

第一篇 电路分析基础



第 1 章综合资源



第 1 章讨论区

第 1 章 电路的基本概念与基本定律

本章包含的主要内容有：电路的基本概念；电路的基本物理量（电流、电压、功率）；电路元件（无源元件、有源元件）以及电路的基本定律（基尔霍夫定律）。其中基尔霍夫定律与元件的伏安关系是电路分析的基本依据，所以本章是本课程最基础的部分。

1.1 电路的组成与电路模型



电路的组成与
电路模型视频



电路的组成与
电路模型课件

1.1.1 电路的组成及其作用

电路是由各种电气器件和设备连接形成的电流通路。在现代工业、农业、国防建设、科学研究及日常生活中，人们使用不同的电路来完成各种任务。小到手电筒，大到计算机、通信系统和电力网络，都可以看到各种各样的电路。可以说，只要用电的物体，其内部都含有电路。

实际电路种类繁多，特性和功能也各不相同，但从组成上讲，**任何实际电路都由电源、负载和中间环节三部分组成**。其中供给电能的电气装置为电源；消耗电能的电气装置为负载；中间环节则将电源和负载连接起来从而使电路能够正常工作，主要是连接导线、开关、变压器、保护装置等一些辅助设备。

从宏观的角度来看，**电路的作用主要体现在能量处理和信号处理两个方面**。

所谓的能量处理，就是通过电路实现电能的产生、传输、分配与转换。典型的例子是电力系统中的输电线路。发电厂的发电机把热能、原子能等转换成电能，通过变压器、输电线等输送给各用户（如电灯、电炉、电动机等），在用户那里又把电能转换成光能、热能、机械能等其他形式的能量。在该电路中发电机提供电能，作为电源；各用户消耗电能，作为负载；变压器、输电线、开关、保护装置等则是中间环节。

所谓的信号处理，就是通过电路实现电信号的获取、传递、变换与处理。以常见的收音机为例，一台简单的收音机由输入电路（包括天线及调谐电路）、检波电路、放大电路以及扬声器组成。输入电路的功能是接收由各个发射台发出的不同信号，从中选择所需信号；检波电路的功能是将调谐电路选择出来的高频信号作适当处理，从中取出发射台发送的音频信号；放大电路将微弱的音频信号放大再送入扬声器。由此可见，此电路的作用是实现电信号的获取、传递、变换与处理，即将激励信号处理成为所需要的响应。

实际的电路元器件、连接导线以及由它们组成的实际电路都有一定的外形尺寸，占有一定的空间。若实际电路的几何尺寸 d 远小于电路工作时电磁波的波长 λ 时（即 $d \ll \lambda$ ），可以认为电流同时到达实际电路的各个点，此时电路尺寸可以忽略不计，整个实际电路可以看做是电磁空间的一个点，这种电路为**集总参数电路**。不满足上述条件的电路则为**分布参数电路**。

举例说，我国电力系统交流电的频率 $f=50\text{Hz}$ ，电磁能量的传播速度为 $c=3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，所对应的波长 $\lambda=c/f=6\,000\text{km}$ 。对以此为工作频率的用电设备来说，其尺寸与这一波长相比可以忽略不计，因此可按集总参数电路处理。而对于上千公里的远距离输电线路来说，显然不满足 $d \ll \lambda$ ，所以不能按集总参数电路处理，分析此类电路时必须考虑到电场、磁场沿线分布的现象。又如在微波电路（如电视天线、雷达天线和通信卫星天线）中，由于信号频率特别高，波长 λ 的范围为 $0.1 \sim 10\text{cm}$ ，此时电路尺寸和波长属于同一数量级，故为分布参数电路。因为工程中所遇到的大量电路都可作为集总参数电路处理，所以本书只讨论集总参数电路。

电路除了可以分为集总参数电路和分布参数电路外，还可以分为线性电路和非线性电路（按照电路是否含有非线性元件来划分）、时变电路和非时变电路（按照电路是否含有时变元件来划分）。本书重点讨论**线性非时变的集总参数电路**。

1.1.2 电路模型

作为电路组成部分的器件或设备，如电阻器、线圈、电容器、变压器、晶体管等，种类繁多，其工作时的物理过程也很复杂，不便于一一进行分析，但是在电磁现象方面却又有着许多相同之处。为了便于电路的分析，我们定义了各种理想的电路元件。**每一种理想电路元件只表示一种电磁特性，并且用规定的符号表示**。例如，用电阻元件来表征具有消耗电能特性的各种实际电器件；用电感元件来表征具有存储磁场能量的各种实际电器件；用电容元件来表征具有存储电场能量的各种实际电器件；用电源元件来表征具有提供电能特性的各种实际电器件，可分为电压源和电流源两种。上述理想电路元件的电路符号如图 1-1 所示。

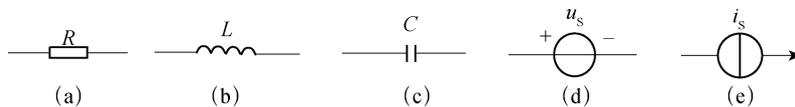


图 1-1 各种理想电路元件的电路符号

工程上各种实际电器件根据其电磁特性可以用一种或几种理想的电路元件来表示，这个过程称为建模。**不同的实际电器件，只要具有相同的电磁特性，在一定条件下都可以用同一个模型来表示**。例如，电炉、白炽灯的主要电磁特性是消耗电能，可用电阻元件表示；干电池、发电机的主要电磁特性是提供电能，可用电源元件表示。

需要注意的是，**建模时必须考虑工作条件**。同一个实际电器件在不同应用条件下所呈现的**电磁特性是不同的，因此要抽象成不同的元件模型**。例如，一个电感线圈，在低频条件下工作时，主要有存储磁场能量和消耗电能的作用，所以把它抽象成电阻和电感的串联，如图 1-2 (a) 所示；随着工作频率的升高，线圈还具有存储电场能量的作用，因此必须考虑其电容效应，其等效元件模型如图 1-2 (b) 所示。其中电阻 R 表示其消耗电能的作用，电感 L 表示其存储磁场能量的作用，电容 C 表示其存储电场能量的作用。

