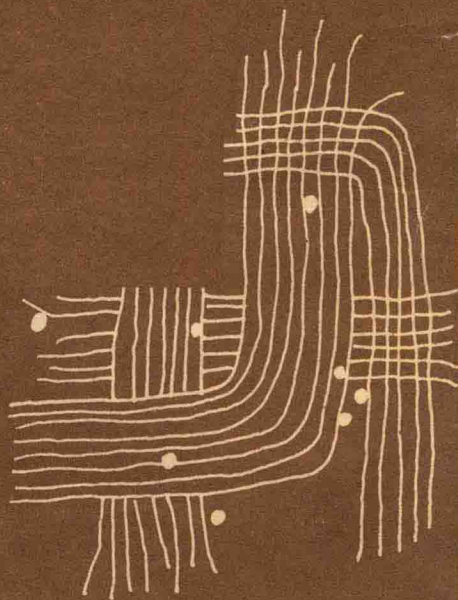


上册

线性电网络分析

汪建



湖北教育出版社

线 性 电 网 络 分 析
上 册
汪 建

湖北教育出版社出版、发行
新华书店湖北发行所经销
湖北省京山县印刷厂印刷

350×1168毫米32开本 16印张 2插页 415000字

1991年8月第1版 1991年8月第1次印刷

印数：1—3000

ISBN7—5351—0776—1/T·2

定价：5.80元

内 容 提 要

本书以线性电路为对象，系统地讲述电路理论的基本概念、基本原理和基本分析方法。通过对电路分析课程中重点、难点内容及解题方法的详细讨论，刻意于基本内容的叙述与学习方法指导的有机结合。本书十分适宜于自学。

全书共十二章，分上、下两册出版。上册内容包括：电路和电路元件；网络分析方法之一——等效变换法；网络分析方法之二——网络方程法；网络分析方法之三——运用网络定理法；正弦稳态电路分析；谐振电路与互感耦合电路。下册内容包括：三相电路及其计算；非正弦周期性稳态电路分析；双口网络；暂态分析方法之一——经典分析法；暂态分析方法之二——复频域分析法；暂态分析方法之三——状态变量分析法。

本书可作为高等学校电类专业本科和大专电路理论课程的教学用书，也可供有关科技人员参考。

序 言

本书系根据本人多年的教学实践，由讲稿整理而成。电路理论是高等工科院校电类专业的一门公共技术基础课。学习本课程的目的，在于懂得电路的基本规律，掌握电路分析的基本方法。

学生对本课程内容的掌握，归结为综合运用所学知识分析、计算具体电路的能力。而这一能力的培养与提高，有赖于对基本概念、基本原理的准确理解，对基本方法的熟练掌握。因此，在本书的编写中，除着重于基本内容的叙述外，还加强了对学习方法特别是解题方法的指导，并力图将两者有机地融合在一起。具体作法是：

(1) 对基本概念和重点、难点内容，用注释方式予以较详尽的说明和讨论；

(2) 对书中的内容在理解和掌握上易于出错之处给予提示和说明；

(3) 给出了各种解题方法的具体步骤，并用众多实例说明这些解题方法的具体应用；

(4) 每章的最后均有一节“例题分析”，通过对一些典型的或综合性较强、具有一定难度的例题的选讲，进一步讨论各种解题方法的灵活运用；

(5) 许多例题同时给出多种解法，供读者比较。

另外，本书基本上采用授课式语言叙述，易读、易懂，十分便于自学。

本书的全部书稿承蒙黄慕义教授作了仔细审阅，陈崇源副教授审校了全书。在编写过程中孙亲锡副教授、黄冠斌副教授对

书稿提出了许多宝贵的修改意见，任江苏同志帮助选编了部习分题，在此一并表示衷心的感谢。也向所有支持、帮助本书出版的同志表示谢意。

本书能在较短时间内出版，与饶红的内助是分不开的。除了繁忙的工作和家务之外，她还承担了书稿的誊抄和绘制插图等工作。本书也是她辛勤工作的成果。

限于编者的水平，加之时间匆促，书中的谬误、不妥之处实在是难免，诚请读者批评赐教。

汪 建

一九九〇年十月于华中理工大学

目 录

第一章 电路和电路元件..... (1)

