

DIANLU

电 路

吴正国 刘林生 任行素 主编

国防科技大学出版社

序 言

《电路》是电类专业的一门重要专业基础课。为适应军队院校教育多专业、多层次的特点,提高《电路》课程的教学质量,我们在多年教学经验的基础上编写了此教材。此教材的内容满足国家教委工科电工课程教学指导委员会于1986年制订的“高等工业学校电路课程的教学基本要求”,也符合总参军校部制订的“军队院校工科本科电路课程教学基本要求”,适用于电类专业大学本科,兼顾大专。

本教材在内容安排上有如下特点:

(一) 突出基本概念,充实了基本的和传统的电路分析方法。对于实际工程计算中常用到的电阻电路分析和正弦交流电路分析安排了较多的章节和习题,对电路定理单独设章讲授。

(二) 保证了适当的深度和广度,具有一定的先进性。教材中,除非线性电路分析、网络图论、状态方程等近代内容都占有一定份量外,对电路设计、开关电容电路等新内容也作了简要介绍。为有能力的读者进一步学习近代电路理论打下了一个较好的基础。

(三) 在保证基本内容和传统内容有严密的知识体系的前提下,对于近代内容采用单独成章成节的方法编写,以利于不同专业、不同层次的读者选用。

(四) 为适当照顾无线电专业的需要,充实了互感耦合、谐振电路等章节,并将磁路与铁芯线圈编入第十四章。

本书由武汉地区军事院校协作中心组织海军工程学院、第二炮兵指挥学院、通信指挥学院、信阳陆军学院、空军雷达学院、空军第一航空技术专科学校等六所院校联合编写。由吴正国、刘林生、任行素三位同志任主编。参加编写的有吴正国(十、十三章)、刘林生(四、五、六章)、任行素(二、三章)、金茂森(十二、十四章)、乔寅礼(一、七章)、王新兰(八章)、沈阳(九章)、陆家榆(十一章)等同志。

我们热忱希望读者对本书多提批评意见和建议。

编 者

一九九〇年十月

目 录

第一章 电路模型与电路基本定律

§ 1-1 电路的作用和电路模型	(1)
§ 1-2 电路中的基本物理量	(2)
§ 1-3 功率	(4)
§ 1-4 线性非时变集总参数电路	(5)
§ 1-5 电阻元件	(7)
§ 1-6 电容元件	(9)
§ 1-7 电感元件	(11)
§ 1-8 独立电源	(14)
§ 1-9 受控源	(16)
§ 1-10 运算放大器	(17)
§ 1-11 基尔霍夫定律	(19)
习 题	(23)

第二章 电阻电路分析

§ 2-1 电阻的串联、并联和混联	(27)
§ 2-2 平衡电桥电路	(30)
§ 2-3 电阻的Y形联接与△形联接的等效变换	(33)
§ 2-4 电压源、电流源的串联和并联	(36)
§ 2-5 电源的等效变换	(37)
§ 2-6 支路法	(39)
§ 2-7 回路法	(44)
§ 2-8 节点法	(49)
§ 2-9 含受控源的电阻电路	(56)
§ 2-10 含运算放大器的简单电路	(59)
§ 2-11 非线性电阻电路	(64)
习 题	(75)

第三章 电路定理

§ 3-1 叠加定理	(83)
§ 3-2 替代定理	(88)

§ 3-3 戴维南定理和诺顿定理·····	(90)
§ 3-4 对偶原理·····	(98)
习 题·····	(100)
第四章 正弦交流电路	
§ 4-1 正弦量的基本概念·····	(103)
§ 4-2 相 量·····	(107)
§ 4-3 电路定律和元件伏安特性的相量形式·····	(112)
§ 4-4 阻抗与导纳·····	(115)
§ 4-5 正弦交流电路的分析·····	(121)
§ 4-6 正弦交流电路的功率·····	(129)
§ 4-7 最大功率传输·····	(136)
习 题·····	(137)
第五章 耦合电感和理想变压器	
§ 5-1 耦合电感的伏安特性·····	(142)
§ 5-2 含耦合电感电路的分析·····	(145)
§ 5-3 空心变压器·····	(149)
§ 5-4 理想变压器·····	(152)
§ 5-5 变压器的电路模型·····	(157)
习 题·····	(160)
第六章 谐振电路	
§ 6-1 串联谐振电路·····	(164)
§ 6-2 并联谐振电路·····	(169)
§ 6-3 双电感、双电容并联谐振电路·····	(174)
§ 6-4 互感耦合谐振电路·····	(177)
习 题·····	(185)
第七章 三相电路	
§ 7-1 对称三相电路·····	(188)
§ 7-2 对称三相电路的计算·····	(193)
§ 7-3 不对称三相电路·····	(197)
§ 7-4 三相电路的功率·····	(201)
习 题·····	(205)
第八章 非正弦周期电流电路	
§ 8-1 傅里叶级数·····	(208)

