

直流电路

本章主要结合直流电路介绍一般电路(包括交流电路)所遵循的基本规律和最基本的电路分析计算方法,这是学习本课程各部分内容的前提,也是学习其他相关专业课程的重要基础。

学习目标:掌握电压和电流的参考方向和关联参考方向的概念;掌握欧姆定律、基尔霍夫定律、支路电流法、叠加定理、电压源电流源等效互换、戴维南定理及其应用、电路中电位的计算。



电工电子技术绪论

熟悉基本物理量,电阻元件、电感元件、电容元件的特点及电压和电流的关系。

了解结点电压法。

学习重点:基尔霍夫定律、叠加定理、戴维南定理的应用;各种电路分析方法的实际应用。

学习难点:参考方向和关联参考方向的概念;戴维南定理;电路功率计算及吸收、供出的判断。

1.1 电路模型

1.1.1 电路的组成和作用

电路是指由一些电气设备或器件组成的,以备电流流过的通路。简单地说,电路就是电流的通路。若工作时其中电流的大小和方向不随时间变化,就称为直流电路。图 1.1 所示就是一个简单的直流电路,由电池、灯泡、开关和导线组合而成。随着电工技术的发展,电路的形式和功能是多种多样的,但总的来说,它们具有两个共同点:①电路的组成一般包括电源(或信号源)、负载和连接导线(在复杂的电路中,可以扩展成连接电源和负载的中间环节)三个部分;②电路的作用主要有传输和变换电能与传递和处理信号两个方面。例如,电炉在电流通过时将电能转换成热能;电视机将接收到的信号经过处理,转换成图像和声音。

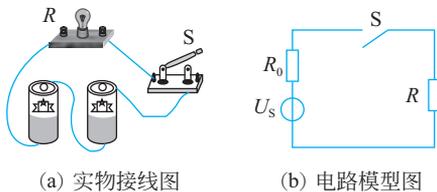


图 1.1 简单直流电路



1.1.2 电路模型和电路图

在电路理论中,为了表征电路部件的主要物理性质,以便进行定量分析,通常将电路部件的实体用它的模型来代替。电路部件的模型由一些具有单一物理性质的理想电路元件构成。基本理想电路元件有五种,即:电阻元件、电感元件、电容元件、理想电压源和理想电流源,在电路图中,它们分别用图 1.2 所示符号表示。

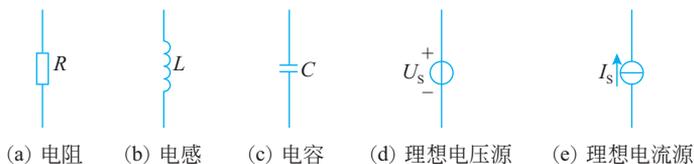


图 1.2 理想电路元件

各种实际电路都可以近似地看作是由理想电路元件组成的理想化的电路,这就是所谓的电路模型,我们可以通过分析电路模型来揭示实际电路的性能。在从工作原理上讨论电路问题时,所画电路图一般都是电路模型图,也叫电路原理图。例如图 1.1(b)所示, U_S 和 R_0 分别为电池的电动势和内阻; R 为白炽灯的电阻; S 为开关。

1.2 电路的基本物理量

电路中的主要物理量有电流、电动势、电压、电位、电功率、电能量等,它们的符号及单位列于表 1.1 中。

表 1.1 电路中主要物理量的符号及单位

量的名称	符号	单位名称	单位符号
电流	I	安[培]	A
电动势、电压、电位	$E、U、V$	伏[特]	V
电功率	P	瓦[特]	W
电能量	W	焦[耳]	J

1.2.1 电流

在电场力的作用下,电荷有规则地定向移动,形成电流。正电荷的运动方向规定为电流的实际方向。单位时间内流过导体截面的电荷[量]定义为电流。设在 dt 时间内通过导体截面的电荷为 dq ,则电流表示为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

大小和方向都不随时间变化的电流称为恒定电流,简称直流。直流常用大写字母表示,如 $U、I$,表示电压、电流为恒定量,不随时间变化,一般称为直流电压、直流电流。小写字母 $u、i$ 表示电压、电流随时间变化。

