

高等学校教材

# 线性电路分析

沙玉钧 编

高等教育出版社

## 内 容 提 要

本书是在管致中、沙玉钧、夏恭恪编《电路、信号与系统》一书上册的基础上改编而成，经过多年教学改革的实践，又根据高等学校工科电工课程教学指导委员会电路理论及信号分析指导小组的评审意见作了修改。全书共分七章：电路及电路元件；电阻电路及电路的基本分析方法；动态电路的正弦稳态分析；线性电路的频率特性；二端口网络；电路瞬态的经典分析法及电路状态的突变及奇异函数的运用。附录介绍了线性电路的计算机辅助分析，书末附有习题参考答案。

本书可用作无线电技术及有关电子技术类专业电路分析课程教材，也可供有关科技人员学习参考。

责任编辑 王志民

高等学校试用教材

**线性电路分析**

沙玉钧 编

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

吴江伟业印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 18 字数 431,000

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

印数 0,001—4,800

书号 15010·0874 定价 3.95元

## 前 言

本书是在原编《电路、信号与系统》上册的基础上重新编写的，体系及内容上虽有较大变动，但仍与管致中、夏恭恪编《信号与线性系统》一书紧密联系。

本课程是工科电子类各专业的一门重要技术基础课。通过本课程的教学，使学生理解电路的基本工作原理、掌握基本分析方法，为学习电子线路及后续有关课程建立必要的基础。它是物理课程与专业工程技术课程之间的桥梁，既要承接物理课程，保持理论上的严格性与严密性，又应联系实际，转向工程技术需要与适用的分析方法；既要继续培养学生分析问题的逻辑性与条理性，又应逐步转向培养学生从实际出发，在理论指导下分析解决具体问题的工程技术观点和方法。这是编者在编写本书时的指导思想。

根据本课程的性质与任务，以及学生在学习本课程时所具备的条件，本书内容以线性电路为对象，稳态分析与瞬态分析并重；着重于电路基本原理的阐述及灵活运用电路基本理论分析具体电路的手算方法。对于适用于计算机辅助分析的系统化分析法，也作了适当介绍，并以附录形式附于书后。编者认为，对比较简单的电路灵活运用基本分析方法进行手算分析，是通过实践掌握理论的必经途径。

本书在体系上仍是先讲稳态分析后讲瞬态分析，这样安排主要是从教学出发考虑。编者认为这样安排似更符合教学中难点分散，先易后难，前后联系，循序渐进的原则，也较有利于对电路瞬态分析作比较深入的分析。考虑到学生在学习本课程时自学能力还

不是很强,提供给他们教材,一方面要为论证与分析问题时严密的逻辑思维与严格的数学推导作出示范,使他们在学习过程中受到潜移默化的训练;而且,可能更关重要的是,要使他们容易看下去,感到自己有能力自学,以培养他们自己钻研问题的信心,这些方面考虑较多,在编写时文字叙述及数学推导就难免令人有冗长之感。

根据本课程与《信号与系统》课程的分工,本书只对电路在基本信号源激励下的工作进行详细分析。对电路在任意时间信号源激励下的分析,如时域分析的卷积,频域分析的富氏变换及拉氏变换,以及状态变量分析等都留由后续课程讲授,本书基本没有涉及。全书内容有70~80讲课学时可以足够。

本书初稿曾在本院教学实践中使用过三次。这次通过评选,高等学校工科电工课程教学指导委员会电路理论及信号分析指导小组提出了很多宝贵意见。又承蒙合肥工业大学芮坤生教授,西安交通大学范丽娟教授审阅了全部书稿,并提出具体修改意见。都对编者修改定稿帮助很大,谨致以衷心的感谢。