§ 8-2 周期函数的频谱	(216)
§ 8-3 有效值与平均值	(218)
§ 8-4 非正弦周期电流电路的计算	(221)
§ 8-5 非正弦周期电流电路中的功率	(224)
§ 8-6 对称三相非正弦周期电流电路	(226)
习 题	(228)
第九章 动态电路的时域分析	
§ 9-1 从时域分析概述	(235)
§ 9-2 一阶电路的零输入响应	(242)
§ 9-3 一阶电路的零状态响应	(248)
§ 9-4 一阶电路的全响应	(256)
§ 9-5 一阶电路分析的三要素法	(262)
§ 9-6 一阶电路的冲激响应	(267)
§ 9-7 任意激励下的零状态响应——卷积积分	(278)
§ 9-8 二阶电路的零输入响应	(283)
§ 9-9 二阶电路的零状态响应与完全响应	(292)
习 题	(296)
第十章 动态电路的复频域分析	
§ 10-1 从傅里叶变换到拉普拉斯变换	(309)
§ 10-2 拉普拉斯变换的基本性质	(313)
§ 10-3 拉普拉斯反变换	(316)
§ 10-4 应用拉普拉斯变换分析线性非时变电路	(320)
§ 10-5 网络函数	(329)
§ 10-6 网络函数的零点和极点	(333)
§ 10-7 电路的方框图	(340)
习 题	(344)
第十一章 网络图论与网络方程	
§ 11-1 图的基本概念	(350)
§ 11-2 网络图的矩阵描述	(352)
§ 11-3 KCL、KVL方程的矩阵形式	(356)
§ 11-4 VCR方程的矩阵形式	(360)
§ 11-5 节点电压方程的矩阵形式	(365)
§ 11-6 改进的节点法	(372)
§ 11-7 回路电流方程的矩阵形式	(375)
§ 11-8 割集电压方程的矩阵形式	(377)

§ 11-9 状态方程·····	(380)
§ 11-10 特勒根定理·····	(384)
§ 11-11 互易定理·····	(386)
习 题·····	(389)

第十二章 二端口网络

§ 12-1 二端口网络的方程与参数·····	(393)
§ 12-2 二端口网络的等效电路·····	(399)
§ 12-3 二端口网络的联接·····	(401)
§ 12-4 接负载的二端口网络·····	(406)
§ 12-5 几种常用的二端口网络·····	(415)
附 传输电平·····	(420)
习 题·····	(423)

第十三章 电路设计

§ 13-1 电路设计的基本概念·····	(428)
§ 13-2 RC 有源滤波器的设计·····	(432)
§ 13-3 开关电容电路·····	(439)
§ 13-4 开关电容滤波器设计简介·····	(441)
习 题·····	(448)

第十四章 磁路及带铁心的电路

§ 14-1 磁场和磁路·····	(450)
§ 14-2 磁路的基本概念和基本定律·····	(452)
§ 14-3 铁磁性物质的特性·····	(456)
§ 14-4 直流磁路的计算·····	(459)
§ 14-5 交流磁路·····	(466)
附 $W = \oint H dB \propto$ 回路面积的证明·····	(467)
附 公式 (14-13) 之推导·····	(469)
附 受控铁心线圈·····	(475)
习 题·····	(478)

第一章 电路模型与电路基本定律

【内容提要】 本章介绍组成线性非时变集总参数电路模型的理想电路元件（包括电阻、电感、电容、独立电源、受控源以及运算放大器），电路的基本物理量和电路的基本定律。在介绍电路的基本物理量时，重点在于引入参考方向的概念。

§ 1-1 电路的作用和电路模型

电路也称电网络，是电流的通路，它由一些电器元件相互联接而构成。电路的结构形式和所能完成的任务多种多样，但按其作用不同可以归结为两大类，一类是实现电能的传输和转换，如供电电路；另一类是传递和处理信号，如测量炉温的热电偶温度计，收音机，电视机等电路。不论电路的结构多么复杂，它们都由三大部分组成：电源或信号源，中间环节和负载。在传输和转换电能的电路里，电源是发电机或电池等，它们把其他形式的能量转换成电能。负载是电动机、电灯或电热器等，它们把电能转换成其他形式的能量。中间环节是联接电源和负载的导线、开关或其他控制设备等。在传递和处理信号的电路中，信号源是热电偶、接收天线等，它们把温度、电磁波等信息转变成电压信号，而后通过中间环节（放大、调谐、检波、变频等各种电路）对信号进行传递和处理，最后送到负载（如毫伏计、扬声器、显像管等）还原为原始信息。

