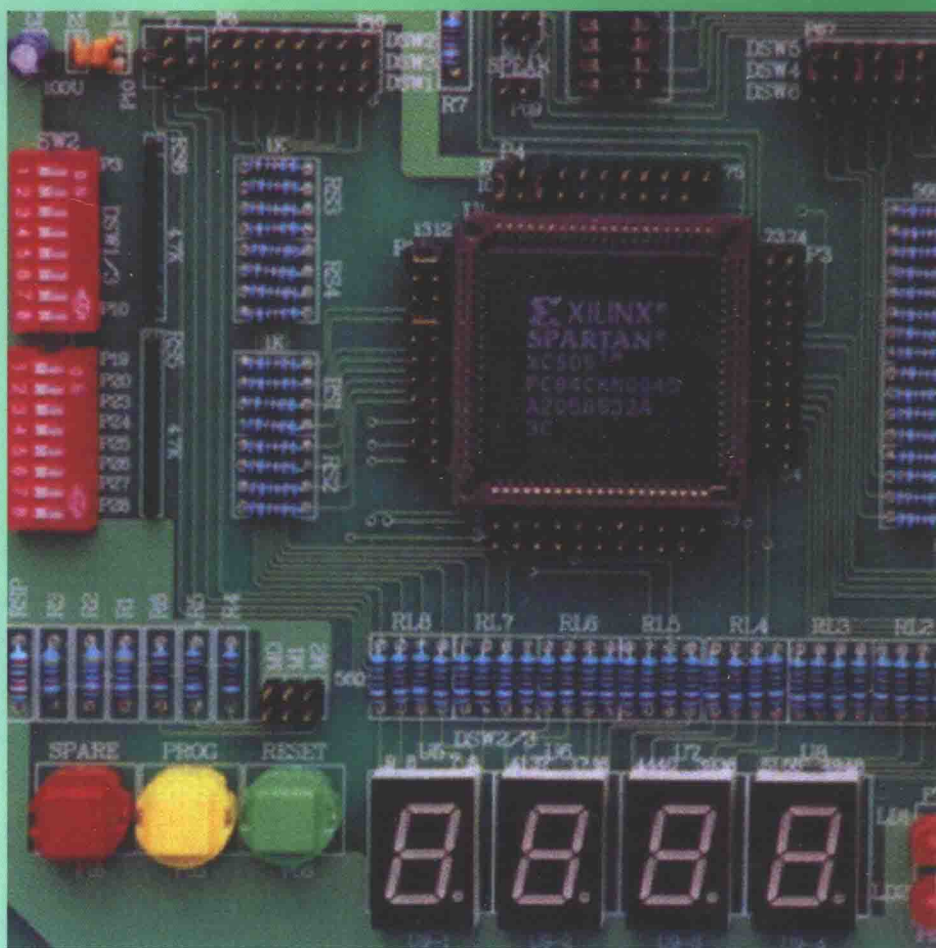


电路基础

主编 姜钧仁

DIANLU JICHU



哈尔滨工程大学出版社



哈尔滨工程大学
国家工科基础课程教学基地
电工电子类系列教材

电 路 基 础

主编 姜钧仁

哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路基础/姜钧仁主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2002.8
ISBN 7-81073-358-3

I. 电... II. 姜... III. 电路理论-高等学校-教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 057620 号

内 容 简 介

本书是在 1996 年出版的《电路基础》的基础上,重新修订编写的,内容符合教育部颁布的高等学校工科本科《电路课程教学基本要求》。

全书共分十一章,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。

本书既可作为高等工科院校电类专业的教材和教学参考书供师生使用,也可供工程技术人员参考和自学之用。

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼
发行部电话:(0451)2519328 邮编:150001
新华书店经销
哈尔滨工程大学印刷厂印刷

*

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 16.5 字数 373 千字

2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月第 1 次印刷

印数:1—5 000 册

定价:20.00 元

序 言

本书初版于1996年问世,至今已过六年。此次修订再版适应了教学内容和课程体系改革的需要,在组织协调好与其他有关课程的关系的基础上,更加突出了《电路基础》作为一门技术基础课的基础地位。新版既保持了初版重视基本概念、基本内容的特点,叙述时十分注意准确性和逻辑性,同时又进一步明确了本课程的主要任务是为后续专业课和学生将来工作准备必要的基础知识,并没有片面地追求电路理论学科本身的系统性和完整性。

与初版比较,此次修订具体的变动与调整有:(1)为便于教学过程中根据需要进行取舍,将“电路的拓朴图”、“基尔霍夫定律的矩形阵式”两部分内容集中在一起,单独列为一节,放于第一章的最后;(2)在第二章的最后,增加了“简单电阻电路的分析”一节,对简单电阻电路的分析做了小结;(3)考虑到“表格法”在《网络分析导论》中介绍更加合适,第三章中删去了“表格法简介”一节;(4)在保留了绝大部分原有习题的基础上,又补充了一部分新习题,使习题总量和类型有所增加;(5)针对部分学生做作业时自己不做具体计算而抄写书后现成答案的偷懒行为,为训练学生的计算能力,本次修订删去了附于书后的习题答案;拟定另出一本与本书配套的《电路基础习题解答》,该书将提供全部习题的完整答案,并提供一些有用的解题思路。此外,为配合“双语”教学,新版还对一些专业术语和词汇加了英语标注。

本书此次修订是我教研室全体教学人员(在本书出版后)六年教学经验的总结。具体参加本书修订工作的有姜煜(执笔第六、七章初稿)、王霖郁(执笔第八、九章初稿)和姜钧仁(其余各章),由姜钧仁统一组合、修改、补充和定稿。成稿后承蒙陈式据教授仔细审阅并提出了许多宝贵的修改意见,在此谨致衷心的感谢。

这次修订改动较多,不少章节是重新编写的。虽然编者在主观上倾注了极大的精力,力求严谨,但限于水平,不足和错误之处,仍恐难免。诚恳希望广大同行和读者批评指正。意见请寄:哈尔滨工程大学信息与通讯工程学院电路基础教研室(邮编:150001)。

编 者
2002年6月

目 录

第一章 电路模型和电路定律	1
§ 1-1 电路和电路图	1
§ 1-2 电流、电压及其参考方向	2
§ 1-3 电功率	5
§ 1-4 电阻元件	6
§ 1-5 电容元件	8
§ 1-6 电感元件	11
§ 1-7 电压源和电流源	13
§ 1-8 受控源	15
§ 1-9 基尔霍夫定律	17
§ 1-10 电路的拓扑图 基尔霍夫定律的矩阵形式	21
习题一	24
第二章 电阻电路的等效变换和化简	29
§ 2-1 电路等效的概念	29
§ 2-2 电阻的串联和并联	30
§ 2-3 电阻的 Y- Δ 联接及其等效互换	33
§ 2-4 电源的串联和并联	36
§ 2-5 有源电阻电路的等效变换	37
§ 2-6 简单电阻电路的分析	41
习题二	44
第三章 网络分析方法和网络定理	48
§ 3-1 支路电流法	48
§ 3-2 回路电流法	50
§ 3-3 节点电压法	54
§ 3-4 含受控源电路的分析	58
§ 3-5 叠加定理	61
§ 3-6 替代定理	65
§ 3-7 戴维南定理与诺顿定理	67
§ 3-8 特勒根定理	74
§ 3-9 互易定理	77
§ 3-10 对偶原理	80
习题三	81
第四章 正弦电路的基本概念	88
§ 4-1 正弦量的有关概念	88
§ 4-2 用相量表示正弦量	92
§ 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	101
§ 4-5 复阻抗和复导纳	103
习题四	107
第五章 正弦电路的稳态分析	110

§ 5-1 串并联电路的分析·····	110
§ 5-2 复杂电路的分析·····	118
§ 5-3 正弦电路中的功率·····	122
§ 5-4 最大功率传输·····	127
习题五·····	129
第六章 三相电路 ·····	134
§ 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
习题六·····	148
第七章 互感电路 ·····	151
§ 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
习题七·····	167
第八章 谐振电路 ·····	170
§ 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
习题八·····	184
第九章 周期性非正弦电路 ·····	187
§ 9-1 周期函数分解为傅里叶级数·····	187
§ 9-2 周期性非正弦电压、电流的有效值 平均功率 ·····	191
§ 9-3 周期性非正弦电路的计算·····	193
§ 9-4 滤波电路的概念·····	197
习题九·····	200
第十章 一阶电路 ·····	203
§ 10-1 电路的初始条件 ·····	203
§ 10-2 零输入响应 ·····	205
§ 10-3 零状态响应 ·····	210
§ 10-4 全响应 ·····	215
§ 10-5 三要素法 ·····	218
§ 10-6 阶跃响应和冲激响应 ·····	224
§ 10-7 卷积积分 ·····	232
§ 10-8 电容电压和电感电流的跃变 ·····	234
习题十·····	240
第十一章 二阶电路 ·····	246
§ 11-1 RLC 串联电路的零输入响应 ·····	246
§ 11-2 RLC 串联电路对恒定输入的响应 ·····	254
习题十一·····	257

第一章 电路模型和电路定律

电(electricity)作为一种优越的能量形式和方便的信息载体与当今的经济建设和社会生活密不可分。电的应用无论是能量的转换还是信息的处理都要通过电路来实现。本章将介绍有关电路的一些基本知识,包括描述电路的基本概念和基本变量,构成电路的几种常见的电路元件以及电流、电压在电路中分布的基本规律——基尔霍夫定律;特别强调了电流、电压参考方向的概念。各种电路元件的特性和基尔霍夫定律是分析电路的基础,而参考方向的引用则是分析电路的前提,这些将贯穿本门课程之始终。

§ 1-1 电路和电路图

一个实际的电路(electric circuit)乃是为实现某一功能由一些电的设备和器件相互联接组成的总体。用两根导线(wire)把一个小灯泡和一节干电池(cell)联接起来便构成了一个最简单的实际电路,如图 1-1(a) 所示。

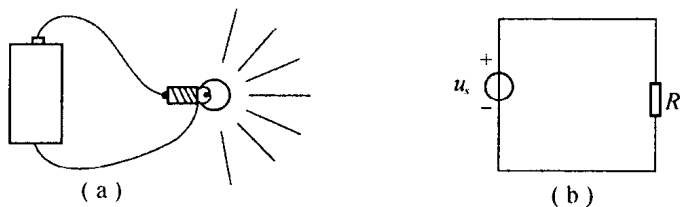


图 1-1

实际电路在应用中所起的作用大致可分为两个方面。一方面,通过电路可以完成电能的传输、分配以及电能与其他各种形式的能量(energy)之间的相互转换,例如电力系统、照明系统等;另一方面,可以根据需要由电路产生、变换和处理某种电信号(signal),例如电子技术中振荡、扫描、放大、调谐等。

实际电路的组成可能非常简单,也可能十分复杂。无论简单还是复杂,总要包含以下三个基本的部分。(1) 产生并提供电能的设备或器件,如电池、发电机等,其功能是变其他形式的能量为电能,为电路提供能源。这一部分被称为电源(source)。(2) 吸收或消耗电能的设备或器件,如灯泡、电炉、扬声器(喇叭)等,其功能是变电能为其他所需形式的能量。这部分被称为负载(load),又称用电器或换能器。(3) 联接导线,用来联接各种电路设备或器件使之形成一个整体——一个完整的电路,并在其中引导电流(current),传输能量。此外,为了安全和方便,还可能有各种控制和保护设备或装置,如开关、继电器和熔断器等。

研究和分析各种电路问题也就是研究和分析发生在电路中的各种物理过程和电磁现象(electromagnetic phenomena)。每一种实际的电路设备或器件都可能同时发生几种电磁现象。为了便于研究和分析,通常是把实际电路用足以反映其电磁性质的一些理想电路元件(circuit element)的组合来代替,构成所谓的电路模型(circuit model)。而理想电路元件则是指具有某种特定的电磁性质的假想元件,每一种这样的元件只反映一种电磁性质,它们都是

某些电路器件在一定条件下的理想化模型。例如,我们把电路中发生将电能转换成热能、光能等形式的能量消耗掉而不能再逆转回来的物理过程的电路器件用电阻元件(resistor)来表示;这样一来,各种电阻器、电炉、电灯等实际的电路器件便都可以用电阻元件这一理想电路元件来代替。像干电池、蓄电池等对外提供一定电压(voltage)的电路器件则可以用一个保持一定电压的理想电压源元件来代替。

用理想的电路元件及其组合来代替实际的电路器件,便可构成与实际电路相对应的电路模型。例如对图 1-1(a)所示的实际电路,如果用电阻元件 R 代替小灯泡,用电压源 u_S 代替干电池,用线段代替联接导线(假设导线电阻忽略不计),就可以得到与之对应的电路模型如图 1-1(b)所示。这种由理想电路元件组成、反映实际电路联接关系的电路模型图,又叫电路图(circuit diagram),通常简称为电路(circuit)。今后我们所说的电路,即我们所研究和分析的对象,都是指的这种电路(模型),而不是实际电路。

结构比较复杂的电路又称(电)网络(network)。电路和网络在本书中没有严格的区别,可以通用。关于电路或网络有一些常用的概念或术语,现分别简单介绍如下。

网络中没有分岔的一段电路称为支路(branch),三条或三条以上支路的联接点称为节点(node)。按照这样的定义,在图 1-2 所示的网络中,共有 $R_1, u_{S1}, R_2, u_{S2}, R_3, u_{S3}, R_4, R_5, R_6$ 六条支路和 A, B, C, D 四个节点。其中 R_4, R_5, R_6 三条支路不含电源,称为无源支路;余下的三条支路均含有电源,称为有源支路。

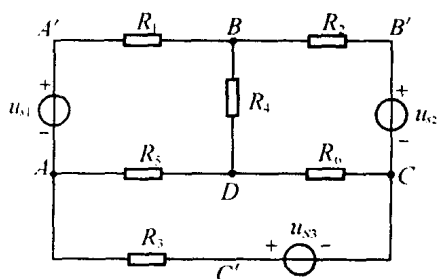


图 1-2

应该指出,支路和节点的定义不是唯一的。有时为了方便,也可以定义一个二端元件为一条支路,支路之间的联接点即为一个节点。若按这种定义,则图 1-2

电路将有九条支路和七个节点(除 A, B, C, D 四点外,还有 A', B', C' 三点亦为节点)。

网络中由若干条支路组成的闭合路径(path)称为回路(loop)。图 1-2 所示的电路共有七个不同的回路,分别是 $AA'BDA, BB'CDB, CC'ADC, AA'BB'CDA, BB'CC'ADB, CC'AA'BDC$ 以及 $AA'BB'CC'A$ 。

如果将一个网络展开在平面上,经过适当的调整可以使其所有支路均互不交叉,则称该网络为平面网络(planar network),否则为非平面网络。显然,图 1-2 所示电路是一个平面网络。可以证明,四个及少于四个节点(节点的定义为前者)的网络均为平面网络。

在平面网络中,没有被支路穿过的回路,称为网孔(mesh)。可见网孔是一种特殊的回路。在以上对图 1-2 网络所列出的七个回路中,只有前三个是网孔。应该指出,只对平面网络才有网孔的概念;对非平面网络,只有回路的概念而没有网孔的概念。

§ 1-2 电流、电压及其参考方向

描述电路工作情形的物理量统称为电路的变量(variable),如电荷(charge)、磁链(flux linkage)、电流、电压、(电)功率(power)等等。其中用的最多的是电流和电压这两个变量。

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。电流的大小则用电流强度的数值来表示。电流强度的定义为

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

即单位时间内通过载流体横截面积的电荷量。当电荷的单位为库仑(C),时间的单位为秒(s)时,电流强度的单位为安培(Ampere),简称安(A), $1\text{A} = 1\text{C/s}$ 。如电流较小,也可用毫安(mA)或微安(μA)做单位;若电流很大,还可用千安(kA)。

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

电流的大小和方向都会直接影响电路的工作状态,因此在研究和分析电路时两者要同时给出或同时确定,否则就是不完整、不准确的。流经电路中某一具体支路的电流,其实际方向只有两种可能,非此即彼。但在实际的电路分析中,有时很难准确判定电流的实际方向,有时电流的实际方向还在随时变动,因此电流的实际方向一时无法标出。为了便于分析,有必要事先指定一个电流方向,当然这一方向不一定是电流的实际方向。我们把这一事先任意指定的电流方向称为电流的参考方向(reference direction)。

指定参考方向后,电流的数值将有正负之分。规定:当电流的实际方向与参考方向一致时,电流为正值;反之,电流为负值。例如对图1-3所示的一段电路,假设电流的实际方向是由A流向B,如图中虚线箭头所示,大小为2安培。则当指定的参考方向如图(a)时,电流 $i = 2\text{A}$;如指定的参考方向如图(b)所示,则电流 $i = -2\text{A}$ 。显然,在引入参考方向之后,电流应被看作是一个代数量。在指定参考方向下,根据电流数值的正或负,就可以确定电流的实际方向。参考方向的选取是任意的,参考方向选取不同,只影响其值的正负号,不影响问题的实际结论。

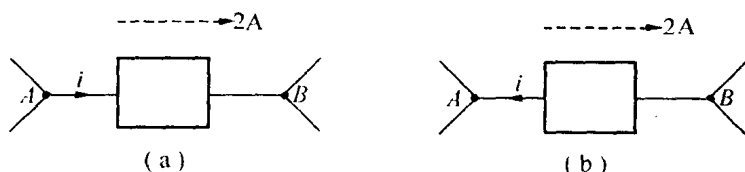


图 1-3

电流的参考方向一般就直接标在其所在的支路上,如图1-3所示。

单位正电荷在电路中某点所具有的电位能,称为该点的电位(potential)。电位的数值是相对于所选定的参考点的。电位参考点是规定其电位能为零的点,可以任意指定,通常都是选取电路中接地或接机壳的公共端为参考点。电位用字母 v 表示,如A点的电位就用 v_A 来表示。当A点的电位高于参考点时, $v_A > 0$ 为正值;反之, $v_A < 0$ 为负值。电路中某点的电位将随所选参考点的不同而表现为不同的数值。但参考点一旦确定,电路中各点的电位便都有了唯一的确定值。电位的这一性质称为电位的单值性。

电路中某两点之间的电位之差,称为该两点之间的电压。电压用字母 u 来表示。如图1-4(a)中A、B两点之间的电压为 $u = v_A - v_B$ 。图中假定A点的电位高于B点的电位,分别用“+”、“-”极性符号来加以标记。在电源以外的电路中,正电荷总是在电场力的作用下由电位高端移向电位低端。因此,习惯上就把这一方向规定为电压的方向,即在电场力的作

① 此处的 i 实际上是 $i(t)$ 的简写,本书均用小写字母表示相应物理量的瞬时值,如 $u(t)$ 简写为 u , $p(t)$ 简写为 p 等等。

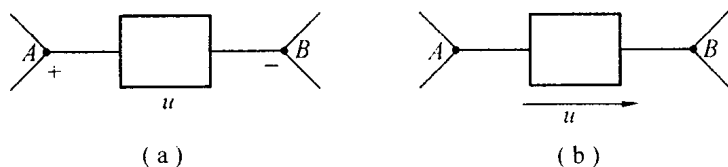


图 1-4

用下正电荷移动的方向,也就是由电位高端指向电位低端的方向(所以电压又称电位降)。随着电荷的移动,正电荷所具有的电位能在减少,减少的能量被这段电路所吸收。因此,电路中某两点之间的电压也可以说成是单位正电荷在电场力的作用下由一点移到另一点的过程中所失去的电位能。即

$$u = v_A - v_B = \frac{d\tau}{dq} \quad (1-2)$$

式中 $d\tau$ 为 dq 这么多电荷在由 A 点移到 B 点的过程中所失去的总电位能。

与电流相似,电路中某两点之间的电压的实际方向也有两种可能。为分析方便,同样可以指定其中任一方向为电压的参考方向,同时把电压看作代数量。当电压的实际方向与参考方向一致时,电压值为正,反之为负。指定参考方向之后,同样可以根据电压数值的正、负来确定电压的实际方向。

在电路中,电压的参考方向一般用“+”、“-”极性来加以标示,称其为参考极性(reference polarity),如图 1-4(a) 中所示,此时电压的参考方向即为由“+”指向“-”的方向;电压的参考方向也可以在两点之间的电路旁用箭头标示,如图 1-4(b) 中所示。电压的参考方向还可以用双下标来表示,如 u_{AB} 表示该电压的参考方向为由 A 指向 B。显然 u_{AB} 与 u_{BA} 是不同的,虽然它们都表示 A、B 两点间的电压,但由于参考方向不同,两者之间相差一个负号,即 $u_{AB} = -u_{BA}$ 。

电位和电压是两个既有联系又有区别的概念。电位是对电路中某点而言的,其值与参考点的选取有关;电压则是对电路中某两点而言的,其值与参考点的选取无关。有时提到电路中某点的电压,实际上是指该点与参考点之间的电压,此时它与该点的电位是一致的。

电位和电压的单位是相同的。当电位能的单位为焦耳(J),电荷量的单位为库仑(C)时,电压的单位为伏特(Volt),简称伏(V), $1V = 1J/C$ 。若电压很高,如在电力系统中,可用千伏(kV)做单位;若电压很低,如在电子技术中,也可以用毫伏(mV)和微伏(μV)做单位。

$$1kV = 10^3V \quad 1mV = 10^{-3}V \quad 1\mu V = 10^{-6}V$$

电流和电压的参考方向在电路分析中起着十分重要的作用。在对任何具体电路进行实际分析之前,都应先指定各有关电流和电压的参考方向,否则分析将无法进行。原则上,电流与电压的参考方向可以各自独立地任意指定;参考方向选取不同,只影响其值的正、负,不影响问题的实际结论。习惯上,同一段电路的电流和电压常常选取相互一致的参考方向,如图 1-5 所示,我们称这样选取的参考方向为关联参考方向。若两者方向选取不一致,则称为非关联参考方向。

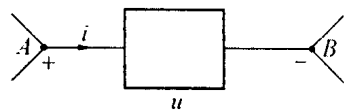


图 1-5

这里需强调一下,今后我们在谈到电流和电压的方向时,如无特别声明,一般指的都是

图中标示的参考方向,而不是其实际方向。初学者必须特别注意并逐步适应这一点。

§ 1-3 电 功 率

正如上节中指出的,电路中随着电荷的移动,进行着能量的转换。当正电荷在电场力的作用下通过一段电路时(此时电流和电压的方向是一致的,见图 1-6),正电荷将失去一部分电位能,这部分能量被这段电路所吸收。电荷失去的能量也就是这段电路吸收的能量,由式(1-2)可知为

$$dw = u dq$$

因此这段电路吸收的电功率(以后就简称为功率)为

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

再由式(1-1),可得此时功率的表达式为

$$p = ui \quad (1-3)$$

式(1-3)说明,在关联参考方向下,一段电路所吸收的功率为其电压和电流的直接乘积。

当电压和电流的参考方向为非关联方向时,此段电路吸收的功率为

$$p = -ui$$

式中负号与 u 、 i 中的任一变量相结合,相当于将该变量的方向倒过来,于是两变量仍相当于取关联参考方向。

以上两式所计算的功率是以吸收为前提的。若计算结果为 $p > 0$,表明该段电路的确是吸收功率的;若 $p < 0$ 则表明该段电路实际上是发出功率的。

一段电路功率的计算也可以发出为前提,此时计算公式正好与上述相反,为

$$p' = \begin{cases} -ui & (\text{关联方向}) \\ ui & (\text{非关联方向}) \end{cases}$$

计算结果如 $p' > 0$,表明该段电路的确是发出功率的;若 $p' < 0$ 则表明该段电路实际是吸收功率的。

功率的单位是瓦特(Watt),简称瓦(W)。 $1W = 1J/s = 1VA$,也可以用千瓦(kW)或毫瓦(mW)为单位。

$$1kW = 10^3W \quad 1mW = 10^{-3}W$$

例 1-1 求图 1-7 所示各元件或电路的功率。图中 $u_1 = 4V$, $i_1 = 0.2A$; $u_2 = 6V$,

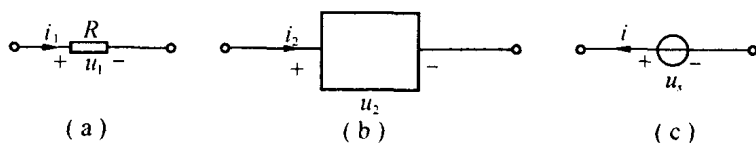


图 1-7

$$i_2 = -0.5A; u_3 = 3V, i = 2mA。$$

说明:在求各功率之前应先明确所求功率是以吸收还是以发出为前提,以便应用合适的

公式。一般情况下,如无明确指定,均选择以吸收为前提。由于多数情况下电源都是对外提供能量的,所以对电源而言,也常以发出为前提计算其功率。

解 (a) 电阻吸收的功率为

$$p_1 = u_1 i_1 = 4 \times 0.2 = 0.8(\text{W})$$

(b) 该段电路吸收的功率为

$$p_2 = u_2 i_2 = 6 \times (-0.5) = -3(\text{W})$$

由于 $p_2 < 0$, 说明该段电路实际发出 3W 的功率。

(c) 对电压源本身而言,该元件上的电压和电流为非关联参考方向,故其吸收的功率为

$$p_s = -u_s i = -3 \times (2 \times 10^{-3}) = -6 \times 10^{-3}(\text{W}) = -6(\text{mW})$$

由于 $p_s < 0$, 说明该电源实际发出功率 6mW。也可以直接计算其发出功率为

$$p'_s = u_s i = 6(\text{mW})$$

无论是以吸收还是以发出为前提进行计算,最后得出的结论都是一样的。实际上一个元件或一段电路吸收 100W 和发出 -100W (或者反过来,发出 100W 和吸收 -100W) 是完全相同的一回事。

一段电路(如图 1-6 所示)在某段时间 $t_0 \sim t$ 期间从外界吸收的电能为

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

若 $w > 0$, 说明该段电路的确是吸收电能的;若 $w < 0$, 则说明该段电路实际是发出能量的。

电能的单位为焦耳(J), 工程上常用瓦秒或千瓦时(kWh) 做电能的单位, 千瓦时又称度。

§ 1-4 电阻元件

从本节起到 § 1-8, 我们将集中介绍一些常用的理想电路元件。为了方便, 今后将省略“理想”二字而简单称之为电路元件。

电路元件是电路最基本的组成单元。每种元件都有其精确的数学定义和特定的表示符号以及不同于其他元件的独有的特性。正是这些特性构成了建立完整的电路方程的两种约束关系之一。

电阻元件是电路中应用最广的元件。许多实际的电路器件如电阻器、电热器、电灯泡、扬声器等都可以用电阻元件来表示。

电阻元件的精确定义是: 其特性可以用 $u \sim i$ 平面上的一条曲线来表示的二端电路元件, 称为电阻元件。在 $u \sim i$ 平面上反映电阻元件特性的曲线称为电阻元件的伏安特性曲线, 简称伏安特性 (Volt-Ampere characteristic)。如果其伏安特性是一条通过 $u \sim i$ 平面坐标原点的直线, 则称其对应的电阻元件为线性电阻元件 (linear resistor); 否则为非线性电阻元件 (non-linear resistor), 图 1-8(a) 所示的两条特性曲线对应的都是非线性电阻元件, 图(b) 所示曲线对应的才是线性电阻元件。

线性电阻元件的电路符号如图 1-9 所示。在关联参考方向下, 线性电阻元件的电压电流关系 (Voltage Current Relation, 缩写为 VCR) 即其伏安关系满足欧姆定律 (Ohm's Law), 为

$$u = Ri \text{ 或 } i = Gu \quad (1-4)$$

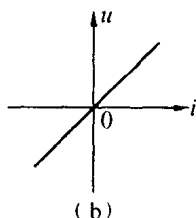
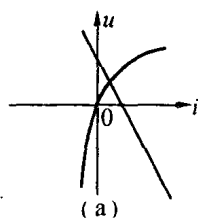


图 1-8

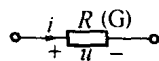
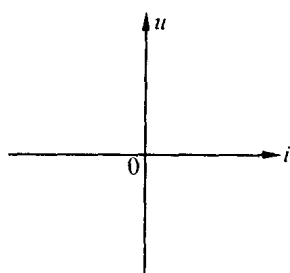


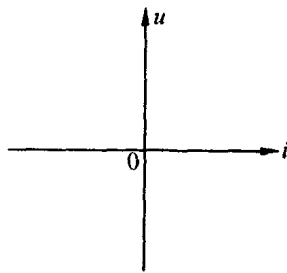
图 1-9

式中 R 、 G 在一般情况下均为不变的正实常数,与 u 、 i 无关,且 $G = \frac{1}{R}$ 。 R 反映了元件对电流的阻碍能力,称为元件的电阻(resistance),单位为欧姆(Ohm),用字母 Ω 表示;电压一定时, R 越大,电流越小。 G 反映了元件对电流的传导能力,称为元件的电导(conductance),单位为西门子(Siemens),用字母 S 表示;电压一定时, G 越大,电流越大。 R 和 G 都是电阻元件的参数(parameter),它们从不同的角度反映了电阻元件的特性。

当 $R = 0$ 或 $G \rightarrow \infty$ 时,由式(1-4)可知,无论 i 为何值(只要为有限值),将恒有 $u = 0$;此时元件的伏安特性将与 i 轴重合,如图 1-10(a) 所示。这种情况相当于将元件两端用一根无阻导线(或称短路线)直接相联而被称为短路(short circuit)。任何元件或一段电路只要其两端电压为零,便可视为短路。相反,当 $R \rightarrow \infty$ 或 $G = 0$ 时,由式(1-4)可知,无论 u 为何值(只要为有限值),将恒有 $i = 0$;此时元件的伏安特性将与 u 轴重合,如图 1-10(b) 所示。这种情况称为断路或开路(open circuit)。任何一个元件或一段电路,只要流经其中的电流为零,便可视为开路。短路和开路是以后经常会用到的两个重要概念。



(a) $u=0$ (短路)



(b) $i=0$ (开路)

图 1-10

由线性电阻元件的伏安关系可知,任何时刻线性电阻元件的电压(或电流)完全由同一时刻的电流(或电压)所决定,而与该时刻以前的电流(或电压)无关。因此,电阻元件是一种瞬时元件。

任何时刻线性电阻元件吸收的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 = \frac{i^2}{G} \quad (1-5)$$

即电阻元件吸收的功率与电流或电压的平方成正比。因此,当 R 或 G 为正值时,将恒有 $p \geq 0$ 。这说明正值电阻是纯粹的耗能元件(dissipative element)。此外,由上式还可以看出,

当电流一定时,阻值越大,电阻吸收的功率越大;而当电压一定时,阻值越大,电阻吸收的功率越小。

电阻元件在某段时间 $t_0 \sim t$ 期间吸收的电能为

$$w = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi)d\xi = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi)d\xi = \int_{t_0}^t Gu^2(\xi)d\xi$$

这些电能一般将被转换成热能而消耗掉。

在关联参考方向下,正值电阻元件的伏安特性在 $u \sim i$ 平面的一、三象限。如果一个线性电阻元件的伏安特性在 $u \sim i$ 平面的二、四象限,则此元件的电阻将为负值,负值电阻元件吸收的功率由式(1-5)知将小于零,说明它实际上是发出电能的。要想获得这种元件,不像获得正值电阻元件那么容易,一般需经过专门的精心设计。

今后,为了叙述方便,将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表示符号 R ,既用来表示一个电阻元件,也用来表示这一元件的参数。

§ 1-5 电容元件

电容元件(capacitor)也是电路中最应用最广的元件之一。它是实际电容器的理想化模型,它反映了电压引起电荷聚集和电场能量储存这一物理过程和电磁现象。

电容元件的定义是:其特性可以用 $q \sim u$ 平面上的一条曲线来表示的二端电路元件,称为电容元件。在 $q \sim u$ 平面上表示电容元件特性的曲线称为电容元件的库伏特性曲线,简称库伏特性(Coulomb-Volt Characteristic)。如果其库伏特性是一条通过 $q \sim u$ 平面坐标原点的直线,如图 1-11 所示,则称其对应的电容元件为线性电容元件,否则为非线性电容元件。

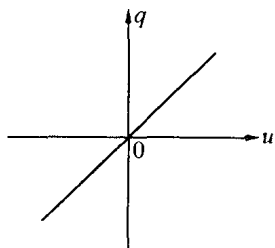


图 1-11

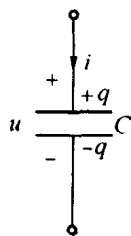


图 1-12

线性电容元件的电路符号如图 1-12 所示。两个极板上的电荷与电压成线性关系,为

$$q = Cu \quad (1-6)$$

式中 C 在一般情况下为一个不变的正实常数,与 q 、 u 无关,称为电容元件的电容(capacitance)。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(Farad),简称法(F), $1F = 1C/V$ 。用法拉做实际电容器的单位通常显得太大,工程中常用微法(μF)和微微法($\mu\mu F$)做电容的单位,微微法又称皮法(pF)。

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

随着加在电容两端的电压的变化,电容的两极板上存储的电荷也跟着变化。电荷增加的过程称之为充电,电荷减少的过程谓之放电。在充放电的过程中,必有电流通过其引线。当取

电流与电压的方向一致即两者为关联参考方向时,将有

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt}$$

即

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1-7)$$

这就是线性电容元件的伏安关系。该式说明,线性电容元件的电流与其电压的变化率成正比(而与电压的大小无关),电压变化越快,电流越大;当电压恒定不变时,电流为零,此时电容元件相当于开路。鉴于电容元件电流和电压所具有的上述动态关系,电容元件是一种动态元件(dynamic element)。

式(1-7)是用电压来表示电流的,是一种导数关系。如果用电流来表示电压,则电容元件的伏安关系又可以写成如下的积分形式

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \\ &= u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中 t_0 为积分过程中的某个指定时刻,称为初始时刻,

$$u(t_0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\xi) d\xi$$

是 t_0 时刻的电容电压,称为电容的初始电压(initial voltage)。

式(1-8)表明,任一时刻电容的电压是由该时刻以前各时刻的电流对时间的积分决定的;它不仅与该时刻的电流有关,而且与该时刻以前所有时刻的电流均有关。这说明,电容元件对其电流的全部“历史”,具有记忆功能。所以电容元件是一种记忆元件(memory element)。相比之下,电阻元件就不具有记忆功能,故电阻元件是一种无记忆元件。

如果取初始时刻 $t_0 = 0$,则式(1-8)可以写成

$$u(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi \quad (1-9)$$

若 $u(0) = 0$,则上式又可简化成

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

电容元件还是一种储能元件(energy storing element)。它能把从电路中吸收的能量以电场能的形式储存在元件的电场之中,而不是像电阻元件那样消耗掉。在适当的时候,储存的电场能还会以某种方式释放出来;但释放的能量决不会超过它所吸收并储存的能量,即电容元件本身既不消耗能量,也不会产生新的能量。

在关联参考方向下,电容元件吸收的功率

$$p = ui = uC \frac{du}{dt}$$

电容元件在某时刻所储有的电场能也就是它在过去所有时刻从外界吸收的能量,为

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

上述积分在由对时间的积分转化为对电压的积分的同时,积分的上、下限也随之转化为

$u(t)$ 和 $u(-\infty)$, 而 $u(-\infty)$ 是指在储能之初电容的电压, 一般来说应有 $u(-\infty) = 0$ 。于是电容元件在某时刻所储有的电场能为

$$w_c(t) = \frac{1}{2} Cu^2(t) \quad (1-10)$$

该式说明, 电容元件在某时刻所储有的电场能与该时刻电压的平方成正比; 它只和该时刻的电压有关, 而和以往电压的变化情况以及此时电流的大小甚至有无均无关。

例 1-2 已知某电容元件的电容 $C = 1\mu\text{F}$, 若加在其上的电压 u 的波形如图 1-13(a) 所示, 电流 i 与电压 u 取关联参考方向, 试画出其电流 i 的波形, 并计算在 $t_1 = 4\text{ms}$ 和 $t_2 = 5\text{ms}$ 时电容元件的电场能。

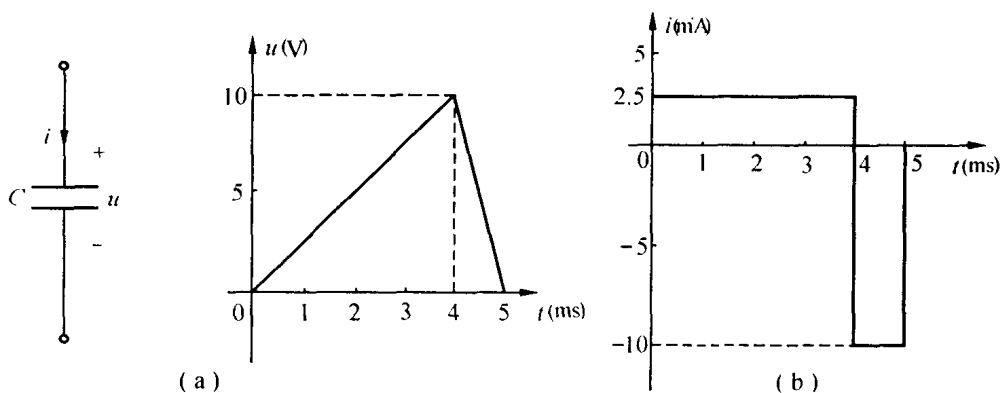


图 1-13

解 电容的电流

$$i = C \frac{du}{dt}$$

电压对时间的变化率由图 1-13(a) 可分段求得如下

$$\frac{du}{dt} = \begin{cases} \frac{10-0}{4 \times 10^{-3}} = 2.5 \times 10^3 (\text{V/s}) & (0 < t < 4\text{ms}) \\ \frac{0-10}{(5-4) \times 10^{-3}} = -10 \times 10^3 (\text{V/s}) & (4\text{ms} < t < 5\text{ms}) \end{cases}$$

故

$$i = C \frac{du}{dt} = 10^{-6} \frac{du}{dt} = \begin{cases} 2.5(\text{mA}) & (0 < t < 4\text{ms}) \\ -10(\text{mA}) & (4\text{ms} < t < 5\text{ms}) \end{cases}$$

其波形如图 1-13(b) 所示。

电容的储能

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

由图 1-12(a) 可知

$$u(t_1) = 10\text{V} \quad u(t_2) = 0$$

故

$$w_c(t_1) = \frac{1}{2} Cu^2(t_1) = \frac{1}{2} \times 10^{-6} \times 10^2 = 5 \times 10^{-5} (\text{J})$$

$$w_c(t_2) = \frac{1}{2} Cu^2(t_2) = \frac{1}{2} \times 10^{-6} \times 0 = 0$$

与电阻元件一样, 今后, 为了叙述方便, 把线性电容元件简称为电容。这样“电容”这一

术语及其相应的表示符号 C , 既用来表示电容元件, 也用来表示这一元件的参数。

§ 1-6 电感元件

电感元件(inductor) 也是电路中最常用的元件。它是实际电感线圈的理想化模型, 它反映了电流产生磁通和磁场能量储存这一物理过程和电磁现象。

电感元件的定义是: 其特性可以用 $\Psi - i$ 平面上的一条曲线来表示的二端电路元件, 称为电感元件。在 $\Psi - i$ 平面上表示电感元件特性的曲线称为电感元件的韦安特性曲线, 简称韦安特性(Weber-Ampere characteristic)。如果其韦安特性是一条通过 $\Psi - i$ 平面坐标原点的直线, 如图 1-14 所示, 则称其对应的电感元件为线性电感元件; 否则为非线性电感元件。

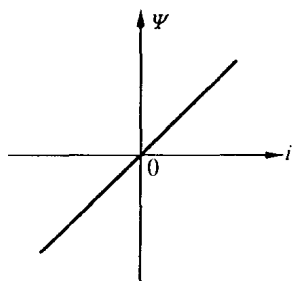


图 1-14

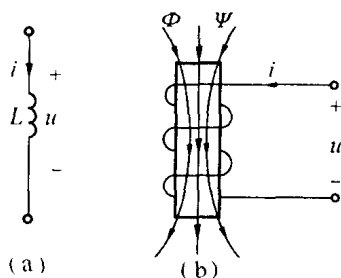


图 1-15

线性电感元件的电路符号如图 1-15(a) 所示。通过其中的电流与其产生的磁链^①成线性关系, 为

$$\Psi = Li \quad (1-11)$$

式中 L 在一般情况下是一个不变的正实常数, 与 Ψ 、 i 无关, 称为电感元件的电感(inductance)。当磁链的单位为韦伯(Wb), 电流的单位为安培时, 电感的单位为亨利(Henry), 简称亨(H), $1\text{H} = 1\text{Wb/A}$ 。如电感较小, 也常用毫亨(mH) 和微亨(μH) 做单位。

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

可以把电感元件看作是由无阻导线绕制而成的空芯线圈, 如图 1-15(b) 所示。当在线圈中通以电流 i 时, 线圈中产生磁通 Φ 并形成磁链 Ψ 。如果电流是变化的, 磁链 $\Psi = Li$ 也将随着变化。根据法拉第电磁感应定律(Law of Electromagnetic Induction), 磁链的变化将在线圈两端引起感应电压(induced voltage), 而且在电流与磁通或磁链的方向满足右手螺旋关系、感应电压和电流方向一致的前提下, 将有

$$u = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d(Li)}{dt}$$

即

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-12)$$

这就是线性电感元件的伏安关系。该式说明, 线性电感元件的电压与其电流的变化率成正比 (而与电流的大小无关), 电流变化越快, 电压越高; 当电流恒定不变时, 电压为零, 此时电感元件相当于短路。由于电感元件的电压和电流之间也是一种动态关系, 故电感元件也是一种

^① 磁链 Ψ 是由磁通 Φ 和 N 匝线圈交链形成的, $\Psi = N\Phi$ 。