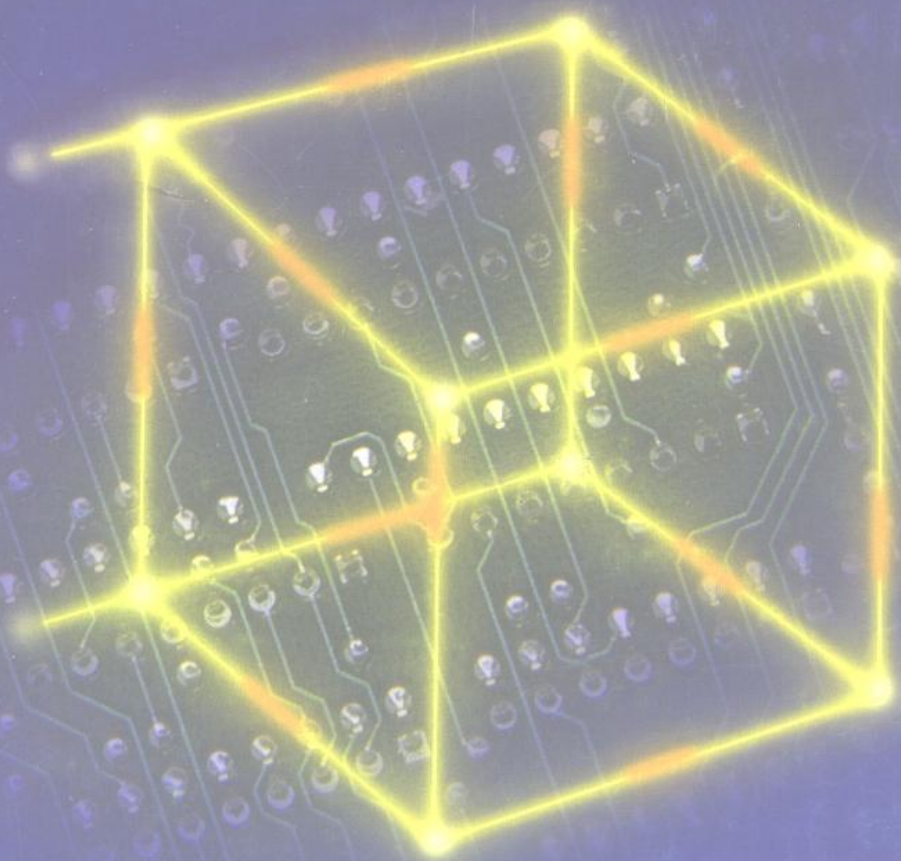


# 电路基础

(电路 I)

主编 姜钧仁 李礼勋



哈尔滨工程大学出版社

1013  
3070

# 电 路 基 础

(电 路 I)

姜钧仁 李礼勋 主编

哈尔滨工程大学出版社

## 内 容 简 介

本书是根据国家教委 1995 年新修订的高等学校工科本科《电路课程教学基本要求》编写的, 可作为高等工科院校四年制电类专业的教材和教学参考书, 也可供工程技术人员自学之用。

全书分《电路基础》和《网络分析导论》两册。前者侧重于电路理论的经典内容, 包括: 电路模型和电路定律, 电阻电路的等效变换和化简, 线性电路的分析方法和网络定理, 正弦电路的基本概念及其稳态分析, 三相电路, 互感电路, 谐振电路, 周期性非正弦电路, 一阶和二阶线性动态电路的时域分析; 后者侧重于电路理论的近代内容, 包括: 动态电路的复频域分析——运算法及网络函数, 双口网络, 多端元件, 网络图论及网络分析, 状态方程, 非线性电路。

### 电路基础 (电路 I)

姜钧仁 李礼勋 主编

责任编辑 张笑冰

\*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

新华书店经销

东北农业大学印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/16 印张 17.25 字数 399 千字

1996 年 9 月第 1 版 1998 年 9 月第 2 次印刷

印数: 3001~5500 册

ISBN 7 - 81007 - 715 - 5

TM·10 定价: 17.50 元

## 序 言

本书是根据国家教委 1995 年新修订的高等学校工科本科《电路课程教学基本要求》组织编写的,内容和顺序与《要求》基本一致。

本书是在我教研室编写的《电路基础》和《网络分析导论》两书(由陈式据主编、国防工业出版社出版)的基础上,经过十年的教学实践,认真总结了多年的教学成果和经验,并参考了国内外部分同类教材之后重新编写的。和原书比较,内容和顺序均做了部分调整。具体有:电路元件的介绍相对集中在第一章;网络拓扑图的初步概念也提前到第一章给出,并给出了基尔霍夫两定律的矩阵形式,为第三章中特勒根定理的证明打下了基础;第三章增加了表格法;动态电路的复频域分析一章增加了网络函数的初步内容;充实了非线性电路的内容,并将其移至最后一章;删除了磁路和铁芯线圈的内容。此外,为与新的文献资料一致,书中的正弦量均改用余弦函数表示,电源元件(独立源和受控源)均采用了国家标准新的图形符号。