组成电路的实际部件很复杂，几何尺寸也很悬殊，但是从电路计算的角度看，人们所关心的实际器件的电磁特性主要是电能的损耗，电场能和磁场能的储存等。电和磁是互相联系不可分割的。有电流流过导体就会有电能转换成热能损耗掉，有电流就会有磁场能储存，有电压就会有电场能储存。但是在一个器件上各种效应表现的强弱程度并不相同。如果一个器件的主要效应表现为电能损耗，就可以用电阻元件来表示；对于主要效应表现为磁场能量储存的器件，可以用电感元件来表示；而对于主要效应表现为电场能量储存的器件，则可以用电容元件来表示。因此，电阻元件、电感元件和电容元件都是抽象化了的理想电路元件。

在电路理论中，将用各种理想电路元件（以后简称电路元件或元件）组合成电路模型来模拟实际电路。联接导线被理想化为没有电阻，周围不存在磁场和电场的理想导线。例如图1-1a所示的简单的实际电路，电源是两节电池，负载是一个灯泡，中间环节是三根导线和一个单刀单掷开关。用电压源 U_s 和内电阻 R_s 串联表示电池，用电阻 R 表示灯泡，再用理想导线和开关将它们联接起来，这便构成了电路模型 b。



图 1-1 电路和电路模型

§ 1-2 电路中的基本物理量

一、电 流

电流是电荷有规则的定向运动而形成的。单位时间内通过某一导体横截面的电荷净流量定义为电流强度，简称电流。其物理模型如图1-2所示。

设在极短的时间 dt 内通过导体横截面的微小电荷量为 dq ，则电流为

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

式(1-1)表示电流是时间的函数。

如果电流不随时间而变化，即 $dq/dt = \text{常数}$ ，则这种电流称为恒定电流，简称直流。直流用大写字母 I 表示，即

$$I = \frac{q}{t}$$

式中 q 是在 t 秒时间内通过导体横截面 s 的电荷量。

习惯规定，把正电荷运动方向作为电流的实际方向。但是在分析电路时，有时对某段电路中电流的实际方向是很难预先判定的，有时电流的实际方向是不断变化着的，因此，有必要引入电流“参考方向”的概念。

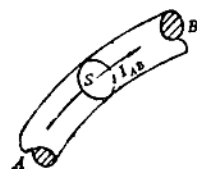


图 1-2 导体中的电流

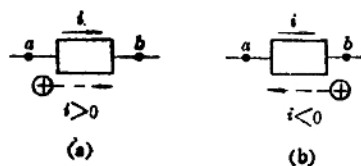


图 1-3 电流方向

参考方向（又称正方向）是任意假定的。在电路图中以带箭头的实线表示电流参考方向，如图1-3所示。参考方向选定后，电流就成为代数量。当参考方向与电流的实际方向（图1-3中带箭头的虚线）一致时，电流取正值（ $i > 0$ ）；反之，则电流取负值（ $i < 0$ ）。

电流的参考方向也可以用双下标文字符号表示, 如 i_{ab} 或 i_{ba} , $i_{ab} = -i_{ba}$ 。

我国法定计量单位是国际单位制(SI)。在国际单位制中, 电流的单位是安培(A)。

二、电压与电位

如果电荷在电场的作用下作定向运动, 那么电荷的这种运动过程就是电场对电荷做功的物理过程。电场力把单位正电荷从电路中某个二端元件的 a 端移动到 b 端所做的功, 叫做 ab 两点间的电压, 用 u_{ab} 表示。即

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

式中 dw 为电场力所做的功。

如果两点间的电压是不随时间而变化的, 则称为恒定电压, 或直流电压, 用大写字母 U 表示。

国际单位制(SI)中, 电压的单位是伏特(V)。

如同电流一样, 在分析电路时, 也要预先假定电压的参考方向。上述 u_{ab} 就是用双下标表示的参考方向, 在电路图中常用带箭头的实线或者用参考极性“+”、“-”表示, 参考方向如图1-4所示。参考方向一旦选定, 电压也就成为代数量, 有正负之分。当参考方向与实际方向(图1-4中虚线所示)一致时, u 为正值; 相反时, u 为负值。若选定的参考方向为由 b 指向 a , 则 $u_{ba} = -u_{ab}$ 。

