

高等学校教材



电路分析基础

李辉 范世贵◎编著

西北工业大学出版社

高等学校教材

电路分析基础

李 辉 范世贵 编著



西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是根据教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会制定的“电路分析基础课程教学基本要求”编写的。全书共分9章。内容包括电路的基本概念与定律,电阻电路的等效变换,线性电路基本分析方法,电路基本定理,正弦稳态电路的分析,三相电路,耦合电感与理想变压器,非正弦周期电流电路,一阶动态电路时域分析。

本书可作为高等学校电子信息、通信、自动化、电气工程、计算机等专业本科生的教材,也可供其他专业选用和有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/李辉,范世贵编著. —西安:西北工业大学出版社,2014.5
ISBN 978-7-5612-3970-4

I. ①电… II. ①李…②范… III. ①电路分析—高等学校—教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 090638 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号 邮编 710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:兴平市博闻印务有限公司

开 本:727 mm×960 mm 1/16

印 张:13.25

字 数:221千字

版 次:2014年5月第1版 2014年5月第1次印刷

定 价:28.00元

前 言

电路分析基础课程是电子、通信、计算机、自动控制、信息处理等专业的一门重要技术基础课程,主要研究电路的基本规律与基本分析方法。它是以高等数学、工程数学、物理学为基础,同时又是后续的技术基础课和专业课的基础,因此,在教学中具有承前启后、继往开来的作用。本课程是学生合理、优化知识结构的重要组成部分,在发展智力、培养能力和良好的非智力素质方面,起着极为重要的作用。

本书内容包括电路的基本概念与定律,电阻电路的等效变换,线性电路基本分析方法,电路基本定理,正弦稳态电路的分析,三相电路,耦合电感与理想变压器,非正弦周期电流电路,一阶动态电路时域分析等。

针对本课程概念多、用到的基础知识多、灵活性强等特点,本书突出了例题精选,加强了基本概念类习题。习题包括判断题、选择题和解答题,供自学者参考练习。

本书可作为高等学校电子信息、通信、自动化、电气工程、计算机等专业本科生的教材,也可供其他专业选用和有关工程技术人员参考。

书中不妥之处在所难免,敬请批评指正。

编 者

· 2014 年 2 月

目 录

第 1 章 电路的基本概念与定律	1
1.1 电路与电路模型	1
1.2 电路分析的基本变量	2
1.3 常用的电路元件	5
1.4 电路基本定律	13
习题 1	20
第 2 章 电阻电路的等效变换	24
2.1 电阻的连接及其等效变换	24
2.2 电源的连接及其等效变换	29
2.3 无独立源单口电路及其等效电路	34
2.4 用等效变换法分析计算电路	37
习题 2	39
第 3 章 线性电路基本分析方法	44
3.1 支路电流法	44
3.2 网孔法	47
3.3 节点法	52
习题 3	58
第 4 章 电路基本定理	61
4.1 叠加定理与齐次定理	61
4.2 等效电源定理	64
4.3 最大功率传输定理	69
4.4 互易定理	72
习题 4	76

第 5 章 正弦稳态电路的分析	80
5.1 复数	80
5.2 正弦量及其描述	83
5.3 KCL, KVL 及电路元件伏安关系的相量形式	89
5.4 阻抗与导纳	95
5.5 正弦稳态电路频域分析法	98
5.6 正弦稳态电路的功率	104
5.7 最大功率传输	109
5.8 简单谐振电路	112
习题 5	116
第 6 章 三相电路	122
6.1 三相电路及其连接	122
6.2 对称三相电路计算	126
6.3 不对称三相电路的概念	129
6.4 三相电路的有功功率	130
习题 6	132
第 7 章 耦合电感与理想变压器	134
7.1 耦合电感元件	134
7.2 耦合电感的伏安关系	137
7.3 耦合电感的去耦等效电路	140
7.4 含耦合电感元件电路的分析	143
7.5 理想变压器	144
习题 7	152
第 8 章 非正弦周期电流电路	156
8.1 非正弦周期函数展开成傅里叶级数	157
8.2 非正弦周期电量的有效值	158
8.3 非正弦周期电流电路稳态分析	160
8.4 非正弦周期电流电路的平均功率	165
习题 8	168

