

高等学校教材

电路原理

上册

重庆大学电工原理教研室编

江 泽 佳 主 编

周守昌 彭扬烈 吴 宁 修订

高等学校教材

电 路 原 理

上 册

重庆大学电工原理教研室 编

江泽佳 主编

周守昌 彭扬烈 吴宁 修订

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是在1977年版的基础上修订的。修订本在体系上作了较大的调整,对非线性电路、线性电路的时域分析和复频域分析、网络图论和网络方程、状态变量法等基本的和近代的内容有所扩充与加深,对某些传统内容作了压缩,对定义、定理和基本概念的阐述更加严谨,若干内容在讲法上也有所改进,文字通顺,注意联系实际和便于自学。

全书仍分上、下两册。上册包括电路的克希霍夫定律和电路元件,电路分析导论,时域分析,正弦稳态分析。下册包括频域分析,复频域分析,网络图论和网络方程,状态变量法,二端口网络,分布参数电路。

高等学校教材
电 路 原 理
上 册

重庆大学电工原理教研室编

江泽佳 主编

周守昌 彭扬烈 吴宁 修订

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京市顺义县印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 20.25 字数 470,000

1979年7月第1版 1985年5月第2版 1985年5月第1次印刷

印数 00,001—9,130

书号 15010·0629 定价 3.50 元

修订本序言

1980年教育部高等学校工科电工教材编审委员会扩大会议审订了四年制电类(不包括无线电技术类)各专业试用《电路教学大纲(草案)》,同年下达的教育部高等学校工科基础课1981—1985年教材编写规划要求对重庆大学电工原理教研室编写的《电路原理》上、下册初版作加宽、加深幅度可以较大的修订。修订稿从1981年秋季开始,三年来在重庆大学三个系二十一个班经过三次完整的试用和修改。1983年秋送请主审人清华大学肖达川教授和江泽光副教授审查后,又作了最后一次修订,于1984年九月定稿。

修订本基本上按照《电路教学大纲(草案)》的体系,首先讲述电路的基本元件和基本约束关系,介绍电路的基本分析方法,然后依次安排了时域分析、正弦稳态分析、频域分析、复频域分析、网络图论和网络方程、状态变量分析、二端口网络、分布参数电路。对于非线性电路和计算机辅助分析,采取了分散在有关章节介绍的方式。例如第一章介绍了线性元件之后接着就介绍非线性元件;第二章在讲述线性电阻电路的解析解法的同时介绍了数值解法,接着又讲了非线性电阻电路的图解法、迭代法、线性化模型和小信号分析法;第三章既应用了解微分方程的经典方法,又介绍了一阶微分方程的数值解法和解线性动态电路的友模法。考虑到学生一般已能初步掌握编写计算机程序的方法,在修订稿经过第一次试用后,决定删去全部计算框图和程序,用省下的篇幅加强电路的数值分析方法。对于一部入门的电路教材,我们认为将非线性电路分散讲授比集中在一章介绍,效果要好一些。

与初版相比较,修订本强调了电路模型的概念,加强了非线性电路理论和计算方法,加深了集中参数电路的时域分析和复频域分析,网络图论和网络方程与状态变量分析两章有所扩充和加深,分布参数电路部分作了压缩。为了克服初版习题与正文配合不够紧密的缺点,修订本增加了节后练习题,例题和各章习题的数量有所增加,并根据试用的经验作了适当的调整。

修订本第一、二章和第三章§3-13至§3-21、第九章§9-8由周守昌同志执笔,第三章§3-1至§3-12、第七、八章和第九章§9-1至§9-7由彭扬烈同志执笔,第四、五、六、十章由吴宁同志执笔。周守昌同志负责起草修订大纲,先后四次统稿,并完成最后全书校定的工作。重庆大学电工原理教研室的许多同志分别参加了选编和解算修订本的习题、绘制修订本的插图和试用修订稿的工作。

高等工程教育正面临新的巨大变革的前夕,相应地,工科教材也必须不断改进。我们诚恳地期望广大读者,特别是采用本书作教材或参考的师生,多多提出批评和建议。

江泽佳

1984年10月1日

目 录

第一章 克希霍夫定律和电路元件.....1

§ 1-1 电路和电路模型.....1	§ 1-2 电流和电压的参考方向.....2
§ 1-3 克希霍夫定律.....3	§ 1-4 激励源.....8
§ 1-5 电阻元件.....10	§ 1-6 电容元件.....13
§ 1-7 电感元件.....19	§ 1-8 耦合电感元件.....24
§ 1-9 受控源.....28	

习题.....32

第二章 电路分析导论.....39

§ 2-1 电阻的串联和并联.....39	§ 2-2 电容的串联和并联.....46
§ 2-3 两耦合电感元件的串联和并联.....49	§ 2-4 线性电路的性质·叠加定理.....52
§ 2-5 替代定理.....56	§ 2-6 戴维南定理.....58
§ 2-7 诺顿定理.....61	§ 2-8 实际电源的电路模型.....66
§ 2-9 星形电阻网络与三角形电阻网络的 等效变换.....69	§ 2-10 支路分析法.....73
§ 2-11 节点分析法.....76	§ 2-12 回路分析法.....83
§ 2-13 激励源的转移.....88	* § 2-14 电路方程的数值解法.....90
§ 2-15 非线性电阻电路的图解法.....96	§ 2-16 牛顿-拉夫逊迭代法.....99
§ 2-17 非线性电阻元件的线性化模型.....102	* § 2-18 含有若干非线性电阻元件的电路的 分析.....105
§ 2-19 非线性电阻电路的小信号分析法.....108	习题.....111