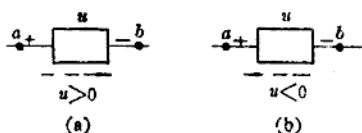


图 1-4 电压的参考方向



图 1-5 电压与电流的关联参考方向

电压的参考方向是可以任意假定的。如果一段电路或一个元件上的电压参考方向与电流参考方向取得一致, (如图1-5), 则将电压与电流的这种参考方向称为关联参考方向。

在分析电路时, 为了方便, 常选定某一点作为参考点, 用符号“⊥”表示, 而把电路中任意点 a 到参考点的电压称为 a 点的电位, 记为 U_a 。在此规定下, 参考点的电位为零。因此, 参考点又称零电位点。由以上定义和(1-2)式可知, 两点间的电压就等于两点间的电位差。

电位的单位也是伏特(V)。电位也是一个代数量, 高于参考点的电位取正值, 低于参考点的电位取负值。

在图1-6中, 电压 $U_{ab}=10V$, $U_{bc}=5V$ 。若选定 b 点为参考点, 即 $U_b=0$, 则 a 点电位 $U_a=10V$, c 点的电位 $U_c=-5V$; 若选定 c 点为参考点, 则 $U_c=0$, 而 $U_a=15V$, $U_b=5V$ 。但是电压 U_{ab} 仍然是 $10V$, U_{bc} 仍然是 $5V$ 。因此, 参考点选得

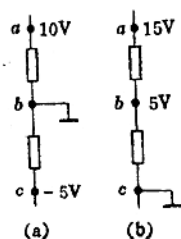


图 1-6 电路中各点电位

不同, 各点电位值将随之而改变, 但是任意两点间的电压值是不变的。亦即, 电路中任意两点间的电压具有单值性。

三、磁通与磁通链

电流和磁场是不可分割的。任何运动电荷或电流的周围都存在磁场。磁场的强弱用磁感应强度向量 B 来表示, 在国际单位制中, B 的单位是特斯拉 (T)。

磁场可以形象化的用磁力线来表示。磁场中, 穿过与磁感应强度向量 B 相垂直的单位面积的磁力线数就规定为等于该点的磁感应强度 B 的数值, B 的方向是通过该点的磁力线的切线方向。磁力线的方向与产生磁场的电流的方向符合右手螺旋定则。磁场是一种涡旋场, 每一条磁力线都是环绕电流的无头无尾的闭合线 (图 1-7)。

通过一界定曲面的磁力线数, 称为通过该曲面的磁通量, 用 ϕ 表示。

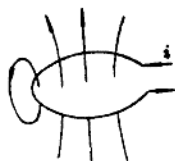


图 1-7 电流的磁场

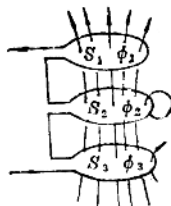


图 1-8 磁通与磁通链

$$\phi = \int_S B dS$$

曲面 S 的正法线方向就是 ϕ 的参考方向。

ϕ 的单位为韦伯 (Wb), $1\text{Wb} = 1\text{T} \times 1\text{m}^2$, 因此, $1\text{T} = 1\text{Wb}/1\text{m}^2$ 。由法拉第电磁感应定律又知道, $1\text{Wb} = 1\text{V} \times 1\text{S}$ 。

多匝线圈所产生的磁通的总和称为磁通链, 用 Ψ 表示。在图 1-8 中

$$\Psi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3$$

如果 N 匝线圈中的磁通都等于 ϕ , 则它们产生的磁通链就等于磁通乘以匝数, 即

$$\Psi = \phi N \quad (1-3)$$

磁通链的单位也是韦伯 (Wb)。

电流与之产生的磁场之间的量值关系由安培环路定律确立:

$$\oint H_l dL = \sum I$$

H 称为磁场强度, 单位是安培/米 (A/m)。

$$B = \mu H$$

μ 是磁介质的磁导率, 单位是亨/米 (H/m)。

§ 1-3 功 率

在一个电路元件中, 若正电荷是从电压 “+” 极移到电压 “-” 极, 电场力所做的

功为正值, 元件吸收电能。相反, 若正电荷是从电压“-”极移到电压“+”极, 说明元件向外提供电能。

由式(1-2)可知, 从 t_0 到 t 时间内, 元件吸收的电能 w 为

$$w = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq$$

由式(1-1)知 $dq = idt$, 所以在电流和电压为关联参考方向下有

$$w = \int_{t_0}^t u idt$$

式中 u , i 都是时间的函数, 并且是代数量, 因此, w 也是时间的函数, 也是代数量。

电能对时间的变化率叫电功率, 简称功率。

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

在直流的情况下,

$$P = UI \quad (1-5)$$

(1-4)、(1-5)两式是在电流和电压取关联参考方向如图1-9(a)所示的情况下导出的。因为 U 、 I 都是代数量, 所以 P 也有正负, 当 $P > 0$ 时元件吸收功率, $P < 0$ 时元件发出功率。

在电流、电压取非关联参考方向时, 如图1-9b所示, 公式(1-4)、(1-5)应当改写为

$$p = -ui \quad (1-6)$$

和

$$P = -UI \quad (1-7)$$

在这种情况下, 计算出的 $P > 0$ 时, 元件也是吸收功率, $P < 0$ 时, 元件还是发出功率。

在国际单位制(SI)中, 能量的单位是焦耳(J), 功率的单位是瓦特, 简称瓦(W)。



图 1-9 功 率

以上关于功率的讨论, 不仅适用于一个元件, 而且适用于任何一段电路。

§ 1-4 线性非时变集总参数电路

一、线性特性

线性非时变集总参数电路中的电路元件都是线性元件, 即具有线性特性的元件。因此, 需要先说明什么是线性特性。如果函数 $y=f(x)$ 的图象是 $y-x$ 特性平面上的一条通过原点的直线, 那么, 就说函数 $y=f(x)$ 是线性函数。如图1-10中, $y=x \lg \theta$, 便是一

个线性函数。

线性函数具有如下特性：

(1) 可加性

若 $x=x_1$ 时, $y=y_1$; $x=x_2$ 时, $y=y_2$. 而当 $x=x_1+x_2$ 时, $y=y_1+y_2$. 或者说, 一般的有

$$f(x_1+x_2)=f(x_1)+f(x_2) \quad (1-8)$$

这种性质称为函数的可加性。

(2) 齐次性 (均匀性)

若 $x=x_1$ 时, $y=y_1$; $x=ax_1$ 时, (a 为任一标量), $y=ay_1$. 即一般的有

$$f(ax)=af(x) \quad (1-9)$$

这种性质称为函数的齐次性 (均匀性)。

综合 (1-8) 和 (1-9) 两式, 可得

$$f(a_1x_1+a_2x_2)=a_1f(x_1)+a_2f(x_2) \quad (1-10)$$

这便是线性特性, 即齐次可加性。具有线性特性的函数就是线性函数。必须强调指出, 只有同时具有可加性和齐次性才是线性函数。

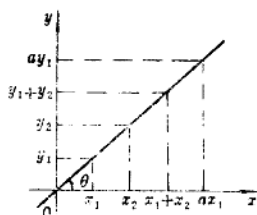


图 1-10 齐次可加性

二、非时变特性

线性非时变集总参数电路中的元件都具有非时变特性。所谓非时变特性, 是指函数 $y=f(x)$ 在 $y-x$ 平面上的特性曲线的位置不随时间而改变。变量 y 和 x 的对应关系即对应规则也不随时间而改变。如果变量 x 代表电路中的激励或输入, 变量 y 代表电路中的响应或输出, 并假定它们都是时间 t 的函数, 即 $x(t)$ 和 $y(t)$, 那么, 非时变特性指的就是, 对于同一个激励波形, 不论何时加到电路或元件上, 所引起的响应的波形都是相同的。例如图 1-11 中所示的那样, 若激励的波形延迟一段时间 τ , 则响应的波形也只是延迟了一段时间 τ 而已。

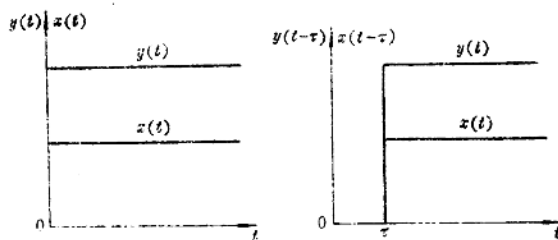


图 1-11 非时变特性

三、集总参数电路

导体流过电流就会有热损耗; 凡有电流, 就会有磁场伴随产生; 凡有电压, 就会有电场存在。因此, 电路中电阻、电感、电容各种参数是到处分布着的。但是, 当构成电路的器件以及电路本身的尺寸远小于电路工作时的电磁波的波长时, 可以认为电磁波通