全书分《电路基础》与《网络分析导论》两册。《电路基础》由姜钧仁、李礼勋主编,陈式据教授主审;参加编写的有李礼勋(第一、二、三章)、姜钧仁(第四、五、六、七章)、程晓华(第八、九章)、张傲霜(第十、十一章)。《网络分析导论》由刁秋庭主编,陈哲时教授主审;参加编写的有傅永庆(第十二、十三、十四章)、刁秋庭(第十五、十六、十七章)。成稿过程中,听取了教研室全体同志的宝贵意见,得到了两位主审教授的全力支持和精心指点,在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,缺点和错误之处在所难免,诚恳欢迎广大读者批评指正。来信请寄:哈尔滨工程大学电工教研室(邮政编码:150001)。

编 者

1996 年 3 月

# 目 录

第一章 电路模型和电路定律	1
§ 1-1 电路与电路图	1
§ 1-2 电路的基本变量和参考方向	3
§ 1-3 电阻元件	6
§ 1-4 电容元件	7
§ 1-5 电感元件	9
§ 1-6 独立电压源和独立电流源	11
§ 1-7 受控源	13
§ 1-8 电网络的拓扑图	15
§ 1-9 基尔霍夫电流定律	18
§ 1-10 基尔霍夫电压定律	21
习题	23
第二章 电阻电路的等效变换与化简	28
§ 2-1 等效的概念 电阻的串并联	28
§ 2-2 电阻的星形和三角形联接的等效变换	32
§ 2-3 电源元件的串并联	35
§ 2-4 有源电路的等效变换	36
习题	40
第三章 线性电阻电路的分析和网络定理	44
§ 3-1 支路电流法	44
§ 3-2 节点电压法	47
§ 3-3 回路电流法	51
§ 3-4 表格法简介	55
§ 3-5 含受控源电路的分析	58
§ 3-6 叠加定理	60
§ 3-7 替代定理	65
§ 3-8 戴维南定理与诺顿定理	68
§ 3-9 特勒根定理	73
§ 3-10 互易定理	74
§ 3-11 对偶原理	77
习题	79
第四章 正弦电路的基本概念	87
§ 4-1 正弦量的有关概念	87

§ 4-2	用相量表示正弦量	91
§ 4-3	电阻、电感和电容元件在正弦电路中的特性	95
§ 4-4	基尔霍夫定律的相量形式	100
§ 4-5	复阻抗和复导纳	102
习题		106
<b>第五章</b>	<b>正弦电路的稳态分析</b>	<b>109</b>
§ 5-1	串并联电路的分析	109
§ 5-2	复杂电路的分析	117
§ 5-3	正弦电路中的功率	122
§ 5-4	最大功率传输	127
习题		129
<b>第六章</b>	<b>三相电路</b>	<b>134</b>
§ 6-1	对称三相电源	134
§ 6-2	对称三相电路的计算	137
§ 6-3	不对称三相电路的概念	142
§ 6-4	三相电路的功率及其测量	145
习题		148
<b>第七章</b>	<b>互感电路</b>	<b>151</b>
§ 7-1	互感系数和耦合系数	151
§ 7-2	互感电压及同名端	153
§ 7-3	互感元件的联接 去耦等效电路	158
§ 7-4	具有互感的正弦电路的分析	161
§ 7-5	空芯变压器	165
习题		168
<b>第八章</b>	<b>谐振电路</b>	<b>170</b>
§ 8-1	串联电路的谐振	170
§ 8-2	串联电路的谐振曲线和通频带	173
§ 8-3	并联电路的谐振	177
§ 8-4	互感耦合电路的谐振	180
习题		185
<b>第九章</b>	<b>周期性非正弦电路</b>	<b>188</b>
§ 9-1	周期函数分解为付立叶级数	188
§ 9-2	周期性非正弦电压、电流的有效值 平均功率	193
§ 9-3	周期性非正弦电路的计算	195
§ 9-4	滤波电路的概念	199
习题		202
<b>第十章</b>	<b>一阶电路</b>	<b>205</b>
§ 10-1	电路的初始条件	205

§ 10-2	零输入响应 .....	207
§ 10-3	零状态响应 .....	212
§ 10-4	全响应 .....	217
§ 10-5	三要素法 .....	220
§ 10-6	阶跃响应和冲激响应 .....	227
§ 10-7	卷积积分 .....	235
§ 10-8	电容电压和电感电流的跃变 .....	237
	习题 .....	242
<b>第十一章</b>	<b>二阶电路</b> .....	<b>249</b>
§ 11-1	<i>RLC</i> 串联电路的零输入响应 .....	249
§ 11-2	<i>RLC</i> 串联电路对恒定输入的响应 .....	257
	习题 .....	260
	习题答案 .....	262

# 第一章 电路模型和电路定律

电路的应用十分广泛。电路理论已经成为一门基本学科。每一学科都有自己的一套模型、基本变量和基本定律。本章将简要地阐述实际电路的作用、组成及建立电路模型的一般概念；介绍描述电路的基本变量及其参考方向的意义；讨论限定电路中电流、电压分布规律的基尔霍夫定律。基尔霍夫定律和参考方向的概念，是研究一切电路的电磁现象和进行定量计算的依据和出发点，将贯穿本课程之始终。

电阻元件、电容元件、电感元件、电压源和电流源是常见的电路元件，利用它们便可构成某些实际电路的模型，本章将给它们以确切的定义，并论述它们的基本特性。其它电路元件将在必要时再加以介绍。