第三章 时域分析.....122

§ 3-1 动态电路的输入-输出方程.....122	§ 3-2 初始状态和初始条件.....125
§ 3-3 零输入响应.....130	§ 3-4 一阶电路的零输入响应.....133
§ 3-5 单位阶跃函数和单位冲激函数.....139	

§ 3-6 零状态响应.....144

§ 3-7 一阶电路的阶跃响应.....151	§ 3-8 一阶电路的冲激响应.....158
§ 3-9 二阶电路的冲激响应.....163	§ 3-10 卷积积分及零状态响应的卷积计 算法.....175
§ 3-11 一阶电路对阶跃激励的全响应·三 要素法.....183	* § 3-12 一般动态电路输入-输出方程的建立 和求解示例.....191
§ 3-13 求一阶微分方程数值解的前向欧 拉法.....197	§ 3-14 求一阶微分方程数值解的后向欧 拉法.....200
§ 3-15 求一阶微分方程数值解的梯形法.....202	* § 3-16 龙格-库塔法.....203
§ 3-17 线性动态元件的友模.....205	§ 3-18 用友模法求线性动态电路的数 值解.....209
* § 3-19 LU 分解法.....211	* § 3-20 卷积积分的数值算法.....217
* § 3-21 一阶非线性动态电路的分析.....219	习题.....221

第四章 正弦稳态分析.....234

§ 4-1 正弦量的基本概念.....234	§ 4-2 线性电路对正弦激励的响应·正弦 稳态响应.....235
§ 4-3 正弦量的相量表示法.....238	§ 4-4 克希霍夫定律的相量形式.....244
§ 4-5 电路元件的电压电流关系的相量 形式.....245	§ 4-6 阻抗和导纳.....252
§ 4-7 阻抗的串联和并联.....255	§ 4-8 节点方程和回路方程.....264
§ 4-9 含有耦合电感元件的电路的计算.....270	§ 4-10 正弦电流电路中的功率.....273
§ 4-11 谐振电路.....285	§ 4-12 三相电路.....296
习题.....304	

部分习题答案.....314

第一章 克希霍夫定律和电路元件

本章的中心内容是阐明电路的基本约束关系,即克希霍夫定律和元件特性。前者是元件间联接关系的约束;后者是元件自身的约束。此外,着重介绍了作为电路理论基本概念的模式化概念和参考方向。

§ 1-1 电路和电路模型

若干个电气设备或器件按照一定方式组合起来,构成电流的通路,叫做电路(circuit)。

作为电路组成部分的设备或器件,例如供电设备(电源(source))、用电设备(负载(load))、电阻器、电感器、电容器、晶体管、电子管等,统称为电路的部件(component)。

然而电路理论中所谓的电路和电路元件(circuit element)(简称元件),不是上述实际电路和实际电路的部件,而是一些数学模型(mathematical model)(简称模型),即在一定条件下能够准确地反映实际电路及其部件的电磁性能的抽象模型。有些实际部件在某种条件下的模型可由一种元件构成,有些实际部件的模型则应由几种元件构成。把实际电路及其部件模型化,是为了便于用数学的方法分析电路和设计电路。

在电路理论中,作为模型的电路可以定义为相互联接着的元件的集合。

电路又可称为电网络,简称网络(network)。“电路”和“网络”这两个术语通常是相互通用的。

实际电路的形式和作用是多多种多样的。有的可以延伸到数百公里以上,有的可以局限在几个平方毫米以内。就其目的而言,或者是为了实现电力的传输和分配,或者是为了传输或处理各种电信号(以下简称信号(signal)),例如语言信号、图象信号和控制信号等。不论哪一种实际电路^①,随着电流的通过,电路中总是进行着电能与其它形式的能量相互转换的过程。

一般地讲,载有电流的导体(或半导体)总会由于发热而损耗电能。电路中还可能由其它原因所造成的能量损耗。电阻(resistance)就是用以反映能量损耗的电路参数(circuit parameter)。

有电压就有电场;有电流就有磁场。电场和磁场都具有能量。当电路工作时,在电路中和电路周围到处都有电场和磁场。电容(capacitance)和电感(inductance)就是分别用以反映电场储能性质和磁场储能性质的电路参数。

由于电路中的能量损耗和电场储能、磁场储能连续分布的特性,反映这些能量过程的三种电路参数也是连续分布的。就是说,在电路的任何部分,都既有电阻,又有电容,又有电感。但是在

① 本书不考虑超导体电路。

电路中的电压(voltage)和电流(current)的频率(frequency)不太高的条件下,确切地说,当电路的部件及电路的各向尺寸远小于电路周围电磁波^①(electromagnetic wave)的波长(wave length)时,电路参数的分布性对电路性能的影响并不明显,从而可以近似地用集中的电阻、电容和电感作为电路的参数,即认为能量损耗、电场储能和磁场储能这三种过程是分别集中在电阻元件、电容元件和电感元件中进行的。由这些理想的集中参数元件(lumped element)构成的电路称为集中参数电路(lumped circuit)。

一个实际电路的部件,根据不同情况,可以抽象成为不同形式的集中参数等效电路,即代之以不同形式的集中参数电路模型。例如一个电感线圈,在低频条件下工作时,可以不考虑线圈的匝间分布电容和层间分布电容,而把它抽象成为一段电阻、电感串联电路。随着工作频率的升高,分布电容的效应将逐渐表现出来。在高频条件下,即使尚可作为集中参数电路处理时,也必须考虑分布电容的影响而以并联的等效集中电容代替分布电容。又例如在一个电容器中,电场的作用占绝对优势,相对说来,磁场可以略去不计。当其发热损耗又很低时,就可以把电容器抽象成为一个理想的电容元件。而要考虑发热损耗时,则须将电容器抽象成为电阻、电容并联(或串联)电路。