本书附录由孙崇洲同志编写,张玲玲、吴玉玉同志选编了全部习题并作出解答。在编写过程中得到全教研组同志的支持,谨此致谢。

限于编者的水平,本书必然还存在一些缺点与错误,敬希广大读者提出批评意见。

编 者

一九八六年九月于南京工学院

# 目 录

<b>第一章 电路及电路元件</b> .....	<b>1</b>
§ 1.1 电路与电路图.....	1
§ 1.2 电流、电压及电功率 .....	3
§ 1.3 电路的基本结构,基尔霍夫定律 .....	6
§ 1.4 电阻元件.....	10
§ 1.5 电容元件.....	16
§ 1.6 电感元件.....	19
§ 1.7 互电感.....	22
§ 1.8 电源.....	29
§ 1.9 受控源与多端元件.....	33
§ 1.10 元件的串、并联组合 .....	38
习题 .....	49
<b>第二章 电阻电路及电路的基本分析方法</b> .....	<b>53</b>
§ 2.1 电阻电路.....	53
§ 2.2 电阻串、并联电路 .....	61
§ 2.3 非串、并联电路的简化 .....	70
§ 2.4 网络方程的独立电压变量及独立电流变量.....	79
§ 2.5 节点电压分析法.....	83
§ 2.6 回路电流分析法.....	94
§ 2.7 常用网络定理 .....	109
§ 2.8 网络拓扑结构的矩阵表示 .....	127
§ 2.9 电网络的基本方程 .....	135
§ 2.10 节点方程与割集方程 .....	142
§ 2.11 回路方程与网孔方程 .....	149
习题 .....	153

<b>第三章 动态电路的正弦稳态分析</b>	<b>169</b>
§ 3.1 动态电路的瞬态与稳态	169
§ 3.2 正弦电流	171
§ 3.3 相量与相量图	176
§ 3.4 动态元件在正弦激励下的稳态特性	181
§ 3.5 阻抗与导纳	194
§ 3.6 动态电路的正弦稳态分析	204
§ 3.7 正弦稳态电路的功率	218
§ 3.8 含互感电路的计算	226
§ 3.9 全耦合变压器与理想变压器	237
§ 3.10 铁芯变压器的电路模型	244
§ 3.11 三相交流电路的基本知识	248
习题	255
<b>第四章 线性电路的频率特性</b>	<b>267</b>
§ 4.1 频率响应与网络函数	267
§ 4.2 简单 $RC$ 电路的频率特性	268
§ 4.3 $RC$ 选频网络	275
§ 4.4 $LC$ 谐振回路的参量	281
§ 4.5 串联谐振电路	286
§ 4.6 并联谐振电路	303
§ 4.7 耦合双谐振电路	312
习题	323
<b>第五章 二端口网络</b>	<b>331</b>
§ 5.1 二端口网络的概念及其参数	331
§ 5.2 二端口网络的网络函数	344
§ 5.3 二端口网络的等效电路	349
§ 5.4 二端口网络的外部联接	354
§ 5.5 影象参数	368
§ 5.6 多端口网络与多端网络	375
习题	382

<b>第六章</b>	<b>电路瞬态的经典分析法</b> .....	<b>391</b>
§ 6.1	电路的瞬态 .....	391
§ 6.2	动态元件的初始状态 .....	392
§ 6.3	一阶 $RC$ 电路 .....	396
§ 6.4	一阶 $RL$ 电路 .....	406
§ 6.5	分析一阶电路的三要素法 .....	412
§ 6.6	一阶电路在任意信号源激励下的响应 .....	415
§ 6.7	二阶电路的零输入响应 .....	421
§ 6.8	高阶电路的一般分析方法 .....	429
习题	.....	441
<b>第七章</b>	<b>电路状态的突变及奇异函数的运用</b> .....	<b>447</b>
§ 7.1	电路中储能元件状态的突变, 突变规律 .....	447
§ 7.2	不连续函数的数学表达, 阶跃函数 $U(t)$ .....	457
§ 7.3	冲激函数 $\delta(t)$ .....	463
§ 7.4	$U(t)$ 及 $\delta(t)$ 在电路瞬态分析中的运用 .....	469
§ 7.5	电路的冲激响应与阶跃响应 .....	482
习题	.....	491
<b>附录</b>	<b>线性电路的计算机辅助分析</b> .....	<b>497</b>
<b>习题参考答案</b>	.....	<b>553</b>

