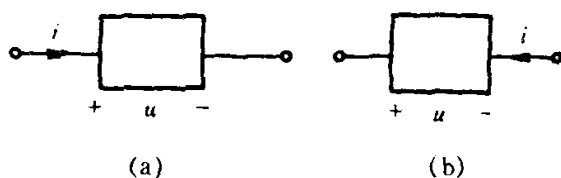


图 1-2-6 例 1-2-1 图

解 (a) 因为电流和电压为关联参考方向，故应用式 (1-2-5)，得

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

说明对于图 1-2-6 (a)，该元件此时吸收功率 10 W

(b) 因为电流和电压为非关联参考方向，故应用式 (1-2-6)，得

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

说明对应于图 1-2-6 (b)，该元件此时吸收功率 -10 W；实际上向外供出功率 10 W。

例 1-2-2 在图 1-2-7 中，方块分别代表电源或负载元件 参考方向如图所示。已知 $i = 1\text{A}$, $u_1 = 3\text{V}$, $u_2 = 7\text{V}$, $u_3 = 10\text{V}$ 。试计算各元件的功率，并说明各方块所代表的是电源还是负载？

解

$$P_1 = u_1 i = 3 \times 1 = 3 \text{ W}$$

$$P_2 = u_2 i = 7 \times 1 = 7 \text{ W}$$

$$P_3 = -u_3 i = -10 \times 1 = -10 \text{ W}$$

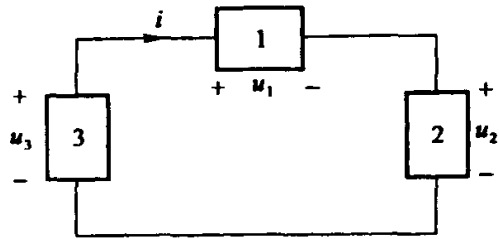


图 1-2-7 例 1-2-2 图

从以上功率的计算可看出： P_1 、 P_2 为正值，说明方块 1、方块 2 是吸收功率的即消耗功率，为负载，而 P_3 是负值，说明方块 3 是供出功率的，为电源。

由此例可以看出： $P_1 + P_2 + P_3 = 0$ 。对一完整的电路来说，它吸收的功率和供出的功率是相等的，称为功率平衡。这是能量守恒原理的具体体现。在电路分析中常利用功率平衡来检验计算结果是否正确。

思考与练习题

1-2-1 简述电路中设电压、电流参考方向的意义。参考方向与实际方向有什么关系？

1-2-2 求图 1-2-8 中所示各元件吸收的功率。

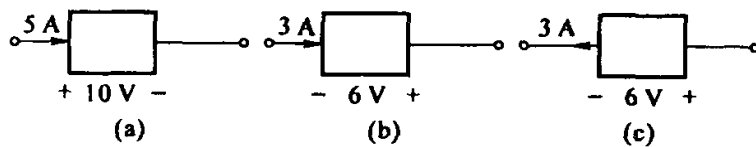


图 1-2-8 练习题 1-2-2 图

1-2-3 试用 u 、 i 分别写出图 1-2-9 中 A、B 两部分电路吸收功率的表达式。

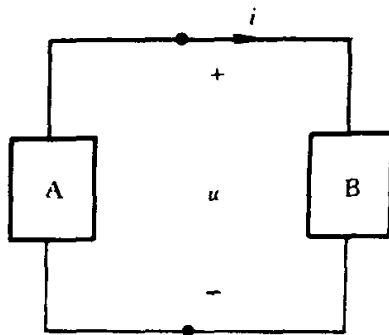


图 1-2-9 练习题 1-2-3 图

第三节 电阻元件及欧姆定律

集总参数电路由电路元件连接组成。电路元件是为了建立实际电器器件的模型而提出的一种理想元件。本节先介绍一种常用的电阻元件及电路分析中重要的定律之一：欧姆定律。

一、电阻元件

电阻元件是一种对电流呈现阻力的元件，有阻碍电流流动的本性，电流要流过电阻就必然要消耗能量。因此电阻元件是消耗电能的元件，简称耗能元件。

电阻中有电流流过，必然会产生电压降。如果电阻值不随它上面的电压或电流的数值变化而变化，称线性电阻。阻值不随时间变化的线性电阻，称为线性时不变电阻。一般实际中使用的电阻，都可近似看成这类电阻。因此本书中也只讨论线性时不变电阻。