集中的电阻、电容和电感等二端元件(two-terminal element)中的电流及其端电压(terminal voltage),在任一瞬时,具有完全确定的数值(即为时间的单值函数)。集中参数电路中任意两点间的电压的数值,在任一瞬时,也是完全确定的。

图 1-1-1a 表示在低频条件下,一个电感线圈和电容器串联的集中参数等效电路;图 1-1-1b 表示在低频条件下,一个电感线圈和电容器并联的集中参数等效电路。图中 R 代表线圈的电阻, L 代表线圈的电感, C 代表电容器的电容。

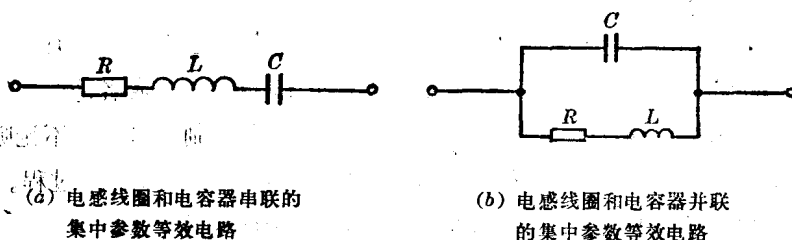


图 1-1-1 集中参数电路

图 1-1-1b 也可用以表示一个电感线圈在高频条件下的集中参数等效电路,这时 C 则是代替分布电容的等效集中电容。

本书第一章至第九章讲述集中参数电路,第十章讨论分布参数电路。

§ 1-2 电流和电压的参考方向

在物理学中初步介绍了电流和电压等物理量,本节不再重复物理内容,而只着重讲述电流和

^① 电磁波即在空间传播着的交变电场(alternating electromagnetic field)。自由空间中电磁波的波长与频率成反比,二者的乘积等于光速。

电压的参考方向(reference direction)。

从数学观点看,作为时间函数(常量可以看成时间函数的特例)的电流和电压都是代数量,其值可以为正,也可以为负。电流(或电压)函数值为正时该电流(或电压)的方向称为它的参考方向。电流(或电压)的参考方向可以随意规定。但是一经规定后,在计算过程中便不得任意改变。

以图 1-2-1 所示二端元件中的电流 $i(t)$ 为例,它的参考方向用箭头表示。当此电流的函数值为正时,其实际方向与其参考方向相同;否则相反。

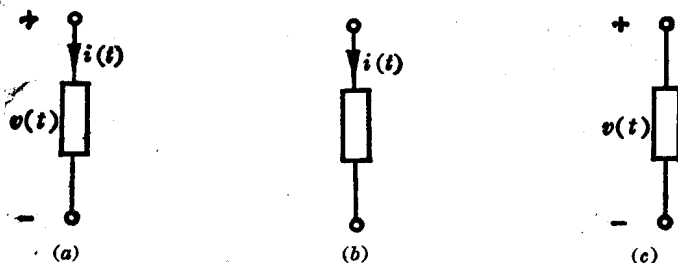


图 1-2-1 任意二端元件的电流和电压的统一参考方向

电压 $v(t)$ 的参考方向(或参考极性)用“+”、“-”号表示。但须注意,电压的参考方向乃是电位降(potential drop)的参考方向,即由规定的高电位点(“+”极)指向规定的低电位点(“-”极)。电位升(potential rise)的参考方向则是由规定的低电位点指向规定的高电位点。显而易见,任一瞬时由高电位点到低电位点的电位降,在数值上等于由低电位点到高电位点的电位升。

同一元件中电流和电压的参考方向均可任意规定,二者可以一致,也可以不一致,但为简便计,常将它们统一起来,而称之为统一参考方向。图 1-2-1(a) 所示电流和电压的参考方向就是统一参考方向。选定统一参考方向后,元件的端电压即为顺电流方向的电位降,从而在任一瞬时 t , 电压 $v(t)$ 和电流 $i(t)$ 的乘积等于该元件在该瞬时吸收的功率(常称为瞬时功率(instantaneous power)) $p(t)$, 即

$$p(t) = v(t)i(t)$$

采用统一参考方向时,可以只用箭头表明元件电流(并暗示元件电压)的参考方向,如图 1-2-1b 所示;或只用“+”、“-”号表明元件电压(并暗示元件电流)的参考方向,如图 1-2-1c 所示。本书在未作特殊声明时均采用统一参考方向。

在国际单位制(SI)中,电压的单位是伏特(volt),简称伏(符号为 V);电流的单位是安培(ampere),简称安(符号为 A);功率的单位是瓦特(watt),简称瓦(符号为 W)。

§ 1-3 克希霍夫定律

电路是相互联接着的元件的集合,电路中的所有元件电流和电压自应遵循由元件的相互联接所规定的约束关系(可称之为拓扑约束(topological constraint))。克希霍夫定律概括了这些约束关系,它是分析和计算电路的基本依据。克希霍夫定律有两条,即克希霍夫电流定律和克希霍夫电压定律。前者适用于电路中的任一“节点”,后者适用于电路中的任一“回路”。

下面先介绍几个有关的电路术语:

1. 支路(branch): 在集中参数电路中, 每一个二端元件构成一个支路。根据这个定义, 图 1-3-1 所示电路具有七个支路。

2. 节点(node): 在集中参数电路中, 每个支路的端点叫做节点。两个或两个以上的支路接于一点时, 此联接点只算作一个节点。通常把仅仅关联两个支路的节点叫做简单节点 (simple node)。图 1-3-1 所示电路具有五个节点, 其中节点④是简单节点。