过电路是在瞬间完成的。电磁波的传播速度等于光速，而光在真空中的传播速度为 $C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。以市电频率 $f = 50 \text{ Hz}$ 的正弦波为例，对应的空间波长为 $\lambda = CT = C(1/f) = 6000 \text{ km}$ 。电路理论中所研究的电路尺寸一般都远远小于此数目。因此，电磁波在电路中距离最远的两点之间传播所需时间造成的影响可以忽略不计。在这种假定条件下，可以证明在任意时刻流入各器件任一端子的电流和任意两个端子之间的电压都将是单值的量。在这种近似条件下，我们用足以反映其电磁性质，但几何尺寸又可忽略不计的理想电路元件或它们的组合来模拟实际电路中的器件。这种理想元件称为集总元件或集总参数元件。

特别需要说明的是，如果电路中有多种频率，则应以对应于最高频率的波长为标准进行比较。例如 1 km 的距离，对应于 6000 km 的波长可以忽略不计，但对于计算机电路，频率高达 $5 \times 10^8 \text{ Hz}$ ，波长只有 0.6 m ，那就是一个很大很大的距离了。因此，电路的几何尺寸只有在比起电路中的电流可能具有的最高频率所对应的波长小到可以忽略不计，才可以用一些几何尺寸可以忽略不计的理想元件，即集总参数元件或它们的组合来模拟。

具有线性非时变集总参数元件，并用理想导线联接的电路模型称为线性非时变集总参数电路。

§ 1-5 电 阻 元 件

一、线性电阻元件

由 $u-i$ 平面上的一条斜率不随时间变化的、通过原点的直线所确定的元件（参数）称为线性非时变电阻元件（简称电阻）。线性电阻元件的伏安特性曲线如图1-12所示。它在电路中的图形符号如图1-13所示。

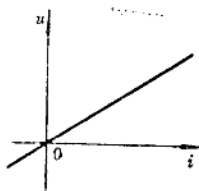


图 1-12 线性电阻元件的伏安关系

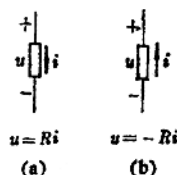


图 1-13 线性电阻上的 u, i 参考方向

线性电阻元件是双向型的元件，改变端口电压极性时，电流方向同时改变，但端口的伏安特性不变，即元件的伏安特性曲线是关于坐标原点对称的。

线性电阻是一种无源理想元件，在任何时刻它两端的电压与通过的电流的关系都服从欧姆定律。在电压和电流为关联参考方向时，电压和电流的关系为

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

式中 R 称为元件的电阻，它是联系电阻元件上电压和电流的一个参数。 R 是正常数，

单位是欧姆 (Ω), 简称欧。

电阻元件参数也可以用电导 G 来表示, $G = 1/R$, 此时式 (1-11) 可改写为

$$i = Gu$$

电导 G 的单位为西门子 (S), 简称西。

若电阻上的电压参考方向与电流参考方向相反 (见图 1-13b), 则欧姆定律应当改写为

$$u = - Ri$$

和

$$i = - Gu$$

这里再次显示参考方向在电路计算中的重要作用。规定的参考方向不同, 同一物理过程的数学表达式将不同, 电路理论中所有公式必须与参考方向配套使用。

由式 (1-11) 可知, 任何时刻线性电阻上的电压 (或电流) 完全取决于同一时刻的电流 (或电压), 而与该时刻以前的电流 (或电压) 值无关。因此, 电阻是一种 “无记忆” 元件。

在电压、电流为关联参考方向的情况下, 电阻元件上吸收的功率

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2$$

电阻 R 、电导 G 是正常数, 故功率 p 恒为正值。在电压、电流参考方向相反的情况下, 功率表示为

$$p = - ui$$

由于这时有 $u = - Ri$ 或 $i = - Gu$, 因此, 功率 p 仍然为正值。这说明, 电阻元件任何时刻都不可能输出电能, 它只是吸收电能, 并全部转换为其他非电能被消耗掉或作为其他用途。所以, 线性电阻元件不仅是无源元件, 而且还是耗能元件。