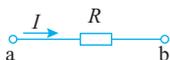


图 1.3 电流方向的表示

在国际单位制(SI)中,在 1s 内通过导体横截面的电荷量为 1C (库[仑])时,其电流为 1A(安[培])。

电流的方向可用箭头表示,也可用字母顺序表示,如图 1.3 所示。用双下标字母表示为 I_{ab} 。

1.2.2 电压

一般用电压来反映电场力做功的能力。电场力把单位正电荷从电场中的 a 点移到 b 点(图 1.4)所做的功称为 a、b 间的电压,用 u_{ab} (U_{ab}) 表示。

习惯上把电位降低的方向作为电压的实际方向,可用“+”“-”符号表示,也可用双下标字母表示,如图 1.4 所示。设正电荷 dq 从 a 点移至 b 点的过程中电场力所做的功为 dW ,则 a、b 间电压为

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1.2)$$

当 $u_{ab} > 0$,则表示正电荷从 a 点移至 b 点时是电场力做功,即这段电路是吸收电能的。在国际单位制中,当电场力把 1C 的正电荷[量]从一点移到另一点所做的功为 1J(焦[耳])时,则这两点间的电压为 1V(伏[特])。

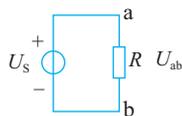


图 1.4 电压的表示

1.2.3 电位

电工技术上,以大地为零电位体,电路如果为了安全而接地的,接地点就是零电位点,是确定电路中其他各点电位的参考点。电路中任意一点的电位就等于该点到参考点的电压。电路中某点的电位用注有该点字母的单下标的电位符号表示。例如图 1.4 中,a 点的电位就用 V_a 表示。

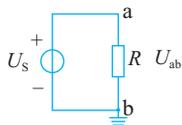


图 1.5 接地点的表示

参考点的电位为零,可用符号“ \ominus ”表示,如图 1.5 所示,b 点接地时, $V_b = 0$ 。如果电路不接地,但又需要分析一些点的电位,可以在电路中任选一点作为参考点,例如电子线路一般都有公共的接壳点,用符号“ \perp ”表示,通常就以这点为参考点,即电路中接壳的端点的电位为零。电位的单位与电压相同,用 V(伏[特])表示。

电路中两点间的电压 U_{ab} 也可用两点间的电位差表示为

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1.3)$$

电路中两点间的电压是不变的,而电位随参考点(零电位点)的不同而不同。

1.2.4 电动势

电动势表征电源中外力(又称为非电场力)做功的能力,它的大小等于外力克服电场力把单位正电荷从负极搬运到正极所做的功,用字母 e (E) 表示。电动势的实际方向是在电源内部从负极指向正极,其单位与电压相同,用 V(伏[特])表示。设在电源内部非电场力把正电荷 dq 从低电位端移至高电位端所做的功为 dW ,则电源的电动势为

$$e(t) = \frac{dW}{dq} \quad (1.4)$$



在图 1.6(a)中,电压 u_{ab} 是电场力把单位正电荷从外电路 a 点移到 b 点所做的功。它的方向由高电位指向低电位,是电压的实际方向。电动势 $e_s(t)$ 是非电场力在电源内部克服电场阻力,把单位正电荷从 b 点移到 a 点所做的功。在图 1.6(b)中,在直流电源开路(没有连接外电路)的情况下,电动势 E 与两端电压 U 大小相等。

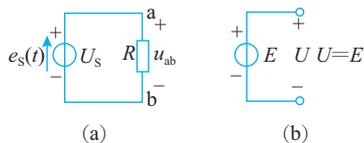


图 1.6 电压与电动势的关系

1.3 电流、电压的参考方向

1.3.1 电流的参考方向

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向,但在分析复杂电路时,经常会遇到某一段电路或某一元件的电流实际方向难以确定的情况。为了解决这一问题,可以先任意假定一电流方向,称为参考方向,并规定:当电流的参考方向与实际方向一致时,代表电流的代数量 I 为正值,如图 1.7(a)所示;当电流的参考方向与实际方向相反时, I 为负值,如图 1.7(b)所示。因此,参考方向也叫作正值方向或正方向。在电路分析计算时,电路图中标注的电流方向都是参考方向,不是实际方向。参考方向可以任意假定,而电流的实际方向需要根据参考方向列出代数方程,求解得到代数量 I 的正负来判断。



图 1.7 电流参考方向与实际方向的关系

1.3.2 电压的参考方向

电路中电压的实际方向规定为从高电位指向低电位。但在复杂电路中,电压的实际方向往往不能预先知道,需要对电路两点间的电压假设一个参考方向,实际方向要结合电压代数量 U 的正负来判断。在图 1.8 中,用“+”“-”号表示电压的实际方向,图 1.8(a)表示电压的参考方向与实际方向一致, U 为正值;图 1.8(b)表示电压的参考方向与实际方向相反, U 为负值。