又如一个实际电容器，当它的发热损耗很低时，可以等效成一个理想的电容元件，如

图 1-3 (a) 所示；而要考虑其发热损耗时，则将电容器抽象成电阻和电容的并联（或串联），如图 1-3 (b) 所示。

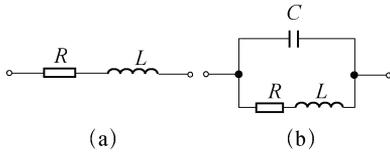


图 1-2 电感线圈的元件模型

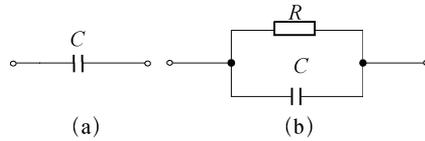


图 1-3 电容器两种元件模型

把组成实际电路的各种电器件用理想的电路元件及其组合来表示，并用理想导线将这些电路元件连接起来，就可得到实际电路的电路模型。图 1-4 (a) 所示的手电筒电路，灯泡可以用电阻元件来表示；干电池如果考虑其内阻的话，可以用理想电压源与电阻的串联组合来表示，再用理想导线将这些电路元件连接起来，这样就得到手电筒电路的电路模型，如图 1-4 (b) 所示。电路模型一旦正确地建立，我们就能用数学的方法深入地分析电路。注意：电路分析的对象是电路模型，而不是实际电路。如果不是特别指出，今后所说的“元件”、“电路”均指理想的电路元件和电路模型。

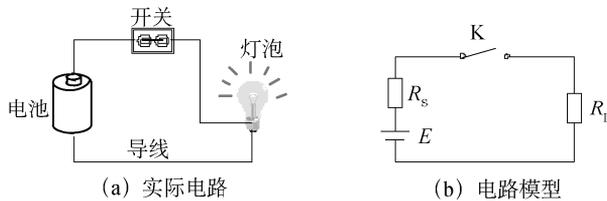


图 1-4 手电筒电路



1.1 测试题

1.2 电路的基本物理量

电路的特性是由电路的物理量来描述的，主要有电流、电压、电荷、磁链、功率和能量。其中电流、电压和功率是电路的基本物理量，电路分析的基本任务就是计算电路中的电流、电压和功率，下面分别加以介绍。

1.2.1 电流

带电粒子的定向运动形成电流。电流定义为单位时间内通过导体横截面的电荷量，用字母 i 表示，即

$$i(t) = \frac{dq}{dt}$$

在国际单位制中，电流的单位为安培 (A)，简称安。在实际应用中，可以加上表 1-1 所列的国际单位制 (SI 单位) 的词头，构成 SI 的十进制倍数或分数单位。如：1mA=10⁻³A，1μA=10⁻⁶A，1nA=10⁻⁹A。



电流视频



电流课件

(1.2.1)

表 1-1 部分国际单位制前词头

因数	10^9	10^6	10^3	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
名称	吉	兆	千	毫	微	纳	皮
符号	G	M	k	m	μ	n	p

如果电流的大小和方向不随时间变化，称为**直流电流**，简称为 DC，如图 1-5 (a) 所示。直流电流可以用大写字母 I 或小写字母 i 表示。如果电流的大小和方向随时间变化，称为时变电流，如图 1-5 (b) 所示。如果时变电流的大小和方向均作周期性变化且平均值为零时，称为**交流电流**，简称为 AC。最常见的交流电流为正弦交流电流，如图 1-5 (c) 所示。时变电流和交流电流通常用小写字母 i 表示。

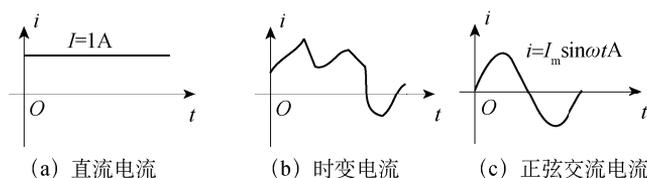


图 1-5

电流是有方向的，通常规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。但在分析电路时，电流的实际方向往往难以预先确定，而且交流电流的实际方向又随时间变化，因此在电路中很难标明电流的实际方向。为此，我们在进行电路分析时，往往先设定电流的正方向，称之为**电流的参考方向**。电流的参考方向可以任意选定，在电路图中用箭头“ \rightarrow ”表示，如图 1-6 所示，也可以用双下标表示，记为 i_{ab} ，表示电流参考方向从 a 流向 b。

按设定的电流参考方向进行电路计算，若计算得电流数值为正，则表示电流的实际方向和所设的参考方向一致；若电流数值为负，则表示电流的实际方向和所设的参考方向相反。

图 1-6 说明了参考方向的含义，图中虚线箭头表明电流的实际方向。图 1-6 (a) 中电流的参考方向与实际方向一致，故电流数值为正；图 1-6 (b) 中电流的参考方向与实际方向相反，故电流数值为负。

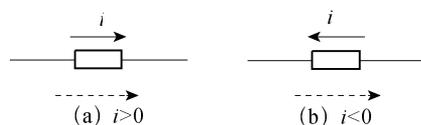


图 1-6 电流的参考方向

显然，在未标明电流参考方向的情况下，计算得出的电流正负值毫无意义。今后在电路图中只标明参考方向，分析电路也都以参考方向为依据。

例 1.2.1 图 1-7 中的电流 $i=1A$ ，问电流的实际方向如何？

解：在图示参考方向下 $i>0$ ，说明电流的实际方向与所设的参考方向一致，即电流的实际方向从 a 流向 b。若将电流的参考方向改为从 b 流向 a，则 $i'=-1A$ 。

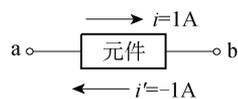


图 1-7 例 1.2.1 图

1.2.2 电压和电位

电路中 a、b 两点间的电压定义为把单位正电荷从 a 点移到 b 点电场力所做的功，即：



电压视频



电压课件

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1.2.2)$$

式中， u_{ab} 表示电路 a、b 两点间的电压（降）， dW 表示移动电荷为 dq 时电场力所做的功。在国际单位制中，电压的单位为伏特（V），简称伏。此外，电压还可以用千伏（kV）、毫伏（mV）、微伏（ μ V）等表示。

如果电压的大小和方向不随时间变化，称为**直流电压**，否则为时变电压。如果时变电压的大小和方向均作周期性变化且平均值为零时，称为**交流电压**。例如，日常生活中最常见的工频电压就是指有效值为 220V、频率为 50Hz 的正弦交流电压。

除了电压，电路中还有一个重要的“电位”概念。电路中通常先假设一个零电位点，用符号“ \perp ”表示，称为参考点。电路中某一点的电位就是将单位正电荷从这一点移到参考点时电场力所做的功。因此，**电路中某一点的电位就是这一点到参考点的电压降**。电位用符号 V 表示，其单位也为伏特。

