

★高等院校 21 世纪新视野教材★

宋 军 陆秀令 主编

电工技术

湖南大学出版社



电工技术

★高等院校 21 世纪新视野教材★

电 工 技 术

主编	宋 军	陆秀令	
编委	宋 军	陆秀令	胡新晚
	肖文英	张榕华	张忠贤
	胡 斌	杨 璐	欧友辉
	周 扬	雷圣清	李葆仁

湖南大学出版社

2004 年·长沙

图书在版编目 (CIP) 数据

电工技术/宋军, 陆秀令主编. —长沙: 湖南大学出版社,
2004. 2

ISBN 7-81053-719-9

I. 电... II. ①宋... ②陆... III. 电工技术—
高等学校—教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 002841 号

电工技术

Diangong Jishu

宋 军 陆秀令 主编

-
- | | |
|-------------------------------|------------------------------|
| ☐ 责任编辑 | 厉 亚 |
| ☐ 特约编辑 | 欧阳旭清 |
| ☐ 封面设计 | 张 毅 |
| ☐ 出版发行 | 湖南大学出版社 |
| | 社址 长沙市岳麓山 邮码 410082 |
| | 电话 0731-8821691 0731-8821315 |
| ☐ 经 销 | 湖南省新华书店 |
| ☐ 印 装 | 湖南新华印刷集团有限责任公司 (邵阳) |
-

- | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------------|--|------|-----------------------------|-------|
| ☐ 开本 | 787×1092 16 开 | ☐ 印张 | 17.5 | ☐ 字数 | 405 千 |
| ☐ 版次 | 2004 年 2 月第 1 版 | ☐ 2004 年 2 月第 1 次印刷 | | | |
| ☐ 印数 | 1~5 000 册 | | | | |
| ☐ 书号 | ISBN 7-81053-719-9/TM·5 | | | | |
| ☐ 定价 | 23.00 元 | | | | |
-

(湖南大学版图书凡有印装差错, 请向承印厂调换)

目 次

第 1 章 电路的基本概念与基本定律

1.1 电路与电路模型	(1)
1.2 电压和电流的参考方向	(2)
1.2.1 电流和电压的参考方向	(2)
1.2.2 电路中的功率	(3)
1.3 基尔霍夫定律	(4)
1.3.1 基尔霍夫电流定律	(4)
1.3.2 基尔霍夫电压定律	(6)
1.4 无源元件	(7)
1.4.1 电阻元件	(8)
1.4.2 电容元件	(8)
1.4.3 电感元件	(9)
1.5 有源电路元件	(10)
1.5.1 电压源	(10)
1.5.2 电流源	(12)
1.5.3 电压源与电流源的等效互换	(12)
1.5.4 受控源	(14)
1.6 电气设备的额定值及电路的工作状态	(15)
1.6.1 电气设备的额定值	(15)
1.6.2 电路的工作状态	(16)
1.7 电路中电位的概念及计算	(18)
本章小结	(20)
自测题	(21)
习 题	(21)

第2章 电路的分析方法

2.1 电阻的串并联	(24)
2.1.1 电阻的串联	(24)
2.1.2 电阻的并联	(25)
2.2 支路电流法	(28)
2.3 节点电压法	(30)
2.4 叠加原理	(34)
2.5 戴维南定理与诺顿定理	(36)
2.5.1 戴维南定理	(37)
2.5.2 诺顿定理	(40)
2.6 受控电源电路的分析	(41)
本章小结	(43)
自测题	(44)
习题	(44)

