

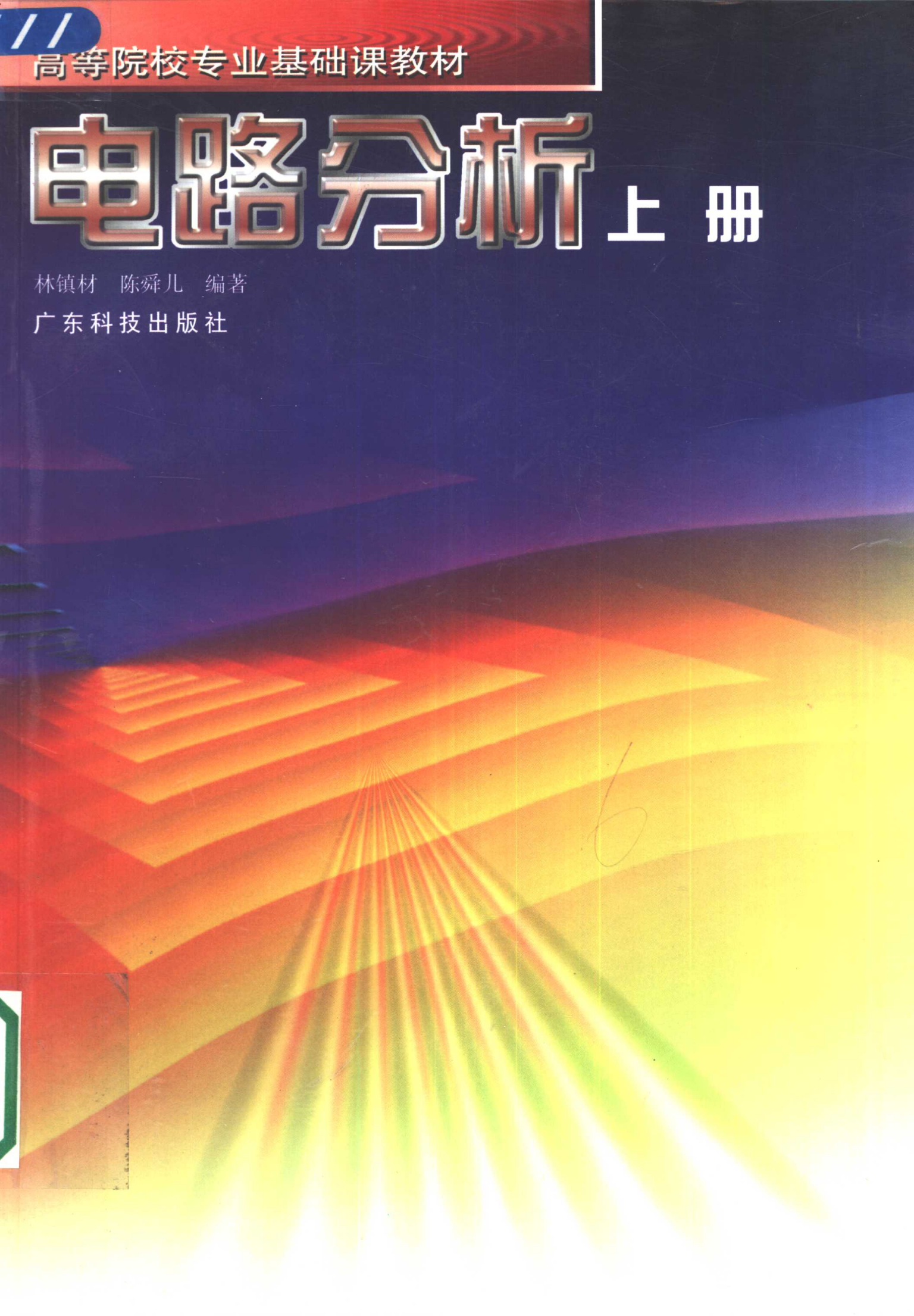


高等院校专业基础课教材

电路分析 上册

林镇材 陈舜儿 编著

广东科技出版社



电 路 分 析

上 册

高等院校专业基础课教材

林镇材 陈舜儿 编著

广东科技出版社

·广州·

图书在版编目(CIP)数据

电路分析(上册)/林镇材,陈舜儿编著. —广州:
广东科技出版社, 2000. 2
(高等院校专业基础课教材)
ISBN 7-5359-2332-1

I. 电… II. ①林…②陈… III. 电路分析-教材
IV. TN711.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 47373 号

出版发行: 广东科技出版社
(广州市环市东路水荫路 11 号 邮码: 510075)
E-mail : gdkjzbb@21cn.com
出版人: 黄达全
经 销: 广东省新华书店
印 刷: 广东番禺市印刷有限公司
(广东番禺市桥工农大街 45 号 邮码: 511400)
规 格: 787mm×1092mm 1/16 14.25 印张 字数 300 千
版 次: 2000 年 2 月第 1 版
2000 年 2 月第 1 次印刷
印 数: 1~4 000 册
定 价: 26.00 元