图 1.8 电压参考方向与实际方向的关系

电路中电流和电压的参考方向在选定时都有任意性,二者彼此独立。但是为了便于分析,常把元件上的电流与电压的参考方向取为一致,称为关联参考方向,如图 1.9(a)所示;



电流与电压参考方向不一致时称为非关联参考方向,如图 1.9(b)所示。

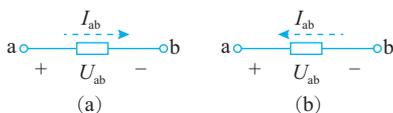


图 1.9 电压和电流的关联、非关联参考方向

1.4 电 功 率

电功率(简称功率)表征电路元件中能量变换的速度,其值等于单位时间(秒)内元件所发出或接收的电能,也就是电场力在单位时间内所做的功。设电场力在 dt 时间内所做的功为 dW ,则功率表示为

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (1.5)$$

在国际单位制中,功率的单位是[瓦特],符号为 W 。

在图 1.10(a)中,电阻两端的电压是 U ,流过的电流是 I ,电压与电流是关联参考方向,则电阻吸收功率为 $P=UI$ 。电阻在 t 时间内所消耗的电能为 $W=Pt$ 。

平时所说消耗 1 度电,就是功率为 1kW 的用电设备在 1h 内消耗的电能,即 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

功率 P 有电源发出的功率或负载接收的功率有两种含义,而且也是代数量。例如,在图 1.10(a)所示电压源对电阻负载供电的电路中,若假定电流 I 的参考方向在电源中和电动势 E 一致,在电阻中和 U 一致,设 I 为“正”值。此时 $P_E=EI$ 指的是电压源 E 发出(或发生)的功率; $P_R=UI=R_L I^2$ 指的是电阻 R_L 吸收(或消耗)的功率, P_E 和 P_R 均为“正”值。

又如图 1.10(b)所示外加电源对蓄电池充电电路(蓄电池电动势 $E_2 < E_1$, R 为调节电流的可变电阻)中,若电流 I 的参考方向规定和 E_1 一致,而和 E_2 相反(E_2 为反电动势),设 I 为“正”值。此时, $P_{E1}=E_1 I > 0$,仍指 E_1 发出的功率,而 $P_{E2}=-E_2 I < 0$,指的是 E_2 吸收的功率,说明此时蓄电池工作于负载状态(充电状态),即电流在蓄电池中是从高电位流向低电位,电能转化为化学能。如果电流 I 的参考方向规定和 E_2 一致,而和 E_1 相反,此时 I 为“负”值, $P_{E1}=-E_1 I > 0$, $P_{E2}=E_2 I < 0$,说明 E_1 为电源、 E_2 为负载的实际情况不变。由此可见,在分析计算情况不能预知的复杂电路时,理想电压源中电流的参考方向,既可按照发出功率(设想为电源)规定和电动势一致,也可按照吸收功率(设想为负载)规定和电动势相反,实际情况是否同设想的一致,取决于发出或吸收功率代数值 $P=EI$ 是“正”还是“负”。



图 1.10 电功率



一般来说,判断电路中某一元件是电源(发出功率)还是负载(吸收功率)的方法如下。

(1) 当电流与电压取关联参考方向时,假定该元件吸收功率,此时功率 $P=UI$ 。

(2) 当电流与电压取非关联参考方向时,假定该元件吸收功率,此时功率 $P=-UI$ 。

如果计算结果 $P>0$,说明该电路元件确实吸收功率,与假设相符,属于负载;反之,如果 $P<0$,则说明该元件发出功率,与假设相反,属于电源。在整个电路中,根据能量守恒定律,各电源发出的功率之和恒等于各负载吸收的功率之和,这种关系叫作功率平衡。

例 1.1 试判断图 1.11 中的元件是发出功率还是吸收功率。

解: 在图 1.11(a)中,电压、电流是关联参考方向,且 $P=UI=10\text{W}>0$,元件吸收功率。

在图 1.11(b)中,电压、电流是非关联参考方向,且 $P=UI=-10\text{W}<0$,元件发出功率。



图 1.11 例 1.1 图

1.5 电阻元件、电感元件与电容元件

电阻元件、电感元件与电容元件都是组成电路模型的理想电路元件。所谓理想,就是突出元件的主要电磁性质,而忽略次要因素。电阻元件具有消耗电能的性质(电阻性),其他电磁性质均可忽略不计。同样,对于电感元件,主要突出其通过电流要产生磁场而储存磁场能量的性质(电感性)。对于电容元件,主要突出其两端加电压要产生电场而储存电场能量的性质(电容性)。电阻是耗能元件,电感和电容是储能元件。

1.5.1 电阻元件

电阻的图形符号如图 1.12 所示,用字母 R 表示。当电阻两端的电压与流过电阻的电流为关联参考方向时,如图 1.12(a)所示,根据欧姆定律电压与电流成正比,有如下关系:

$$u = iR \quad (1.6)$$

当电阻两端的电压与流过电阻的电流为非关联参考方向时,如图 1.12(b)所示,根据欧姆定律电压与电流有如下关系:

$$u = -iR \quad (1.7)$$



图 1.12 电阻两端电压方向与流过电阻的电流方向

在关联参考方向下,如果 $R = \frac{u}{i}$ 是一个常数,则 R 称为线性电阻。线性电阻的伏安特性如图 1.13 所示,是过原点的直线。

式(1.6)两边乘以 i ,得到 $P = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \geq 0$ 。式中, $G = \frac{1}{R}$,称为电导。电阻



总是消耗能量的。在国际单位制中,当电阻两端的电压为 1V,流过电阻的电流为 1A 时,电阻为 1Ω 。电导的单位是 S(西[门子])。当电阻两端的电压与流过电阻的电流不成正比时,伏安特性是曲线,如图 1.14 所示。此时,电阻不是一个常数,随电压、电流变动,称为非线性电阻。

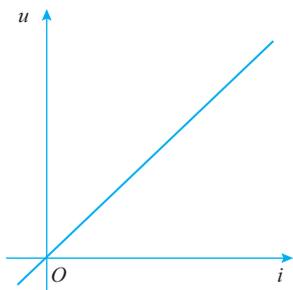


图 1.13 线性电阻的伏安特性

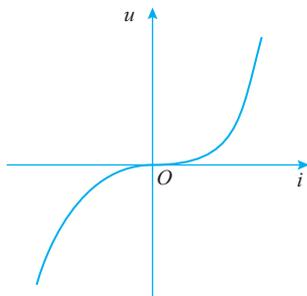


图 1.14 非线性电阻的伏安特性

1.5.2 电感元件

图 1.15 所示为一个电感线圈。假定绕制线圈的导线无电阻,线圈有 N 匝,当线圈通以电流 i ,在线圈内将产生磁通 Φ ,如果磁通 Φ 与线圈各匝都交链,则磁链 $\Psi = N\Phi$ 。

在电路中,一般用图 1.16 表示上述电感线圈,并用字母 L 表示,通常称为电感元件,能够储存磁场能量。 Φ 和 Ψ 都是线圈本身电流产生的,称为自感磁通和自感磁链。

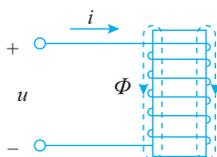


图 1.15 电感线圈

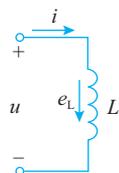


图 1.16 电感元件

电感元件中,电流 i 的参考方向与电源电压 u 的参考方向一致;电流所产生的磁通 Φ 和磁链 Ψ 的参考方向根据电流的参考方向用右手螺旋定则确定;规定感应电动势 e_L 的参考方向与磁通的参考方向符合右手螺旋定则。因此 e_L 的参考方向与电流 i 的参考方向一致。

磁链 Ψ 和电流 i 有如下关系:

$$\Psi = Li \quad (1.8)$$

式中: L 为线圈的自感或电感。

在国际单位制中,磁通和磁链的单位为 Wb(韦[伯]),自感的单位为 H(亨[利])。当 $L = \frac{\Phi}{i}$ 是正实常数时,称为线性电感。

根据楞次定律,有

$$u = -e_L = \frac{d\Phi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1.9)$$