- § 1—1 电路的一些基本概念..... (1)
- § 1—2 电流、电压及其参考方向..... (5)
- § 1—3 电路的基本定律——基尔霍夫定律..... (13)
- § 1—4 奇异函数和不连续波形的数学表达法..... (17)
- § 1—5 电路元件及其分类..... (28)
- § 1—6 电阻元件..... (33)
- § 1—7 电容元件..... (35)
- § 1—8 电感元件..... (43)
- § 1—9 独立电源..... (48)
- § 1—10 受控电源和运算放大器..... (51)
- § 1—11 例题分析..... (55)

第二章 网络分析方法之一——等效变换法

- (74)
- § 2—1 等效变换的概念..... (74)
- § 2—2 电阻元件的串联和并联..... (77)
- § 2—3 电阻元件的混联..... (82)
- § 2—4 电源的等效变换..... (87)
- § 2—5 Y形网络和 Δ 形网络的等效变换..... (99)
- § 2—6 电位的计算方法..... (103)
- § 2—7 简化电阻网络的几种特殊方法..... (107)
- § 2—8 用等效变换的方法分析含受控源电路..... (116)

§ 2—9	含运算放大器简单电路的计算	(120)
§ 2—10	动态元件的串联和并联	(123)
§ 2—11	例题分析	(132)

第三章 网络分析方法之二——网络方程法

		(154)
§ 3—1	网络图论的基本概念	(154)
§ 3—2	图的拓扑结构的矩阵描述	(163)
§ 3—3	网络方程中的独立变量	(173)
§ 3—4	基尔霍夫定律的矩阵表示式	(178)
§ 3—5	支路分析法	(185)
§ 3—6	节点分析法	(198)
§ 3—7	割集分析法	(206)
§ 3—8	网孔分析法	(212)
§ 3—9	回路分析法	(218)
§ 3—10	对偶网络的对偶性原理	(224)
§ 3—11	例题分析	(231)

第四章 网络分析方法之三——运用网络定

理法

§ 4—1	叠加定理	(248)
§ 4—2	替代定理	(255)
§ 4—3	戴维南定理和诺顿定理	(258)
§ 4—4	特勒根定理	(270)
§ 4—5	互易定理	(276)
§ 4—6	最大功率传输定理	(281)
§ 4—7	中分定理	(285)
§ 4—8	例题分析	(291)

第五章 正弦稳态电路分析.....(309)

- § 5—1 正弦交流电的基本概念.....(309)
- § 5—2 正弦量的相量表示.....(317)
- § 5—3 基尔霍夫定律的相量形式.....(327)
- § 5—4 R 、 L 、 C 元件伏安关系式的相量形式.....(329)
- § 5—5 复阻抗和复导纳.....(340)
- § 5—6 正弦稳态电路的计算.....(346)
- § 5—7 相量图与位形图.....(353)
- § 5—8 正弦稳态电路中的功率.....(360)
- § 5—9 功率因数及其提高.....(381)
- § 5—10 例题分析.....(387)

第六章 谐振电路和互感耦合电路.....(407)

- § 6—1 串联谐振电路.....(407)
- § 6—2 并联谐振电路.....(424)
- § 6—3 一般谐振电路及其计算.....(433)
- § 6—4 耦合电感器与电感矩阵.....(437)
- § 6—5 互感耦合电路的分析.....(445)
- § 6—6 耦合电感器的去耦等效电路.....(453)
- § 6—7 两绕组耦合电感器与空芯变压器.....(460)
- § 6—8 全耦合变压器与理想变压器.....(464)
- § 6—9 理想变压器电路的计算.....(470)
- § 6—10 例题分析.....(477)

习题答案.....(498)

第一章 电路和电路元件

电路理论学科的研究对象是电路。电路分析是电路理论的重要分支和基础部分，它的任务是，在给定电路的结构和参数的条件下，求电路的响应，即电压、电流及功率等。本章介绍有关电路的基本概念、组成电路的元件及电路应遵从的基本定律。