如果二端元件的伏安特性曲线是斜率随时间而改变的通过坐标原点的直线, 则该二端元件便是线性时变电阻元件。如果某一时刻 t , 直线的斜率为 $R(t)$, 则在关联参考方向下有

$$u(t) = R(t)i(t)$$

或

$$i(t) = G(t)u(t).$$

二、非线性电阻元件

非线性电阻元件的伏安特性曲线不是通过原点的直线, 所以元件上电压与电流之间不服从欧姆定律, 而元件的电阻将随电压或电流的改变而改变。图 1-14 所示是几种典型

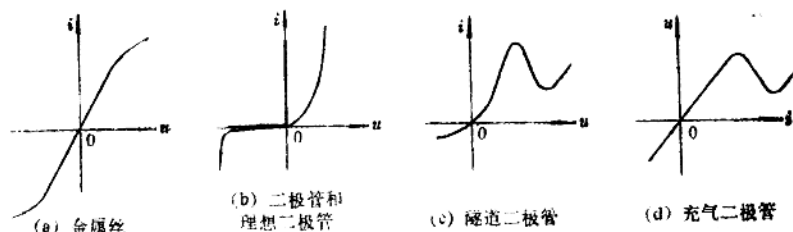


图 1-14 非线性电阻元件的伏安特性

的非线性电阻元件的伏安特性曲线。曲线 a, 对坐标原点对称, 且为单调增长, 这种元件是双向型的。曲线 b、c、d 都不是对原点对称的, 这说明, 这些元件对于不同方向的电流或不同极性的电压, 其端口特性是不同的, 即为非双向型的。最为特殊的是理想二极管, 当电流为正方向时, 端电压为零, 称正向导通; 当电压反向时, 电流为零, 称为反向截止, 这是单向型的非线性电阻元件。使用非双向型和单向型的非线性电阻元件时, 必须认清它的两个端子的极性。

对于曲线 c, 每一个电压值都有一个电流值相对应, 即电流是电压的单值函数, $i=f(u)$ 。因此, 称为压控型的。而对于曲线 d, 每一个电流值都有一个电压值相对应, 即电压是电流的单值函数, $u=f(i)$ 。因此, 称为流控型的。曲线 a 既属于压控型又属流控型, 曲线 b 则既非压控型亦非流控型。

非线性电阻元件也有非时变和时变之分。以上列举的都是非线性非时变电阻元件。

§ 1-6 电 容 元 件

电容器在工程上应用广泛, 品种和规格很多, 外形及尺寸差异悬殊, 但其结构和原理, 都是由两块金属极板间隔以某种介质 (空气、绝缘纸、云母、电解质等) 所组成。由于介质不导电, 加上电源后, 就能在两块极板上分别聚集起等量的异性电荷, 在介质中建立起电场, 并储存电场能量。撤除电源后, 极板上的电荷仍能相互吸引, 但又为介质阻隔而不能中和, 使这种电荷能长久地聚集下去。因此, 电容器是一种能够储存电场能量的器件。

实际电容器, 当电压变化时, 在介质中往往引起一定的能量损耗 (称介质损耗), 而且介质不可能完全绝缘, 有漏电现象。但是, 介质损耗和漏电流一般都很微弱, 可以忽略不计。

电容元件是实际电容器的理想化模型。如果一个二端元件的特性可以用 $q-u$ 平面上的一条曲线来描述, 则该二端元件称为电容元件, 相应的特性称为库伏特性。根据库伏特性曲线的形状和位置是否随时间变化, 电容元件也有线性非线性, 时变非时变之分。如果库伏特性曲线是通过原点的直线, 则称为线性非时变电容元件, 其库伏特性曲线和图形符号如图 1-15 所示。

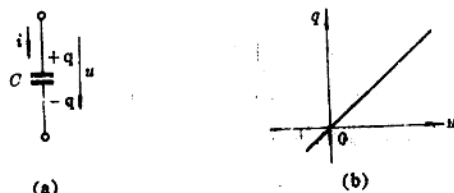


图 1-15 线性电容元件的符号及 $q-u$ 特性

线性非时变电容元件上所储存的电荷 q 与两极板间电压 u 的比值是一个正实常数, 即

$$C = \frac{q}{u}$$

C 为电容元件的电容量 (简称电容), 在国际单位制中, C 的单位为法拉 (F)。对于实际的电容器, 法拉显得太大, 因此常用微法 (μF) 和皮法 (pF)。 $1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$, $1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$ 。

设电容元件上的电压参考方向为正极板指向负极板。在此假定下正极板上的电荷 q 与电容元件两端的电压 u 有以下关系

$$q = Cu \quad (1-12)$$

电容元件上的电压变化时, 极板上的电荷随之改变, 于是在电容支路中就出现电流。如果规定电流参考方向是流入正极板的, 即与电压 u 取关联参考方向, 则电流

$$i = dq/dt$$

将式 (1-12) 代入, 得

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1-13)$$

上式表明, 线性非时变电容元件上的电流与电压的变化率成正比。如果电压不随时间变化, 则电容元件的电流为零, 这时电容元件就相当于开路。因此, 电容元件有隔断直流的作用。