# 第一章 电路及电路元件

## §1.1 电路与电路图

在人们日常生活中,经常接触到各种用电设备,简单的如手电筒,复杂的如电视机等。这些用电设备,总的来说都是由一些电器零件——统称为器件,用导线连接起来,构成一个电的通路——电路。简单的电路只有一两个器件,构成一条通路;复杂的电子设备,器件有成百上千个,构成的电路密如蛛网。使用这些电器设备时将开关闭合,接通电源,电路中就有电流流通,使设备工作。

将电路器件——包括电源、负载及开关等全部器件在内用导线连接起来,构成为电的通路的整体称为电路或网络\*。在电路中,电源为电能的供给者,它将其他形式的能量转变为电能,向负载输出;负载为电能的接受者,它将接受到的电能转变为其它形式的能量,供人们使用。导线的作用则是把它们连接起来,通过它传送电能。而开关则担负着接通或断开电路,改变电路连接情况的任务。分析一个电路,就是在已知电路中各个器件的电性能及其相互连接的情况下,分析计算电路中的电流流通,功率传输,以及各个器件的电流、电压及功率等工作情况,从而确定电路的全部工作。

在对电路进行分析之前,一般都先把实际电路在纸上画成电

---

\* “电路”与“网络”这两个名词并无定义上的区别,习惯上网络常指比较复杂的电路,在本书中对这两个名词不加区分。



路图。用规定的图形符号代表电路中的各种器件，并用实线代表连接它们的导线。代表实际器件的图形符号，撇开器件的具体结构与实际功能，只表示出器件的电性能，而且所表示的电性能也是理想化的(例如，图中实线所代表的导线就是理想化的——它的电阻值是零)。电路图在结构上只表示出这些器件电的连接，并不反映设备的实际结构。在电路图上，应当尽可能反映出电路中元件连接的电的规律性以便于分析。

以最简单的手电筒为例，它是由两节干电池，一个小电珠，一个按钮开关，由电筒的金属外壳充当导线连接成为一个电路。它的

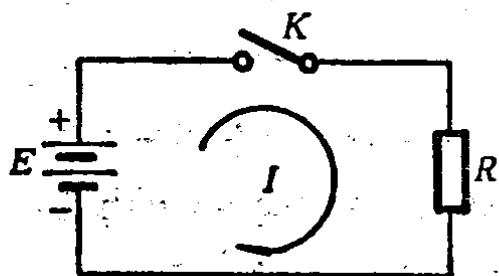


图 1-1 手电筒的电路图

的电路图如图 1-1 所示。在电路图上，分别用  $E$ 、 $R$  及  $K$  表示这些器件。 $E$  表示干电池，它的电压大小为  $E$ ； $R$  表示小电珠，小电珠具有电阻的性能，它的电阻值为  $R$ ； $K$  表示开关，合上时电阻为零，断开时电阻

为无限大。这里电源  $E$ 、电阻  $R$  及开关  $K$  都是实际器件理想化的模型。 $E$  提供的电压，不论接在上面的负载是多大，提供的电流是多大，其量值都是  $E$  不变。实际上干电池能提供的电功率当然是非常有限的。电流稍为大一点，超出其正常工作范围，对外提供的电压就急剧下跌。即使是在其正常提供电流范围内，其端电压也不是如其数学表达式(数学模型)那样严格的常数  $E$ 。代表小电珠的电阻  $R$ ，在图 1-1 中是作为常量看待的，即不论加在它上面的电压有多高，通过它的电流有多大，其阻值都是  $R$  不变。事实上当然也不是这样。这种在电路图中只反映电性能电源  $E$ ，电阻  $R$  等，统称为电路元件。它们的电性能也近似地规律化，理想化。具有同一类电性能的器件，例如电源，不管它是发电机，干电池还是一个有复杂电路的稳压整流器，只要它对外提供电压，都用同一