§ 1—1 电路的一些基本概念

一、电路

工农业生产、科研、国防及日常生活都离不开电，而电的作用是通过具体的电路来实现的。所谓电路是指由电路器件（又称为电路元件）和联接导线组合而成的电流通路。

实际的电路千差万别。简单的电路仅由几个元件组成；而复杂的电路密如蛛网，其包含的电路元件可能成千上万。尽管各种电路的复杂程度相异，完成的功能亦不相同，但它们都是由电源或信号源、用电设备（又称负载）和中间环节这三部分组成的。电路中电源或信号源的作用是将其它形式的能量转化为电能或产生信号向负载输出；用电设备的作用是将电能转化为人们需要的其它形式的能量或信号；而中间环节包括联接导线、开关等，是将电源和负载相联，并加以控制构成电流的通路以传输电能。如一个简单的手电筒电路，其电源为干电池，它将化学能转化为电能并提供给电路；手电筒的负载为小电珠（灯泡），它将电能转化为光能供人们使用；手电筒的金属外壳起着联接导线的作用并附有开关，以便根据需要使电能从电池传送到灯泡。

电路也称为“电网络”。

二、电路图

对实际的电路进行分析时，通常需画出电路图。所谓电路图

即是反映实际电路电气结构的图形。在电路图中，用规定的图形符号代表电路中的各种器件，用实线代表联接导线。图 1-1-1 为两个电路图的例子。要注意，电路图中的图形符号并不反映实际器件的具体结构与功能，只表征器件的电特性，而且所表征的电特性也是理想化的。电路图中的元件又称之为理想化元件。

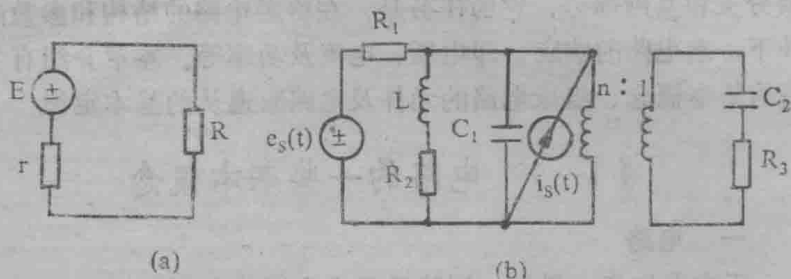


图 1-1-1 电路图的示例

三、集中参数电路和分布参数电路

我们将要看到，一个电路元件可用一个参数或多个参数予以表征，而不管它的几何尺寸是多少，这种参数被称为集中参数。实际上，这里采用了这么一种假定：即认为电磁波的传播速度为无限大，或者说电磁波在电路中的传播不需要时间，这样，元件及电路的几何尺寸变得无关紧要。

是否任何电路都可以采用这种假定，即不考虑元件的几何尺寸呢？并非如此，这需取决于电路的最高工作频率所对应的波长与电路及元件几何尺寸的相对大小。仅当下式成立时，才可认为无需考虑元件的几何尺寸，并将元件用集中参数表征：

$$\lambda \geq 100 l \quad (1-1-1)$$

式中 l 为元件的最大线性尺寸， λ 为电路中最高工作频率的波长，它和频率的关系为

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1-1-2)$$

其中 $c = 3 \times 10^8 \text{ km/S}$ ，为电磁波的传播速度。

如频率 $f = 50 \text{ Hz}$ 的工频正弦交流电，其波长 $\lambda = \frac{c}{f} = 6000 \text{ km}$ 。而一般用电器的尺寸远小于这个数字，故忽略元件的几何尺寸不会带来什么问题。但对电力传输线（高压输电线）而言，其长度为几百公里甚至上千公里，与电路频率的波长处于同一个数量级，此时若采用上述假设将导致不良甚至是错误的结果。

我们将可以忽略电磁波传播速度的有限性，而将元件用一些集中参数予以表征的电路称为集中参数电路，反之称为分布参数电路（即电路中的参数是按几何尺寸连续分布的）。

集中参数电路和分布参数电路有着不同的分析方法。从数学的观点看，集中参数电路是可用常微分方程（以时间 t 为变量）描述的电路，而分布参数电路则需用偏微分方程（以时间和空间坐标为变量）加以描述。本书只讨论集中参数电路的分析方法。

四、电路中的几个术语

下面结合图1-1-2所示的电路介绍电路中常用的几个重要名词。

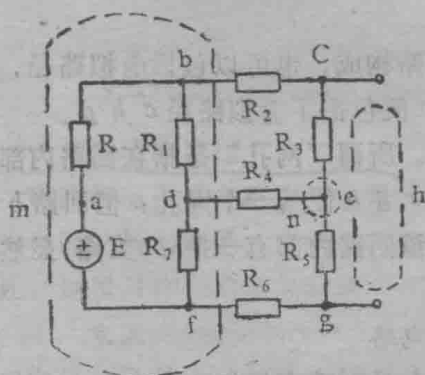


图 1-1-2 用以说明电路术语的电路

1. 支路

电路中的每一个分支称为一条支路。如图 1-1-2 电路中的分支 $b-a-f$ 、 $b-d$ 、 $d-f$ 等均为支路。这样，该电路共有六条支路。此外亦可将每一个二端元件（具有两个端钮的元件）甚