## § 1-1 电路与电路图

电流流过的全部通路称为电路。它是由一些电的设备或器件组成的总体。图 1-1 是一个很简单的实际电路，用两条导线把灯泡和干电池联接起来形成闭合通路，便有电流在其中流动，使灯泡发光，用来照明。随着电流的流动，在电路中进行着能量的传输和转换，通常是把电能转换为光、热、声或机械等形式的能量。而提供电能的装置，如电池、发电机等则进行着把非电能，如化学能、水位能、原子能等转换为电能的过程。电路的另一作用是对电讯号进行变换和处理，如放大、滤波、存贮和记忆等。总之，在电力系统、计算机及通讯装置等电气设备中，都是利用电路来完成各种各样的任务的。

电路中提供电能或电讯号的器件，称为电源，如图 1-1 中的干电池。电源的电流或电压常称为激励函数或激励。吸收电能或输出讯号的器件称为负载，也有称为换能器或用电器的，如图 1-1 中的灯泡。负载上的电流或电压称为响应。此外，电路中还要有引导电流的导线。可见，电路主要是由电源、负载和导线三部分组成。实际上为了安全和使用方便起见，还要有各种控制设备，如开关和熔断器等。

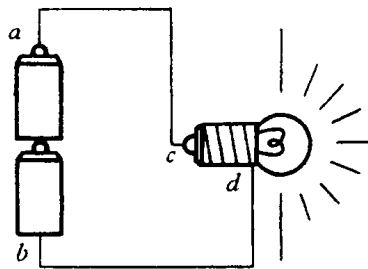


图 1-1

实际电路用途各异，种类繁多，几何尺寸也相差很大。电路理论主要研究电路中发生的电磁现象，用电流、电荷、电压或磁通等物理量来描述其中的过程。电路理论的目的之一是计算电路中各器件的端电流和端子间的电压，而一般不涉及器件内部发生的物理过程。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，或者说电磁波通过电路的时间可认为是瞬时的，则电磁场理论和实践均证明在任意时刻流入各器件任一端子的电流和任两个端子间的电压都将是单值的量。在这种条件下，我们可以用足以反映其电磁性质的一些理想电路元件或它们的组合来



模拟实际电路中的器件。这种理想电路元件称为集总元件或集中参数元件。理想电路元件是具有某种确定的电磁性质的假想元件,它是一种理想化的模型,每一种理想元件只表示电路中的一种物理现象或性质,并具有精确的数学定义。在电路理论中我们用抽象的理想元件及其组合近似地代替实际的器件,从而构成了与实际电路相对应的电路模型。实际电路中各器件的端子是通过导线相互联接起来的,而在电路模型中各理想元件的端子是用“理想导线”联接起来的。

如果实际电路的尺寸不满足远小于工作时电磁波的波长这一条件,则这种电路不能按集总电路来处理。这种电路称为具有分布参数的电路。分布参数电路能用集中参数元件的适当组合的序列来逼近。本书仅限于讨论由集总元件构成的电路,称为集总电路或集中参数电路。

电路器件中发生的物理现象,如发光、发热、辐射、作功以及电磁能量的储存或释放等等,是我们建立模型的依据。电路器件的理想化模型称为电路元件。每一种电路元件,都只表示电路中的一种物理现象或性质。例如,电阻元件表示电路中消耗电磁能,具有将电能转换为其它形式能量的不可逆过程的物理现象;电容元件表示电场效应,即具有储存或释放电场能量的性质;电感元件则表示磁场效应,即具有储存或释放磁场能量的性质。能够将其它形式的能量(如化学能、机械能或太阳能等)转换为电能的元件,称为电源元件。许多元件都只具有两个端钮,称为二端元件。具有两个以上端钮者,称为多端元件。各种元件都用规定的图形和文字符号来表示。

许多电路器件可以只用一个电路元件来表示,如图 1-1 中的灯泡,其主要作用是把电能变为光和热,故可用电阻元件来表示。干电池组可用电源元件表示,如考虑到电池组内部消耗电能的现象,就要用电源和电阻两个元件来表示。实际导线具有发热和电磁效应,应该用电阻、电感和电容等元件的组合来表示。但在直流电源作用下,一般只考虑导线电阻,其余可忽略。经过上面讨论,我们可以把图 1-1 的实际电路画成图 1-2(a)的形式。图中  $u_s$  和  $r_i$  分别表示电池组的电压和内阻; $r_1$ 、 $r_2$  分别表示导线  $ac$  和  $bd$  的电阻; $R$  则表