用 V_a 、 V_b 分别表示电路中 a 点、b 点的电位，则 a、b 两点之间的电压 U_{ab} 就等于这两点的电位差，即：

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1.2.3)$$

注意：在计算电位时，必须先选定某一点作为参考点。参考点可以任意选择，但是同一个电路中不可以同时设定两个或两个以上不同的参考点。

引入电位的概念后，电路图中可以省去电压源支路，直接将电压源的极性在图中标出，并标明其电位值，如图 1-8（a）所示电路可以改画成图 1-8（b）所示电路。在本书后面的章节中，经常会出现这种画法。

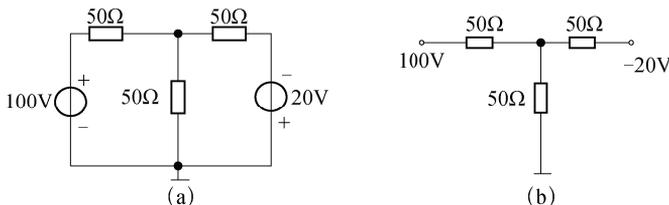


图 1-8

电路中规定电压的实际方向是电位降低的方向，即由高电位端指向低电位端，所以电压又称电压降。

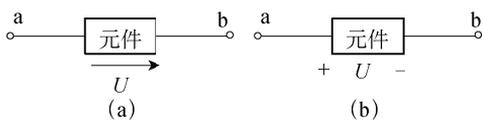


图 1-9 电压的参考方向

与电流的参考方向类似，分析电路时，**有必要先设定电压的参考方向。电压的参考方向也是任意假定的**，它有三种表示方法：一是用箭头“ \rightarrow ”表示，如图 1-9（a）所示；二是用“+”、“-”极性表示，如图 1-9（b）所示。其中“+”

表示假定的高电位端，“-”表示假定的低电位端；三是用双下标表示，如 u_{ab} 表示电压的参考方向从 a 指向 b。

按设定的电压参考方向进行电路计算，若计算得电压数值为正，表示电压的实际方向和所设的参考方向一致；若电压数值为负，则表示电压的实际方向和所设的参考方向相反。在未标明电压参考方向时，计算出的电压正负值毫无意义。

例 1.2.2 电路如图 1-10 所示，已知 $U_{ac}=10V$ ， $U_{bc}=5V$ ，求 V_a 、 V_b 和 U_{ab} 。若以 a 点为参

考点，重新计算 V_b 、 V_c 和 U_{ab} 。

解：图中以 c 为参考点，则 $V_c=0V$

根据电位的定义可得：

$$V_a=U_{ac}=10V; V_b=U_{bc}=5V; U_{ab}=V_a-V_b=5V$$

若以 a 点为参考点，则 $V_a=0V$

$$V_b=U_{ba}=U_{bc}-U_{ac}=-5V; V_c=U_{ca}=-U_{ac}=-10V; U_{ab}=V_a-V_b=5V$$

由例 1.2.2 可以看出：电路中各点的电位值是相对的，取决于参考点的选择；而电路中任意两点间的电压值是固定的，和参考点的选择无关。

电动势用来衡量非电场力对电荷做功的能力，即非电场力将单位正电荷从一点移到另一点所做的功。与电压相比，电动势的实际方向规定为电源内非电场力的方向，即由低电位端指向高电位端，或者说是电位升高的方向。电动势用符号“ E ”表示，其单位也是伏特。

例 1.2.3 电路如图 1-11 所示，求 b 点的电位。

解：根据串联电阻电流相等的特点，再结合欧姆定律，

可得：
$$\frac{V_a - V_b}{5} = \frac{V_b - V_c}{11}$$

将 $V_a=10V$ ， $V_c=-6V$ 代入上式，计算可得 $V_b=5V$

电路中每个元件的电流或电压的参考方向都是相互独立的，可以任意假设。为了分析方便，通常将元件上的电压、电流的参考方向设置为一致，即电流的参考方向由电压的“+”指向“-”，这样选定的参考方向称为关联参考方向，如图 1-12 (a) 所示。若电压、电流的参考方向设置得相反，则称为非关联参考方向，如图 1-12 (b) 所示。

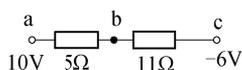


图 1-11 例 1.2.3 图

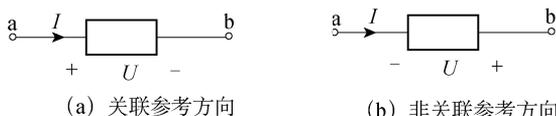


图 1-12 关联参考方向和非关联参考方向

1.2.3 功率

在电学中，功率是指单位时间内电场力所做的功，用符号 p 表示。在国际单位制中，功率的单位为瓦特 (W)，简称瓦。



功率视频



功率课件

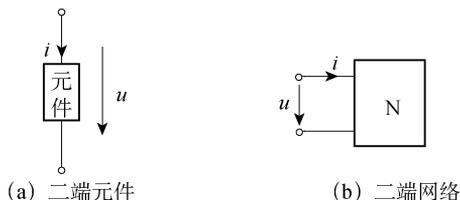


图 1-13 二端元件和二端网络

下面讨论图 1-13 所示二端元件和二端网络的功率。当电压、电流采用关联参考方向时，二端元件或二端网络吸收的功率为

$$p_{\text{吸收}} = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = ui \quad (1.2.4)$$

显然，电流、电压采用非关联参考方向时，二端元件或二端网络吸收的功率为

$$p_{\text{吸收}} = -ui \quad (1.2.5)$$

式 (1.2.4) 和式 (1.2.5) 计算的都是吸收的功率。若计算得 $p_{\text{吸收}} > 0$ ，表示该时刻二端元件或二端网络实际吸收功率；若 $p_{\text{吸收}} < 0$ ，表示实际发出功率。

因为吸收功率和发出功率本身相差一个负号，吸收功率 -10W 就相当于发出功率 10W 。所以，在关联参考方向下，元件发出的功率为

$$p_{\text{发出}} = -ui \quad (1.2.6)$$

在非关联参考方向下，元件发出的功率为

$$p_{\text{发出}} = ui \quad (1.2.7)$$

式 (1.2.4) 和式 (1.2.6) 实质上是相同的，同理，式 (1.2.5) 和式 (1.2.7) 实质上也是相同的。具体计算时可根据已知条件选择合适的公式。