如发现因印装质量问题影响阅读,请与承印厂联系调换。

前 言

本书为高等院校理、工科电子专业学生专业基础课教材,亦可作为理科有关专业学生选修课以及电子专业高等教育自学考试的专业基础课教材。

本书根据高等院校审定的四年制无线电技术专业试用的教学大纲而编写。对电子专业本科生授课约 80 学时。在对教学内容适当筛选基础上,大专学生及其他层次学生授课时数可适当增加。

全书共十五章,分上、下两册。全书内容可分为直流电阻电路分析、动态电路分析、正弦稳态电路分析三大部分。上册共八章,其中一至四章为直流电阻电路分析,五至八章为动态电路分析;下册共七章,主要为正弦稳态电路分析。

凡在目录中标有 * 号的有关章节,可根据学生层次,以及各专业的课程设置而作为选用教材,不一定在规定的教学预定学时中讲授。例如上册的第八章“冲激函数在动态电路分析中的应用”是为在以后课程中不讲授“信号与系统”课程的学生而设的,以使学生能掌握有关这方面的基本内容。此外,在本书编写过程中有意识介绍了非线性元件及其电路、非线性时变元件、非平面电路等基本概念,作为后续有关课程的基础知识。

在参阅大量有关本课程的有关教材及资料的基础上,本书在编写过程中尽量做到标题直观贴切,叙述力求清楚准确,电路及元件采用最新标准统一符号,在每节正文后附有练习题,每章备有完整习题,力求全书的系统性与完整性。根据作者多年的教学经验,权衡利弊,在本书中不设习题答案。然而这将会给自学者及任课教师带来不便,故计划日后再行编写教师用书,以弥补不足。

考虑到“电路分析”课程一般不开设相应的实验课,为此,在有关章节中都配有 CAI (计算机辅助教学)的内容,使教学更为直观、生动,从而提高学生学习兴趣,使教学效果进一步提高。这是在教材编写中的一次大胆尝试,其效果有待在教学实践中检验。

本书由林镇材主编,陈舜儿负责全书 CAI 有关内容及部分章节的编写。由于编著者水平有限,难免有疏漏之处,恳请同行专家及读者批评指正。

编著者

1999 年 8 月于中山大学

目 录

第一章 电路的基本概念及求解电路的基本方法	(1)
§ 1-1 电路、实际元件、理想元件及电路模型	(1)
§ 1-2 电路的变量、电流、电压的参考方向与极性	(2)
§ 1-3 基尔霍夫定律	(7)
§ 1-4 线性电阻与非线性电阻	(11)
§ 1-5 独立电源	(15)
§ 1-6 受控电源	(19)
§ 1-7 求解电路的基本方法	(23)
习题一	(27)
第二章 运用等效的概念求解电路的方法	(30)
§ 2-1 二端网络及等效二端网络的概念、分压公式与分流公式	(30)
§ 2-2 实际电源模型及其等效互换	(35)
§ 2-3 混联电路的计算方法	(38)
§ 2-4 含受控源电路的等效分析方法	(41)
§ 2-5 T形网络与 Π 形网络的等效互换	(43)
习题二	(47)
第三章 运用过渡独立变量求解电路的方法	(50)
§ 3-1 电路的网孔分析法	(50)
§ 3-2 节点电压分析法	(54)
* § 3-3 割集分析法	(58)
* § 3-4 基本回路分析法	(64)
§ 3-5 引入CAI进行电阻电路分析	(67)
习题三	(72)
第四章 运用网络的定理求解电路的方法	(81)
§ 4-1 叠加定理	(81)
§ 4-2 置换定理	(85)
§ 4-3 互易定理	(87)
§ 4-4 戴文宁定理与诺顿定理	(90)
§ 4-5 最大功率传递定理	(95)
习题四	(98)
第五章 电容元件与电感元件	(108)
§ 5-1 电容元件	(108)
§ 5-2 电感元件	(115)

习题五	(122)
第六章 一阶电路	(124)
§ 6-1 换路定则和初始值的计算	(124)
§ 6-2 一阶电路方程的建立和求解	(129)
§ 6-3 三要素法	(139)
§ 6-4 脉冲激励下的响应	(144)
§ 6-5 含多个动态元件的一阶电路	(149)
§ 6-6 引入 CAI 进行一阶动态电路分析	(155)
习题六	(158)
第七章 二阶电路	(162)
§ 7-1 RLC 串联电路的零输入响应	(162)
§ 7-2 恒定激励下 RLC 串联电路的完全响应	(172)
§ 7-3 GCL 并联电路的分析	(175)
§ 7-4 一般二阶电路	(178)
§ 7-5 引入 CAI 进行二阶动态电路分析	(181)
习题七	(189)
* 第八章 冲激函数在动态电路分析中的应用	(190)
§ 8-1 冲激函数及其性质	(190)
§ 8-2 冲激响应	(192)
§ 8-3 线性非时变电路对任意输入的响应——卷积积分	(197)
习题八	(200)
附录 Design Center 软件的简要使用说明	(202)
参考文献	(222)

第一章 电路的基本概念及求解

电路的基本方法

本书的内容是讨论集总电路的分析,而由电阻、电容、电感等集总参数元件组成的电路则称为集总电路。在此书前部分只讨论含电阻元件与电源元件的电路,也就是电阻电路。它属于集总电路的一部分。