符号  $E$  表示。电阻  $R$  也是这样, 不管它是电灯泡、电动机, 还是其它用电设备, 只要它外接端子上的电压, 电流具备  $u=Ri$  的关系, 我们都把它叫作电阻, 用同一符号  $R$  表示。因此, 这些符号与图形, 都只是实际器件的电路模型。电路分析, 都是以这些模型为对象的。模型的电性能与实际器件的电性能越相接近, 分析结果也就越接近实际。

## §1.2 电流、电压及电功率

电流、电压及电功率是表示电路工作的三个基本物理量。它们各自的定义及物理意义在物理课程中已有论述, 这里只作一简略的回顾。

电流为描述电荷(有秩序)流动的物理量。导线中的电流即定义为每单位时间通过导线横截面的电量, 称为电流强度, 电流为其简称。电量有正负, 电流有流向, 规定电流的方向为正电荷流动的方向(负电荷流动的反方向)。在电路图上用一箭头标示这一方向。在国际单位制中电量( $q$ )的单位为库仑, 简称库, 单位符号为 C。时间的单位为秒, 单位符号为“s”。而电流的单位为安培, 简称安, 单位符号为“A”。

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

如果电流是恒定的, 即其量值和流向不随时间变化, 称为直流, 一般都用大写字母  $I$  表示。对于量值(和方向)随时间改变的电流, 则电流应描述为时间的函数  $i(t)$ , 一般都略去函数形式, 直接表示为  $i$ 。

电荷是电能的携带者, 它通过电路元件时与元件发生能量的交换。电荷携带电能的多少反映为其电位的高低, 电能即表示为

电量与电位的乘积。当它与外界发生能量交换时即表现为电位的变动。因而电流通过元件,在元件外接端子间将产生电位差值。这一电位差称为电压。电位的升高(电荷从元件获得能量)或降低(电荷失去电能,交付与元件转变为其他能量形式)用电压的“极性”来表示。在电路图上,正极性端标示“+”,表示高电位端。电压的极性有时也称为“方向”,并用箭头标示这一方向。一般常以从高电位端向低电位端作为电压的方向,因而电压有时也更明确的称为电压降( $u$ )。在国际单位制中,电压的单位为伏特,简称伏,单位符号为(V)。

由于电流为每单位时间通过的电量,故电流与电压的乘积即为每单位时间电能的变换即电功率( $p$ )。电功率的单位为瓦特,简称瓦(W)。

$$p = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-2)$$

在电路中,电流有流向,电压有极性。在直流电路中,电压源的极性是明确的。如果电路的结构比较简单,电路中电流的流向不难判定。因此,在电路图上标明电流的流向及各个元件上电压的极性并不困难。例如图 1-1 的电路就是这样。但对于稍为复杂一些

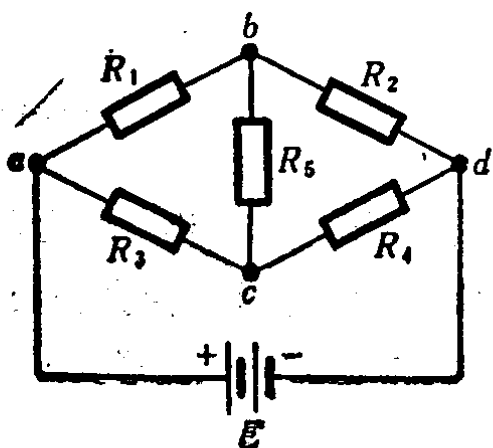


图 1-2 电桥电路

的电路,在电路图上电流的流向以及电压的极性有时很难直接看出。例如图 1-2 所示的电桥电路,在电桥不平衡的情况下, $R_5$  中的电流是从  $b$  流向  $c$  还是从  $c$  流向  $b$  就必须通过计算才能确定。对于电压  $u_{bc}$ ,  $b$  与  $c$  哪一个正极性端也是这样。