在电压与电流取关联参考方向的情况下, 因为 $i = dq/dt$, 所以电容元件上电荷 q 与电流 i 的积分关系可以写作

$$\begin{aligned} \int_{q(t_0)}^{q(t)} dq &= \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \\ q(t) - q(t_0) &= \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \\ q(t) &= q(t_0) + \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \end{aligned}$$

式中 t_0 为一个指定的时间, 即计时起点。如果取 $t_0 = -\infty$, 而且电容元件在该时刻是不带电荷的, 则有

$$\begin{aligned} q(t) &= \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^0 i(\xi) d\xi + \int_0^t i(\xi) d\xi \\ &= q(0) + \int_0^t i(\xi) d\xi \end{aligned}$$

这就相当于将计时起点选为 $t_0 = 0$, 而在该时刻电容元件上已经充有电荷 $q(0)$ 。

对于线性电容元件, 两端电压为

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{C} q(t) = \frac{1}{C} q(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \\ &= u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \end{aligned}$$

式中 $u(t_0) = (1/C)q(t_0)$ 是在计时起点 t_0 时刻电容元件两端的电压。如果取 $t_0 = 0$, 则有

$$u(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi \quad (1-14)$$

(1-14) 式说明, 电容元件在任何时刻 (t) 的电压 $u(t)$ 都与初始电压 $u(0)$ 以及从 0 到 t 的所有时刻的电流值有关。因此, 电容元件是一种“记忆”元件。

在电压与电流为关联参考方向时, 电容元件吸收的功率为

$$p = ui$$

从 t_0 到 t 一段时间内, 电容元件所吸收的能量为

$$\begin{aligned} W_c &= \int_{t_0}^t p d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) C \frac{du(\xi)}{d\xi} d\xi \\ &= C \int_{u(t_0)}^{u(t)} u(\xi) du(\xi) \\ &= \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(t_0) \end{aligned}$$

若选取的 t_0 为电压等于零的时刻, 即 $u(t_0) = 0$, 此时电容元件处于未充电的状态, 因此它所储存的电场能量也为零。在这种条件下, 电容元件在任何时刻所储存的电场能量 $w_c(t)$ 将等于它所吸收的能量, 即

$$w_c(t) = \frac{1}{2} Cu^2(t)$$

从时间 t_1 到 t_2 , 电容元件吸收的能量为

$$\begin{aligned} w_c &= \int_{u(t_1)}^{u(t_2)} u du = \frac{1}{2} Cu^2(t_2) - \frac{1}{2} Cu^2(t_1) \\ &= w_c(t_2) - w_c(t_1) \end{aligned}$$

即等于电容元件在 t_2 时刻和 t_1 时刻所储存的电场能量之差。

电容充电时, $|u(t_2)| > |u(t_1)|$, $w_c(t_2) > w_c(t_1)$; $w_c > 0$, 它吸收电能, 并全部转变成电场能储存; 在放电时, $|u(t_2)| < |u(t_1)|$, $w_c(t_2) < w_c(t_1)$; $w_c < 0$, 它又将电场能转变成电能释放出去。如果在 t_0 时刻, $u(t_0) = 0$, 充电到 $u(t_1)$ 之后, 又放电, 放到 t_2 时, 又有 $u(t_2) = 0$, 那么电容元件在充电时所吸收并储存起来的能量, 到放电完毕时全部释放出去。理想电容元件是不消耗电能的, 它只是一种储能元件。而且, 它也不会释放出多于它所吸收或储存的能量, 因此, 它又是一种无源元件。

实际的电容器是为了获得一定大小的电容而特意设计制造的。但是电容效应在除了电容器之外的许多别的场合也存在。例如两条架空线之间或两根电缆芯线之间就有电容。因为两根电线就相当于两块极板, 电线之间的空气或电缆芯线之间的绝缘层就是极板间的介质。又如晶体管的发射极、基极、集电极之间也存在着结电容。一只线圈的线匝与线匝之间也有电容, 只不过在某种工作条件下它们的电容可以忽略不计而已。

§ 1-7 电 感 元 件

用导线绕制成的空心线圈或具有铁心的线圈在工程上有广泛的应用。具有铁心的线