至一对开路端钮，或者一段短接线视为一条支路。

2. 节点

电路中两条或两条以上支路的联接点被称为节点。若认为图

1-1-2 电路中的每一个二端元件为一条支路，则该电路共有七个节点；若将电路中的每一个分支视为一条支路，则该电路只有 b 、 d 、 e 、 f 四个节点。

电路中亦有“广义节点”的概念。所谓“广义节点”是指电路中的任一封闭面。如图 1-1-2 中由虚线构成的闭合路径 m 、 n 便是两个封闭面。“汇集”于每一个广义节点的支路为虚线即闭合面所切割的支路，如“汇集”于广义节点 m 的有 $b c$ 、 $d e$ 、 $f g$ 等三条支路。要注意构成广义节点的虚线即闭合面只能对支路切割一次。显然，“节点”是“广义节点”的特例，其封闭面只包围一个节点，仅切割与该节点相连的支路，如广义节点 n 就是节点 e 。

3. 回路

电路中从任一节点出发，经过某些支路和节点，又回到原来的起始节点（所有的节点和支路只能通过一次）的任一闭合路径被称为回路。如图 1-1-2 所示电路中的路径 $b c e d b$ 、 $d e g f d$ 、 $b c e g f d b$ 等均是回路，该电路共有七个回路。

回路不一定要全部由支路构成，也可以包括虚拟路径，如在图 1-1-2 中的回路 $c h g e c$ 便包括了虚拟路径 $c h g$ 。

回路的特例是“网孔”。所谓“网孔”是指在回路内部不含支路的回路。如回路 $b c e d b$ 便是一个网孔；但回路 $b c e g f d b$ 不是网孔，因为在该回路内部有一条 $d e$ 支路。显然，该电路共有三个网孔。

4. 平面电路和非平面电路

若一个电路能画在平面上且不致有任何两条支路在非节点处交叉（即交叉而不相联接的情况），这种电路被称为平面电路，否则称为非平面电路。图 1-1-3(a) 所示的电路是一个非平面电路。在该电路中出现了 R_3 支路和 R_5 支路交叉而不相联接的情况。但图 1-1-3(b) 所示电路不是非平面电路，这是因为它能被改画为图 1-1-3(c) 所示的电路，在此电路中， R_3 和 R_5 支路不再交叉。

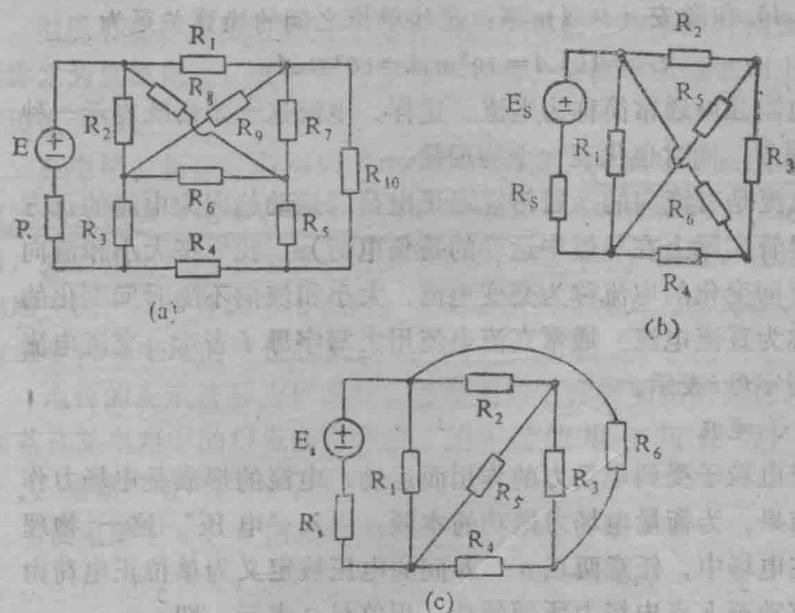


图 1-1-3 非平面电路和平面电路示例

§ 1—2 电流、电压及其参考方向

一、电流和电压

电流和电压是电路分析中常用的两个基本物理量；它们又被称为电路的基本变量。这两个物理量在物理学课程中已有详细的论述，这里只作一简要的回顾。

1. 电流

电荷有规则的定向运动或电场强度的变化产生电流。为表征电流的大小，引入电流强度的概念，它被定义为单位时间内通过导体横截面的电量，用符号 i 表示，即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

电荷 q 的单位为库仑 (C)，时间 t 的单位为秒 (S)，则

电流 i 的单位为安培 (A)。实用中, i 的单位还有千安 (kA)、毫安 (mA) 和微安 (μA) 等。这些单位之间的换算关系为

$$1kA = 10^3 A = 10^6 mA = 10^9 \mu A$$

电流强度通常简称为电流。这样, 电流这一术语既表示一种物理现象, 同时也代表一个物理量。

电流是有流向的, 通常规定正电荷的运动趋向为电流的正方向 (尽管实际上在导体中运动的是负电荷)。我们把大小和流向均随时间变化的电流称为交变电流, 大小和流向不随时间变化的电流称为直流电流。通常直流电流用大写字母 I 表示, 交流电流用小写字母 i 表示。

2. 电压

带电粒子受到电场力的作用而运动, 电流的形成是电场力做功的结果。为衡量电场力做功的本领, 引入“电压”这一物理量。在电场中, 任意两点 a 、 b 间的电压被定义为单位正电荷由 a 点移动至 b 点电场力所做的功, 用符号 v 表示, 即

$$v = \frac{dw}{dq} \quad (1-2-2)$$

能量 w 的单位为焦耳 (J), 电荷 q 的单位为库仑 (C), 则电压 v 的单位为伏特 (V)。实用中, 电压的单位还有 kV 、 mV 、 μV 等, 这些单位间的换算关系为

$$1kV = 10^3 V = 10^6 mV = 10^9 \mu V$$

电压是有极性的。若单位正电荷从 a 点移动至 b 点电场力作了正功, 则 a 点为正极性, b 点为负极性; 若单位正电荷从 a 点移动至 b 点电场力做了负功, 则 a 点为负极性, b 点为正极性。电压的极性也被称为电压的参考方向。若 a 点为正极性, b 点为负极性, 则电压的参考方向由 a 指向 b , 并表示为 v_{ab} 。这种双下标表示法中的前一个下标代表电压的起点, 后一个下标表示电压的终点, 这表明两个下标的位置不可随意颠倒, 这需特别加以注意。可以证明, 工频及直流电路中任意两点间的电压只和这两点

的位置有关而与电荷的移动路径无关。

电压有交、直流之分。若电压的大小和极性均不随时间变化的称之为直流电压，并用大写字母 V 表示。交流电压通常用小写字母 v 表示。

在电路分析中，常用到“电位”的概念。电路中某点的电位被定义为该点与电路中参考点之间的电压，因此在谈到电位的同时，必须指出电路的参考点。参考点的电位为零，这样，在选择电路中的点 O 作为参考点时，便意味着将 O 点置为零电位。电位的单位与电压的单位相同。

电位的表示符号为 V 或 φ ，并常用单下标标明点的标记。例如若选某电路中的 O 点为参考点，则 a 点的电位可记为 V_a 或 φ_a ，这意味着 $V_a = \varphi_a = V_{aO}$ 。

设电路中 a 、 b 两点的电位为 φ_a 、 φ_b ，则

$$\begin{aligned}\varphi_a - \varphi_b &= V_{aO} - V_{bO} = V_{aO} - (-V_{Ob}) \\ &= V_{aO} + V_{Ob} = V\end{aligned}$$

这个电压 V 是电场力移动单位正电荷从 a 点经 O 点至 b 点所做的功。前已指出，电路中两点间的电压与电荷移动的路径无关，因此 V 便是 a 、 b 两点间的电压。于是有

$$\varphi_a - \varphi_b = V_{ab} \quad (1-2-3)$$

这表明，电路中任两点间的电压等于这两点的电位之差，故电压又称作电位差。

由(1-2-3)式可见，当 $V_{ab} > 0$ 时， $\varphi_a > \varphi_b$ ，这表明电压 V_{ab} 为正时， a 点的电位高于 b 点的电位，称 a 点为高电位端， b 点为低电位端，沿着电压的方向（从 a 到 b ），电位在降低，因此电压亦称为“电位降”或“电压降”。

二、电流、电压的参考方向

前已述及，电流、电压均是既有大小又有正负的代数量，其正负与一定的方向相对应。由于在实际的电路中，如图1-2-1所示的电路，很难直接确定各支路电流的流向及电压的极性，因

此，在电路分析中，引入“参考方向”的概念，用以确定电流、电压这些代数量，从而确定电流、电压的数值大小和流向或极性。

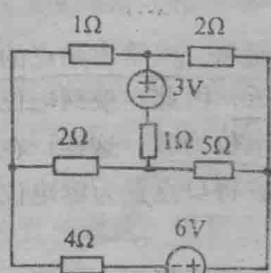


图 1-2-1 电路示例

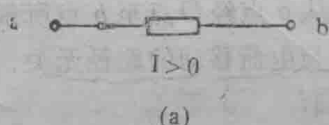
应强调指出，在电路分析中，参考方向是一个非常重要的基本概念，要特别予以重视。

1. 参考方向的概念

参考方向是一个人为假定的方向，又称为假定正向，它和电压、电流数值的正、负号结合起来，便能确定电量的真实方向。

(1) 电流的参考方向

在电路图中，电流的参考方向用箭头符号表示，如图1-2-2所示。在图1-2-2(a)中， I 为正值，表明电流的实际方向与图中标示的方向一致，即电流确是从



a 端流入，从 b 端流出；在图1-2-2(b)中， I 为负值，表明电流的实际方向与标示的方向相反，即电流实际是从 b 端流入，从 a 端流出。尽管(b)图中电流的实际流向与假定方向不一致，也无需将电流的参考方向予以改变，因为参考方向和电流数值负号的结合便明确地指出了电流的实际方向。

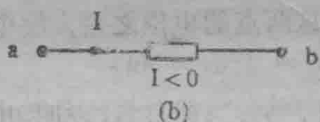


图 1-2-2 电流的参考方向

(2) 电压的参考方向

在电路图中，电压的参考方向有两种标示法。一种是用“+”“-”符号表示，即高电位端标以符号“+”，低电位端标以符号“-”；另一种是用带尾的箭头表示，即箭尾朝向高电

位端，箭头指向低电位端，如图1-2-3所示。在该图中，若 $V > 0$ ，表明电压的实际方向和参考方向一致，即 a 为高电位端， b 为低电位端；若 $V < 0$ ，则情形与上面的刚好相反。

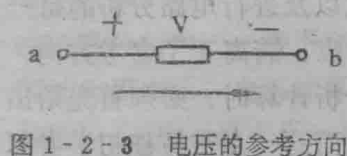
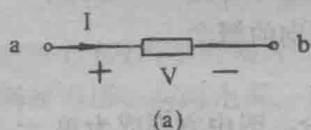


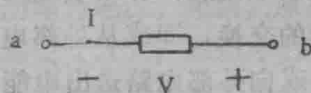
图1-2-3 电压的参考方向

2. 关联的参考方向

实际进行电路分析时，可同时标示某一支路电流和电压的参考方向。但为简便起见，常采用“关联的参考方向”或“一致的参考方向”（又简称为关联正向）。所谓“关联的参考方向”是指电流的参考正向也就是电压的参考方向，即电流从电压的正极性端流入，从负极性端流出，如图1-2-4(a)所示。相反的情形则称为非关联的参考方向，如图1-2-4(b)所示。



(a)



(b)

图1-2-4 关联的参考方向和非关联的参考方向

采用了关联正向后，可在电路图中或者只标出电流的参考方向，或者只标出电压的参考方向。实际中，常见的是只标示电流的参考方向。一般地，在仅标出某一支路的电流（或电压）的参考方向而不加说明的情况下，均意味着采用的是“关联正向”。

3. 关于参考方向的说明

参考方向的概念虽然简单，但因为它的应用贯穿在整个电路分析课程的始终，是重要的基本概念之一，有必要再作如下几点说明：

(1) 参考方向虽然是一种假想的方向，它并不代表真实方向，但电量的真实方向却必须根据它和数值的正负号共同来决定。因此离开了参考方向，电量的真实方向将无从确定，电量数