第3章 正弦交流电路

3.1 正弦交流电的特征	(46)
3.1.1 正弦量的三要素	(46)
3.1.2 交流电的有效值	(48)
3.2 正弦量的相量表示法	(50)
3.2.1 复数	(50)
3.2.2 相量	(50)
3.3 电路元件的伏安关系的相量形式	(52)
3.3.1 电阻元件	(52)
3.3.2 电容元件	(54)
3.3.3 电感元件	(55)
3.4 基尔霍夫定律的相量形式	(57)
3.5 复阻抗及交流电路的计算	(59)
3.5.1 R、L、C的串联电路	(59)
3.5.2 R、L、C的并联电路	(63)
3.5.3 功率因素的提高	(68)
3.6 正弦交流电路中的谐振	(72)
3.6.1 串联谐振	(72)
3.6.2 并联谐振	(76)
本章小结	(78)
自测题	(80)

习 题	(80)
-----------	------

第 4 章 三相交流电路

4.1 对称三相正弦量	(85)
4.1.1 对称三相正弦量的特点	(85)
4.1.2 三相电源的联接方法	(86)
4.2 负载为星形联接的三相电路	(88)
4.2.1 三相四线制电路	(88)
4.2.2 负载对称电路	(89)
4.2.3 负载不对称电路及中线的作用	(91)
4.3 负载为三角形联接的三相电路	(92)
4.4 三相负载中的功率	(94)
4.4.1 对称负载三相功率的计算	(94)
4.4.2 不对称负载三相功率的计算	(94)
本章小结	(95)
自测题	(96)
习 题	(97)

第 5 章 电路的暂态分析

5.1 电路的暂态及换路定律	(99)
5.1.1 暂态电路的概念	(99)
5.1.2 换路定律及电路初始值计算	(99)
5.2 RC 电路的暂态过程 三要素法	(101)
5.2.1 RC 电路的充电过程	(101)
5.2.2 三要素法	(103)
5.2.3 RC 电路的放电过程	(105)
5.3 微分电路和积分电路	(106)
5.3.1 RC 微分电路	(107)
5.3.2 RC 积分电路	(107)
5.4 RL 电路的暂态过程	(108)
5.4.1 RL 电路的短接	(108)
5.4.2 RL 电路与直流电源接通	(110)
本章小结	(111)
自测题	(111)
习 题	(111)

第6章 磁路的基本知识

6.1 磁路的基本概念	(115)
6.1.1 磁路的基本物理量	(115)
6.1.2 磁路的组成	(116)
6.1.3 铁磁材料的磁性能	(117)
6.2 磁路欧姆定律	(118)
6.3 交流铁心线圈	(118)
6.3.1 电磁关系	(119)
6.3.2 铁心线圈的功率损耗	(120)
6.4 电磁铁	(121)
6.4.1 直流电磁铁	(122)
6.4.2 交流电磁铁	(122)
本章小结	(123)
检测题	(124)
习 题	(125)

第7章 变压器

7.1 变压器基本结构	(127)
7.1.1 铁芯	(127)
7.1.2 绕组	(128)
7.2 变压器的工作原理	(129)
7.2.1 变压器的空载运行	(129)
7.2.2 变压器的负载运行	(130)
7.2.3 变压器的阻抗变换作用	(132)
7.3 变压器的运行特性	(133)
7.3.1 变压器的外特性及电压调整率	(133)
7.3.2 变压器的损耗和效率	(133)
7.4 变压器的使用	(134)
7.4.1 变压器的额定值	(134)
7.4.2 变压器的选用常识	(135)
7.5 三相变压器与特殊变压器	(136)
7.5.1 三相变压器	(136)
7.5.2 自耦变压器	(136)
7.5.3 仪用互感器	(137)
本章小结	(139)
自测题	(140)

习 题.....	(140)
----------	-------

第 8 章 交流电动机

8.1 三相异步电动机的基本结构	(142)
8.2 三相异步电动机的工作原理	(143)
8.2.1 旋转磁场	(143)
8.2.2 工作原理	(145)
8.3 三相异步电动机的电磁转矩及机械特性	(146)
8.3.1 电磁转矩	(146)
8.3.2 机械特性	(146)
8.4 三相异步电动机的使用	(149)
8.4.1 铭牌和额定值	(149)
8.4.2 三相异步电动机的启动	(150)
* 8.4.3 三相异步电动机的调速	(154)
8.4.4 三相异步电动机的制动	(158)
8.4.5 三相异步电动机的选用	(159)
* 8.5 单相异步电动机	(161)
本章小结	(163)
自测题	(163)
习 题	(164)