在这一章中,我们先讨论电路的基本概念,电路的模型,求解电路的基本依据即基尔霍夫定律。最后讨论电阻电路最基本的分析方法。

§ 1-1 电路、实际元件、理想元件及电路模型

为了某种目的,把电源与电子元件与负载连接起来即成为电路。例如把一个灯泡用导线与电池连起来,便成为一个简单的实际电路。

电路的功能可归纳为以下几个方面:传输与处理信息、能量的传递、电量的测量与存储信息。而电路的部件,如上面提到的电池、导线与灯泡,它们的作用分别是提供能量(电池),利用电阻率小并具有优良导电性能的金属制成的导线去传递电能,以及把电能转变成热与光的换能器灯泡。在这里,电池、导线、灯泡是一个实际部件。因为电池使用了一段时间后,它的端电压再不可能维持恒定,导线的电阻率即使很小,但总存在电阻,灯泡的钨丝在有电流通过时会发热,而把钨丝置于真空中便会发光,同时在钨丝附近也不可避免出现微弱磁场。又例如我们在实验室经常看到的滑线电阻器,它的主要用途及功能是用来改变电阻数值,但有电流通过时会在附近空间形成磁场,层与层之间也会有电容的作用。因此,我们将这些实际的元件连接起来构成一个具体电路,并且当分析计算这个电路时,我们没有可能也没有必要全盘考虑各元件的各种物理性质,在特定的条件下,例如工作频率较低,对于滑线电阻,只考虑阻值的变化而忽略磁场与电场的作用。如电池在使用时间不长并在额定的放电电流范围内,认为输出恒定的电压,而连接的导线认为它的电阻为零,这样便可导出理想元件的概念。所谓理想元件,即在一定的条件下对实际元件加以理想化,忽略它的次要的性质,并用一个足以表征其主要性能的模型来表示它。我们这时可认为灯泡的电感是极其微小,而把它看成一个理想电阻元件;而一个新的电池,它的内阻与灯泡电阻相比完全可以忽略不计,而把它看成是输出恒定电压的理想电压源;而电路联接导线在长度较短时,它的电阻也可完全忽略,而可看作理想导体。这时,我们把这理想电阻元件构成了小灯泡的模型,用理想电压源去构成了电池的模型,用理想导体去构成联接导体的模型。因而对电路进行理论分析的通常不是实际电路而是电路模型。在引入电路模型后,前面提到的灯泡、电池、导线连接的实际电路[图 1-1(a)]即可转变成图 1-1(b)所示的电路模型(即电路图)。

从一个实际电路出发,建立起它的电路模型是非常必要的。要画出一个简单的实际

电路,是极容易做到的事,而对于一台电视机,当要画出它的电路图时,我们面对的将是成千上万只不同的零件。此时,要画其实际电路是不可能而且是无必要的,我们只能画出它的电路模型以供分析参考。

概括来说,各种实际器件都可以用理想模型来近似地表征它的性能。而实际器件的运用一般都和电能的消耗现象和电磁能的存贮现象有关。电能的消耗发生在器件的所有导体通路之中,电磁能则存贮在器件的电场与磁场之中。而这些现象一般同时存在,并且发生在整个器件之中并交织在一起。而所谓“理想化”,指的是:假定上述这些现象可分别

研究,而用所谓“集总参数元件”来构成模型。而每一种集总元件都只表示一种最基本现象,如理想电阻元件便是一种只表示消耗电能而转化为热能或其他形式能量的元件,因而是一种集总元件。同理,还可以有只表示存贮电场能量的理想电容元件和只表示存贮磁场能量的理想电感元件。它们都是集总元件。而上述提及的三种现象分别集中在这三种元件之中。此外,在构成电路模型时,还需要两种理想的电源元件,即电压源元件与电流源元件。而上面提及的元件一般具有两个端钮,故称之为二端元件。在电路中,除了二端元件外,往往还有如受控源、理想变压器及耦合电感等四端元件。在一定条件下实际器件的模型较简单,只需涉及到一种理想元件,但有些器件的模型可能要由几种理想元件构成。例如,低频时使用的实际电阻器只需用一个理想电阻元件来作为它的模型即可。但在高频使用情况下,还应加入电感、电容这些理想元件来构成它的模型。

在这里还应指出,集总是意味着把器件的电场和磁场分隔开,即电场只与电容元件相关联,磁场只与电感元件相关联,因此,两种场之间就不存在相互作用。然而,我们知道,电、磁场之间相互作用将产生电磁波及能量辐射,部分能量通过辐射而损失。为此,当只有辐射能量可以忽略的情况下才可采用集总的概念。按此理,则要求器件的尺寸远小于正常工作频率所对应的波长。

由集总元件组成的电路模型称为集总电路模型,或称为集总电路。本书只讨论集总电路的分析。集总假设是此书主要的假设,今后所述电路的基本定律均在此假设前提下才能使用。

许多实际器件,例如灯泡、电烙铁及绕线电阻等都可以用电阻元件作为模型。晶体三极管以及许多数字集成电路、逻辑电路等在一定的条件下也可以用电阻元件及其他电源元件作为模型。而只含电阻元件及电源元件的电路称之为电阻电路。下面我们先学习这类最简单电路的分析方法。