对一个完整的电路来说，由于能量必须守恒，所以在任一时刻电路中所有元件吸收功率的代数和必为零。即电路中必有一部分元件发出功率（提供电能，作为电源），另一部分元件吸收功率（消耗电能，作为负载），且发出的功率之和一定等于吸收的功率之和。

在关联参考方向下，从 t_0 到 t 这段时间内，电路吸收的电能为

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi) d\xi \quad (1.2.8)$$

在国际单位制中，电能的单位为焦耳 (J)，简称焦。

例 1.2.4 计算图 1-14 中各元件的功率，并指出该元件是提供电能还是消耗电能。

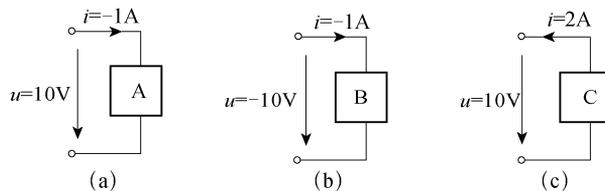


图 1-14 例 1.2.4 图

解：图 (a) 中，电压、电流为关联参考方向，故元件 A 吸收的功率为

$$p_{\text{吸收}} = ui = 10 \times (-1) = -10\text{W} < 0 \quad \text{A 发出功率 } 10\text{W}, \text{ 提供电能}$$

图 (b) 中，电压、电流为关联参考方向，故元件 B 吸收的功率为

$$p_{\text{吸收}} = ui = (-10) \times (-1) = 10\text{W} > 0 \quad \text{B 吸收功率 } 10\text{W}, \text{ 消耗电能}$$

图 (c) 中，电压、电流为非关联参考方向，故元件 C 吸收的功率为

$$p_{\text{吸收}} = -ui = -10 \times 2 = -20\text{W} < 0 \quad \text{C 发出功率 } 20\text{W}, \text{ 提供电能}$$

例 1.2.5 图 1-15 所示电路，已知元件发出功率 150mW ， $i = 10\text{mA}$ ，求电压 u 。

解：由于该元件上的电压、电流为非关联参考方向，因此发出的功率可按照式 (1.2.7) 计算，即

$$p_{\text{发出}} = ui = 150 \times 10^{-3} \text{W}$$

故

$$u = \frac{150 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-3}} = 15\text{V}$$

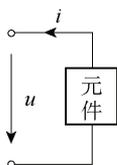


图 1-15 例 1.2.5 图



1.2 测试题

1.2 测试题
讲解视频1.2 测试题
讲解课件

1.3 基尔霍夫定律

电路是由若干元件连接而成的有机整体，各元件的电压、电流除了受元件自身的伏安关系约束（又称**元件约束**）外，还要受到电路的连接关系所带来的约束（又称**拓扑约束**）。基尔霍夫定律就是描述电路结构关系的基本定律，是整个电路理论的源头。它包含两个基本定律：基尔霍夫电流定律（KCL）和基尔霍夫电压定律（KVL）。

在介绍基尔霍夫定律之前，先结合图 1-16 所示电路介绍电路的几个常用术语。

支路：电路中的一个分支称为支路。支路数常用 b 表示。一条支路可以只有一个二端元件，也可以由几个二端元件串联而成。显然同一条支路上的电流处处相等。图 1-16 所示电路共有 3 条支路，即 acb 、 aeb 、 adb 。

节点：3 条或 3 条以上支路的连接点称为节点。节点数常用 n 表示。图 1-16 所示电路共有两个节点，即 a 点和 b 点。在电路图中，节点通常用实心的小圆点标注。特别要注意：电路中如果有若干个点之间是用一根理想导线直接相连的，则这些点应该看做是同一个节点。

回路：电路中的任一闭合路径称为回路。图 1-16 所示电路中共有 3 个回路，即 $acbea$ 、 $adbea$ 、 $adbca$ 。

网孔：对平面电路而言，内部不含有其他支路的回路称为网孔。所谓平面电路是指经任意扭动变形后画在一个平面上而不会出现支路交叉的电路（节点处除外）。网孔只有在平面电路中才有意义，网孔数常用 m 表示。图 1-16 所示电路共有两个网孔，即 $acbea$ 、 $adbea$ 。

可以证明，对平面电路而言，网孔数 m 、支路数 b 、节点数 n 之间满足以下关系：

$$m=b-(n-1)$$

1.3.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律（KCL）是描述电路中与节点相连的各支路电流间相互关系的定律。它的基本内容是：对电路中任一节点，任何时刻流入（或流出）该节点的所有支路电流的代数和恒为零，即

$$\sum i=0 \quad (1.3.1)$$

在式（1.3.1）中，若规定流入该节点的电流前面取“+”号，则流出该节点的电流前面取

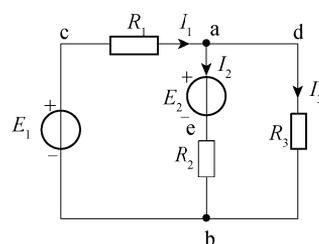
基尔霍夫
定律视频基尔霍夫
定律课件

图 1-16

“-”号；反之亦然。电流是流入还是流出，均是根据电流的参考方向判断。

也就是说，在式(1.3.1)中有两套正负号，电流变量前面的正负号和电流变量本身的正负值。前者是由电流的参考方向是流入还是流出节点决定的，后者是由电流的参考方向与实际方向是否一致所决定的。

在图 1-16 中，对节点 a，若规定流入节点的电流前面取“+”号，则流出节点的电流前面取“-”号，由 KCL 可得：

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

上式也可以写成：

$$I_1 = I_2 + I_3$$

故 KCL 还可以表示为：对电路中任一节点，任何时刻流入该节点的电流之和等于流出该节点的电流之和，即

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}} \quad (1.3.2)$$

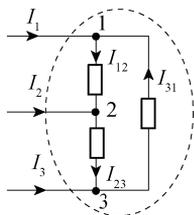


图 1-17

KCL 实质是电荷守恒定律在电路节点上的一种体现。节点上既不会有电荷的堆积，也不会有新的电荷产生，所以连接于任一节点的各支路电流的代数和恒为零。

基尔霍夫电流定律不仅适用于电路中的任一节点，也适用于电路中任一封闭面（又称广义节点）。如图 1-17 所示，对节点 1、2、3，根据 KCL 分别有： $I_1 = I_{12} - I_{31}$ ； $I_2 = I_{23} - I_{12}$ ； $I_3 = I_{31} - I_{23}$ 。将上面 3 个式子相加，可得 $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ 。