从式(1.9)可以看出,在任意时刻,线性电感元件的电压与该时刻电流的变化率成正比。当电流不随时间变化时(直流电流),电感电压为零,此时电感元件相当于短路。

1.5.3 电容元件

电容元件如图 1.17 所示,电容极板上所储集的电量 q 与其上电压 u 成正比,即

$$C = \frac{q}{u} \quad (1.10)$$

式中, C 称为电容,是电容元件的参数,其单位是 F(法[拉])。当给电容器充上 1V 的电压时,如果极板上储集了 1C 的电量,则该电容器的电容就是 1F。由于法拉的单位太大,工程上多采用微法(μF)或皮法(pF)。 $1\mu\text{F}$ 等于 10^{-6}F , 1pF 等于 10^{-12}F 。

当电压方向如图 1.17 所示,电容极板间电场强度的方向是从上而下,即上极板储集的是正电荷,下极板储集的是等量的负电荷。当极板上的电量 q 或电压 u 发生变化时,在电路中就会引起电流:

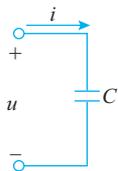


图 1.17 电容元件

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1.11)$$

当电容一定时,电流与电容两端电压的变化率成正比。当电压为直流电压时,电流为零,电容相当于开路。

1.6 电气设备的额定值和电路的几种状态

1.6.1 电气设备的额定值

电气设备(包括电缆、绝缘导线)的导电部分都有一定的电阻,电流流过时,将消耗电能(转变为热能),使电气设备的温度逐渐升高。由于物体的散热量是同它与周围空气的温度差(又叫温升)成正比的,经过一段时间(导线为几分钟,一般电机为一两个小时),散热同发热平衡,温度的升高就稳定下来。电流越大,发热量也越大,稳定的温升也就越高,如果电气设备的温度超过了某一容许的数值,电气设备的绝缘材料便会迅速变脆,寿命缩短,甚至烧毁。因此,根据所用绝缘材料在正常寿命下的允许温升,电气设备都有一个在长期连续运行或规定工作制度下允许通过的最大电流,叫作额定电流,用符号 I_N 表示。

电气设备还根据所用绝缘材料的耐压程度和容许温升等情况,规定正常工作时的电压,叫作额定电压,用符号 U_N 表示。

电气设备的额定电压、额定电流和相应的额定功率 P_N 以及其他规定值(例如以后要讲的电动机的额定转矩等)叫作电气设备的额定值,额定值表明了电气设备的正常工作条件、状态和容量,通常标在设备的铭牌上,在产品说明书中也可以查到。使用电气设备时,一定要注意它的额定值,避免出现不正常的情况和发生事故。

1.6.2 电路的几种状态

电路在使用时,可能出现三种状态,以图 1.18 所示照明电路为例说明如下。

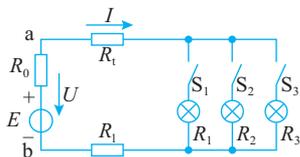


图 1.18 照明供电电路



1. 空载状态(也叫开路状态)

在图 1.18 所示电路中,当所有电灯开关(S_1 、 S_2 、 S_3)都断开时,就处于空载状态。此时,电路中无电流($I=0$),电源不输出功率($P=UI=0$),电源端电压叫作空载电压(也叫作开路电压),它与电源电动势相等($U=U_0=E$)。

2. 负载状态

在图 1.18 所示电路中,当有一些电灯开关接通时,就处于负载状态。设照明负载总等效电阻为 R_L ,一根供电线电阻为 R_1 ,电源内阻为 R_0 ,此时,电路中电流为

$$I = \frac{E}{R_0 + 2R_1 + R_L} \quad (1.12)$$

其数值取决于负载电阻 R_L 。一般用电设备都是并联于供电线上,因此,接入的电灯数量越多,负载电阻 R_L 越小,电路中的电流便越大,负载功率也越大。在电工技术上把这种情况叫作负载增大。显然,负载的大小是指负载电流或功率的大小,而不是负载电阻的大小。当电路中电流达到电源或供电线的额定电流时,工作状态叫作“满载”;超过额定电流时,叫作“过载”;小于额定电流时,叫作“欠载”。如前所述,导线和电气设备的温度升高到稳定值要有一个过程,短时间的少量的过载还是可以的,长时间的过载是不允许的,使用时应当注意。