§ 1-2 电路的变量、电流、电压的参考方向与极性

电路的电性能是用一组表为时间函数的变量来描述,电路分析的目的在于求解这些变量。这些变量最常用的是电压、电流与功率。

带正电荷的质子与带负电荷的电子称为带电粒子,所带电荷的多少称为电量。 $6.24 \times$

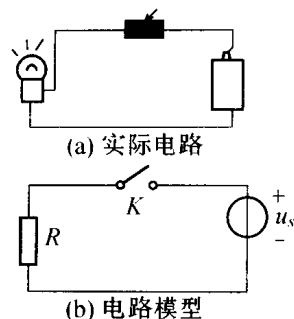


图 1-1 实际电路和电路模型

10^{18} 个电子所具有的电量为 1 库仑,用符号 C 表示,属国际单位制。电量的符号用 q 和 Q 表示。每单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度,用符号 i 表示。电流强度常简称电流。

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

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。电流通常分成直流与交变电流。若电流的大小和方向均不随时间变化,则该电流称为恒定电流,简称直流,用符号 I 表示。若电流的大小与方向均随时间变化,称之为交变电流,简称交流,通常用小写英文字母 i 表示。

电流在国际单位制中,用安(A)作为单位。

上面提到,电流的方向被规定为正电荷运动的方向,但在实际问题中,尤其在求解较为复杂的电路时,往往难以事先判断电流的真实方向,亦即电流的真实方向往往难以在电路图中标出。这样,我们就难以列出求解电路的方程。为此,我们引入电流参考方向这一概念。

参考方向可以人为任意选定,在电路图中用箭头来表示。并且规定:若电流的真实方向与参考方向一致,电流为正值;若两者相反,电流则为负值。这样就可利用电流的正负值,结合着参考方向判断出电流的真实方向。例如,1 A 表示正电荷以 1 C/s 的速率顺着参考方向的箭头移动,而 -1 A 则表示逆着参考方向的箭头移动。在对电路进行分析时,我们尽可以人为地任意假设电流的参考方向,并以此去列方程,对电路进行分析与计算,由最后的答案的正、负值来确定电流的真实方向。一个电路中,在没有标出参考方向的情况下,电流的正负是毫无意义的。

今后,在电路图中所标的电流方向都是参考方向,不一定为电流的真实方向。

【例 1-1】 图 1-2(a)表示某一二端元件。设 1 A 的电流由 a 通过图中所示的元件流向 b ,问应如何表示这一电流?

解:应有两种表示方式。

(1)若用图(b)所示 i_1 表示,则 i_1 应表示为

$$i_1 = 1 \text{ A}$$

(2)若用图(c)所示 i_2 表示,则 i_2 应表示为

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

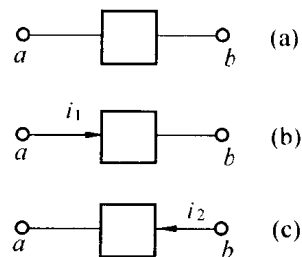


图 1-2 例 1-1 图

原因在于, i_1 的参考方向与电流的真实方向一致,而 i_2 的参考方向与电流的真实方向相反。

电路分析中,常引用“电压”这一物理量。电压有时又称为“电位差”,用符号 u 表示。电压的单位为伏(V),电路中 a 、 b 两点间的电压表示单位正电荷由 a 点转移到 b 点时所获得或者失去的能量,即

$$u(t) = \frac{dW}{dq} \quad (1-2)$$

式中, dq 为由 a 点转移到 b 点的电量,单位为库(C); dW 表示在转移过程中,电荷

dq 所获得或者失去的能量,单位为焦(J)。

若正电荷由 a 转移到 b ,是获得能量的,则 a 点为低电位,即负极, b 点为高电位,即正极。反之,若正电荷由 a 转移到 b 失去能量,则 a 点为高电位,即正极, b 点为低电位,即负极。正电荷在电路中转移时电能的得或失表现为电位的升或降,即通常所说的电压升或电压降。

若所讨论的电压的大小与极性均不随时间而变化,则该电压称为恒定电压或直流电压,用字母 U 表示。反之,若讨论的电压的大小与极性都随时间而变化,则称为交变电压或交流电压,通常用字母 $u(t)$ 或 u 表示。

与电流一样,我们也需要为电压规定参考极性。上述的电流参考方向用箭头表示,而电压的参考极性则在元件或电路的两端用“+”、“-”符号来表示。“+”号表示高电位端,“-”号表示低电位端。如图 1-3,方框可代表一个元件或一段电路。

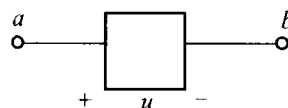


图 1-3 电压参考极性的表示方式

并规定,当电压为正值时,该电压的真实极性与参考极性相同,即 a 点电位高于 b 点电位;而当电压为负值时,该电压的真实极性与图所标的极性相反,即 b 点的电位高于 a 点电位。同理,在未标电压参考极性的情况下,电压的正负是毫无意义的。