第 9 章 一阶动态电路时域分析	171
9.1 常用的电信号	171
9.2 换路定律	175
9.3 电路初始值的求解	177
9.4 线性定常电路的性质	180
9.5 一阶电路时域经典分析法	182
9.6 求一阶电路全响应的三要素法	187
9.7 一阶电路的冲激响应	192
习题 9	194
习题参考答案	197
参考文献	203

第 1 章 电路的基本概念与定律

基本要求

- (1)深刻理解电路的基本概念(电流、电压的参考方向及关联参考方向;电阻元件及其伏安关系;理想电流源、理想电压源的伏安关系;受控电源的定义)。
- (2)会计算电源(含独立源和受控源)、电阻及支路吸收或发出的功率。
- (3)灵活掌握基尔霍夫定律。
- (4)应用基尔霍夫定律计算简单电路的电压、电流及功率。

1.1 电路与电路模型

将电气设备或器件按一定方式连接起来所构成的电流通路称为电路。这里所指的电气设备和器件泛指实际的电路部件,如电阻器、电感器、电容器、晶体管、变压器等。电路的形式多种多样,大到数千千米的输电系统、通信系统,小到几个平方毫米的集成芯片。在电力系统、通信系统、计算机系统、控制系统等领域,都存在着各种各样的电路。但不论电路的具体形式如何,都是随着电流的通过,进行着电能与其他形式的能量的转换,从而实现电能或电信号的产生、传输、变换与使用。

通常,把供给电能的设备称为电源或激励,把用电设备称为负载,把电路中的电压和电流称为响应。电路的另一个作用是信号处理。例如收音机或电视机的调谐电路,就是用来选择所需要的电信号的,所收到的电信号是很微弱的,需要放大电路对其进行放大,然后再通过扬声器将电能转换成声音输出。

电路的具体形式繁多,功能各异,可分为以下几种类型:

- (1)线性电路与非线性电路。若电路的激励与响应之间满足叠加性和齐次性,即称为线性电路;否则,称为非线性电路。
- (2)时不变电路与时变电路。若电路元件的参数不随时间而变化,称为时不变电路或定常电路;否则,称为时变电路。

(3)集中参数电路与分布参数电路。若电路的几何尺寸远远小于电路最高工作频率所对应的波长,称为集中参数电路;否则为分布参数电路。

(4)动态电路与静态电路。含有动态元件(电感元件和电容元件)的电路称为动态电路;否则,为静态电路。

本书只研究线性、时不变、集中参数电路。

在电路分析中,所研究的电路并不是实际电路,而是反映其主要电磁特性的电路模型。电路模型由理想电路元件组成,理想元件又称为模型元件,具有精确的数学定义。

以理想电路元件及其组合作为电路理论的研究对象,即形成了电路模型理论。大量的实践证实,只要电路的模型选取恰当,按照电路模型理论分析计算的结果与实际电路中测量的结果基本上是一致的。

将电路模型画在平面上所形成的图形称为电路图。电路图只反映各电路元件在电路中的作用及其连接关系,并不反映实际设备的内部结构、几何尺寸和相互位置等。

图 1.1 为手电筒的电路图。图中,电池用一个电压源 U_s 和电阻 R_s 的串联组合表示,灯泡用电阻 R_L 表示,开关用 S 表示,连接导线为理想导线。

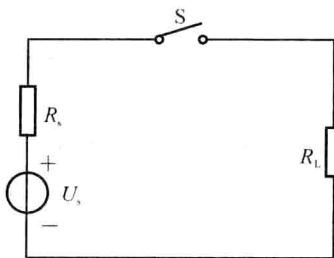


图 1.1 电路图

1.2 电路分析的基本变量

一、电流

在电场作用下,电荷的定向移动称为电流。电流的大小定义为单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.1)$$

式中, Q 为在时间 t 内通过导体横截面的电荷量, 单位为 C(库[仑]); I 为电流, 单位为 A(安[培])。

如果通过导体横截面的电荷量 $q(t)$ 随时间变化, 则电流 $i(t)$ 表示为

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1.2)$$

物理上规定正电荷定向移动的方向为电流的实际方向。但在实际电路分析中, 由于无法确定电路中电流的实际方向, 因此常采用参考正方向, 简称参考方向, 在电路图中用箭头表示, 如图 1.2 所示, 也可以用双下标表示, 如 i_{AB} , 表示其参考方向是由 A 到 B。

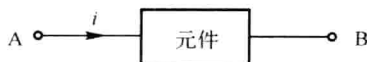


图 1.2 电流的参考方向

参考方向为主观任意设定的电流方向。若在参考方向下计算出的电流为正值, 则说明实际电流方向与参考方向一致; 否则, 实际电流方向与参考方向相反。只有在指定的电流参考方向下, 电流值的正和负才可以反映出电流的实际方向。

二、电压

电压是指电场力把单位电荷从电场中的一点移到另一点所做的功, 即

$$U = \frac{W}{Q} \quad (1.3)$$

式中, W 为电场力移动电荷 Q 所做的功, 单位为 J(焦[耳]); Q 为电荷量; U 为电压, 单位为 V(伏[特])。

如果功 $w(t)$ 随时间变化, 则电压 $u(t)$ 表示为

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \quad (1.4)$$

电压还可以用电位差表示。选电场中某一点作为参考点, 设该点电位为零, 其他点相对于该点的电压称为电位。这样, A, B 两点之间的电压 u_{AB} 即可用 A 点电位 φ_A 和 B 点电位 φ_B 之差表示, 即

$$u_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$$

电压的实际方向规定为从高电位指向低电位, 即电压降低的方向。但在实际电路分析中, 由于无法确定各支路电压的实际方向, 因此要采用参考正方向, 简称参考方向, 参考方向为主观任意设定的方向。在电路图中高电位用

“+”表示，低电位“-”表示，如图 1.3 所示。也可以用双下标表示，如 u_{AB} 表示其参考方向由 A 指向 B。

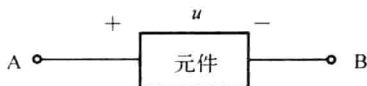


图 1.3 电压的参考方向

电压的参考方向是主观任意设定的。若在参考方向下计算出的电压为正值，则说明其实际方向与参考方向一致；否则，实际方向与参考方向相反。只有在指定的电压参考方向下，电压值的正和负才可以反映出电压的实际方向。

三、关联参考方向

电流与电压都是标量代数量，其参考方向是任意设定的，二者彼此独立，相互无关。但为了分析电路方便起见，总是把某元件或某段电路的电压参考方向和电流参考方向取为关联参考方向，即电流 i 的参考方向是从电压参考方向的正极流入，经过元件，从负极流出，如图 1.4 所示。否则，即为非关联参考方向，如图 1.5 所示。

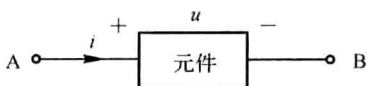


图 1.4 关联参考方向

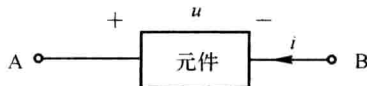


图 1.5 非关联参考方向

采用关联参考方向，可以使电压与电流的参考方向简化，只需标出两者之一即可。

四、功率

功率是电场力在单位时间内所做的功，即

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

式中， $dW(t)$ 为电场力在 dt 时间内所做的功； $p(t)$ 为功率，单位为 W(瓦[特])。

若某段电路的电压为 $u(t)$ ，流过的电流为 $i(t)$ ，则在 $u(t)$ 和 $i(t)$ 为关联参考方向下，电路吸收的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1.6)$$

由于电压、电流为标量代数量,因此功率也为标量代数量。

若根据式(1.6)计算出的功率为正,则表示该段电路实际上是吸收电能的;若功率为负,则表示该段电路实际上是产生或发出电能的。

例 1.1 如图 1.4 所示电路。(1)若 $i=2\text{ A}$, $u=5\text{ V}$,求该元件吸收的功率;(2)若 $i=5\text{ A}$, $u=-10\text{ V}$,求该元件发出的功率;(3)若 $u=5\text{ V}$,该支路发出的功率 $P=10\text{ W}$,求电流 i 的值。

解 (1) $P=ui=5\times 2=10\text{ W}$;

(2) $P=-ui=-(-10)\times 5=50\text{ W}$;

(3) 因为 $P=-ui=-5i=10$,故 $i=-2\text{ A}$ 。

1.3 常用的电路元件

电路元件按照能量特性分为无源元件和有源元件。若元件的端电压 $u(t)$ 和通过的电流 $i(t)$ 为关联参考方向,在任一时刻 t ,其吸收的能量满足

$$w(t) = \int_{-\infty}^t u(t)i(t)dt \geq 0 \quad (1.7)$$

则该元件对外不提供能量,称为无源元件,否则称为有源元件。

电路元件按照其端钮的数量可分为二端元件和多端元件。

一、电阻元件

在由电压 u 、电流 i 组成的直角坐标系下,若二端元件的电压、电流关系是由 $u-i$ 平面上通过坐标原点的曲线来描述的,则这种二端元件称为理想电阻元件,简称电阻元件。这条曲线称为电阻元件的伏安特性曲线。电阻元件的伏安关系或元件约束关系也常用函数关系式表示,即

$$i = f(u) \quad \text{或} \quad u = g(i)$$

电阻元件分为线性电阻和非线性电阻。线性电阻的伏安特性是 $u-i$ 平面上通过坐标原点的直线,而非线性电阻的伏安特性为 $u-i$ 平面上通过坐标原点的曲线。

电阻元件又可分为时变电阻和定常电阻。若电阻的伏安特性曲线不随时间变化,则称为定常电阻或时不变电阻,否则称为时变电阻。线性时不变电阻的伏安特性为 $u-i$ 平面上过坐标原点的一条直线,而线性时变电阻的伏安特性则为 $u-i$ 平面上过坐标原点的一族直线。

线性时不变电阻元件的符号如图 1.6(a) 所示,其伏安特性如图 1.6(b)

所示。其中 R 为伏安曲线的斜率。线性时不变电阻具有如下特点：

- (1) 伏安特性为 $u-i$ 平面上过坐标原点的直线。
- (2) 端电压 u 与通过的电流 i 成正比, 即满足欧姆定律

$$u(t) = Ri(t) \quad (1.8)$$

式中, u 与 i 为关联参考方向。

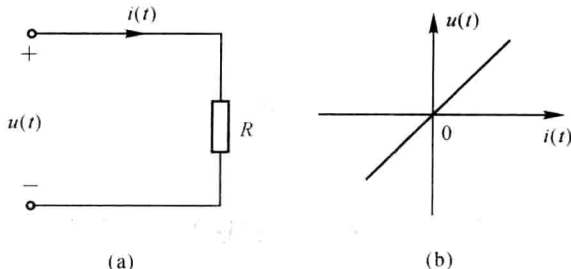


图 1.6 线性时不变电阻及其伏安关系

(3) 电阻元件具有双向性。因伏安特性曲线以原点对称, 说明对不同方向的电流和电压, 其伏安特性完全相同, 故两个端钮没有区别, 可任意连接。

(4) 正电阻元件为无源元件。对线性时不变正电阻, 其吸收的功率 $P = ui = Ri^2 = u^2/R \geq 0$, 可见它满足无源性。

(5) 电阻元件是无记忆元件。由式(1.8)可看出, 电压 $u(t)$ 只取决于同一时刻的电流 $i(t)$ 的值, 与该时刻以前的电流值无关, 称为无记忆元件。

线性时不变电阻还可用电导 G 表示, 定义

$$G = \frac{i(t)}{u(t)} = \frac{1}{R} \quad (1.9)$$

式中, $i(t)$, $u(t)$ 分别为电阻的电流、电压; 电导 G 的单位为 $1/\Omega$, 即西[门子], 用 S 表示。

二、电感元件

电感元件是无源二端元件, 它能存储磁场能量。如图 1.7 所示, 在某种材料的框架上绕制成的螺线管即构成了一个电感元件。当线圈中的电流 $i(t)$ 变化时, 则在线圈中产生的磁通量 φ 变化, 相应的磁链 ψ 也变化, 随之产生了感应电压 $u(t)$ 。

设线圈匝数为 N , 则有

$$\varphi = Ki \quad (1.10)$$

式中, K 是与线圈几何尺寸、形状、线圈芯子材料等有关的因子。对应的磁链为

$$\psi = N\varphi \quad (1.11)$$

磁通 φ 和磁链 ψ 的单位均为 Wb(韦[伯]), 方向由右手螺旋定则确定。因此磁链与电流的关系可由 $\psi-i$ 平面上过坐标原点的曲线来描述。

如果二端元件电流和磁链之间的关系可由 $\psi-i$ 平面上过坐标原点的曲线来描述, 则这种二端元件称为理想电感元件, 简称电感元件, 这条曲线称为电感元件的韦安特性曲线。

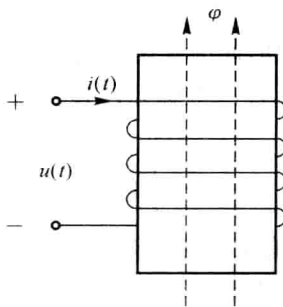


图 1.7 电感电流与磁通

电感元件也分为线性电感和非线性电感、时变电感和时不变电感。本书只讨论线性时不变电感。

线性时不变电感元件的电路符号如图 1.8(a) 所示。主要特点如下:

(1) 韦安特性为 $\psi-i$ 平面上一条过坐标原点的直线, 其斜率为 L , 如图 1.8(b) 所示。

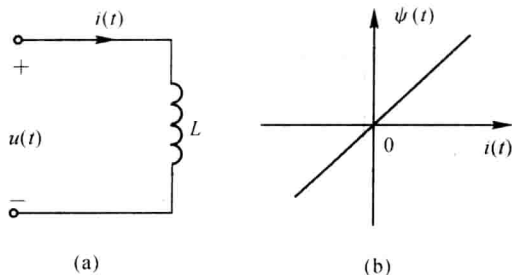


图 1.8 线性电感元件

(2) 磁链 ψ 与电流成正比, 即

$$\psi = Li(t) \quad (1.12)$$

式中, ψ 为磁链 (Wb); i 为电流 (A); L 为电感量, 单位为 H (亨[利])。 L 为韦安曲线的斜率。

(3) 电感元件具有双向性。由韦安特性可知, 电感元件也是一种与端钮接法无关的元件。

(4) 电感元件为动态元件。当电感中的电流随时间变化时, 在 $i(t)$ 和 $u(t)$ 为关联方向下, 由电磁感应定律可知, 其感应电压为

$$u(t) = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di(t)}{dt} \quad (1.13)$$

因此, 电感元件的伏安特性为微分关系, 这说明电感元件是一个动态元件, 即 t 时刻的电压与 t 时刻电流对时间的变化率成正比。

(5) 电感元件为无源元件。电感元件具有储存磁场能量的性质, 其储存的能量为

$$w_L = \frac{1}{2} Li^2 \geq 0 \quad (1.14)$$

式(1.14)说明电感元件具有无源性和储能性。

(6) 电感元件为记忆元件。由式(1.13)可知

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau \quad (1.15)$$

即 t 时刻的电流值与 t 时刻以前的电压值有关, 也就是说电感的电流对电压具有记忆能力。

例 1.2 如图 1.8 所示的电感元件, 其中 $L = 2 \text{ H}$, 电流 $i(t)$ 的波形如图 1.9(a) 所示。(1) 求电压 $u(t)$ 和电感吸收的功率 $p(t)$, 并画出其曲线; (2) 求 $t = 1.5 \text{ s}$ 时的功率值和磁场能量。

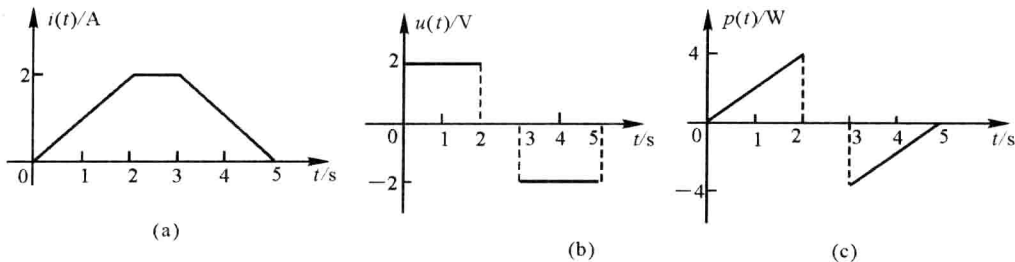


图 1.9

解 (1) $u(t) = L \frac{di(t)}{dt} = 2 \frac{di(t)}{dt}$, 故 $u(t)$ 的波形如图 1.9(b) 所示, $u(t)$ 的