3. 回路(loop): 在集中参数电路中, 由若干支路构成的, 其中每一个节点与两个支路(而且只与两个支路)相关联的闭合路径叫做回路。例如图 1-3-1 所示电路中支路 1、3、6 构成一个回路; 支路 1、2、7、6 同样构成一个回路; 其余回路不再一一列举。

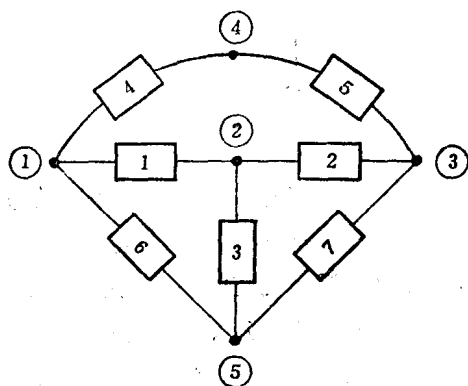


图 1-3-1 电路的支路、节点和回路

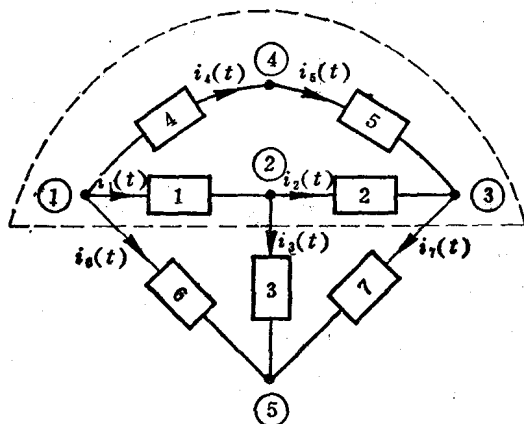


图 1-3-2 克希霍夫电流定律示例

1-3-1 克希霍夫电流定律

克希霍夫电流定律(Kirchhoff's current law, 缩写为 KCL) 反映了集中参数电路中会合到任一节点的各支路电流间相互约束的关系, 即:

对于集中参数电路中的任何一个节点而言, 在任一瞬时, 流入此节点的电流之和等于流出此节点的电流之和。

例如在图 1-3-2 所示电路中, 根据克希霍夫电流定律, 可对节点①、②、③分别列出方程如下:

$$\text{节点①} \quad i_1(t) + i_4(t) + i_6(t) = 0$$

$$\text{节点②} \quad i_2(t) + i_3(t) = i_1(t)$$

$$\text{节点③} \quad i_7(t) = i_2(t) + i_5(t)$$

经适当的移项处理后写成

$$\text{节点①} \quad i_1(t) + i_4(t) + i_6(t) = 0$$

$$\text{节点②} \quad -i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = 0$$

$$\text{节点③} \quad -i_2(t) - i_5(t) + i_7(t) = 0$$

由此可见, 克希霍夫电流定律可以换一种说法, 即:

对于集中参数电路中的任何一个节点而言, 在任一瞬时, 流出(或流入)此节点的电流的代数和恒等于零。用数学式表达为

$$\sum i(t) = 0 \quad (1-3-1)$$

此式称为克希霍夫电流方程,或节点电流方程。建立这种方程时,要注意根据各支路电流(就其参考方向而言)是流出节点或流入节点来决定在它们的前面取“+”号或“-”号。

值得注意,关联着简单节点的两支路电流在参考方向一致时彼此相等。例如图 1-3-2 中节点④的克希霍夫电流方程为

$$i_4(t) = i_5(t)$$

因此,为了减少电路的克希霍夫电流方程数起见,可以不考虑简单节点,而将关联着简单节点的相互串联的元件作为一个支路看待。

图 1-3-2 中节点⑤的克希霍夫电流方程为

$$i_3(t) + i_6(t) + i_7(t) = 0$$

这表明任一瞬时流入节点⑤的电流的代数和等于零。此方程也可由其余诸节点的克希霍夫电流方程相加求得。由图 1-3-2 亦可看出,在任一瞬时,流出图中用虚线表示的包围着节点①、②、③、④的闭合面的电流的代数和也等于零。事实上,克希霍夫电流定律可以适用于类似的任何一个闭合面。这种假想的闭合面包围着的节点和支路的集合,可以叫做电路的广义节点 (super-node)。

克希霍夫电流定律,就其实质来说,是电流连续性原理在集中参数电路中的表现形式。所谓电流的连续性,对于集中参数电路而言,就是说,在任何一个无限小的时间间隔内,流入任一节点(广义节点或普通节点)的电荷与流出该节点的电荷必然相等。换言之,克希霍夫电流定律表明了在任何节点上电荷的守恒性。

尚须指出,克希霍夫电流定律与元件的性质无关,节点电流方程的具体形式仅仅依赖于支路与节点的联接关系和支路电流的参考方向。

1-3-2 克希霍夫电压定律

克希霍夫电压定律(Kirchhoff's voltage law, 缩写为 KVL)反映了一个回路中各支路电压间相互约束的关系。

先以图 1-3-3 所示电路中的回路①为例,任意选定回路的参考方向(例如图示顺时针方向),沿着这个方向计算回路中各支路电压瞬时值的代数和。

$$\begin{aligned} \text{回路①} \quad & v_1(t) + v_3(t) - v_6(t) \\ & = [v_1(t) - v_2(t)] + [v_2(t) \\ & \quad - v_5(t)] - [v_1(t) - v_5(t)] \\ & = 0 \end{aligned} \quad (1-3-2)$$