同理,在电路图中,对元件所标的电压参考极性也可以人为任意选定。虽然这不一定代表电压的真实极性,但它们配合着电压的正值或负值,表明电压的真实极性。

综合而言,在对电路分析时,我们应对通过元件的电流假设参考方向,同时对元件两端的电压假设参考极性,彼此可独立任意假定。在实际应用中,我们通常规定采用关联的参考方向,即规定电流的参考方向与电压的参考“+”极到“-”极的方向一致,如图 1-4 所示。这样,在电路图中,我们只需标出电流的参考方向或电压的参考极性其中一种即可。

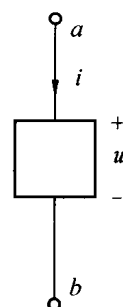


图 1-4 关联的参考方向

电路常用的另一变量是功率。功率表征电路中的某一段所吸收或产生能量的速率,用符号 p 表示。若我们用图 1-5 中的方框来表示某段电路(它可能是若干元件的组合,也可能是某一个电源或电阻元件),并采用关联的电流、电压的参考方向,假设在 dt 时间内由 a 点转移到 b 点的正电量为 dq ,并且由 a 到 b 是电压降,数值为 u ,则据前面的式(1-2),可得转移过程中 dq 失去的能量为

$$dW = u dq$$

电荷失去能量意味着这段电路吸收能量,这意味着能量由电路的其他部分传送到了这一部分。能量流动与传输方向如图 1-5 所示。而吸收能量的速率,即吸收的功率为

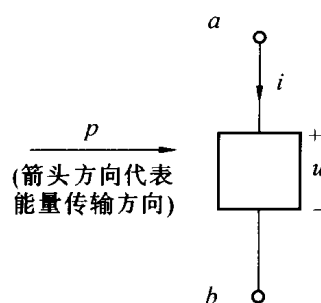


图 1-5 功率的参考方向

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = u \frac{dq}{dt}$$

因为

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

所以

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (1-3)$$

而能量的传输方向则定为功率的方向。

与把电压、电流作为代数量处理一样,我们也可以将功率设置参考方向。当功率的实际方向与参考方向一致时,功率为正,反之为负。而功率的参考方向可用箭头表示,可以是进入或离开所研究讨论的电路,其指向也可任意假定。由式(1-3)推导的过程可知,若所研究的电路中,电压、电流已采用关联参考方向,并且功率的参考方向为进入该电路部分,它们之间关系如上图 1-5 所示,则运用式(1-3)计算该电路部分的功率时,若算出的功率为正,表示功率的实际方向与参考方向一致,即该电路部分吸收功率;若算得的功率为负,则表示功率的实际方向与参考方向相反,即说明该电路部分产生功率。

由此可见, u 、 i 、 p 三者的参考方向中,若任意改变其中的一个,都会使与图 1-5 中所示者相反,并且改用式(1-4)计算功率,若功率

$$p(t) = -u(t) \cdot i(t) \quad (1-4)$$

为正,仍表示吸收功率;若功率为负,仍表示产生功率。

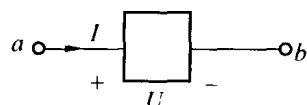
此外,在图 1-5 所示的参考方向下,在 t_0 到 t 的时间间隔内,这部分电路所吸收的能量为

$$W(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\zeta) d\zeta = \int_{t_0}^t u(\zeta) i(\zeta) d\zeta \quad (1-5)$$

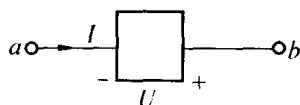
在上式中, ζ 为时间变量。用 ζ 的目的是为了避免与积分的上、下限 t 混淆。

在国际单位制中,能量的单位为焦,用符号 J 表示。

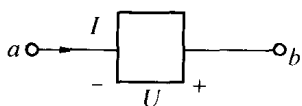
【例 1-2】 (1)在下图 1-6(a)、(b)中,若电流分别为 1A 及 2A,且均由 a 流向 b ,求该两元件吸收或产生的功率;(2)在图 1-6(c)中,若元件产生的功率为 5W,求电流。



(a) $U=1V$



(c) $U=-2V$



(b) $U=-2V$

图 1-6 例 1-2 图

解:(1)如图所示, I 的参考方向均由 a 指向 b ,则对图(a)所示的元件来说,电压、电流应是关联的参考方向,因此

$$P = U \cdot I = 1 \times 1 = 1(W)$$

即该元件吸收 1W 的功率。

而对图(b)所示的元件来说,电压、电流为非关联参考方向,因此

$$P = - U \cdot I = - (- 2) \times 2 = 4(W)$$

说明该元件吸收 4W 的功率。

(2)对于图(c),电流 I 的参考方向仍由 a 指向 b ,故

$$P = - U \cdot I = - 5(W)$$

因为产生功率为 5W,故 $P = - 5(W)$ 。则

$$I = 5/U = - 5/2 = - 2.5(A)$$

上式的负号表明,电流的实际方向由 b 指向 a 。

此外,在计算功率时,一般毋需标出功率的参考方向,直接运用文字说明即可。

必须指出:电荷与能量是描述电现象的基本变量或原始变量,通常为方便描述电路,我们由电荷与能量引入了电路的几个变量,如电压、电流与功率。这些变量容易测量,并由电压与电流可计算出功率。为此,电路分析往往侧重于求解电路的电压与电流。并且在求解电路时,要特别注意参考方向的意义,在电路图中标出的电压极性和电流的方向均为参考极性与参考方向,并不一定为电压的真实极性及电流的真实方向。在本书中约定:电路中,凡未同时标出电流、电压的参考方向的,均意味着采用了关联的参考方向。