在更一般的情况下,电路中电流的流向及电压的极性都随时间反复变化,更无法在电路图上标明它

们的真实方向。

对于电流、电压等具有正、反两个“方向”的物理量，在进行电路分析时都用代数量来表示，即对一个方向用正值表示，相反方向就用负值表示。例如图 1-3(a)。流过元件  $N$  的电流标明是从  $N$  的端点  $a$  流入而从端点  $b$  流出，电流的大小为  $i$ 。如果电流的实际方向与图上标示的方向是一致的，则  $i$  为正值；如果电流的实际方向与此相反，是从端点  $a$  流出的，则可以看成电流的方向仍是从  $a$

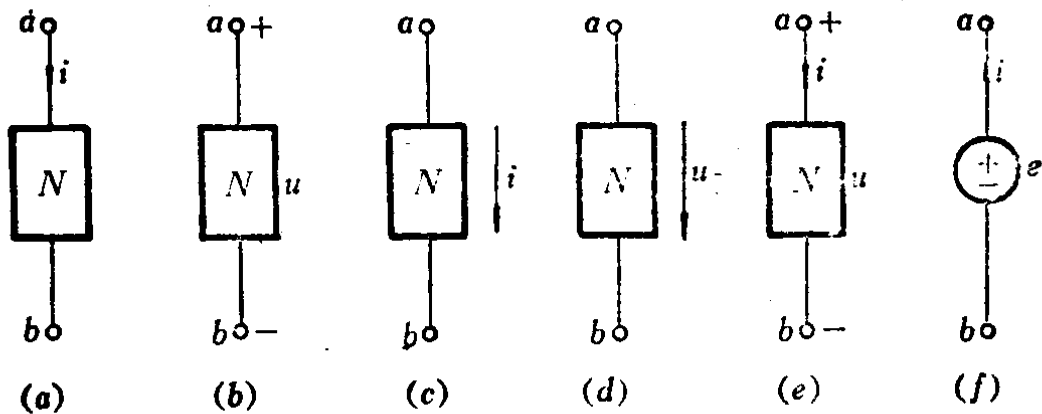


图 1-3 电流、电压的正方向标示法

端流入而从  $b$  端流出，即仍与电路图上标示的方向一致，但其量值为负。同理，图 1-3(b) 中元件  $N$  上的电压标明  $a$  为正极性端， $b$  为负极性端，表明  $a$  端电位高于  $b$  端电位，电压(降)  $u$  为正值。如果实际情况与此相反，则在电压极性仍如前所标示的情况下， $u$  为负值。图 1-3(c) 及 (d) 表示另外两种常用的标示方法。其意义是明显的，无需再加说明。

因此，电路图上标示的电流方向及电压极性(方向)只是标明它们的参考方向或“正”方向。如果实际电流的方向与电路图上标示的参考方向一致，电流为正值，如为负值，则实际的方向与图上标示的参考方向相反。电压也是一样。由于正与负是相对的，向哪一方向作为正可以任意指定。但是一经指定并在图上标明后，则在电路的整个分析计算过程中必须以此为准，不能变动。在根据电路图进行电路分析计算之前，电流及电压的参考方向必须先

在电路图上指定并标明。这是因为若不先指定参考方向，则作为代数量的电流及电压值，它们的正负便无所遵循。

同一元件上的电流及电压，它们的参考方向常取一致，即参考方向约定电流从元件的(电压)正极性端流入，从负极性端流出，如图 1-3(e) 所示。这样选取的参考方向称为关联的参考方向。但这并不是绝对必须遵循的。例如对于电源，其电压与电流的参考方向就常取相反方向，如图 1-3(f) 所示。

由于在电路分析中电压  $u$  与电流  $i$  均为代数量，因此，计算得出的电功率  $p=ui$  也是代数量。

设某一元件上的电压、电流取关联的参考方向即参考方向相同，则由式(1-2)计算得出的电功率，表示这一元件自外电路获得的电功率或自外电路输入的电功率；如果  $p$  为负值，则该元件获得负功率实际上是向外电路提供或输出电功率。如果电压、电流的参考方向相反，则结论也相反。作为习题，请读者根据物理学中规定的电流、电压及电功率的定义，自己进行论证，得出这一结论。

### §1.3 电路的基本结构、基尔霍夫定律

如前所述，电路或网络是由各个元件用导线连接而成的。现在我们暂且放开电路元件的电特性，先考察一下电路的基本结构。

#### 1. 支路、节点与回路

不考虑元件的电特性，所有元件都只是电流的通路。在电网络的结构中，每一条电流的通路称为支路，支路与支路的连接点称为节点(或称结点)。从网络的一个节点出发，经过若干个支路与节点，重又回到原来的起始节点(所有支路与节点都只准通过一次)，这一首尾相接的通路称为回路。例如图 1-4(a) 所示的电路，

如果只考察它的结构, 可以简单的画成图 1-4(b) 的样子\*。从图

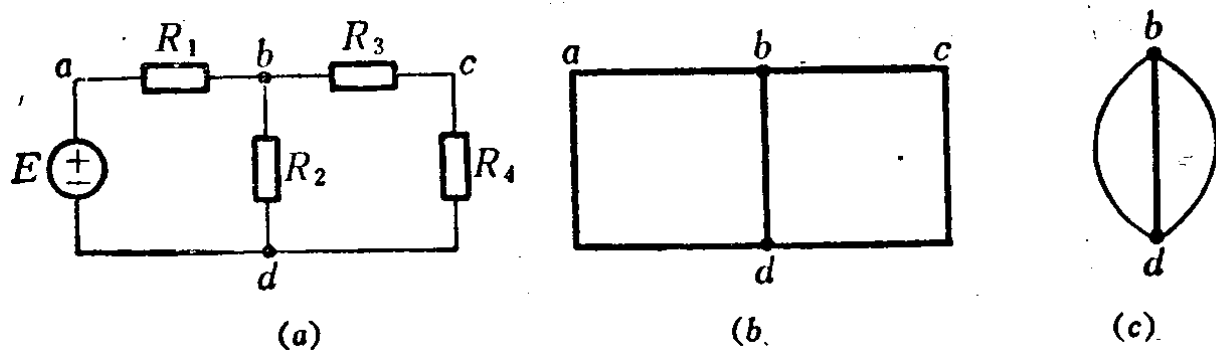


图 1-4 网络的结构

(b) (或直接从图(a)) 可以看到, 这一网络有  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  四个节点,  $ab$ 、 $ad$ 、 $bc$ 、 $bd$  及  $cd$  五条支路,  $abda$ 、 $bcd b$  及  $abcd a$  三个回路。由于节点  $a$  及  $c$  都只连接两条支路, 即支路  $ab$  与  $ad$  及支路  $bc$  与  $cd$ , 它们都只是一条电流通路, 因此  $bad$  及  $bcd$  都可作为一条支路看待。这样, 这一网络便只有两个节点, 三条支路, 如图(c)所示。

对于电路图中支路、节点与回路的一些基本关系, 在第二章中还要有所论述。

## 2. 基尔霍夫定律

任何网络所有支路上的电流和电压, 都必须受两个基本定律的制约。这两个定律被称为基尔霍夫电流定律及基尔霍夫电压定律。

基尔霍夫电流定律又称基尔霍夫第一定律, 简称为  $KCL$ 。它的具体内容是: 对网络中的任一节点, 在任何瞬时从该节点流出的电流必等于同一瞬时流入该节点的电流; 或者表达为: 在任何瞬时任一节点上电流的代数和恒等于零。如果以流出节点的电流为正, 则流入节点的电流为负, 或者以流入节点的电流为正, 则流出节点的电流为负。这一定律可用数学表达式写成

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

\* 在网络图论中, 称(b)为网络(a)的“图”或“线图”。

例如图 1-5 表示网络中一个节点  $N$ ，有五个支路与该节点相连接。各支路电流的正方向标明在图上。由  $KCL$ ，对图(a)有

$$i_1 + i_2 + i_4 = i_3 + i_5$$

或

$$i_1 + i_2 - i_3 + i_4 - i_5 = 0$$

对图(b)，有

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5 = 0$$

基尔霍夫电流定律实际上是用另一方式表达了电荷守恒原理。因为如果  $N$  处电流的代数和不等于零，在该节点必然有电荷的产生或消失，而这都是违反电荷守恒原理的。

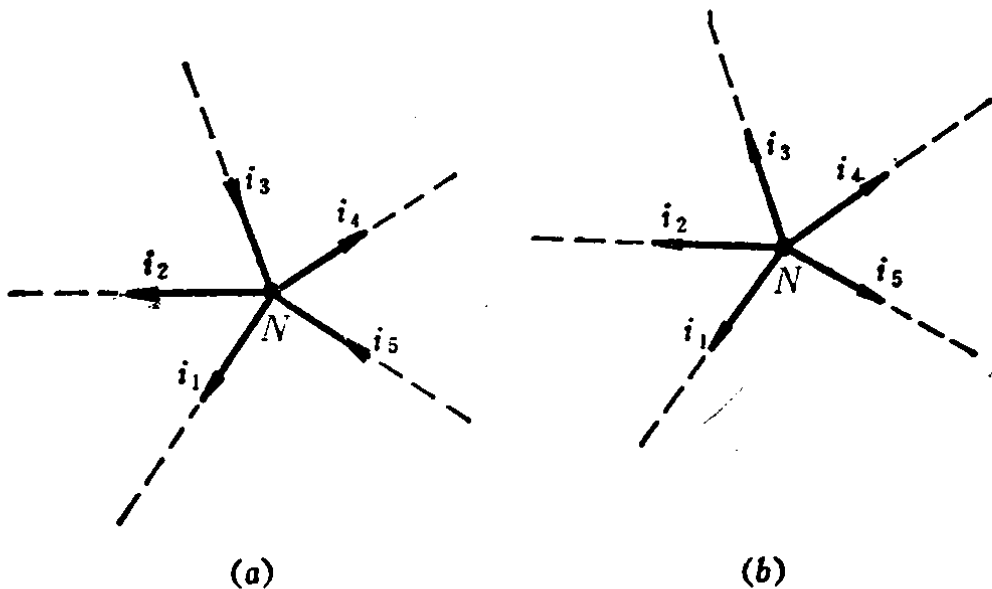


图 1-5 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律还可以作如下推广：对任何网络用一个假想的闭合面包围网络的一个局部。则任一瞬时流出这一闭合面的电流必等于同一瞬时流入闭合面的电流，或流出（入）闭合面的电流代数和恒等于零。这就是说，被这一闭合面切割的所有支路\*电流的代数和恒等于零。例如图 1-6 中虚线表示这一闭合面，它切割四条支路，根据这四条支路电流的正方向，有

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

\* 在网络图论中这些支路的集合称为“割集”。

网络的第二个基本定律是基尔霍夫电压定律，又称基尔霍夫第二定律，简称为  $KVL$ 。它的具体内容是：在任一瞬时，环绕网络中的任一回路，各支路电压的代数和恒等于零。写成数学表达式为

$$\sum u = 0 \quad (1-4)$$

需要提出注意：“环绕”是有一定循行方向的。取回路中各个支路电压的代数和时，支路电压的方向与环绕的方向一致者为正，反之为负。因此，在应用  $KVL$  时，对于所选取的回路，环绕这一回路的方向可以任意选取，但须标明。这一“方向”就称为这一回路的方向。

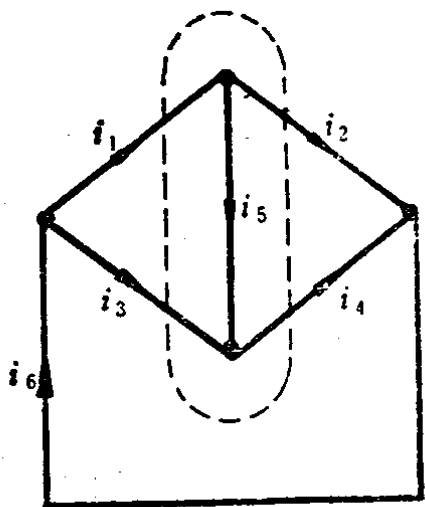


图 1-6  $KCL$  的推广

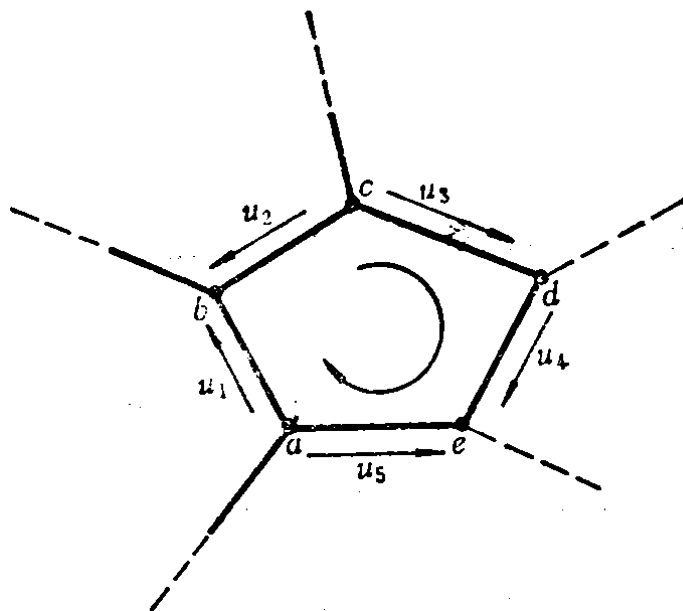


图 1-7 基尔霍夫电压定律

例如图 1-7 表示网络中某一回路，回路中的箭头表示回路的方向。根据这一回路中各个支路电压的正方向，有

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

基尔霍夫电压定律是能量守恒原理在电路中的表现。根据电压的定义，电压表示电场力把单位正电荷从高电位端移到低电位端所作的功。单位正电荷从回路中的某一节点经过任一闭合路径仍然回到这一节点，仍然具有原来的电位，总的电位差是零，也就



是电压的代数和是零。

基尔霍夫定律表达了组成网络的各个支路间电流及电压的相互制约关系。这些关系仅决定于网络的结构，与网络各支路中元件的电特性——元件自身的电压电流关系无关。对于一个由确定的元件组成的具有确定结构的实际网络，它的工作是确定的。这一网络中各个支路或元件上的电压及电流，一方面受元件自身电压电流关系的制约，同时又受网络中各支路电压及电流相互关系的制约，从而使网络中各个支路或元件上的电压及电流都得到确定。从数学意义上说，对于任何一个实际的网络，不管这一网络的结构多么复杂，以各支路或元件的电压及电流为未知数，根据基尔霍夫电流定律写出表示各支路间电流相互制约关系的方程式，根据基尔霍夫电压定律写出表示各支路间电压相互制约关系的方程式，再根据元件的电特性写出表示网络中各支路或元件自身电压电流制约关系的方程式，对这些方程式联立求解，就能得出解答。

## §1.4 电阻元件

元件是组成电路的最小单元。在电路中它的特性表示为元件外接端钮上的电压电流关系（一般就称为伏安特性），为了强调这一点，有时也称为“外特性”。这一特性常用数学关系式——解析式来表达，或直接描绘成电压电流关系曲线——伏安特性曲线。前已指出一般元件的电特性，都是实际器件模型化后的理想情况。

电阻元件是电路中最经常用到的元件之一，一般用符号  $R$  表示。根据电阻元件电压电流关系曲线是否是通过原点的直线，电阻元件可分为线性电阻与非线性电阻两大类。

### 1. 线性电阻元件

对于线性电阻，大家早就熟识。众所周知的欧姆定律