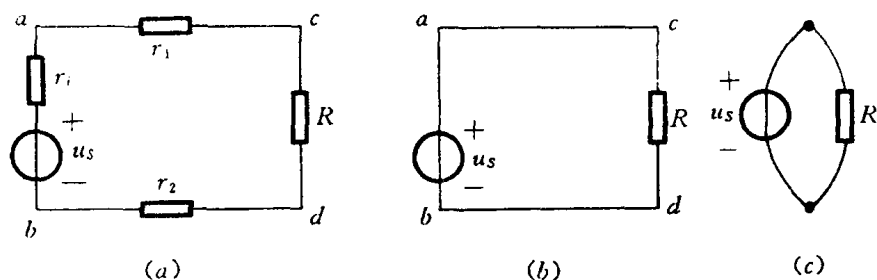


图 1-2

示灯泡电阻。在正常情况下,电源内阻较小,可以略去。若导线截面积足够大而长度不大,其电阻也可略去,这样就可简化成图 1-2(b)的形式。图中  $ac$  和  $bd$  表示不吸收或不储存任何形式能量的理想导线,这种线段可以任意伸缩而不影响电路中的物理现象。于是图 1-2(b)可进一步简化成图 1-2(c)的形式,它明显地表示电源和电阻元件两端点对应地联接在一起,但通常为整齐起见,还是画成图 1-2(b)的形式。

用电路元件表示电路器件后,便可得到实际电路的电路模型或电路图。图 1-2 就是

图 1-1 的电路图。电路理论的研究对象是电路图,而不是实际电路。通过对电路图的研究,认识电路的特性,掌握分析电路的一般方法,就能具有分析任一给定电路,或按任一给定特性设计电路的能力。结构较复杂的电路图的一些性质,将在 § 1-8 中讨论。

电路理论是沿着电路分析和电路综合两个主要领域发展的。电路分析是按给定的电路图和元件参数,对各部分的电流或电压进行定性分析或定量计算。或者说,对于已知参数的电路图,要求确定相应于激励的响应。相反的命题称为电路综合(或设计),就是给定激励与响应函数,要求设计相应的电路图并确定元件参数。一般来说,电路分析的解答是唯一的,而电路综合的解答通常不是唯一的。电路分析是电路理论的主要内容,也是电路综合的基础,本书只阐述电路分析的基本理论。

## § 1-2 电路的基本变量和参考方向

描述电路工作情形的物理量,如电荷、磁通、电流、电压以及电功率和能量,称为电路的基本变量。它们的意义在物理课中已讲过,本节着重介绍这些变量的方向或极性的标记方法,即参考方向问题。

电荷的有规则运动称为电流。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。设  $dt$  时间内通过电路横截面的电荷为  $dq$ ,则有

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

$i$  称为电流强度,简称电流。本书规定用小写英文字母  $i(t)$  或  $i$  表示。

电荷在电场力作用下运动形成电流,但电荷本身是既不能被创造也不会被消灭的。这种特性称为电荷守恒性。

电流强度的单位是安培,简称安,用(A)表示。对于较小的电流,则用毫安(mA)或微安( $\mu$ A)做单位,它们的关系是

$$1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$$

电流的大小和方向对电路的工作状态都有影响,所以在描述一个电流时要同时给出电流的大小和方向。电流在导线或一个电路元件中流动的实际方向只有两种可能,见图 1-3。当有正电荷的净流量从 A 端流入并从 B 端流出时,习惯上就认为电流是从 A 端流向 B 端;反之,则认为电流是从 B 端流向 A 端。在电路分析中,有时对某一段电路中电流的实际流动方向很难预先判断出来,有时电流的实际方向还在不断地改变,因此很难在电路中标明电流的实际方向。由于这些原因,引入了电流“参考方向”的概念。

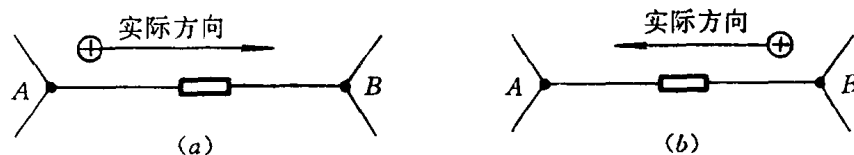


图 1-3

在图 1-4 中先选定其中某一个方向作为电流的方向,这个方向叫做电流的参考方向(如图中实线所示)。当然所选的方向并不一定就是电流实际的方向(图中用虚线表示)。在

引入参考方向的情况下电流就是一个代数量。若电流的参考方向与其实际方向一致,则电流为正值( $i > 0$ ),如图 1-4(a)所示;若电流的参考方向与其实际方向相反,则电流为负值( $i < 0$ ),如图 1-4(b)所示。于是,在指定的电流参考方向下,电流值的正和负就可以反映出电流的实际方向。

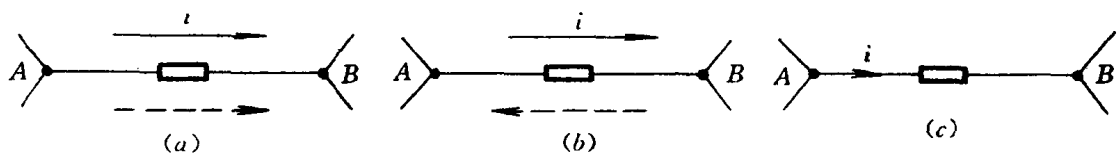


图 1-4

电流的参考方向是任意指定的,在电路中一般用一有箭头的线段来表示,并在线段旁标上电流的文字符号如  $i_1, i_2$  等,也可以用双下标表示,如  $i_{AB}$  意味着该电流的参考方向是由 A 指向 B。为了方便,今后我们直接把电流的参考方向标于所在支路上,如图 1-4(c) 所示。