在实际应用中,我们有时会感到某些单位太大或太小,它们都是被一个以 10 为底的正次幂或负次幂相乘后而得,例如:

$$1\text{mV(毫伏)} = 1 \times 10^{-3} \text{ V(伏)}$$

$$1\text{mA(毫安)} = 1 \times 10^{-3} \text{ A(安)}$$

$$1\text{kW(千瓦)} = 1 \times 10^3 \text{ W(瓦)}$$

$$1\mu\text{s(微秒)} = 1 \times 10^{-6} \text{ s(秒)}$$

正确而规范并用于构成十进倍数和分数单位的词头如表 1-1 所列。

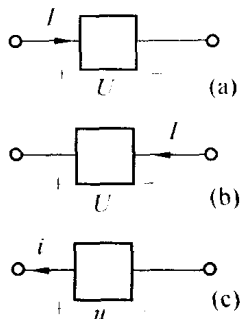
表 1-1 国际制词头(部分)

因数	原文	词头名称	词头符号
10^9	giga	吉	G
10^6	mega	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^{-3}	milli	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳	n
10^{-12}	pico	皮	p

练习题

1-1 下图为通过各元件的电流的参考方向及电压的参考极性,求这些元件的功率。已知图(a): $U = -1\text{ V}$, $I = 2\text{ A}$;图(b): $U = 3\text{ V}$, $I = -2\text{ A}$;图(c): $u = 8\text{ V}$, $i = 2\sin t$ (mA)。

答案: $[-2\text{ W}$, 产生功率; 6 W , 吸收功率; $-16\sin t$ (mW), 当 $p > 0$ 吸收功率, $p < 0$ 产生功率]



练习题 1-1 图

§ 1-3 基尔霍夫定律

我们知道,集总电路是由理想的导体将分列的元件联接而成。若我们将每一个二端元件视为一条支路,则流经元件的电流及其端电压分别称为支路电流和支路电压。在集总电路中,所谓求解电路,最终目的就是求解电路的支路电压与支路电流。

在讨论基尔霍夫定律前,我们先介绍几个名词。

支路的含义如前述,是单个元件或其多个元件的串联组合。而支路的联接点则称为节点。如图 1-7,为由 5 个二端元件及 2 个多端元件(多端元件 F、G 用圆形表示)连成的电路。在图中,节点 1 表示二端元件 A、E 和四端元件 F 有关端子的结合点,而节点 6 则为四端元件 F 与三端元件 G 的结合点。而若干元件端对依次联接而闭合起来,便形成回路。如图中 1A2F5E1 是回路,1A2F1 也是回路。回路要规定其参考方向,上述的两回路,也同时表明了其方向。

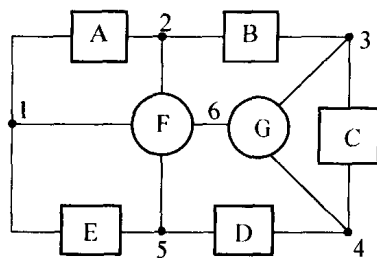


图 1-7 电路的结构

在回路中,不含任何支路的回路则称之为网孔。

下面我们再讨论一下平面电路与非平面电路的概念。

在图 1-7 的电路中,若在 1、6 两点间增添一个二端元件,那么无论如何都做不到端线不发生交叉重叠。为此,我们认为,凡是可以把所有元件都布置在一个平面上而其端线不出现交叉重叠现象的电路,称之为平面电路。

电路是由元件组成的,整个电路的表现既取决于这些元件构成一个整体所采用的联接方式,也取决于每个元件各具有的特性。本节先说明电路整体的基本规律,即基尔霍夫定律。

基尔霍夫的两个定律是自然界电荷守恒和能量守恒两个基本法则的体现。电荷守恒的含义是电荷不能创造也不能消灭,由此便可得基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's current law),简称为 KCL。

图 1-8 为集总电路中的一个节点,与该节点相接各支路的电流分别为 i_1 、 i_2 、 i_3 ,它们的参考方向如图所示。流进该节点的电流代数和为 $i_1 + i_2 - i_3$,而流进该节点电荷的速率可表示为

$$\frac{dq}{dt} = i_1 + i_2 - i_3$$

上式中 q 为节点处的电荷。而节点是理想导体的汇合点,不可能积累电荷。由电荷守恒定律可知,节点处 $\frac{dq}{dt}$ 必为零。故

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0$$

若将上式乘 -1 ,则有

$$-i_1 - i_2 + i_3 = 0$$

由此可见,流进节点与流出节点所有电流的代数和为零。上述第一个式子定义流入节点电流为正,流出的电流为负,第二个式子与之相反。显然,电路的节点处不论有多少条支路,都可得到以上的结论。