* 第 9 章 直流电动机

9.1 直流电机的构造	(166)
9.2 直流电动机的工作原理	(167)
9.3 直流电动机的机械特性	(169)
9.4 直流电动机的使用	(171)
9.4.1 并励电动机的起动与反转	(171)
9.4.2 并励电动机的调速	(172)
本章小结	(174)
自测题	(175)
习 题	(175)

* 第 10 章 控制电机

10.1 伺服电动机	(177)
10.1.1 直流伺服电动机	(177)
10.1.2 交流伺服电动机	(178)
10.2 测速发电机	(180)

10.2.1 直流测速发电机	(181)
10.2.2 交流测速发电机	(181)
10.3 步进电动机	(183)
10.3.1 典型结构和工作原理	(183)
10.3.2 基本特点和应用	(186)
本章小结	(187)
自测题	(188)
习 题	(189)

第 11 章 电动机的继电接触器的控制

11.1 常用控制电器简介	(190)
11.1.1 交流接触器	(190)
11.1.2 继电器	(191)
11.1.3 自动开关	(193)
11.1.4 其他常用电器	(193)
11.2 三相异步电动机的单向起停控制线路	(196)
11.2.1 点动控制线路	(196)
11.2.2 单向起停控制线路和自锁	(197)
11.3 三相异步电动机的正反转控制线路	(198)
11.4 三相异步电动机的其他常用控制线路	(199)
11.4.1 行程控制	(200)
11.4.2 时间控制	(202)
11.4.3 顺序控制	(203)
11.4.4 多地点控制	(203)
11.5 阅读继电接触器控制线路的要点	(204)
11.5.1 读图要点	(204)
11.5.2 读图举例	(205)
本章小结	(206)
自测题	(207)
习 题	(208)

第 12 章 可编程序控制器(PLC)及其应用

12.1 可编程序控制器的结构及原理	(212)
12.1.1 可编程序控制器的硬件组成	(212)
12.1.2 可编程序控制器的工作原理	(215)
12.2 FX ₂ 系列可编程控制器及指令系统	(217)
12.2.1 FX ₂ 系列 PLC 简介	(217)

12.2.2 可编程控制器的指令系统·····	(219)
12.2.3 可编程控制器的编程原则和方法·····	(228)
12.3 可编程控制器应用举例·····	(229)
12.3.1 PLC 设计步骤 ·····	(229)
12.3.2 三相电动机 Y- Δ 起动、正反转控制 ·····	(231)
本章小结·····	(231)
自测题·····	(232)
习 题·····	(233)

第 13 章 工厂供配电与安全用电常识

13.1 工厂供配电概述·····	(235)
13.2 安全用电·····	(236)
13.2.1 电流对人体危害·····	(236)
13.2.2 触电方式·····	(237)
13.3 接地和接零·····	(237)
13.4 节约用电·····	(239)
本章小结·····	(240)
自测题·····	(240)
习 题·····	(240)

* 第 14 章 电工测量

14.1 电工仪表与测量的基本知识·····	(241)
14.1.1 电工仪表测量的基本理论·····	(241)
14.2 电工仪表的分类和符号·····	(245)
14.2.1 仪表的分类·····	(245)
14.2.2 常用电工仪表的符号及其意义·····	(246)
14.2.3 磁电式仪表·····	(247)
14.2.4 电磁式仪表·····	(248)
14.2.5 电动式仪表·····	(249)
14.3 电压、电流及功率的测量 ·····	(250)
14.3.1 电压的测量·····	(250)
14.3.2 电流的测量·····	(250)
14.3.3 功率的测量·····	(251)
14.4 兆欧表·····	(253)
14.5 电阻及阻抗的测量·····	(254)
14.5.1 电阻测量·····	(254)
14.5.2 阻抗测量·····	(256)