正电荷在电路某点所具有的电位能与电荷的比值称为该点的电位。通常把电路图作为一个完整的体系,可以指定电路中任一点(仅能指定一点)的电位为零,称为电位参考点。一般指定电路中接地或接机壳的点为参考点。指定参考点后,电位为代数量。电路中电位比参考点高者,电位值为正,低者则为负。电路中各点电位都有确定的数值,称为电位的单值性。本书用小写英文字母  $v$  或  $v(t)$  表示电位。

电路中两点电位之差称为电位差或电压。本书用  $u$  或  $u(t)$  表示电压。电压也可以用双下标的标注方法。在图 1-5 中, A 与 B 间的电压等于两点电位之差,记作

$$u_{AB} = v_A - v_B \quad (1-2)$$

可见,若  $v_A > v_B$ , 即 A 点电位高于 B 点电位,则  $u_{AB}$  为正值,反之则为负值。习惯上规定下标的顺序为电压方向,所以电压方向是指电位降落的方向,故有时称电压为电位降。通常用极性(用+、-号表示相对极性的正负)和相应的文字来标注电压。如图 1-5 所示,用  $u_1$  表示这段电路的电压,其极性(或方向)如图所示,则有

$$u_1 = u_{AB} = v_A - v_B$$

由电位的定义可知, AB 两点间的电压  $u_{AB}$  实际上表明了单位正电荷由 A 点移到 B 点的过程中所失去的电位能,即

$$u_{AB} = \frac{dw}{dq} \quad (1-3)$$

其中  $dq$  为由 A 点移到 B 点的正电荷量,单位为库仑(C);  $dw$  为从 A 点到 B 点移动过程中,电荷  $dq$  失去的电位能,单位为焦耳(J)。

基于引入电流参考方向同样的道理,我们也引入电压的参考方向(或极性)。在指定参考方向的情况下,电压也是代数量。

电位参考点和电流参考方向、电压参考方向都是任意指定的,不同的参考点和参考方

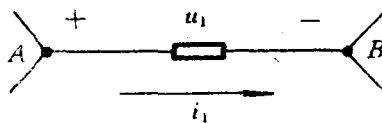


图 1-5

向,并不影响实际问题的结果。这与力学中选定参考系和力、速度的参考方向的道理是一样的。如果一段电路上的电流、电压选取相同的参考方向,称为一致的或关联的参考方向,如图 1-5 中  $u_1$  与  $i_1$  的方向即为关联参考方向。

根据电压的定义,可知电压或电位差与参考点无关。此外,电压或电位差还与计算路径无关。例如图 1-2(a)中  $cb$  两点间的电压,无论沿  $c R d r_2 b$  或沿  $c r_1 r_i u_s b$  计算,结果都是一样的。

按照电位、电压的定义,其量纲均为焦耳/库仑(J/C),所以单位都是一样的,称做伏特,简称伏,用 V 表示。也可用千伏(kV),毫伏(mV)或微伏( $\mu$ V)作单位,其关系为:

$$\begin{aligned} 1\text{kV} &= 10^3\text{V} & 1\text{mV} &= 10^{-3}\text{V} \\ 1\mu\text{V} &= 10^{-6}\text{V} \end{aligned}$$

电路中由于电流的流动,进行着能量的转换。在许多场合下,我们需要的是获得某种能量。另一方面,电路中的物理现象也要用能量的观点来阐明,所以功率和能量也是电路的基本变量。

在一段电路中,如图 1-5 所示,在选取关联的电流电压参考方向的条件下,设在  $dt$  时间内由  $A$  点移到  $B$  点的正电荷量为  $dq$ ,由  $A$  点到  $B$  点的电压为  $u$ ,则根据式(1-3)可知,正电荷  $dq$  在移动过程中失去的电能为

$$dw = udq$$

失去的电能转换为其它形式的能,意味着这段电路消耗或吸收了电能。单位时间内消耗的电能;即消耗的电功率则为

$$p = \frac{dw}{dt} = u \frac{dq}{dt}$$

由于

$$i = \frac{dq}{dt}$$

所以有

$$p = ui \quad (1-4)$$

式(1-4)表明的功率也称进入一段电路的功率。显然按照这样的规定, $p$  也是代数量。 $p$  为正,表示这段电路在这一瞬时是吸收电能的; $p$  为负则表示该瞬时是发出(供应)电能的。功率的大小是由电流、电压两者共同决定的,不能只看一方面,以为电流大功率必然也大。对于一定的功率,电压高时电流便可以小些。远距离输电采用高压方式就是为了减小电流,从而可以减少传输线上的功率损耗。

功率的量纲为伏安,单位是焦耳/秒,称做瓦特,简称瓦,用 W 表示,也可用千瓦(kW)或毫瓦(mW)做单位。

在  $t_1 \sim t_2$  期间电路吸收的电能若用  $w$  表示则有

$$w = \int_{t_1}^{t_2} p dt = \int_{t_1}^{t_2} u i dt \quad (1-5)$$

该式可以用来计算一段电路吸收的能量,也可以用来计算电源元件的能量,当电源元件在电路中提供能量时, $w$  将是负值;反过来,若  $w$  为正值时,说明该电源在电路中充当了负载,是吸收能量的。例如蓄电池在充电状态时就是这种情况。