综上所述,KCL 可表述为:

对于任何集总参数电路的任何一个节点,在任何一个时刻,流入(或流出)该节点的所有支路电流的代数和为零。用数学表达式表示为

$$\sum_{k=1}^n i_k(t) = 0 \quad (1-6)$$

式中, $i_k(t)$ 为流出(或流进)节点的第 k 条支路的电流, n 为该节点处的支路数目。

必须指出,以上 KCL 的讨论中,对各支路的元件并无要求,只要是集总电路,KCL 就一定成立,即 KCL 与电路元件的性质无关。在运用 KCL 求解电路时,习惯一般定义流出的电流为正,流入的电流为负。下面举例说明基尔霍夫电流定律的应用。

【例 1-3】 图 1-9 为某一电路中的一个节点 A。已知 $i_1 = 3\text{A}$, $i_2 = 2\text{A}$, $i_3 = -4\text{A}$,试求流过元件 B 的电流 i_4 。

解: i_1 、 i_2 、 i_3 与 i_4 汇集于 A 点,应满足 KCL

已知三个电流,必可求出另一电流 i_4 。

按其参考方向及一般求解习惯,可列出

$$-i_1 + i_2 + i_3 - i_4 = 0$$

代入数据得

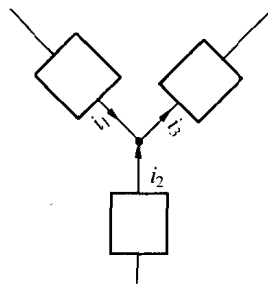


图 1-8 电路中的一个节点

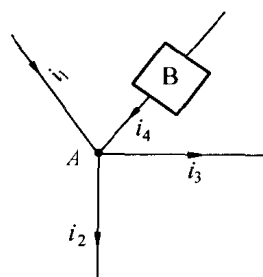


图 1-9 例 1-3 图

$$i_4 = -(3) + (2) + (-4) = -5(\text{A})$$

i_4 为负值表明其实际方向与图的参考方向相反。值得注意的是,在上例式中,括弧内的正负号为电流本身数值的正负号,而方程各项前的正、负号,则取决于电流参考方向对节点的相对关系,注意两者不要混淆。此外,若我们不按习惯而把流入为正流出为负来列 KCL,则最终所求得的结果 $i_4 = -5\text{A}$ 完全不变。

基尔霍夫定律另一个为电压定律(Kirchhoff's voltage law),简称为 KVL,它表示电路中各支路电压之间必须遵守的规律,而这个规律体现在电路中的各个回路。

基尔霍夫电压定律的出发点是,电路必须遵守能量守恒法则,即在某段时间内,电路中某些元件所得的能量有所增加,则其他一些元件的能量必须有所减小。这种情况对电路中支路电压间的关系有着重大的影响。如图 1-10 的电路中,若在某段时间内各元件得到能量为 W_1 、 W_2 、 $\cdots$ 、 W_6 ,则由能量守恒法则可得

$$W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 = 0$$

由于功率为能量的微分,对上式微分即得

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 = 0 \quad (1-7)$$

此式说明,在每一瞬间电路中所有元件获得的功率总和为零。而按图可知:

$$p_1 = -u_1 i_1$$

$$p_2 = u_2 i_2$$

$$p_3 = u_3 i_2$$

$$p_4 = -u_4 i_2$$

$$p_5 = u_5 i_1$$

$$p_6 = u_6 i_6$$

代入式(1-7),得

$$-u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_2 - u_4 i_2 + u_5 i_1 + u_6 i_6 = 0 \quad (1-8)$$

据 KCL 可得

$$i_6 = i_1 + i_2$$

代入式(1-8),可得

$$(-u_1 + u_5 + u_6)i_1 + (u_2 + u_3 - u_4 + u_6)i_2 = 0 \quad (1-9)$$

我们知道, i_1 与 i_2 是线性无关的,若式(1-9)成立,则式中前面的系数必为零,故有

$$-u_1 + u_5 + u_6 = 0 \quad (1-10a)$$

$$u_2 + u_3 - u_4 + u_6 = 0 \quad (1-10b)$$

将式(1-10b)代入式(1-10a),得

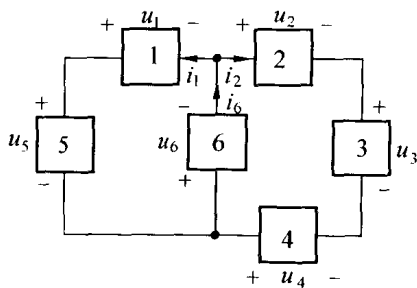


图 1-10 论证 KVL 的电路方框图

$$-u_1 + u_5 + u_4 - u_3 - u_2 = 0 \quad (1-10c)$$

由图 1-10 可知,元件 1、5、6 构成一个回路,元件 2、3、4、6 又构成一回路,而元件 1、5、4、3、2 也构成一个回路。据上分析可知,以上三式表明沿三个回路各支路电压降的代数和为零。而在上面三个式子中,式(1-10a)是沿逆时针方向计算电压降,式(1-10c)亦如此,但式(1-10b)则沿顺时针方向计算电压降。

综上所述,基尔霍夫电压定律表述为:

对于任一集总参数电路中的任一回路,在任何时刻,沿该回路的所有支路电压降的代数和为零。数学表达式为

$$\sum_{k=1}^n u_k(t) = 0 \quad (1-11)$$

式中, $u_k(t)$ 为回路中的第 k 条支路电压, n 为回路中的支路数。

与上述对 KCL 的讨论相同, KVL 对各支路的元件性质并无要求, 即不论电路中的元件如何, 只要是集总参数电路, KVL 总是成立并且与电路元件性质无关。

【例 1-4】 图 1-11 为某一电路中的一个回路, 并已知: $u_1 = u_5 = 3\text{V}$, $u_2 = u_4 = 4\text{V}$, $u_3 = -1\text{V}$ 。试求 u_6 。

解: 据 KVL, 若这 6 个电压中给定其中 5 个电压, 则另一个电压必能求出。

设各电压的参考极性如图 1-11 所示。沿 a 点出发, 顺时针绕行, 则据 KVL 可知

$$u_1 + u_2 + u_3 - u_4 - u_5 - u_6 = 0$$

代入已知数据得

$$(3) + (4) + (-1) - (4) - (3) - u_6 = 0$$

解得

$$u_6 = -1\text{V}$$

u_6 为负值, 说明 u_6 的实际极性与图 1-11 所标 u_6 的参考极性相反。

从本例题的求解过程中可看到, 在应用 KVL 解题时, 方程中各项前的正、负号取决于各元件电压降的参考方向与所选的绕行方向是否一致, 如一致取正号, 反之取负号。并且在以数值代入时, 每项电压本身还有正负号, 它取决于电压降的实际方向与参考方向是否一致。

此外, 在运用 KVL 求解实际电路时, 还应注意到一点: 任何两点间的电压与计算时所选择的路径无关。下面我们仍以图 1-11 为例加以说明。

【例 1-5】 试求图 1-11 的 a 、 b 两点之间的电压 u_{ab} 。

解: 若以顺时针绕行, 结合元件电压的参考极性与绕行方向, a 、 b 两点之间的电压 u_{ab} 为

$$u_{ab} = u_1 + u_2 + u_3 - u_4 = (3) + (4) + (-1) - (4) = 2(\text{V})$$

若逆时针方向绕行, 同样结合元件电压的参考极性与绕行方向, a 、 b 两点之间的电

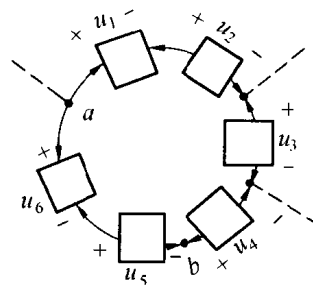


图 1-11 例 1-4 图

压 u_{ab} 为

$$u_{ab} = u_6 + u_5$$

在上例中,已知 $u_5 = 3\text{V}$, 求出 $u_6 = -1\text{V}$, 故得

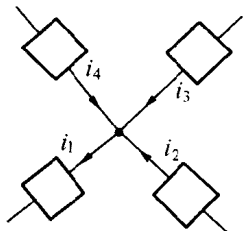
$$u_{ab} = (-1) + (3) = 2\text{V}$$

计算结果证实了任何两点间的电压与计算时所选择的路径无关。

练 习 题

1-2 试求下图电流 i_4 。当(a) $i_1 = 2\text{A}$, $i_2 = 3\text{A}$, $i_3 = 5\text{A}$ 时; (b) $i_1 = -2\text{A}$, $i_2 = 3\text{A}$, $i_3 = 1\text{A}$ 时。

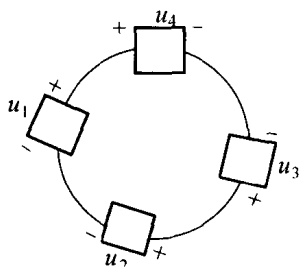
答案: [(a) -6A ; (b) -6A]



练习题 1-2 图

1-3 试求下图的电压 u_4 。当(a) $u_1 = 1\text{V}$, $u_2 = 2\text{V}$, $u_3 = 4\text{V}$ 时; (b) $u_1 = -2\text{V}$, $u_2 = 1\text{V}$, $u_3 = 3\text{V}$ 时。

答案: [(a) 3V ; (b) 0V]



练习题 1-3 图

§ 1-4 线性电阻与非线性电阻

如前所述,在本书前面部分,先讨论电阻元件及电源元件的电路,在这一节中,我们讨论线性电阻、线性时变电阻、非线性非时变电阻、非线性时变电阻、线性负电阻的概念。

电路是由元件联接而成的,各种元件都有精确的定义,并由此可确定每一元件电压与电流之间的关系,这一关系称为元件的伏安特性,简称为 VAR(Volt, ampere relation)。基尔霍夫定律与元件的伏安特性是集总电路分析的基础。

电阻元件是从实际电阻器抽象出来的模型。由大家所熟悉的欧姆定律可知,通过该