式中, $v_1(t)$ 、 $v_3(t)$ 、 $v_5(t)$ 分别代表节点①、②、⑤的电位瞬时值。

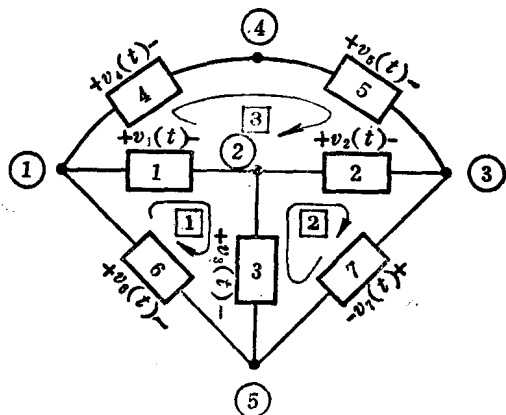


图 1-3-3 克希霍夫电压定律示例

同理,按图示参考方向,计算回路②、③中各支路电压瞬时值的代数和,其结果均等于零。即

回路②

$$v_2(t) + v_7(t) - v_3(t) = 0$$

回路③

$$v_4(t) + v_5(t) - v_2(t) - v_1(t) = 0$$

克希霍夫电压定律指出,在集中参数电路的任何一个回路中,任一瞬时,沿着任意选定的回路参考方向计算,各支路电压的代数和恒等于零。用数学式表达为

$$\sum v(t) = 0 \quad (1-3-3)$$

此式称为克希霍夫电压方程,或回路电压方程。在一个回路中,凡支路电压的参考方向与回路的参考方向一致者,在回路电压方程中该电压的前面取“+”号;反之取“-”号。

由式(1-3-2)可以看出,克希霍夫电压定律的成立,是由于集中参数电路中任何时刻任意两点间的电压等于该两点间的电位差,而与计算电压的路径无关。因此,克希霍夫电压定律可以说是集中参数电路中任意两点间瞬时电压单值性的必然结果。

从电位的观点来看,在任一瞬时,由一点出发,沿着一个回路绕行一周,电位有升必有降,升多少就降多少,回到原来的出发点时,该点的电位是不会发生变化的。因此,克希霍夫电压定律也可以说是集中参数电路中任意一点瞬时电位单值性的必然结果。

应当指出,克希霍夫电压定律同克希霍夫电流定律一样与元件的性质无关,回路电压方程的具体形式仅仅依赖于回路所关联的支路以及回路的参考方向和回路中各支路电压的参考方向。

尚须指出,基于瞬时电压(或电位)单值性的克希霍夫电压定律,不仅适用于由若干支路构成的具体回路,也适用于不完全是由支路构成的假想回路。

例 1-3-1 根据克希霍夫电压定律,可以计算电路中任意两点间的电压和任意一点的电位。现以图 1-3-4 所示直流电路为例,求节点①到节点⑤的电压和各节点的电位。

解 将克希霍夫电压定律应用于假想回路①②⑤①可得

$$v_{12} + v_{25} + v_{51} = 0$$

或

$$v_{12} + v_{25} - v_{15} = 0$$

从而求出由节点①到节点⑤的电压

$$\begin{aligned} v_{15} &= v_{12} + v_{25} \\ &= v_{12} - v_{52} \\ &= 2 - 6 \\ &= -4\text{V} \end{aligned}$$

同一电压也可由另一路径求得:

$$\begin{aligned} v_{15} &= v_{14} + v_{45} \\ &= v_{14} - v_{54} \\ &= 20 - 24 \\ &= -4\text{V} \end{aligned}$$

计算各节点的电位时,要先选择一个电位参考点(potential reference point)即零电位点(zero potential point)。

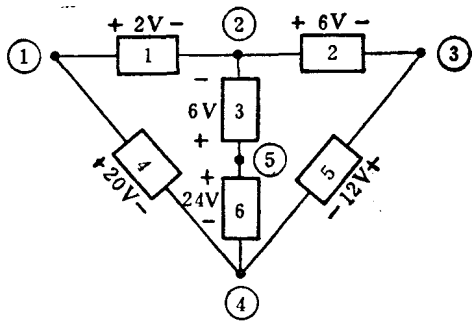


图 1-3-4 电位的计算

(1) 如以节点④作为电位参考点, 即令节点④的电位

$$v_{④} = 0$$

则节点①的电位

$$v_{①} = v_{14} = 20\text{V}$$

节点②的电位

$$v_{②} = v_{24} = v_{25} + v_{54} = -6 + 24 = 18\text{V}$$

或

$$v_{②} = v_{24} = v_{21} + v_{14} = -2 + 20 = 18\text{V}$$

或

$$v_{②} = v_{24} = v_{23} + v_{34} = 6 + 12 = 18\text{V}$$

节点⑤的电位

$$v_{⑤} = v_{54} = 24\text{V}$$

节点③的电位

$$v_{③} = v_{34} = 12\text{V}$$

(2) 又如以节点①作为电位参考点, 即令节点①的电位

$$v_{①} = 0$$

则节点②的电位

$$v_{②} = v_{21} = -2\text{V}$$

节点⑤的电位

$$v_{⑤} = v_{51} = v_{52} + v_{21} = 6 - 2 = 4\text{V}$$

或

$$v_{⑤} = v_{51} = v_{54} + v_{41} = 24 - 20 = 4\text{V}$$

节点④的电位

$$v_{④} = v_{41} = -20\text{V}$$

节点③的电位

$$v_{③} = v_{31} = v_{32} + v_{21} = -6 - 2 = -8\text{V}$$

或

$$v_{③} = v_{31} = v_{34} + v_{41} = 12 - 20 = -8\text{V}$$

由此可见, 计算电位时电位参考点选择得不同, 各点电位将改变同一个数量; 但任意两点间的电压 (即电位差) 则不随电位参考点的改变而改变。

练习题

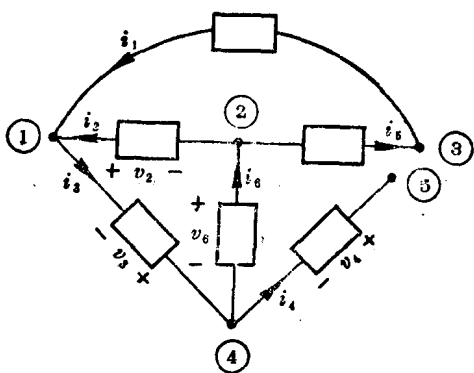
1-3-1 设图题 1-3-1 中的各电压、电流分别按以下四种情况给定, 试问能否满足 KCL 和 KVL:

(a) $i_1 = 2\text{ A}$ $i_2 = 5\text{ A}$ $i_3 = -7\text{ A}$ $i_4 = 10\text{ A}$ $i_5 = -2\text{ A}$

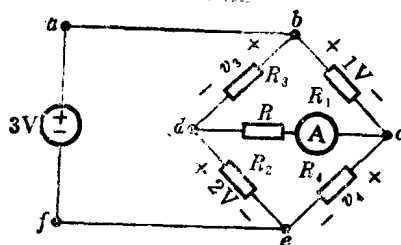
(b) $i_1 = 2\cos 3t\text{ A}$ $i_2 = 5\cos 3t\text{ A}$ $i_3 = -7\cos 3t\text{ A}$ $i_4 = 0$ $i_5 = 2\cos 9t\text{ A}$

(c) $v_1 = 5\text{ V}$ $v_2 = 7\text{ V}$ $v_4 = 2\text{ V}$ $v_6 = 2\text{ V}$

(d) $v_1 = 5\cos 3t\text{ V}$ $v_2 = -7\cos 3t\text{ V}$ $v_6 = 2\cos\left(3t + \frac{\pi}{3}\right)\text{ V}$



图题 1-3-1



图题 1-3-2

1-3-2 图题 1-3-2 为由电阻构成的直流电桥。已知电阻 R_1 和 R_2 上的电压分别为 1 V 和 2 V，问电阻 R 中有无电流？并求电阻 R_3 和 R_4 上的电压 v_3 和 v_4 。

§ 1-4 激励源

由信号源输入电路的信号叫做激励信号，简称激励(excitation)。由非信号源形式的电源输入电路的电压或电流亦可称为激励。

经过电路传输或处理后输出的信号叫做响应信号，简称响应(response)。由任何激励源(excitation source)在电路任一部分引起的电压、电流，亦可称为响应。

激励源又称为独立源(independent source)，以区别于本章最后一节将要介绍的受控源(controlled source，又叫做非独立源(dependent source))。

激励分为电压激励和电流激励两类，激励源也分为电压源和电流源两类。下面分别予以介绍。

1-4-1 电压源

电压源(voltage source)是一个二端元件，其端电压在任意瞬时与其端电流(terminal current)无关：或者恒定不变(直流情况)，或者按照某一固有的函数规律随时间而变化。

电压源的符号如图 1-4-1a 所示。其中 $v_s(t)$ 为电压源的电压。根据图中规定的端电压 $v(t)$ 和电压 $v_s(t)$ 的参考方向，电压源的特性可用下式表述：

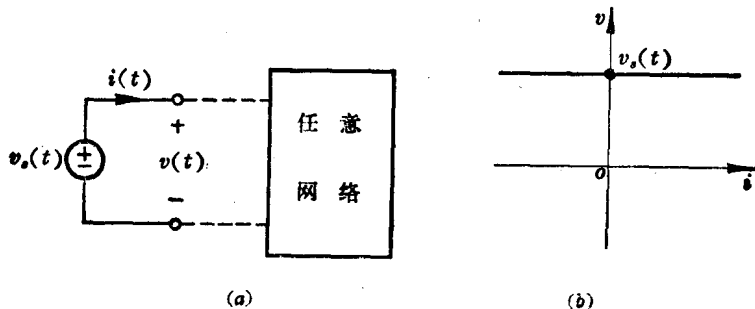


图 1-4-1 电压源及其 v - i 特性

$$v(t) = v_s(t) \quad \text{与端电流 } i(t) \text{ 无关}$$

因此, 在任一瞬时 t , 电压源的端电压 $v(t)$ 与电流 $i(t)$ 之间的函数关系, 即 $v-i$ 特性 ($v-i$ characteristic), 如图 1-4-1b 所示。它是一条平行于 i 轴 (电流坐标轴) 而以 $v_s(t)$ 为纵坐标的直线。

当选定电压源电流的参考方向与其端电压的参考方向相反时, 电压源输出的瞬时功率

$$p(t) = v(t)i(t) = v_s(t)i(t)$$

此输出功率如同电流 $i(t)$ 一样可在无限范围内变化。这种具有无限负载能力的电压源当然是抽象的元件, 实际上是不存在的。但是, 某些常用电源在一定的负载范围内使用时, 可以近似于电压源。在电力网内, 对于任何一个用电设备而言, 整个电力网除了该用电设备以外的部分, 一般也可以近似地看作是一个电压源。即使是不能单纯用电压源模拟的实际电源, 其数学模型也可由电压源和其它元件组合而成。

一个电压源在电压为零的特殊情况下, 相当于一个短路 (short circuit) 元件, 其 $v-i$ 特性与 i 轴重合。

1-4-2 电流源

电流源 (current source) 是一个二端元件, 其端电流在任意瞬时与其端电压无关; 或者恒定不变 (直流情况), 或者按照某一固有的函数规律随时间而变化。