电能的单位为焦耳(J),工程上常用瓦秒或千瓦时做单位,后者记为 kWh,也叫做度。

### § 1-3 电阻元件

以下几节讨论二端元件,有电阻元件、电容元件、电感元件和电压源元件、电流源元件。

电阻元件是实际电阻器的理想化模型。许多电路器件都可以用电阻元件来表示,所以电阻元件是一个很重要的电路元件。电阻元件用字母  $R$  或  $r$  表示,其符号如图 1-6 所示。流经电阻元件的电流  $i$  和端电压  $u$  选取关联参考方向,也在图中注明。

电阻元件的基本特性是其电压与电流关系可用  $u \sim i$  平面上的一条曲线表示。因此,电阻元件的确切定义应为:电压与电流的关系可用  $u \sim i$  平面上的一条曲线表示的元件称为电阻元件。元件的电压电流关系常简称为伏安关系,记作 VCR(取 Voltage Current Relation 的第一个字母)。电阻元件的伏安关系是函数关系,即  $u=f(i)$  或  $i=g(u)$ ,意味着电阻元件某瞬时的电流只与该瞬时的电压有关,而与该瞬时以前的情形无关,常称为瞬时元件或无记忆元件。电阻元件的 VCR 一般可用函数表达式来表示,如  $i=I_s e^{\frac{u}{R}}$ ,  $u=Ri$  等。

图 1-7(a)是某电阻元件的伏安特性曲线,这种元件的电流与电压成正比,其伏安特性是一条通过原点的直线,称为线性电阻元件。线性电阻元件的

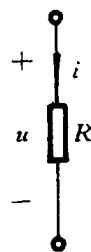


图 1-6

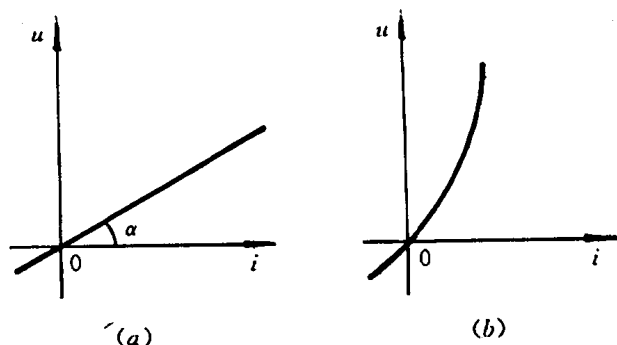


图 1-7

伏安关系服从欧姆定律,在图 1-6 所示关联参考方向的条件下,可写成

$$u = Ri \quad (1-6a)$$

或

$$i = Gu \quad (1-6b)$$

其中

$$G = 1/R$$

$R$  表示元件对电流的阻碍能力,称为元件的电阻,单位为欧姆,简称欧,用  $\Omega$  表示; $G$  表示元件对电流的传导能力,称为元件的电导,单位为西门子,简称西,用  $S$  表示。电阻和电导都是电阻元件的参数。显然,线性电阻元件的参数

$$R = \frac{u}{i} \text{ 或 } G = \frac{i}{u}$$

是与  $u$  和  $i$  无关的常数,所以用电阻值(电导值)便足以表示元件的性质与作用。给定线性电阻元件的电阻值(电导值)后,其电流与电压便有确定的关系。 $R=0(G=\infty)$  的一段电路称为短路,若通以有限电流,其端电压恒为零,可见短路的伏安特性曲线与电流轴重合。

$R=\infty(G=0)$ 的一段电路称为开路,在有限电压作用下,开路处的电流恒为零,其伏安特性与电压轴重合。

由式(1-4)可得电阻元件吸收(消耗)的电功率为

$$p = ui = i^2R = \frac{u^2}{R} \quad (1-7a)$$

或 
$$p = u^2G = \frac{i^2}{G} \quad (1-7b)$$

上式表明,在 $R$ (或 $G$ )一定时,电压(或电流)越大,元件吸收的功率也越大。但在电压一定的条件下,电阻值越大,元件吸收的功率则越小。

在 $t_1$ 到 $t_2$ 区间内,电阻元件消耗的电能,由式(1-5)可得:

$$w = \int_{t_1}^{t_2} u i dt = R \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt = G \int_{t_1}^{t_2} u^2 dt \quad (1-8)$$

由式(1-7)和式(1-8)可见,功率和能量都与电流或电压的平方成比例,故在 $R \geq 0$ (或 $G \geq 0$ )的条件下,任一瞬时电阻元件的功率和能量都是非负的。也就是说阻值非负的电阻元件只会消耗电能而无提供电能的本领,属无源元件中的耗能元件。

今后,为了叙述方便,把线性电阻元件简称为电阻。这样,“电阻”这个术语及其相应的符号 $R$ ,一方面表示一个电阻元件,另一方面也表示此元件的参数。

如果电阻的伏安特性不随时间改变,则称为非时变电阻,否则就称为时变电阻。非时变电阻也称定常电阻。今后若无特别声明,电阻一词即指线性定常电阻元件。

若电阻元件的伏安特性不是通过原点的直线,如图1-7(b)所示,则称为非线性电阻。非线性电阻元件的电压和电流之间不服从欧姆定律,且元件的电阻将随电压或电流的改变而改变。其次,值得指出的是,有些非线性电阻元件的伏安特性还与电压或电流的方向有关,也就是说,当元件两端施加的电压的方向不同时,流过它的电流完全不同。线性电阻元件的特性则与元件电压或电流的方向无关。