元件上任意时刻的电压 u 和其电流 i 的关系，可以由 $u-i$ 平面上一条曲线确定。我们称之为伏安特性曲线。电阻元件上的

伏安特性曲线是过 $u - i$ 平面原点的一条直线，如图 1-3-1 所示。电阻符号如图 1-3-2。

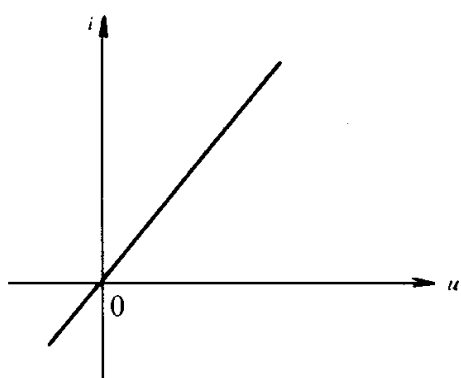


图 1-3-1 伏安特性

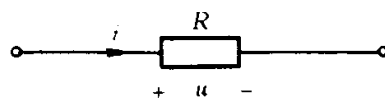


图 1-3-2 电阻符号

线性时不变电阻的电压与电流间的关系由欧姆定律描述。在关联参考方向下其数学表达式为

$$u = Ri \quad (1-3-1)$$

式 (1-3-1) 中， R 称为电阻，单位欧姆 (Ω)，简称欧，为一正常数。当电流电压的参考方向为非关联时，如图 1-3-3，则欧姆定律数学表达式为

$$u = - Ri \quad (1-3-2)$$

或

$$R = - \frac{u}{i}$$

负号只说明非关联方向

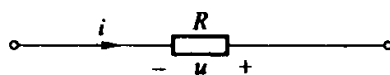


图 1-3-3 电流电压参考方向为非关联

电阻的伏安特性也可写成

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

式 (1-3-3) 中， G 称为电导，其单位为西门子 (S)。电导与电阻互为倒数。

$$G = \frac{i}{u} = \frac{1}{R} \quad (1-3-4)$$

从物理概念上看，电导是反映材料导电能力强弱的参数。式(1-3-4)也说明电阻和电导是从相反的两个方面来表征同一材料特性的两个参数。

在直流电路中，可将上述公式中的电压电流的符号改为大写的 U 、 I 。

由式(1-3-1)可知任何时刻线性电阻元件的电压（或电流）完全由同一时刻的电流（或电压）所决定，而与该时刻以前的电流（或电压）的各种值无关。从这个意义上讲，电阻元件只是一种“无记忆”的元件。

二、电阻上的功率和能量

在电压和电流为关联方向时，任何时刻线性电阻元件吸收的电功率

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2 \quad (1-3-5)$$

式(1-3-5)中， R 、 G 是正实常数， u^2 、 i^2 总为正，故功率 p 恒为正值。这说明任何时刻电阻元件只能是吸收能量而消耗掉电能，因此电阻是一个纯耗能元件。这与本节开头给出的电阻定义是相符的。

电阻上吸收的能量与时间区间有关系。如果线性电阻吸收的电能全部转变为热能，那么从时刻 t_0 到 t 产生的热能为

$$w = \int_{t_0}^t p d\tau \quad (1-3-6)$$

即线性电阻从时刻 t_0 到 t 产生的热能在数值上等于它从时刻 t_0 到 t 所消耗的电能。 w 的单位为焦耳(J)，简称焦。式(1-3-6)中，为避免积分上限 t 与积分变量相混淆，将积分变量换为

τ 。将式 (1-3-5) 代入式 (1-3-6) 得

$$w = \int_{t_0}^t u i d\tau = \int_{t_0}^t R i^2 d\tau = \int_{t_0}^t G u^2 d\tau \quad (1-3-7)$$

由于电阻上吸收的功率对任意时间都是非负的，从式 (1-3-7) 不难看出电阻吸收的能量也一定是非负的。因此通常把电阻吸收的电能说成电阻消耗的电。

三、电器设备的额定值

电流流过电阻必然消耗电能而发热，这样我们能够利用电来发热发光，制成各种元件和电器设备。如果在使用时电流过大，温度过高，设备会被烧坏。为了保障电器设备能正常工作，对各种电器设备消耗的功率、外加电压和外加电流的数值都有一定的限额，称为额定功率、额定电压和额定电流。制造厂家在电器的名牌上都要标明它们的额定值，这是使设备安全工作所允许的最大值。根据电压、电流和功率间的关系，所有的额定值不一定全部标出。例如，灯泡通常只给出额定电压和额定功率。而电阻元件则只标明电阻值和额定功率。一些灯泡上标明 220 V，40 W，其含义是：这只灯泡接 220 V 电压，消耗功率为 40 W；如果所接电压高于 220 V，灯泡消耗功率大于 40 W，就有可能将灯泡烧坏；如果所接电压低于 220 V，灯泡消耗功率小于 40 W，使用不正常。

例 1-3-1 有一个 100 Ω ，1 W 的碳膜电阻，在使用时，它所承受的最大电压和允许流过的最大电流是多少？如果把 20 V 的电压加在电阻上，能正常工作吗？

解 由 $P = RI^2$ 得 $I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{1}{100}} = \frac{1}{10} \text{ A} = 100 \text{ mA}$

$$U = RI = 100 \times 100 \times 10^{-3} = 10 \text{ V}$$

故在使用时电流不得超过 100 mA，电压不得超过 10 V。若把 20 V 电压加到电阻上，此时的功率

$$P' = \frac{U^2}{R} = \frac{20^2}{100} = 4 \text{ W}$$

因 $P' = 4 \text{ W}$ 超过额定功率 1 W，电阻将被烧坏，无法正常工作。

四、线性电阻与非线性电阻

线性电阻的伏安特性是一条经过坐标原点的直线，如图 1-3-1 所示。电阻值可由直线的斜率来确定，是一个常数。

如果伏安特性是一条过坐标原点的曲线，则称为非线性电阻。例如半导体二极管就是一个非线性电阻元件。它的符号如图 1-3-4 (a)，伏安特性曲线如图 1-3-4 (b) 所示。

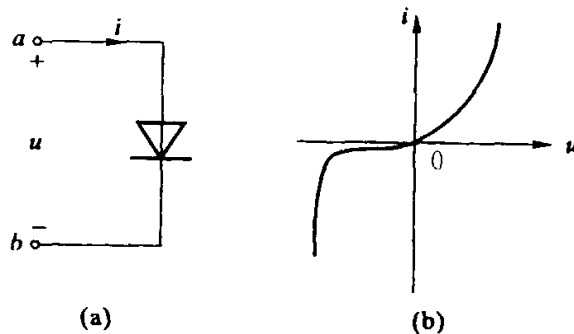


图 1-3-4 非线性电阻

非线性电阻的阻值不是常量，而是随着电压或电流的大小、方向而改变。但就每一时刻而言仍满足欧姆定律。值得提出的是，有些非线性电阻元件的伏安特性还与电压或电流的方向有关。也就是说，当元件两端施加的电压的方向不同时，流过它的电流完全不同。而线性电阻元件的特性则与元件电压或电流的方向无关，因此线性电阻又称双方向性元件。

思考与练习题

1-3-1 一个 $40\text{ k}\Omega$, 10 W 的电阻, 使用时允许流过的最大电流是多少?

1-3-2 有一个手电筒的灯泡, 当两端电压为 3 V 时, 电流为 $300\text{ }\mu\text{A}$, 问灯泡的电阻多大? 灯泡的瓦数是多少?

1-3-3 求图 1-3-5 所示电路中的 u 或 R 。

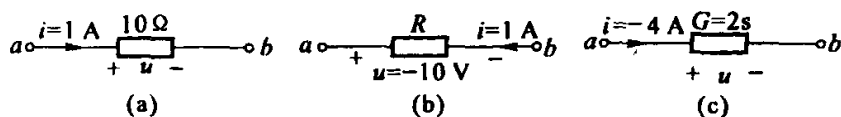


图 1-3-5 练习题 1-3-3 图

第四节 电容元件

一、电容元件

电容器的应用极为广泛。虽然电容器的品种和规格不少, 但它的构成原理却并不复杂。两块金属板中间放入介质就构成简单的电容器。加上电源后, 两块极板上分别聚集起数量相等, 但符号相反的电荷, 在极板周围就形成了电场, 并储存有电场能量。电源移去后电荷可以继续聚集在极板上, 电场继续存在, 因此可以说电容器是一种能够储存电场能量的器件。在理想情况下, 不考虑电容器的热效应和磁场效应, 忽略介质的损耗和漏电流, 就可以将电容元件看成是实际电容器的理想化模型。

其定义如下: 如果一个二端元件在任意时刻 t , 其电荷 q 与电压 u 之间关系可由 $u - q$ 平面上一条曲线所确定, 则称此二端

元件为电容元件。电容元件的符号及特性曲线如图 1-4-1 所示。

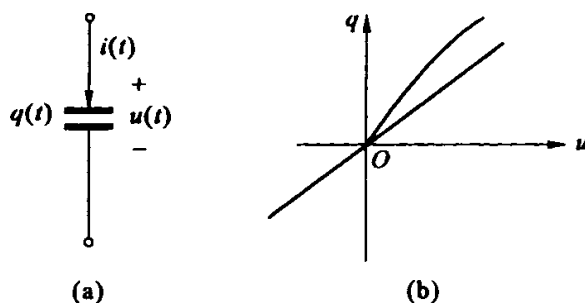


图 1-4-1 电容元件的符号及特性曲线

如果电容元件的特性曲线是一条在 $u - q$ 平面上经过坐标原点的一条直线，则称为线性电容元件；否则称为非线性电容元件。如果特性曲线不随时间变化，则称为时不变电容元件；否则，称为时变电容元件。本书中讨论线性时不变电容元件。

一个理想的线性电容元件，在任意时刻极板上聚集的电量取决于同一瞬间电容元件两端的电压。若规定电容元件上的电压参考方向由聚集正电荷的极板指向负电荷的极板（正极板指向负极板），则任何时刻线性电容上的电荷量与其两端电压的关系如下

$$q = Cu \quad (1-4-1)$$

式 (1-4-1) 中， C 称为该元件的电容量，简称电容。用于表征电容元件储存电荷的能力。习惯上也常把电容元件简称为电容。所以电容这一名词具有二重含义它既指电容元件，又指它的参数值。

在国际单位制中，电容的单位为法拉 (F)，简称法。实际上，电容器的电容往往比 1F 要小的多，因此通常采用微法 (μF) 和皮法 (pF) 为单位。它们的换算关系为

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

$$1 \text{ pF} = 10^{-6} \mu\text{F} = 10^{-12} \text{ F}$$

实际上一个电容器，除标明其电容量外，还需标明其额定工