可见，任何时刻流入封闭面的电流代数和恒为零。

例 1.3.1 求图 1-18 所示电路中的电流 i_1 和 i_2 。

解：对节点①列写 KCL 方程： $4 - 7 - i_1 = 0$ 解得 $i_1 = -3\text{A}$

对节点②列写 KCL 方程： $i_1 + 10 + 2 - i_2 = 0$ 解得 $i_2 = 9\text{A}$

求 i_2 时，也可以对图中虚线所示的封闭面列写 KCL 方程：

$$4 + 10 + 2 - 7 - i_2 = 0 \quad \text{解得 } i_2 = 9\text{A}$$

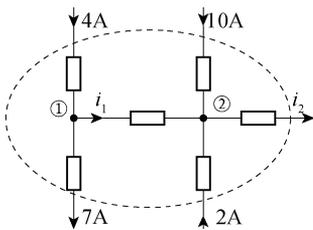


图 1-18 例 1.3.1 图

1.3.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (KVL) 是描述回路中各支路电压间相互关系的定律。它的基本内容是：对电路中的任一回路，在任一瞬时，沿着任一方向（顺时针或逆时针）绕行一周，该回路中所有支路电压的代数和恒为零。即

$$\sum u = 0 \quad (1.3.3)$$

列写 KVL 方程前，必须先假定回路的绕行方向。若支路电压的参考方向与回路绕行方向一致，则该电压项前取“+”号；反之取“-”号。

图 1-19 所示电路，对回路 cabc，设回路绕行方向为顺时针，各元件电压的参考方向如图 1-19 所示，则由 KVL 可得：

$$U_1 - U_2 + U_3 - U_4 = 0 \quad (1.3.4)$$

KVL 实质是能量守恒定律的体现。电荷沿着闭合回

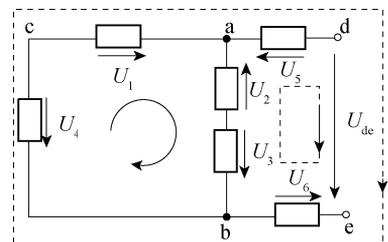


图 1-19

路绕行一周，没有产生能量，也没有吸收能量，所以任一回路的各支路电压的代数和恒为零。

基尔霍夫电压定律还可以推广应用到电路中任一假想的回路（电路某两点之间实际是断开的），即对电路的任一假想的闭合回路，各段电压降的代数和恒为零。如图 1-19 所示电路，d、e 两点间并无支路存在，但 d、e 两点间仍有电压 U_{de} ，我们可以对 cadebc 这一假想的回路，按顺时针绕行方向，列写 KVL 方程：

$$U_1 - U_5 + U_{de} - U_6 - U_4 = 0$$

得

$$U_{de} = U_5 - U_1 + U_4 + U_6$$

也可对 adeba 这一假想的回路，按顺时针绕行方向，列写 KVL 方程：

$$-U_5 + U_{de} - U_6 - U_3 + U_2 = 0$$

得

$$U_{de} = U_5 - U_2 + U_3 + U_6$$

由式 (1.3.4) 可知： $-U_1 + U_4 = -U_2 + U_3$ ，可见按不同路径求出的电压 U_{de} 是相等的。

以上分析结果表明：电路中任意两点之间的电压 U_{ab} 等于沿着从 a 点到 b 点的任一路径上所经过的各元件电压的代数和。此即求解电路中任意两点间电压的方法。要注意，两点间的电压与所选的路径无关。

需要指出的是，KCL 和 KVL 确定了电路中各支路电流和支路电压间的约束关系。这种约束关系只与电路的连接方式有关，与支路元件的性质无关，故称为拓扑约束。因此无论电路由什么元件组成，也无论元件是线性还是非线性、时变还是非时变，只要是集总参数电路，基尔霍夫定律始终适用。

例 1.3.2 在图 1-20 所示电路中，已知 $U_1=3V$ ， $U_2=4V$ ， $U_3=5V$ ，试求 U_4 及 U_5 。

解：对网孔 1，设回路绕行方向为顺时针，列写 KVL 方程：

$$-U_1 + U_2 - U_5 = 0$$

解得

$$U_5 = U_2 - U_1 = 4 - 3 = 1V$$

对网孔 2，设回路绕行方向为顺时针，列写 KVL 方程：

$$U_5 + U_3 - U_4 = 0$$

解得

$$U_4 = U_5 + U_3 = 1 + 5 = 6V$$

若选其他闭合路径，也可得到相同结果，请读者自行验证。

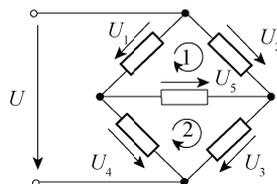


图 1-20 例 1.3.2 图



1.3 测试题



1.3 测试题
讲解视频



1.3 测试题
讲解课件

1.4 无源元件

电路元件是构成电路的基本单元，按其在电路中所起的作用，可分为无源元件和有源元件两大类。当元件的电压 u 、电流 i 取关联参考方向时，如果对任意时刻 t 都满足 $w(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau)i(\tau)d\tau \geq 0$ ，则该元件为无源元件；否则为有源元件。无源元件不具有能量的控

制作用，如电阻、电感、电容、二极管等，它们在电路中通常作为负载。有源元件则具有能量的产生或者控制作用，如发电机、电池、三极管、场效应管、运算放大器等。本节介绍电阻、电感和电容这三种最常见的无源元件。

1.4.1 电阻元件

1. 电阻元件的定义

凡是以消耗电能为主要电磁特性的实际电气装置或电器元件，理论上都可以抽象成理想电阻元件，简称电阻。在电子设备中常用的绕线电阻、金属膜电阻、碳膜电阻及在日常生活常见的白炽灯、电炉等，都可以用电阻元件作为其电路模型。电阻有线性与非线性、时变和非时变之分。本书主要研究线性电阻元件，其电路符号如图 1-21 (a) 所示。



图 1-21 线性电阻的电路符号及伏安特性

2. 线性电阻元件的伏安关系

对线性电阻元件来说，电阻两端的电压和电流之间的关系服从欧姆定律。

当电压 u 和电流 i 采用关联参考方向时，有

$$u=Ri \quad (1.4.1)$$

即线性电阻元件上的电压与流过的电流成正比。式中 R 称为电阻元件的电阻值，简称电阻，是一个常数。在国际单位制中，电阻的单位为欧姆 (Ω)。电阻的常用单位有千欧 ($k\Omega$)、兆欧 ($M\Omega$)。线性电阻元件的伏安特性曲线如图 1-21 (b) 所示，它是一条经过坐标原点的直线，该直线的斜率由电阻 R 决定。

当电压 u 和电流 i 采用非关联参考方向时，欧姆定律公式中需加一负号，即

$$u=-Ri \quad (1.4.2)$$

电阻的倒数称为电导，用 G 表示，即 $G=\frac{1}{R}$ ，电导的单位是西门子 (S)。

引入电导后，欧姆定律也可表示为

$$i=\pm Gu \quad (1.4.3)$$

电阻元件的电压(或电流)完全取决于该时刻的电流(或电压)，而与过去时刻的电流(或电压)无关，这种性质称为无记忆性，故电阻是一种无记忆元件。

线性电阻元件有两个特殊的情况需要注意：一是当 $R=\infty$ 时，不论电阻两端的电压为何值，流过的电流始终为 0，称之为“开路”；另一种是当 $R=0$ 时，不论电阻的电流为何值，其两端的电压始终为 0，称之为“短路”。一旦某个电阻出现开路或短路故障，相关电路必然会因电流突变为 0 或电流过大而失去原有的正常工作状态，甚至会造成整个电路瘫痪。所以在实际应用时一定要避免电阻故障，尤其是要避免短路情况发生。

3. 电阻元件的功率

电阻元件对电流具有阻碍作用，电流流过电阻时必然要消耗能量。当电压、电流取关联参考方向时，电阻元件吸收的功率为

$$p=ui=i^2R=u^2/R\geq 0$$

当电压、电流取非关联参考方向时，电阻元件吸收的功率为

$$p = -ui = -(-Ri)i = i^2 R = u^2 / R \geq 0$$

可见，不论是关联参考方向还是非关联参考方向，电阻元件始终吸收功率，并把吸收的电能转换成其他形式的能量消耗掉，因此电阻是耗能元件，也是无源元件。

当电流流过电阻时，电阻会发热，这就是电流的热效应。一方面可以利用它制成电炉、电烙铁等电热器，另一方面会造成导线的绝缘老化，引起漏电，严重时甚至烧毁电气设备。因此各种电气设备为了安全运行，都有一定的功率、电压和电流限额，称之为额定功率、额定电压和额定电流。例如白炽灯通常给出额定电压和额定功率（如 220V，60W）；固定电阻器除了标出电阻值（10kΩ、1kΩ、100Ω 等）外，还需给出其额定功率（如 5W、2W、1W、1/2W、1/4W、1/8W 等）。

例 1.4.1 已知一灯泡额定功率为 40W，额定电压为 220V，求其额定电流及电阻值。

解：由 $P=UI$ 得 $I=P/U=40/220=0.182A$

$$R=U/I=1209\Omega$$

例 1.4.2 电路如图 1-22 所示，试写出各图中 U 与 I 之间的关系式。

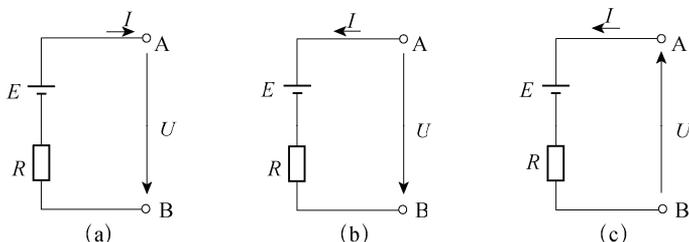


图 1-22 例 1.4.2 图

解：根据 A、B 两点之间的电压等于沿着从 A 点到 B 点的任一路径上所经过的各元件电压的代数和，再结合欧姆定律，可得：

图 (a) 中， $U=E-IR$ ；图 (b) 中， $U=E+IR$ ；图 (c) 中， $U=-E-IR$

例 1.4.3 电路如图 1-23 (a) 所示，已知电源发出功率 60W，求电阻 R_X 。

解：设电源上的电流为 I ，如图 1-23 (b) 所示。此时电源上的电压、电流为非关联参考方向， $P_{\text{发出}}=20I=60W$ ，求得 $I=3A$

由 KCL 可得： $I_X=I-1=2A$

由 KVL 可得： $U=-5I+20=5V$

由欧姆定律可得： $R_X=U/I_X=2.5\Omega$

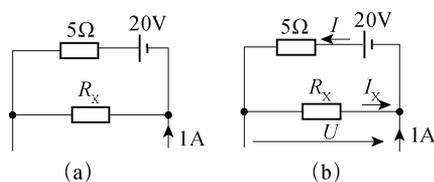


图 1-23 例 1.4.3 图

1.4.2 电容元件

1. 电容元件的定义

凡是以存储电场能量为主要电磁特性的实际电气装置或电器元件从理论上都可以抽象为理想电容元件。实际电容器是由两块平行的金属极板，中间以绝缘介质（如云母、绝缘纸、电解质等）隔开所形成的器件。给电容器外加电压



电容元件视频



电容元件课件

时，就会在金属极板上分别聚集起等量的正负电荷，接高电位的极板聚集正电荷，接低电位的极板聚集负电荷，从而在绝缘介质中建立电场并具有电场能量。即使移去外加电压，电荷仍然保留在极板上，所以电容器具有存储电场能量的作用。忽略电容器的介质损耗和漏电流，

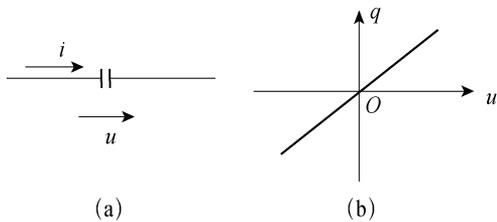


图 1-24 线性电容元件的电路符号和库伏特性

可以用理想的电容元件作为它的电路模型。电容元件不仅可以作为实际电容器的模型，还可以表示在许多场合广泛存在的寄生电容效应。例如，一对架空输电线之间就有电容效应；电感线圈在高频工作条件下，各匝线圈之间也有电容效应。

本书主要研究线性电容元件，其电路符号如图 1-24 (a) 所示。

2. 线性电容元件的伏安关系

对线性电容元件来说，任何时刻正极板上的电荷 q 与其两端电压 u 有以下关系：

$$q=Cu \quad (1.4.4)$$

式中， C 称为电容元件的电容量，简称电容。当电荷的单位为库仑 (C)，电压的单位为伏特 (V) 时，电容的单位为法拉 (F)，简称法。小容量电容以微法 (μF)、皮法 (pF) 表示。

线性电容的电容量只与其本身的几何尺寸和内部介质有关，与外加电压无关。以电荷 q 为纵坐标，以电压 u 为横坐标，可得线性电容元件的库伏特性，如图 1-24 (b) 所示。它是一条通过原点的直线，直线的斜率由电容 C 决定。

当电容元件的电压和电流取关联参考方向时，如图 1-24 (a) 所示，则电流 $i = \frac{dq}{dt}$ ，把式 (1.4.4) 代入上式，得

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1.4.5)$$

因为电容元件的伏安关系是一种微分关系，所以**电容是一种动态元件**。从式 (1.4.5) 可以看出：**任何时刻，线性电容元件上的电流与该时刻电压的变化率成正比**。当电压不变时，则电流为零。在直流稳态情况下，电容两端的电压恒定，所以其电流为零。由此可知：**电容对直流相当于开路，即电容有隔直流的作用**。在交流电路中，频率越高，电流通过的能力越强。因此，**电容具有通高频、阻低频的特征**。利用此特征，电容在电路中常用于信号的耦合、旁路、滤波等。

要注意，式 (1.4.5) 是在电压、电流取关联参考方向下得出的，若电压、电流取非关联参考方向，式中相差一个负号。

将式 (1.4.5) 两边积分，得

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = u_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi \quad (1.4.6)$$

式中， u_0 是初始值，即 $t=0$ 时电容元件上的电压值。

式 (1.4.6) 表明：**任一时刻 t 的电容电压 $u(t)$ 取决于从 $-\infty$ 到 t 所有时刻的电流值，因此电容电压具有记忆电流的性质，电容是一种“记忆元件”**。

3. 电容的储能

当电容元件的电压、电流取关联参考方向时，其瞬时功率表示为

$$p(t) = u(t)i(t) = Cu(t) \frac{du(t)}{dt}$$

在时间 $(-\infty, t]$ 内，电容元件吸收的能量为

$$w_C(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t Cu(\xi) du(\xi) = \frac{1}{2}Cu(t)^2 - \frac{1}{2}Cu(-\infty)^2 \quad (1.4.7)$$

一般认为 $u(-\infty)=0$ ，则电容元件在任一时刻 t 存储的电场能量为

$$w_C(t) = \frac{1}{2}Cu(t)^2 \quad (1.4.8)$$

在时间 $[t_1, t_2]$ 内，电容元件能量的变化为

$$w_C = w_C(t_2) - w_C(t_1) = \frac{1}{2}Cu(t_2)^2 - \frac{1}{2}Cu(t_1)^2 \quad (1.4.9)$$

当电容充电时， $|u(t_2)| > |u(t_1)|$ ，此时电容通过电路吸收能量；当电容放电时， $|u(t_2)| < |u(t_1)|$ ，此时电容将存储的电场能量释放出来。由式(1.4.8)可知，任何时刻电容的储能 $w_C \geq 0$ ，说明电容释放的能量不会多于它吸收的能量，即**电容在任何工况下吸收的净能量都是大于等于零的，因此电容既是储能元件，也是无源元件。**

实际电容器除了标出型号、电容值之外，还需标出电容器的耐压值。使用时加在电容两端的电压不能超过耐压值，否则电容会被击穿。电解电容使用时还需注意其正、负极性。

4. 电容的串并联

在实际应用中，考虑到电容的容量及耐压，可以将电容串联或者并联起来使用。

n 个电容串联时，其等效电容值 C_{eq} 为

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n} \quad (1.4.10)$$

n 个电容并联时，其等效电容值 C_{eq} 为

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \cdots + C_n \quad (1.4.11)$$

请读者利用KCL、KVL和电容的电压、电流关系证明以上两式。

1.4.3 电感元件

1. 电感元件的定义

凡是**以存储磁场能量为主要电磁特性的实际电气装置或电器元件从理论上都可以抽象为理想电感元件。**工程

上为了用较小的电流产生较大的磁场，通常用金属导线绕制成线圈，当线圈中有电流流过时，在其周围就会产生磁场。对空心线圈来说，若导线电阻忽略不计，则可用线性电感元件作为它的电路模型。电感元件不仅可以作为实际电感线圈的模型，还可以表示在许多场合广泛存在的电感效应。

本书主要研究线性电感元件，其电路符号如图1-25(a)所示。



电感元件视频



电感元件课件

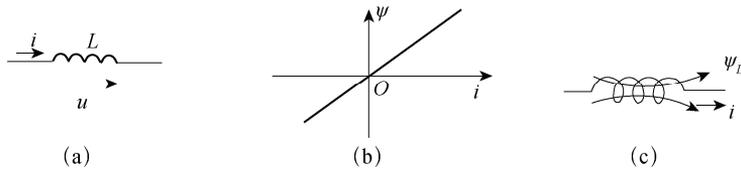


图 1-25 线性电感元件的电路符号及韦安特性

2. 线性电感元件的伏安关系

假设 N 匝线圈通以电流 i ，产生磁链 Ψ_L ，如图 1-25 (c) 所示，我们规定磁链 Ψ_L 与电流 i 的参考方向满足右螺旋关系。

对线性电感元件来说，其磁链 Ψ_L 与电流 i 的关系为

$$\Psi_L = Li \quad (1.4.12)$$

式中， L 称为电感元件的电感值或电感。当磁链的单位为韦伯 (Wb)，电流的单位为安培 (A) 时，电感的单位为亨利 (H)，简称亨。电感的常用单位有毫亨 (mH) 和微亨 (μH)。

以磁链 Ψ_L 为纵坐标、电流 i 为横坐标，可得线性电感元件的韦安特性曲线，如图 1-25 (b) 所示。它是一条通过原点的直线，直线的斜率由电感值 L 决定。

如果电感的电流变化时，磁链也随之变化，根据电磁感应定律，电感将产生感应电压。当电压、电流取关联参考方向时，有

$$u = \frac{d\Psi_L}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1.4.13)$$

式 (1.4.13) 表明：任何时刻，线性电感元件上的电压与该时刻电流的变化率成正比。在直流稳态情况下，电感电流恒定，故电感的电压为零，即电感对直流相当于短路。在交流电路中，频率越高，则电感两端的电压越大。因此，电感具有通低频、阻高频的特征。利用该特征，电感也可用来制成滤波器。

应当强调，式 (1.4.13) 是在电压、电流取关联参考方向下得出的，若电压、电流取非关联参考方向，式中相差一个负号。

将式 (1.4.13) 两边积分，得

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\xi) d\xi = i_0 + \frac{1}{L} \int_0^t u(\xi) d\xi \quad (1.4.14)$$

式中， i_0 是初始值，即在 $t=0$ 时电感元件中通过的电流。

式 (1.4.14) 表明：任一时刻 t 的电感电流 $i(t)$ 取决于从 $-\infty$ 到 t 所有时刻的电压值，因此电感电流具有记忆电压的性质，电感也是一种“记忆元件”。

3. 电感的储能

当电感元件的电压、电流取关联参考方向时，其瞬时功率表示为

$$p(t) = u(t)i(t) = Li(t) \frac{di(t)}{dt}$$

在时间 $(-\infty, t]$ 内，电感元件吸收的能量为

$$w_L(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t Li(\xi) di(\xi) = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(-\infty) \quad (1.4.15)$$

一般认为 $i(-\infty)=0$ ，则电感元件在任何时刻 t 存储的磁场能量为

$$w_L(t) = \frac{1}{2} Li(t)^2 \quad (1.4.16)$$

由式(1.4.16)可知,任何时刻电感的储能始终大于等于零,或者说电感在任何工况下吸收的净能量都是大于等于零的,所以电感既是储能元件,也是无源元件。

在实际应用中,电感元件除了标出电感值外,还需标出其额定电流。使用时流过电感的电流不能超过其额定值,否则电感会被烧毁。

4. 电感的串联与并联

n 个电感串联时,其等效电感值 L_{eq} 为

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + \dots + L_n \quad (1.4.17)$$

n 个电感并联时,其等效电感值 L_{eq} 为

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n} \quad (1.4.18)$$

请读者利用 KCL、KVL 和电感的电压、电流关系证明上述两式。



1.4 测试题



1.4 测试题讲解视频



1.4 测试题讲解课件

1.5 有源元件

1.5.1 独立电源



独立电源视频



独立电源课件

任何电路正常工作时都必须有电源提供能量。实际电源的种类很多,如干电池、蓄电池、光电池、发电机及电子线路中的信号源,等等。这些电源可分为两大类:一类是电源两端的电压保持定值或一定的时间函数,如干电池、稳压电源等;另一类是电源输出的电流保持定值或者一定的时间函数,如光电池、晶体管稳流电源等。下面分别加以介绍。

1. 理想电压源

不管外部电路如何,其两端电压总能保持定值或一定的时间函数,这样的电源定义为理想电压源,其电路符号如图 1-26(a)所示,其中“+”、“-”是参考极性, u_S 为理想电压源的电压。当 u_S 为常数时,即为直流电压源,也可以用图(b)所示的电路符号表示。

理想电压源具有以下特点。

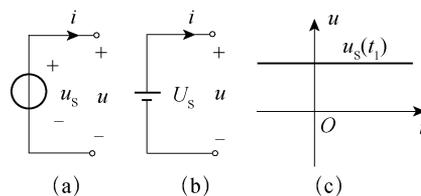


图 1-26 理想电压源的电路符号及伏安特性

(1) 输出电压是由电源本身决定的，与外电路无关。

在任一时刻 t_1 ，理想电压源的端电压与输出电流的关系曲线（称伏安特性）是平行于 i 轴、其值为 $u_S(t_1)$ 的直线，如图 1-26 (c) 所示。

(2) 流过电压源的电流是任意的，是由与之相连的外电路决定的。

电压源外接不同的外电路时，其电流的大小和方向都可以发生变化。电压源中电流的实际方向可以从高电位端流向低电位端，也可以从低电位端流向高电位端。如果电流从电压源的低电位端流向高电位端，则电压源发出功率，对电路提供能量，起电源作用；如果电流从电压源的高电位端流向低电位端，则电压源吸收功率，作为其他电源的负载。因此，**电压源是一种有源元件**。

注意：**理想电压源可以开路，但不能短路**。开路时，端口电流为 0，端口电压仍为 u_S ；短路时，流经电压源的电流为无穷大，将会烧毁电源。

理想电压源实际上并不存在，但通常的电池、发电机、工程中常用的稳压电源及大型电网等，如果工作时，其输出电压基本不随外电路变化，都可近似看做理想电压源。

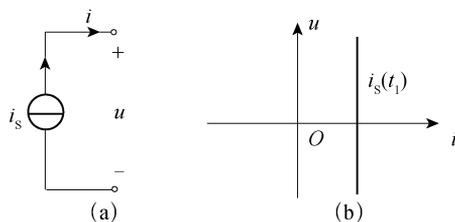


图 1-27 理想电流源的电路符号及伏安特性

2. 理想电流源

不管外部电路如何，其输出电流总能保持定值或一定的时间函数，这样的电源定义为**理想电流源**，其电路符号如图 1-27 (a) 所示，其中箭头表示理想电流源 i_S 的参考方向。

理想电流源具有以下特点。

(1) **输出电流是由电源本身决定的，与外电路无关。**

在任一时刻 t_1 ，理想电流源的伏安特性曲线是一条平行于 u 轴、其值为 $i_S(t_1)$ 的直线，如图 1-27 (b) 所示。

(2) **电流源的端电压是任意的，是由与之相连的外电路决定的。**

电流源外接不同的外电路时，其端电压的大小和方向都可以发生变化。若电流从电流源的低电位端流向高电位端，则电流源发出功率，对电路提供能量，起电源作用；若电流从电流源的高电位端流向低电位端，则电流源吸收功率，从外电路接收能量，作为其他电源的负载。因此，**电流源也是一种有源元件**。

注意：**理想电流源可以短路，但不能开路**。短路时，端口电压为 0，输出电流仍为 i_S ；开路时，电流源两端的电压为无穷大，这显然是不允许的。因此电流源在不对外供电时，内部必须存在电流通路。需要对外供电时再把内部通路关断，对外提供电流。

理想电流源实际上并不存在，当光电池及晶体管稳流电源等器件的输出电流基本不随外电路变化时，可近似看做理想电流源。

因为理想电压源输出电压或者理想电流源输出电流不受外电路的控制而独立存在，所以这两类电源统称为**独立电源**。它们作为电源或者输入信号，在电路中起着“激励”作用，它们作用后将在电路中产生电压和电流，这些由独立电源激励引起的电压和电流称为电路的“响应”。

例 1.5.1 求图 1-28 (a) 所示电路中电压源发出的功率。

解：设电压源上电流 I 的参考方向如图 1-28 (b) 所示，