14.6 万用表.....	(257)
本章小结.....	(259)
自测题.....	(260)
习 题.....	(261)
参考答案(部分)	(262)
参考文献	(267)
后 记	(268)

第 1 章 电路的基本概念与基本定律

1.1 电路与电路模型

为了某种需要由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。

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

然而电路理论中所研究的电路和电路元件(简称元件),不是指上述实际电路和实际电路的部件,而是一些理想化了的电路和电路元件,即在一定条件下能足够准确地反映实际电路及其部件的主要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。电路和网络这两个术语通常是相互通用的。

实际电路多种多样。有的可以延伸到数百公里以外,有的可以局限在几个平方毫米以内。就其目的而言,或者是为了实现电能的传输和分配,或者是为了传输或处理各种电信号例如语言信号、图像信号和控制信号等,不论哪种实际电路,随着电流的通过,电路中的部件进行着电能与其他形式能量的相互转换。

一般来说,载有电流的导体总会由于发热而损耗电能。电路中还可能由其他原因所造成的能量损耗。电阻就是用以反映能量损耗的电路参数。

电路中有电压就有电场;有电流就有磁场。当电路工作时,在电路中和电路周围到处都存在电场和磁场。电场和磁场都具有能量,电容和电感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具有连续分布性,就是说,在电路的任何部分,都既有电阻,又有电容,又有电感,但是在电路中的电压与电流的频率不太高的条件下,确切地说,当电路的部件及电路的各项尺寸远小于电路周围电磁波的波长时,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个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构成的电路称为集中参数电路。

为了便于对实际电路进行分析和用数学描述,将实际元件理想化(或模型化),即在一一定的条件下突出其主要的电磁性质,而忽略其次要因素,把它近似地看作理想化电路元件。由一些理想电路元件组成的电路,就是实际的电路模型,它是对实际电路电磁性质的科学抽象和概括。在理想电路元件(以后“理想”两字常略去)中主要有电阻元件、电感元

件、电容元件等。这些元件分别由相应的参数来表征。例如常用的手电筒,其实际电路元件有干电池、电珠、开关和筒体,其电路模型如图 1.1.1 所示。电珠是电阻元件,其参数为电阻 R ;干电池是电源元件,其参数为电动势 E 和内电阻(简称内阻) R_0 ;筒体是连接干电池与电珠的中间环节(包括开关),其电阻可以忽略不计,被认为是一无电阻的理想导体。

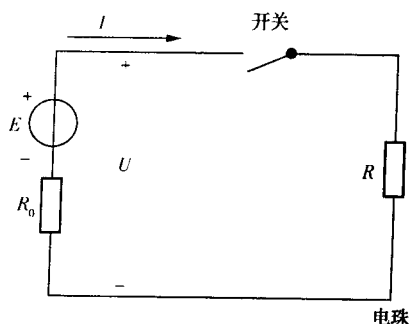


图 1.1.1 手电筒的电路模型

1.2 电压和电流的参考方向

电路中的基本物理量是电流、电压和电动势,这些基本概念在物理课中已学过,本节不再重复,只着重介绍电流和电压的参考方向。

1.2.1 电流和电压的参考方向

图 1.1.1 是最简单的直流电阻电路,其中 E 、 U 和 R 分别为电源的电动势、端电压和内阻, R 为负载电阻。当开关闭合后,电路中的电流 I 、电压 U 和电动势 E 是电路的基本物理量,在分析电路时必须用箭标或“+”、“-”来标出它们的方向或极性(如图中所示),才能正确列出电路方程。