电流源的符号如图 1-4-2a 所示。其中 $i_s(t)$ 为电流源的电流。根据图中规定的端电流 $i(t)$ 和电源电流 $i_s(t)$ 的参考方向, 电流源的特性可用下式表述:

$$i(t) = i_s(t) \quad \text{与端电压 } v(t) \text{ 无关}$$

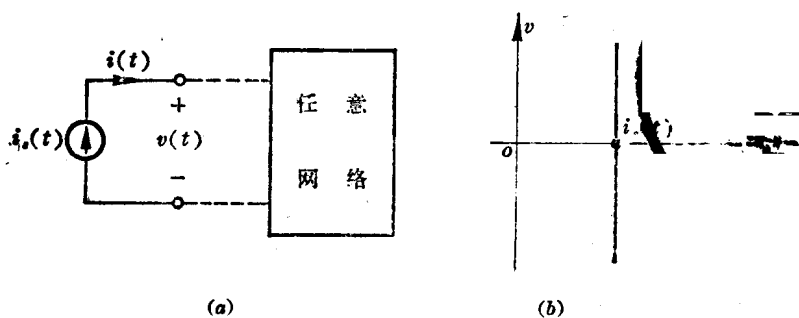


图 1-4-2 电流源及其 $v-i$ 特性

因此, 电流源在任一瞬时 t 的 $v-i$ 特性如图 1-4-2b 所示。它是一条平行于 v 轴 (电压坐标轴) 而以 $i_s(t)$ 为横坐标的直线。

按图 1-4-2a 所示电压、电流的参考方向, 电流源输出的瞬时功率

$$p(t) = v(t)i(t) = v(t)i_s(t)$$

此输出功率如同端电压 $v(t)$ 一样可在无限范围内变化。这种具有无限负载能力的电流源当然也是抽象的元件, 实际上是不存在的。而且, 普通的常用电源不能单纯用电流源来模拟。纵然如此, 任何实际电源的数学模型却可由电流源和其它元件组合而成。

一个电流源在电流为零的特殊情况下, 相当于一个开路 (open circuit) 元件, 其 $v-i$ 特性与 v 轴重合。

通过电压源的电流和电流源的端电压均视外部电路而定, 其值可根据已知外部条件分别按克希霍夫电流定律和克希霍夫电压定律求出。

例 1-4-1 图 1-4-3 所示为一直流电路, 求通过两电压源的电流 i_1 和 i_2 以及两电流源的端电压 v_{12} 和 v_{34} 。

解 将克希霍夫电流定律应用于节点①可得

$$i_1 = 5 - 5 = 0$$

再将克希霍夫电流定律应用于节点②可得

$$i_2 = 5 - 1 = 4\text{A}$$

将克希霍夫电压定律应用于回路③⑤④③可得

$$v_{34} = v_{35} + v_{54} = 6 - 3 = 3\text{V}$$

再将克希霍夫电压定律应用于①④③②①可得

$$\begin{aligned} v_{12} &= v_{14} + v_{43} + v_{32} \\ &= -23 - 3 + 5 \\ &= -21\text{V} \end{aligned}$$

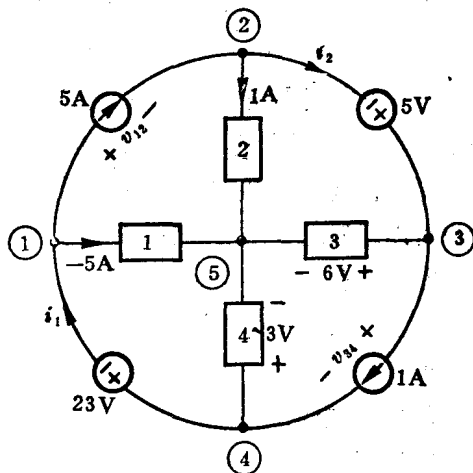


图 1-4-3 通过电压源的电流和电流源的端电压的计算

练习题

1-4-1 一个 100 V 的电压源, 在开路、接上一个 100 Ω 的电阻以及并联一个 10 A 的电流源(假定电流由电压源的正极性端流进)三种情况下, 将分别送出多大的电流?

1-4-2 一个 10 A 的电流源, 在短路、接上一个 5 Ω 的电阻以及并联一个 10 V 的电压源(假定电流由电压源的正极性端流进)三种情况下, 其端电压各为多少?

§ 1-5 电阻元件

如前所述, 电阻是反映能量损耗的电路参数。在电路理论中, 电阻元件^①(resistor)用以模拟电阻器和其它实际部件的电阻特性。电阻元件按电压、电流关系的直线性和非直线性分为线性电阻元件(linear resistor)和非线性电阻元件(nonlinear resistor)。按其特性是否随时间变化又可分为时变电阻元件(time-varying resistor)和非时变电阻元件(time-invariant resistor)。本书只介绍最常用的线性和非线性的非时变电阻元件, 今后凡提到线性电阻元件和非线性电阻元件, 都是指线性和非线性的非时变电阻元件。

1-5-1 线性电阻元件

线性电阻元件是一个二端元件, 其端电压 $v(t)$ 和端电流 $i(t)$ 间有如下的线性函数关系:

$$v(t) = Ri(t) \quad (1-5-1)$$

或

$$i(t) = Gv(t) \quad (1-5-2)$$

式中, R 为线性电阻元件的电阻, G 为线性电阻元件的电导(conductance), 二者均为与电压、电

^① 电阻元件常常又简称为电阻。

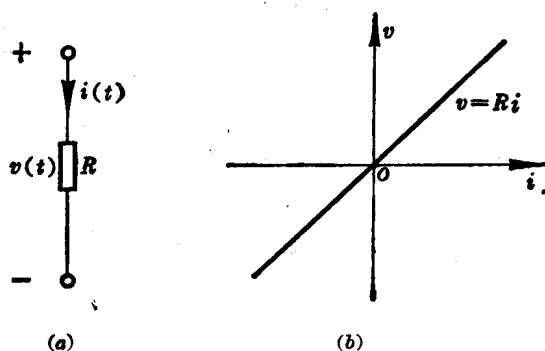


图 1-5-1 线性电阻元件及其 $v-i$ 特性

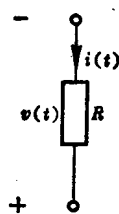


图 1-5-2 线性电阻元件(电压、电流的参考方向相反)

流无关的常量, 并且①

$$G \triangleq \frac{1}{R} \quad (1-5-3)$$

在国际单位制中, 电阻的单位是欧姆(ohm), 简称欧(符号为 Ω); 电导的单位是西门子② (siemens), 简称西(符号为 S)。

电阻和电导是可以反映同一电阻元件性能的互为倒数的两个参数。如果说电阻反映一个电阻元件对电流的阻力, 那么电导就可以作为衡量一个电阻元件导电能力强弱的标志。

式(1-5-1)将线性电阻元件的端电压表示为端电流的线性函数; 而式(1-5-2)则将线性电阻元件的端电流表示为端电压的线性函数。这两个公式就是适用于线性电阻元件的欧姆定律 (Ohm's law) 的两种数学表达式。

线性电阻元件的符号如图 1-5-1a 所示; 其 $v-i$ 特性如图 1-5-1b 所示, 它是在第 1、3 象限内通过坐标原点而斜率为 R 的直线。

应当注意, 以上所取的线性电阻元件的端电压 $v(t)$ 和端电流 $i(t)$ 的参考方向是统一的, 如图 1-5-1a 所示。如果电压和电流的参考方向相反 (见图 1-5-2), 则其函数关系式应为

$$v(t) = -Ri(t)$$

或

$$i(t) = -Gv(t)$$

当电压、电流取统一参考方向时, 电阻元件吸收的瞬时功率为

$$p(t) = v(t)i(t)$$

而根据欧姆定律

$$v(t) = Ri(t)$$

故线性电阻元件吸收的瞬时功率又可表示为

$$p(t) = Ri^2(t) \quad (1-5-4)$$

① $\triangleq$ 表示“定义为”的意思。

② 西门子就是 1/欧, 过去又称姆欧(mho, 符号为 $\oslash$)。

在时间间隔 $[t_0, t]$ 内, 线性电阻元件吸收的能量则可用定积分表示如下:

$$w[t_0, t] = \int_{t_0}^t p(t') dt' = R \int_{t_0}^t i^2(t') dt' \quad (1-5-5)$$

1-5-2 非线性电阻元件

不服从欧姆定律的电阻元件, 即 $v-i$ 特性不能用通过坐标系原点的直线来表示的电阻元件, 称为非线性电阻元件。本书中代表非线性电阻元件的符号如图 1-5-3 所示。

非线性电阻元件可分为电流控电阻元件 (current-controlled resistor) 和电压控电阻元件 (voltage-controlled resistor) 两类。

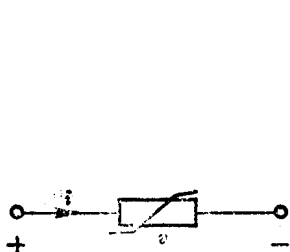


图 1-5-3 非线性电阻元件

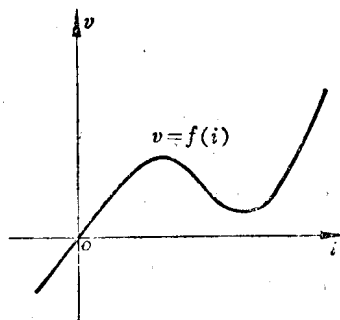


图 1-5-4 充气二极管的 $v-i$ 特性

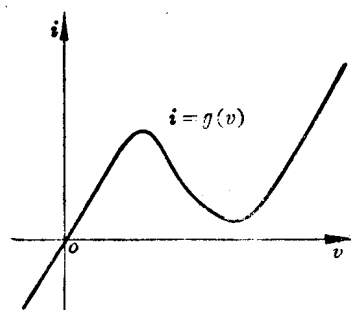


图 1-5-5 隧道二极管的 $i-v$ 特性

电流控电阻元件是一个二端元件, 其端电压 v 可以表示为端电流的单值函数, 即

$$v = f(i) \quad \text{为单值函数} \quad (1-5-6)$$

也就是每给定一个电流值, 可以确定唯一的电压值。充气二极管 (gas diode) 是具有电流控电阻元件特性的一种典型器件, 其 $v-i$ 特性如图 1-5-4 所示。

电压控非线性电阻元件也是一个二端元件, 其端电流 i 可以表示为端电压 v 的单值函数, 即

$$i = g(v) \quad \text{为单值函数} \quad (1-5-7)$$

也就是每给定一个电压值, 可以确定唯一的电流值。隧道二极管 (tunnel diode) 是具有电压控电阻元件特性的一个典型器件, 其 $i-v$ 特性如图 1-5-5 所示。

如果非线性电阻元件的端电压 v 可以表示为端电流 i 的单值函数, 端电流 i 又可以表示为端电压 v 的单值函数, 即

$$v = f(i) \quad \text{为单值函数}$$

和

$$i = g(v) \quad \text{为单值函数}$$

同时成立, 并且 f 和 g 互为反函数, 则 v, i 的函数关系又可以改写为

$$v = g^{-1}(i) \quad \text{为单值函数}$$

和

$$i = f^{-1}(v) \quad \text{为单值函数}$$

这样的非线性电阻元件既是电流控的又是电压控的。p-n 结 (p-n junction) 二极管就是一例,