## § 1-4 电容元件

工程中,电容器的应用十分广泛。电容器虽然品种和规格很多,但就其构成原理来说,都是由两块金属极板中间隔以不同的介质(如云母、绝缘纸、电解质等)所组成,如图1-8(a)所示。加上电源后,极板上分别聚集起等量异号的电荷,在介质中建立起电场,并储存有电场能量。电源移去后,电荷可以继续聚集在极板上,电场继续存在。所以电容器是一种能够储存电场能量的实际器件。此外,电容器上电压变化时,在介质中也往往引起一定的介质损耗,而且介质不可能完全绝缘,多少还有一些漏电流。质量优良的电容器的介质损耗和漏电流都很微弱,可以略去不计。电容元件是实际电容器的理想化模型。

理论上定义电量 $q(t)$ 与电压 $u(t)$ 的关系可用 $q \sim u$ 平面上的一条曲线来表示的元件,称为电容元件,其符号如图1-8(b)所示。电容元件的特性可以用 $q \sim u$ 平面上的曲线表示,称为库~伏特性曲线。这条曲线如果是通过原点的直线,如图1-8(c),相应的元件称为线性电容元件,否则称为非线性电容元件,如图1-8(d)。

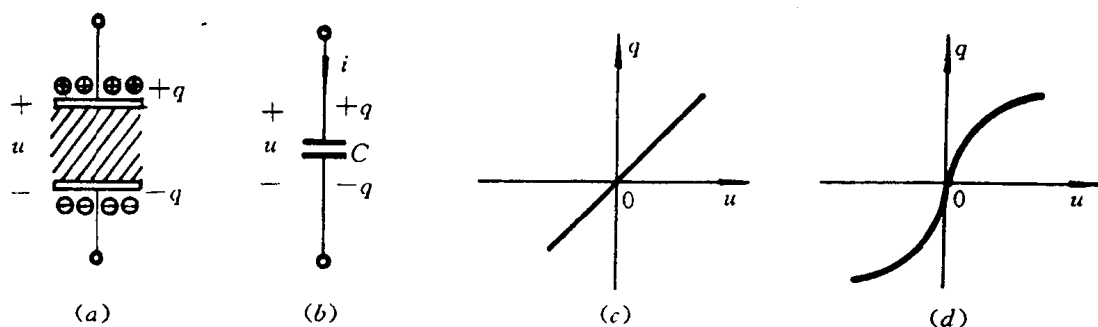


图 1-8

线性电容元件的电量  $q$  与其端电压  $u$  成正比,比例系数用  $C$  表示,称为电容元件的容量,简称电容,即

$$q(t) = Cu(t) \quad (1-9)$$

当电量的单位为库仑(C),电压单位为伏特(V)时,电容的单位是法拉(F)。也可用微法( $\mu\text{F}$ )和皮法(pF)做单位。它们的关系是:

$$1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F} \quad 1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$$

在直流电路中,电容元件端电压不变,储存在极板上的电量及介质中的电场都不随时间变化,引线中没有电荷移动,因而没有电流,故电容元件对直流相当于开路。但是,如果在电容元件两端加上变化电压,当电压增加时,元件储存的电量增加,这个过程叫做充电。电压减小时,元件储存的电量减少,这个过程叫做放电。元件在充放电过程中,储存的电荷随之增加或减少,因而在引线中必然有电荷的移动而形成电流。由电流强度的定义

$$i = \frac{dq}{dt}$$

及式(1-9)可得联接线性电容的导线中的电流为

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1-10)$$

式(1-10)是电容元件的伏安关系,是通过  $i \sim q$  和  $q \sim u$  二重关系导出的。它表明电容元件的电流与其端电压的导数成正比,与电阻的伏安关系有着明显的不同。

如果用电压表示电流,则式(1-10)的关系又可以写成

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \\ &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i(\tau) d\tau + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \end{aligned}$$

若令

$$u(0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i(\tau) d\tau$$

则得

$$u(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (1-11)$$

式中  $u(0)$  是  $t=0$  时的电容电压,称做初始电压,式(1-11)表明,某时刻  $t$  电容的电压与其初始电压  $u(0)$  以及 0 至  $t$  时间内电流的所有可能值有关。由于电容元件的这种性质,人们把电容元件叫做有记忆本领的元件。如果  $u(0)=0$ ,则有:

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau$$

电容元件吸收的瞬时功率为:

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

随着端电压的增加,电容元件吸收电能,用  $w_c(t)$  表示,它等于瞬时功率的积分:

$$\begin{aligned} w_c(t) &= \int_{-\infty}^t p dt \\ &= \int_{-\infty}^t Cu \frac{du}{dt} dt = \frac{1}{2} C [u^2(t) - u^2(-\infty)] \end{aligned}$$

由于有  $u(-\infty) = 0$ , 所以

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

上式说明,电容元件在任一时刻储存的能量与该时刻电压的平方成正比,与电流的有无以及电压的建立过程无关。电压绝对值增加时,能量增加,电源供给的能量转换为电场能量储存在元件中;电压绝对值减小时,能量减少,储存的电场能量以某种方式被释放出来。因此电容是不消耗能量的储能元件。