3. 短路状态

在图 1.18 所示电路中,当两根供电线(通常总是并在一起敷设,以减少所产生的电磁干扰)在某一点由于绝缘损坏而接通时,就处于短路状态,此时,电流不再流过负载,而直接经过短路连接点流回电源,由于在整个回路中只有电源的内阻和部分导线电阻,电流数值很大,叫作短路电流 I_{sc} 。最严重的情况是电源两端被短路(即图 1.18 电路中 a、b 两点接通),短路电流为

$$I_{sc} = \frac{E}{R_0} \quad (1.13)$$

短路电流远远超过电源和导线的额定电流,如不及时切断,将引起剧烈发热而使电源、导线以及电流流过的仪表等设备损坏。为了防止短路引起的事故,通常在电路中接入熔断器或自动断路器,可以在发生短路时迅速切断电路。

1.7 电压源、电流源及其等效变换



电压源、电流源
及其等效变换

一个电源可以用两种不同的电路模型来表示:一种是用电压的形式来表示,称为电压源;另一种是用电流的形式来表示,称为电流源。

1.7.1 电压源

实际电压源的模型由只有电动势 E 的理想电压源和代表内阻为 R_0 的电阻元件串联组成,如图 1.19 所示。

开路时,输出电流 $I=0$,端电压 $U=U_0=E$ 。接入负载 R_L 后,电流和电压如下:

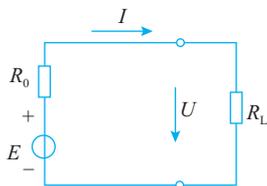


图 1.19 电压源



$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} \quad (1.14)$$

$$U = E - R_0 I \quad (1.15)$$

可见,输出电流取决于负载 R_L ,端电压略小于开路电压 U_0 ,其差值就是串联内阻 R_0 所分电压 $R_0 I$ 。短路时, $U=0$

$$I = I_{SC} = \frac{E}{R_0} \quad (1.16)$$

电压源的上述性能通常用它的端电压 U 随输出电流 I 变化的曲线来表示,如图 1.20(a) 所示,称为电压源的外特性曲线。这个特性曲线是按关系式 $U = E - R_0 I$ 画出的,当 E 和 R_0 数值一定时,是一条直线,它表明随着 I 的增大, U 逐渐减小。电压源的内阻 R_0 一般比较小,在正常工作时,即在电流小于电源额定电流 I_N 的范围内,电压 U 只稍有降低,可以认为基本恒定。

从理论上说,电流如果允许一直增大到短路电流 I_{SC} ,电压源的端电压将降低到零值,整个外特性曲线如图 1.20(b) 所示。应当说明,图 1.20(a) 和图 1.20(b) 中电流坐标轴的比例尺是不同的,图 1.20(b) 中 I 轴单位长度所代表的电流值远比图 1.20(a) 中的大。

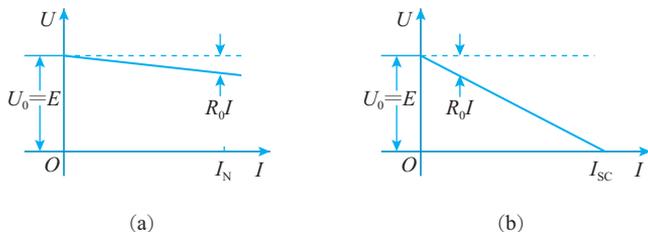


图 1.20 电压源的外特性曲线

理想电压源就是串联内阻 R_0 为 0 的电压源,如图 1.21(a) 所示,其输出端电压 $U = E$ 是恒定的,与输出电流 I 的大小无关,所以又叫作恒压源,它的外特性曲线为 $U = E$ 的水平直线,如图 1.21(b) 所示。理想电压源绝对不允许短路,因为短路时 $I = \infty$ 。

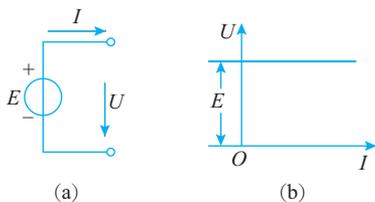


图 1.21 理想电压源及其外特性曲线

1.7.2 电流源

实际电流源是从具有类似性质的电路元件如光电池,加以理想化得到的。它的模型由只有电激流 I_S 的理想电流源和代表内阻为 R'_0 的电阻元件并联组成,如图 1.22 所示。

负载 R_L 短路时,输出电流 $I = I_S$,端电压 $U = 0$,接入负载电阻

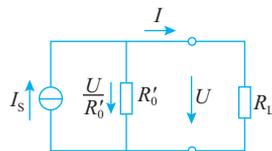


图 1.22 电流源