表达式为

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ 2 \text{ V}, & 0 < t \leq 2 \text{ s} \\ 0, & 2 < t \leq 3 \text{ s} \\ -2 \text{ V}, & 3 < t \leq 5 \text{ s} \\ 0, & t > 5 \text{ s} \end{cases}$$

$$p(t) = u(t)i(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ 2t \text{ W}, & 0 < t \leq 2 \text{ s} \\ 0, & 2 < t \leq 3 \text{ s} \\ -2(5-t) \text{ W}, & 3 < t \leq 5 \text{ s} \\ 0, & t > 5 \text{ s} \end{cases}$$

$p(t)$ 的波形如图 1.9(c) 所示。

$$(2) \quad p(1.5 \text{ s}) = u(1.5 \text{ s})i(1.5 \text{ s}) = 3 \text{ W}$$

$$w(1.5 \text{ s}) = \frac{1}{2}L [i(1.5 \text{ s})]^2 = 2.25 \text{ J}$$

三、电容元件

电容元件是无源二端元件,它具有储存电场能量的特性。电容元件一般由用电介质隔开的两个金属板构成。当电容器两个金属板上加电压时,每个金属板上将储存电量 q ,并有

$$q = Cu \quad (1.16)$$

式中, q 为电量,单位为 C; u 为所加电压,单位为 V; C 为与电介质、电容器几何形状、极板面积、距离等因素有关的因子,称为电容量,单位为 F(法[拉])。

电容元件可用 $q-u$ 平面上过坐标原点的曲线来描述,此曲线称为库伏特性曲线。

若二端元件的电量与电压关系可用 $q-u$ 平面上过坐标原点的直线描述,则这种二端元件为线性电容元件,否则为非线性电容元件。

电容元件也可分为时变电容和时不变电容。本书只研究线性时不变电容,其电路符号如图 1.10(a) 所示。主要特点如下:

(1) 库伏特性为 $q-u$ 平面上一条过坐标原点的直线,直线斜率为 C ,如图 1.10(b) 所示。

(2) 电容元件存储的电量 q 与电压 u 呈线性关系,即

$$q = Cu \quad (1.17)$$

式中, C 是一个常量。

(3) 电容元件具有双向性。线性时不变电容元件的库伏特性曲线对坐标原点的对称性, 说明其特性与端钮接法无关。

(4) 电容元件为动态元件。当电量随时间变化时, 在电容元件中便产生变化的电流, 即有

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = C \frac{du(t)}{dt} \quad (1.18)$$

由式(1.18)可见, 电容元件的伏安特性也为微分关系。它反映了电容元件的动态性, 即 t 时刻的电流与 t 时刻电压对时间的变化率成正比。需注意, 式(1.18)中 u 和 i 为关联参考方向。

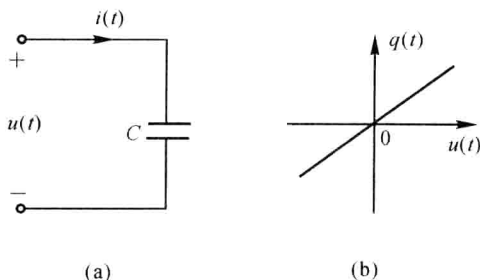


图 1.10 线性电容元件

(5) 电容元件为无源元件。电容元件具有储存电场能量的性质, 其储存的能量为

$$w_C = \frac{1}{2} C u^2 \geq 0 \quad (1.19)$$

因此, 电容元件不仅能储存能量, 而且其本身是一个无源元件。

(6) 电容元件为记忆元件。由式(1.18)可知

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (1.20)$$

即 t 时刻的电压值与 t 时刻以前的电流值有关, 也就是说电容元件的电压对电流具有记忆能力。

四、理想电压源元件

理想电压源是一个有源二端元件。若其端电压在任何情况下都能保持为某给定的时间函数 $u_s(t)$, 而与通过它的电流无关, 则此二端元件称为理想电压源, 其电路符号如图 1.11(a) 所示。图中, u 代表理想电压源的端电压, 它恒