如果电容元件的库伏特性随时间改变则称为时变电容元件。如果电容元件的库伏特性不随时间改变,则称为非时变(又称定常)电容元件。今后若无特别声明,电容元件一词即指线性定常电容元件。

今后,为了叙述方便,把线性电容元件简称为电容。所以“电容”这个术语以及它的相应符号  $C$ ,一方面表示一个电容元件,另一方面也表示这个元件的参数。

电容器是为了获得一定大小的电容制成的。但是,电容的效应在许多别的场合也存在。如一对架空输电线之间就有电容,因为一对输电线可视为电容的两个极板,输电线之间的空气则为电容极板间的介质,这就相当于电容器的作用。又如晶体三极管的发射极、基极和集电极之间都存在着电容。一只线圈的各线匝之间也都有电容,不过象这种所谓的匝间电容是很小的,若线圈中电流和电压随时间变化不快时,其电容效应可略去不计。

## § 1-5 电感元件

用导线绕制的线圈如图 1-9(a) 所示。当电流通过线圈时,将在线圈及其周围建立磁场,即有磁链与线圈键链。实际线圈的理想化模型,就是电感元件。理论上定义磁链  $\psi(t)$  与电流  $i(t)$  关系可以用  $\psi \sim i$  平面上的一条曲线表示的元件,称为电感元件。其符号如图 1-9(b) 所示。电感元件的特性可以用  $\psi \sim i$  平面上的曲线表示,称为韦~安特性曲线。如果特性曲线是一条通过原点的直线,如图 1-9(c) 所示,则相应元件称为线性电感元件;否则称为非线性电感元件,如图 1-9(d) 所示。

线性电感元件的磁链  $\psi$  与其电流  $i$  成正比,比例常数用  $L$  表示,称为电感,即

$$\psi(t) = Li(t) \quad (1-12)$$

当  $\psi$  的单位为韦伯(Wb),电流的单位为安培(A)时, $L$  的单位是亨利(H)。也可用毫亨



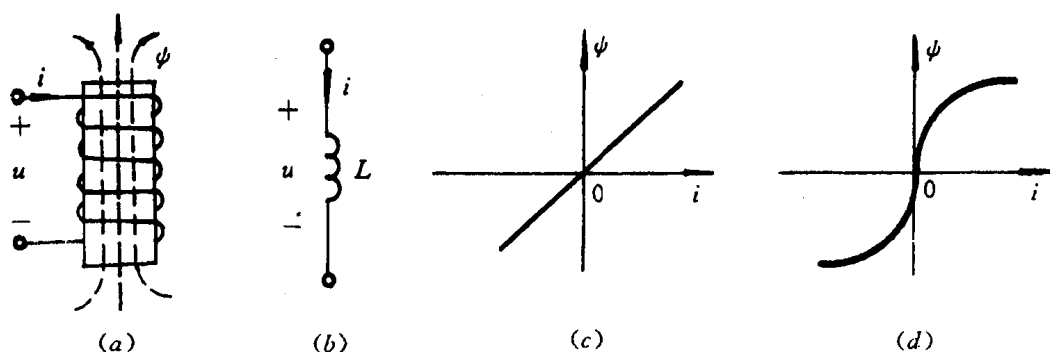


图 1-9

(mH)或微亨( $\mu\text{H}$ )作单位,它们的关系为:

$$1\text{H} = 10^3\text{mH} \quad 1\text{H} = 10^6\mu\text{H}$$

变化电流通过线圈时,将引起磁通变化,根据电磁感应定律,磁通的变化将在线圈中引起感应电压  $u(t)$ ,感应电压的大小与磁通的变化率成正比。如果假定电压的参考方向与电流的参考方向一致,且电流的参考方向与磁链的方向符合右螺旋关系,如图 1-9 (a)、(b)所示,则电压为

$$u(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} \quad (1-13)$$

这个电压是由线圈自身的电流变化引起的,称为自感电压。在使用式(1-13)时,必须注意到  $u$ 、 $i$  的参考方向应当一致,这一点甚为重要。

将式(1-12)代入式(1-13)得

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-14)$$

式(1-14)是电感元件的伏安关系,它是通过  $\psi \sim i$  和  $u \sim \dot{\psi}$  的关系推导出来的。该式表明,理想电感元件的端电压与电流的导数成正比例。

如果用电压表示电流,则式(1-14)的关系可以写成

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau \\ &= \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u(\tau) d\tau + \frac{1}{L} \int_0^t u(\tau) d\tau \end{aligned}$$

若令

$$i(0) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u(\tau) d\tau$$

则得

$$i(t) = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u(\tau) d\tau \quad (1-15)$$

式中  $i(0)$  是  $t=0$  时的电流,称为初始电流,式(1-15)说明,任一时刻  $t$  电感的电流与其初始电流  $i(0)$  以及 0 到  $t$  区间内电压的所有可能值有关。由于电感的这种性质,人们把电感元件也叫做有记忆本领的元件。如果  $i(0)=0$ ,则有

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u(\tau) d\tau$$

电感元件吸收的瞬时功率为: