

电路理论·上册

电路基础理论

(修订本)

杨山 主编

天津大学出版社



电路理论·上册

电路基础理论

(修订本)

杨山 主编

天津大学出版社

(津)新登字 012 号

电路理论·上册

电路基础理论
(修订本)

杨 山 主编

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省永清县第一胶印印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 22 字数: 549 千字

1993 年 9 月第二版 1993 年 9 月第一次印刷

印数: 1-6000

ISBN 7-5618-0036-3

TM.3

定价: 13.50 元

修订本前言

自本书初版 1988 年问世以来，五年过去了，随着教学改革的不深入，对电路课程的教学提出了更高的要求，这期间，教师的教学经验更加丰富，学生的学习能力也有所提高。教材应该适应变化了的新情况。

修订本包括了国家教委电工教学指导委员会制定的“高等工业学校电路课程基本要求”的全部内容，结合我校具体情况，作了适当的补充和修订。

修订本（上册）基本保留了第一版的章节名称，但大部分内容都重新组织过。考虑到国内目前教学情况，有些章节的内容，作了较大的调整，起点有所提高。在顺序上，将初版第五章“一阶和二阶动态电路”移作第八章，更名为“线性电路动态过程的时域分析”，原第六、七、八章相应提前，即采取了先稳态后暂态的顺序。修订本补充了一些有启发性、有一定难度的习题，并附有习题答案。

书中引用的名词，凡“基本要求”中有的，均已按“基本要求”作了修改，所有插图的图形符号均按 GB4728 规定的标准绘制。

天津大学电工原理教研室使用过初版书的同志们讨论了教材的使用情况和存在问题。修订时采纳了他们的宝贵意见。所有初版的编者都参加了本书（上册）的修订工作。修订本的初稿由杨山（第一章至第五章）和刘美轮（第六章至第十章）二同志执笔，集体讨论后修改定稿。刘建猷、张荣华、钱巨玺、李文中、周树棠、张大钧各同志分工做了习题答案并绘制了全部插图。

错误和不妥之处，欢迎批评指正。

编者
1993 年 4 月

第一版前言

本书为天津大学本科电类专业《电路基础理论》和《网路理论导论》课程的教材。自1982年以来，我们已将原有“电路”课程的理论部分改革成上述两门课程。

全书分上、下两册。上册包括：电路和电路定律；线性电路的系统解法；电路的基本定理；含受控源与运算放大器电路；一阶和二阶电路；正弦交流电路；三相电路；非正弦周期电流电路；用拉氏变换解电路的过渡过程和非线性电路等十章。是本着提高起点，加强基础，适当更新和便于教学的原则编写的。对于电类专业的本科生，在学完高等数学和物理的电学部分后，可尽早开设“电路基础理论”课程。目前天津大学有关专业均在第三学期内学完该课程。授课时数80学时左右。

下册共九章。包括网络图论和网络方程；二端口网络；状态变量法；网络函数和固有频率；网络综合；信号频谱；离散时间电路；均匀传输线的正弦稳态和均匀传输线的暂态。特点是内容广泛，理论性强，各章独立和使用方便。用此册书所开设的相应课程适宜设置在较高年级。在学生有了必要的工程数学和初步专业知识后，再进一步学习本册书所包括的有关电路理论各领域中更加深入和广泛的内容。实践证明，这样安排收到了较好的效果。此外，对于不同专业，使用本册书时可以有所侧重或取舍，也可以作为选修课教材。目前天津大学一般安排在第五或第六学期，授课时数为60学时左右。本册书还可作继续教育的教材或自学用书，也可供有关工程技术人员参考。

参加全书编写工作的有杨山、刘美轮、刘建猷、张荣华、钱巨玺、李文中和周树棠七同志，杨山同志主编定稿。天津大学电工原理教研室的许多同志参加了本书的讨论和试用，提供了不少素材和修改意见，为本书的出版做了大量的工作。

本书原稿先后承蒙天津大学李修恕老师和河北工学院李望超、唐孝磁老师在百忙中进行了仔细的审阅，提出了不少极为宝贵的修改意见，在此谨表谢忱。

本书的错误和不足之处恳切希望读者批评指正。

编 者

1988年4月

内 容 提 要

本书是天津大学电工原理教研室在总结电路理论课程改革经验的基础上编写的。上、下册分别为《电路基础理论》和《网络理论导论》。

上册经过修订，包括：电路的基本规律；电阻电路分析；电路的基本定理；含受控源与运算放大器的电路；正弦电流电路的稳态分析；三相电路；非正弦周期电流电路；线性电路动态过程的时域分析；线性电路动态过程的复频域分析；非线性电路。下册共九章，内容是：网络图论和网络方程；二端口网络；状态变量法；网络函数和固有频率；网络综合；信号频谱；离散时间电路；均匀传输线的正弦稳态和均匀传输线的暂态。各章均配有例题和习题。书末附习题答案和参考书目。

本书可作为大学本科电类专业电路理论课程教材，上、下册可单独设课，亦可作为工程技术人员继续教育的教材或参考书。

目 录

第一章 电路的基本规律	(1)
§ 1-1 电路和电路元件	(1)
§ 1-2 元件中的电流、电压和功率	(2)
§ 1-3 无源二端元件	(8)
§ 1-4 有源二端元件	(16)
§ 1-5 基尔霍夫定律	(19)
§ 1-6 无源电路的等效变换	(24)
§ 1-7 含独立源电路的等效变换	(32)
习题	(38)
第二章 电阻电路分析	(42)
§ 2-1 电路的图和电路方程	(42)
§ 2-2 支路分析法	(47)
§ 2-3 回路分析法	(51)
§ 2-4 节点分析法	(57)
习题	(64)
第三章 电路的基本定理	(69)
§ 3-1 叠加定理	(69)
§ 3-2 替代定理	(75)
§ 3-3 互易定理	(76)
§ 3-4 戴维南定理和诺顿定理	(80)
§ 3-5 对偶原理	(87)
§ 3-6 功率守恒定理	(88)
习题	(89)
第四章 含受控源与运算放大器的电路	(93)
§ 4-1 理想受控电源	(93)
§ 4-2 含受控源电路的一般解法	(97)
§ 4-3 电路方程解的存在与唯一性	(104)
§ 4-4 线性电路定理的应用	(107)
§ 4-5 运算放大器及其电路模型	(111)
§ 4-6 含理想运算放大器的电路分析	(113)
习题	(117)
第五章 正弦电流电路的稳态分析	(121)
§ 5-1 正弦交流电的基本概念	(121)
§ 5-2 电阻、电容及电感中的正弦电流	(125)

§ 5-3	正弦量的相量表示法	(132)
§ 5-4	复阻抗、复导纳及其等效转换	(137)
§ 5-5	正弦稳态电路的分析计算	(143)
§ 5-6	正弦稳态电路的功率	(149)
§ 5-7	谐振电路	(155)
§ 5-8	含互感的电路	(162)
§ 5-9	理想变压器	(171)
	习题	(174)
第六章	三相电路	(180)
§ 6-1	三相电源和三相电路	(180)
§ 6-2	对称三相电路	(183)
§ 6-3	三相电路的功率	(186)
§ 6-4	对称三相电路的计算	(188)
§ 6-5	不对称三相电路的计算	(194)
	习题	(197)
第七章	非正弦周期电流电路	(199)
§ 7-1	非正弦周期电流	(199)
§ 7-2	有效值、平均值和平均功率	(204)
§ 7-3	非正弦周期电流电路的计算	(207)
§ 7-4	滤波和滤波器	(211)
§ 7-5	对称三相电路中的高次谐波	(213)
	习题	(217)
第八章	线性电路动态过程的时域分析	(220)
§ 8-1	线性电路动态过程的经典解法	(220)
§ 8-2	一阶电路的零输入响应	(224)
§ 8-3	一阶电路在直流激励下的零状态响应	(229)
§ 8-4	一阶电路的全响应	(231)
§ 8-5	一阶电路在正弦激励下的响应	(240)
§ 8-6	二阶电路的动态过程	(246)
§ 8-7	几种典型波形和电路的单位冲激响应	(255)
§ 8-8	线性电路对任意波形激励的响应	(261)
§ 8-9	用经典法求解一般线性电路的动态过程	(264)
	习题	(268)
第九章	线性电路动态过程的复频域分析	(272)
§ 9-1	拉普拉斯变换	(272)
§ 9-2	拉普拉斯变换的基本性质	(274)
§ 9-3	用部分分式展开法求原函数	(281)
§ 9-4	复频域形式的电路定律和电路图	(287)
§ 9-5	用复频域分析法解电路的动态过程	(293)

习题	(300)
第十章 非线性电路	(303)
§ 10-1 非线性电阻	(303)
§ 10-2 非线性电阻电路的图解法	(305)
§ 10-3 非线性电阻伏安特性的分段线性化	(310)
§ 10-4 非线性电阻电路的数值解法	(320)
§ 10-5 非线性电阻电路的小信号分析法	(324)
§ 10-6 其它非线性元件	(328)
习题	(330)
习题答案	(333)
参考书目	(341)

第一章 电路的基本规律

电路理论所研究的电路并非实际的电路。与所有其他科学分支的研究方法一样，为了描述实际电路中的复杂物理过程，常将其简化为理想的模型。

本章介绍几种基本的理想电路元件，它们由组成实际电路的器件抽象而来，各自对应一种电磁现象。由这些电路元件联结成的电路模型才是电路理论研究的对象。

将各种元件联结在一起，各元件间的电流、电压会受到制约，反映联结约束关系的是基尔霍夫定律，它包括电流定律和电压定律。

本章还将介绍电路理论中极为重要的“等效”概念，并用以解决一些简单的电路分析问题。

§ 1-1 电路和电路元件

规模最大的实际电路是电力系统。系统中的发电机将热能或水位能或原子能转换成电能，产生电能的设备称为电源。经过输电线路将电能传送给用电设备，再把电能转换为机械能、热能、光能等，使用电能的设备称为负载。这种电路的功能就是电能的转换和传输。

在电视机、收音机等设备中，常需把输入信号加以变换和加工，以得到所需的输出信号。这就要使用放大、选频、滤波等各种电路，这些电路的功能是信号处理。

在计算机、生产过程自动控制等方面，为了满足各种不同的需要，有各种功能的实际电路。

所有实际电路都是由人造装置（称为电气器件或部件）按一定方式连接起来，以形成电流通路的。电气器件种类繁多，各种器件所涉及的物理过程很广泛。图 1-1 (a) 为一实际电路的示意图。即使在这样简单的电路中，也要进行电能的传送和电能与化学能、热能、光能的转换。

电路理论不研究各种能量相互转换的机理，只关心电路中的电磁过程。即电压、电流、电荷和磁通所表征的过程。这 4 个物理量是电路的基本变量。在集总的条件下，电气器件的性能可用它们外接端钮处基本变量之间的关系描述，如电压与电流的代数方程或微分方程等。所谓集总条件就是：假设电气器件的几何尺寸远小于电路工作时的电磁波的波长，可以认为传送到器件各处的电磁能量是同时到达的。在此条件下，任意时间流入器件任一端子的电流和任两个端子间的电压都是单值的。而且流进的电流与流出的电流相等。

实际电气器件的性能方程常很复杂。为了简化对器件性能的描述，常略去其次要的物理过程，把它理想化。理想化的性能方程在一定条件下能正确反映实际器件的基本物理现象。理想化器件的抽象模型叫做电路元件。

电路元件是单个部件。每一元件只反映一种电磁现象，用一种特定的函数来表示。电路元件由实际器件抽象而来，然而并非与实际器件一一对应。尽管实际电气器件有成千上

万种，电路元件却只有少数几种。任何实际电气器件的电气特性都可用一个或几个元件的组合来表示，其组合的复杂程度视精确度的要求而定。

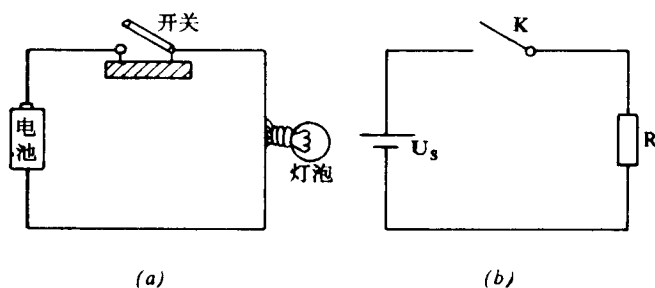


图 1-1 实际电路及其模型

电路变量有电压 (u)、电流 (i)、电荷 (q) 和磁链 (ψ)。表示电路元件端子两变量之间关系的数学表达式叫做元件的约束方程，例如： $f(u, i, t) = 0$ 、 $u = f(i, t)$ 、 $u = Ri$ 、 $q = Cu$ 等。由于约束方程之不同，所以定义了不同种类的元件。如果在任一确定时刻，两变量之间的关系可用通过坐标原点的直线表示，称为线性元件。两变量之间相互联系的系数叫做元件的参数。参数值不随时间变化的叫做非时变元件，不满足线性或非时变条件的元件叫做非线性元件或时变元件，其参数为端子变量或时间的函数。

由若干个电路元件连接而成的理想化电路可作为实际电路的模型，简称为电路。由于电路元件是满足集总条件的，故称此种电路为集总电路，或具有集总参数的电路。将电路元件用图形符号表示，便可画出理论分析用的电路图。图 1-1 (b) 是一简单示例。

如果实际电路或电气器件不满足集总条件，其中的电压、电流将不仅与时间有关，而且还与空间坐标有关，也就是说它们将是时空函数。描述这种器件或电路的约束方程将是偏微分方程。常用空间分布的无限多个电路元件的连接来模拟这种电路或器件，称为分布电路或具有分布参数的电路。

一个电路是否是线性的、时变的或集总参数的，由电路的激励（输入）与响应（输出）之间的关系来决定。但在一般情况，可以简单地以电路所含有的元件的性质来确定。只含线性元件的电路为线性电路，含有一个以上的非线性（或时变的）元件的电路为非线性（或时变的）电路。

严格地说，实际电路都是非线性、分布参数的。但在多数情况下，用集总的线性元件来模拟，可以达到工程所需的准确度。

电路理论的内容主要有二：一是在电路元件的约束方程和元件间连接方式已知时，研究该电路对激励所产生的响应——电路分析；二是研究如何构成电路，使其满足响应与激励之间预定关系的要求——电路综合。

§ 1-2 元件中的电流、电压和功率

1. 元件中的电流和电压

电路元件按其外接端钮的数目，可分为二端元件、三端元件、多端元件等。图 1-2 之方框图为任意一个二端元件。端子 1、2 与电路中其他元件相连接。端子电流和端子间电压分别用 i 和 u 表示，它们的计量单位分别是安（培）A 和伏（特）V。

对集总二端元件，在任何时刻，从一个端子流进的电流等于从另一个端子流出的电流。所以，通常只标出一个端子的电流。箭头所指方向为电流的正方向，或称为参考方向。

电流 i （电流强度）等于单位时间（秒）内穿过端子 1 处导线横截面的电荷，即

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

电荷 q 是沿所指方向穿过导线截面的正电荷 q_+ 与反方向穿过截面的负电荷 q_- 的绝对值之和。电荷的计算单位是库（仑）C。

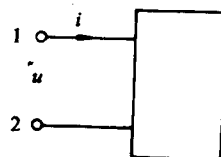


图 1-2 二端元件

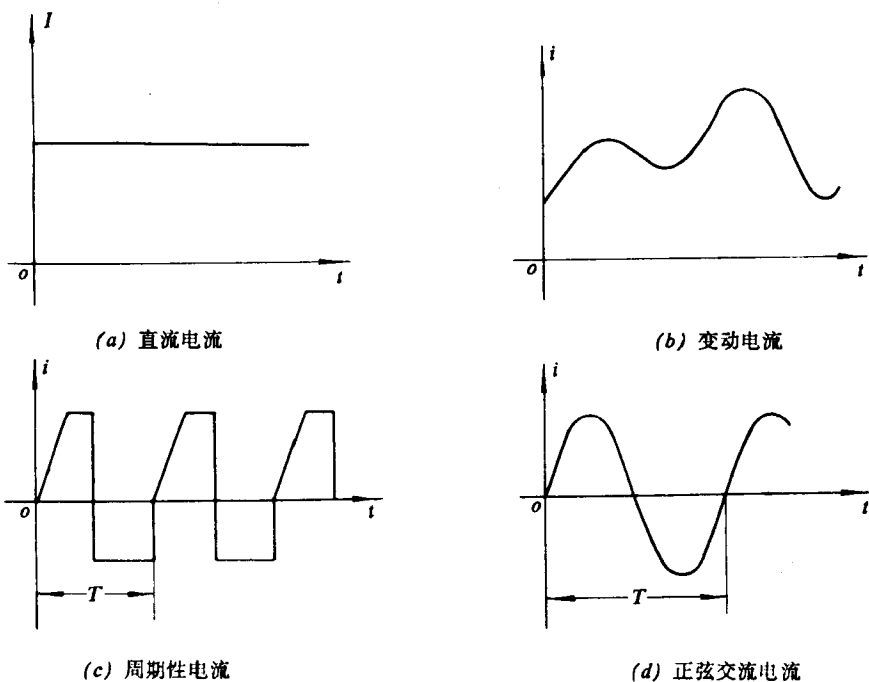


图 1-3 几种典型电流波形

电流 i 通常是时间的函数 $i = i(t)$ 。图 1-3 中给出了几种电流的典型波形，在某指定的时刻，电流的值可以为正、负或等于零。在指定正方向情况下，若 $i > 0$ ，就意味着电流的实际方向与正方向一致；若 $i < 0$ ，表明电流的实际方向与正方向相反。

以后我们将用 $i(t)$ 或 i 表示随时间变化的电流，用 I 表示恒定电流，对某一确定时间 t_0 的电流 $i(t_0)$ ，用 i 等于常量表示。其他的量，如电荷、电压等，依此类推。

电压等于单位正电荷被从 1 处移到 2 处时电场力所作之功，即

$$u = u_{12} = \frac{dW}{dq} \quad (1-2)$$

式中，功的单位是焦（耳）J，电荷的单位是库，电压的单位是伏。

空间一点到选定的参考点之间的电压定义为该点的电位。参考点的电位为零。若以 u_1 （或 u_{10} ）和 u_2 （或 u_{20} ）分别表示端子 1、2 对选定参考点而言的电位，则有

$$u_{12} = u_1 - u_2 \quad (1-3)$$

对集总元件，它们都是确定的值。

电压 u 通常也是时间的函数 $u = u(t)$ 。图中箭头所指方向是正方向，是从高电位指向低电位的。在某一瞬时，若 $u > 0$ ，则意味着端子 1 的电位 u_1 高于端子 2 的电位 u_2 ；若 $u < 0$ ，则 u_1 低于 u_2 。

做电路分析时，电路中各元件的电流和电压都必须指定正方向。这样从它们的解析表达式 $i(t)$ 和 $u(t)$ 中计算出的正、负值才有确切的含义。描述元件（以及整个电路）电压与电流之间关系的任何方程，也只对选定的正方向才有意义。对欲分析的电路，事先不能判断各元件电压和电流的真实方向；而交替变化的电压和电流，真实方向是随时间变化的。在分析问题时，可任意选定正方向，并据所选方向列写表达式及关系方程，由计算结果的正、负再来确定在某瞬时的真实方向。

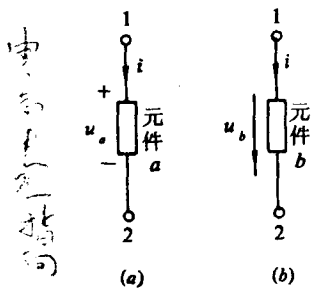


图 1-4 电压的极性表示

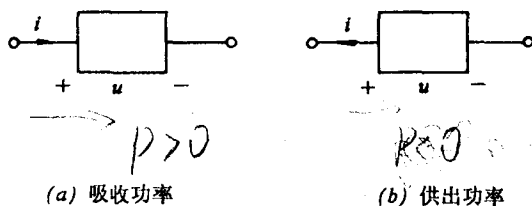


图 1-5 元件的功率

电流的正方向也可不用箭头而用“双下标”方法表示，如 i_{12} 表示电流是从 1 端经元件流向 2 端。电压的正方向也可用 (+)、(-) 极性符号表示，如图 1-4。这里的单下标 a 、 b 是表示元件 a 、 b 的电压，不是 a 、 b 点的电位。电压的正方向是从 (+) 极指向 (-) 极，显然有

$$i_{12} = -i_{21}, \quad u_{12} = -u_{21} \quad (1-4)$$

在一个元件或一段电路中，电流与电压的正方向可以各自独立设定。但如指定电流从标以电压 (+) 极性一端流入，而从标以 (-) 极性的一端流出，即电流是从高电位端流向低电位端，则称为电流正方向与电压正方向是一致的。两正方向相互关联，称为关联参考方向。在此规定下，为了简化，常把电压（或电流）的正方向箭头省去，只画出电流（或电压）的正方向。

2. 元件中的功率

正电荷从电路元件的电压 (+) 极，经元件移到电压的 (-) 极，是从高电位点移向

低电位点，是电场力对电荷做功的结果，这时元件吸收能量，或者说元件消耗了电能。相反地，如果正电荷从电路元件的（-）极移到（+）极，则必须由外力（化学力、电磁力等）对电荷作用以克服电场力，这时元件发出能量，或者说，元件供出了电能。

若某元件两端的电压为 u ，在 dt 时间内从（+）极到（-）极流过该元件的电荷量为 dq ，那末，根据式（1-2）和式（1-1）电场力作的功为

$$dW(t) = u(t)dq(t) = u(t)i(t)dt \quad (1-5)$$

能量对时间的导数是功率，于是该元件吸收的电功率为

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt} = u(t)i(t) \quad (1-6)$$

功率的计量单位是瓦（特）W。

应注意，式（1-6）是在电流正方向与电压正方向一致的情况下推得的，参看图（1-5（a））。若在某时， $p > 0$ ，表示元件吸收功率；如果 $p < 0$ ，表示元件吸收的功率为负值，实际上它在发出功率。当电流与电压的正方向不一致时，如图（1-5（b））所示。则用 $p = ui$ 计算得出功率是表示元件发出的功率， $p > 0$ ，是真正发出功率， $p < 0$ ，则它实际是吸收功率。

若设 t_0 时元件所具有能量为 $W(t_0)$ ，在 t 时元件所具有能量为 $W(t)$ ，则在 $[t_0, t]$ 时间间隔内输送给元件的能量为

$$\Delta W = W(t) - W(t_0) = \int_{t_0}^t u(\tau)i(\tau)d\tau \quad (1-7)$$

若选 $t_0 = -\infty$ ，且假定 $W(-\infty) = 0$ ，则

$$W(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau)i(\tau)d\tau \quad (1-8)$$

它是直到时刻 t 为止，元件所吸收的能量。

如果对任一时刻 t 下式都成立

$$W(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau)i(\tau)d\tau \geq 0 \quad (1-9)$$

就是说，到任意瞬时 t 为止，送入元件的能量总为非负值，该二端元件是能量的需求者。这类元件称为无源元件。

设一个元件的初始电压和初始电流为零，然后随时间按任意规律增长，最后又都衰减到零。如果在此整个过程中送入元件的总能量为零，则这种元件称为无损元件。用公式表示则为

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau)i(\tau)d\tau = 0 \quad (1-10)$$

这里假定 $u(-\infty) = u(\infty) = i(-\infty) = i(\infty) = 0$ 。

以上关于有损和无损及有源和无源的定义和结论，都是从二端元件得出的，但不难推广应用到多端元件中去。

例题一 图 1-6 所示电路。已知元件电压 $U_1 = -20V$ ， $U_3 = 10V$ ， $U_4 = 15V$ 。试求 a 、 b 、 c 各点的电位（以 d 点为参考点）及第 2、5、6 元件的电压。

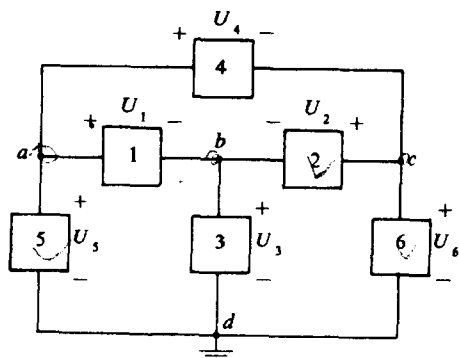


图 1-6 电压和电位

解: d 为参考点, 其电位为零。其他各点的电位为该点到 d 点间的电压, 即单位正电荷从该点移到 d 点, 电场力所作之功, 故有

$$U_b = U_{bd} = U_3 = 10\text{V}$$

$$U_a = U_{ad} = U_{ab} + U_{bd} = U_1 + U_3 = -20 + 10 = -10\text{V}$$

$$U_c = U_{cd} = U_{ca} + U_{ab} + U_{bd} = -U_4 + U_1 + U_3 = -15 - 20 + 10 = -25\text{V}.$$

式中 $U_{ca} = -U_4$ 是因为两者的极性相反, 待求各元件的电压为

$$U_6 = U_c = -25\text{V}$$

$$U_5 = U_a = -10\text{V}$$

$$U_2 = U_c - U_b = -25 - 10 = -35\text{V}.$$

例题二 计算图 1-7 中各元件的功率。设图 (a) 中, (i) $I = 1\text{A}$, $U = 2\text{V}$; (ii) $I = 1\text{A}$, $U = -2\text{V}$; 图 (b) 中, (i) $I = -2\text{A}$, $U = 3\text{V}$; (ii) $I = -2\text{A}$, $U = -3\text{V}$ 。

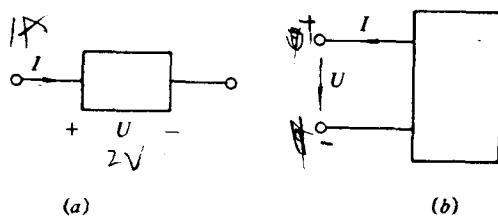


图 1-7 功率的计算

解: 在图 1-7 (a) 中, 电压与电流的正方向是一致的。正电荷从高电位点移向低电位点。所以 U 与 I 的乘积表示该元件吸收的电功率, 在情况 (i) 时, 元件吸收功率为

$$P = UI = 2 \times 1 = 2\text{W}$$

在情况 (ii) 时, 元件吸收功率为

$$P = UI = (-2) \times 1 = -2\text{W}$$

计算结果为负值，表明该元件实际向外供出 2 瓦功率。

在图 1-7 (b) 中，电压与电流正方向相反，正电荷是从低电位点经过元件到高点位的。所以 U 与 I 的乘积为该元件所供出的电功率。在情况 (i)，元件供出功率为

$$P = UI = 3 \times (-2) = -6W$$

元件供出的功率为负值，表明它实际是在吸收功率

在情况 (ii)，元件供出功率为

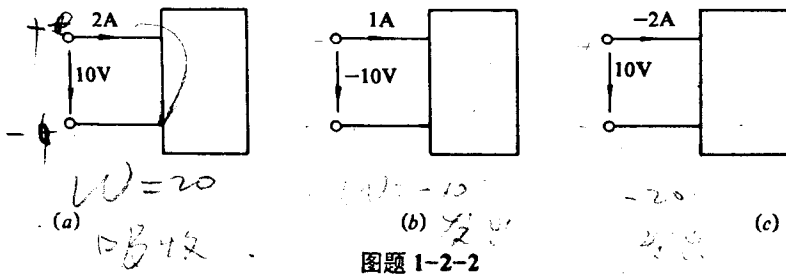
$$P = UI = (-3) \times (-2) = 6W$$

结果为正值，表明该元件是供出功率。

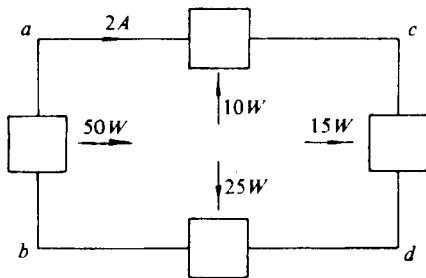
练习题

1-2-1 图 1-6 所示电路，已知元件电压 $U_1 = -20V$ ， $U_3 = 10V$ ， $U_4 = 15V$ 。若选 c 点为参考点，求其他各点电位及其他元件电压，并与例题一的结果相比较。

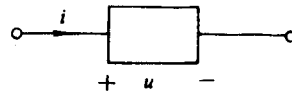
1-2-2 图中所示二端元件，哪个吸收功率？哪个供出功率？其值各为多少？



图题 1-2-2



图题 1-2-3



图题 1-2-4

1-2-3 图示电路中，已知 ab 段元件产生电功率 50W，其它三段元件吸收电功率分别为 10W、15W 和 25W。试计算各段电压 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{cd} 和 U_{da} 。

1-2-4 已知通过某元件的电流及其两端电压为

$$i = 5\sin(2\pi t - \frac{\pi}{2})A$$

$$u = 10\sin(2\pi t)\text{V}$$

参考方向如图所示。试求当 $t = 1/8$ 、 $1/4$ 、 $3/8$ 秒时元件的功率。

§ 1-3 无源二端元件

1. 电阻元件

电阻元件是电阻器、白炽灯、电炉等实际电气器件的理想化模型。这些电气器件的主要的、共同的特征是消耗电能，电阻元件是一种理想元件，用以表示电路中能量消耗的物理现象。

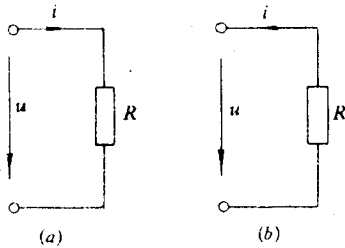


图 1-8 电阻元件

一个二端元件，如果在任何时间，其端子电压 u 与端子电流 i 之间的关系可用代数方程 $u = u(i)$ 或 $i = i(u)$ 来表示，则称为电阻元件，简称电阻。在电路图中用长方框表示，如图 1-8 所示。其中 R 是电阻的文字符号。

电压与电流间的关系式在指定了正方向情况下才有意义。通常按图 1-8 (a) 取两者的正方向。即前面提到的关联参考方向。

约束方程 $u = u(i)$ 或 $i = i(u)$ 称为电阻的电压—电流关系，(Voltage Current Relationship, 简记为 VCR) 或伏安特性或伏安关系。电阻元件的伏安特性可以用 $u-i$ 平面 (或 $i-u$ 平面) 的一条曲线表示。一般情况下，电阻的伏安特性是非线性的，如图 1-9 所示。称为非线性电阻。

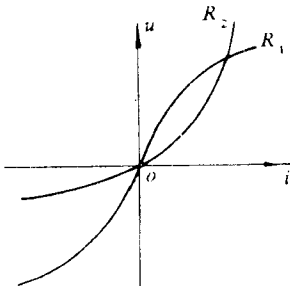


图 1-9 非线性电阻特性曲线

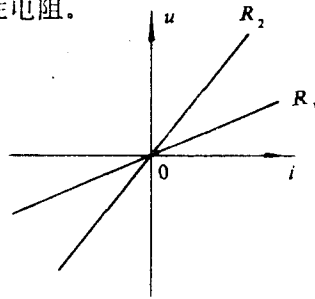


图 1-10 线性电阻特性曲线

若 $u = u(i)$ 是通过原点的一条直线，如图 1-10 所示的 R_1 或 R_2 ，表示电压与电流成正比关系，称为线性电阻。这时有

$$u = Ri \quad (1-11)$$

或

$$i = \frac{1}{R} u = Gu \quad (1-12)$$

这就是熟知的欧姆定律。式中常数 R 为线性电阻元件的参数。电阻的参数值亦简称为电阻^①。电阻参数的计量单位是欧 (姆) Ω 。 R 的倒数 G 称为电阻元件的电导，简称为电

^①电阻元件用 R 表示，线性电阻的参数用 R 表示，都简称为电阻，常混用。