关于电压和电流的方向,有实际方向和参考方向之分,要加以区别。

我们习惯规定正电荷运动的方向或负电荷运动的相反方向为电流的方向(实际方向)。电流的方向是客观存在的。但在分析较为复杂的直流电路时,往往难于事先判断某支路中电流的实际方向;对交流电路来说,其方向随时间而变,在电路图上也无法用一个箭标来表示它的实际方向。为此,在分析与计算电路时,常可任意选定某一方向作为电流的参考方向,或称为正方向。所选的电流的参考方向并不一定与电流的实际方向一致。当电流的实际方向与其参考方向相同时,则电流为正值[图 1.2.1(a)];反之,当电流的实际方向与其参考方向相反时,则电流为负值[图 1.2.1(b)]。因此,在参考方向选定之后,电流之值才有正负之分。

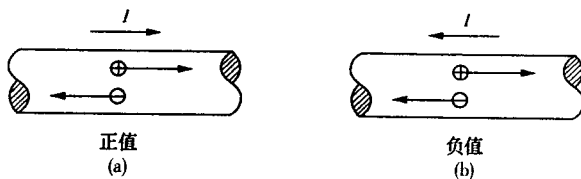


图 1.2.1 电流的参考方向

电压和电动势都是标量,但在分析电路时,和电流一样,我们也说它们具有方向。电压的方向规定为由高电位(“+”极性)端指向低电位(“-”极性)端,即为电位降低的方向。电源电动势的方向规定为在电源内部由低电位(“-”极性)端指向高电位(“+”极性)端,

即为电位升高的方向。

在电路图上所标的电流、电压和电动势的方向,一般都是参考方向,它们是正值还是负值,视选定的参考方向而定。例如在图 1.2.2 中,电压 U 的参考方向与实际方向一致,故为正值;而 U' 的参考方向与实际方向相反,故为负值。两者可写成

$$U = -U'; \text{ 电流亦然, } I = -I'$$

电压的参考方向除用极性“+”、“-”表示外,也可用双下标表示。例如 a, b 两点间的电压 U_{ab} , 它的参考方向是由 a 指向 b, 也就是说 a 点的参考极性为“+”, b 点的参考极性为“-”。如果参考方向选为由 b 指向 a, 则为 U_{ba} , $U_{ab} = -U_{ba}$ 。电流的参考方向也可用双下标表示。

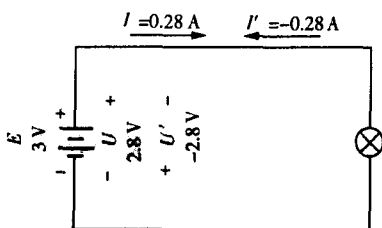


图 1.2.2 电压和电流的参考方向

我国法定计量单位是以国际单位(SI)为基础的。

在国际单位制中,电流的单位是安[培](A)。当 1s(秒)内通过导体横截面的电荷[量]为 1C(库[仑])时,则电流为 1A。计量微小的电流时,以毫安(mA)或微安(μ A)为单位。1mA 是千分之一安,1 微安是百万分之一安。

在国际单位制中,电压的单位是伏[特](V)。当电场力把 1C 的电荷[量]从一点移到另一点所做的功为 1J(焦[耳])时,则该两点间的电压为 1V。计量微小的电压时,则以毫伏(mV)或微伏(μ V)为单位;计量高电压时,则以千伏(kV)为单位。电动势的单位也是伏[特](V)。

1.2.2 电路中的功率

根据物理学中功率的定义,电路中某一元件或某一部分电路的功率为

$$p = ui \quad (1.2.1)$$

式中 u 是此元件或这一部分电路的端电压, i 是流经此元件或电路的电流。

当电压 u 和电流 i 随时间 t 变化时,功率也随时间变化。在工程中则更关心平均功率,如果电压 u 和电流 i 是时间 t 的周期函数,则平均功率

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T ui dt \quad (1.2.2)$$

式中 T 是电压、电流的变化周期。

在直流情况下,电压和电流都是常数,则

$$P = UI \quad (1.2.3)$$

还有一个问题需要说明的是,这个功率是表示吸收功率还是发出功率呢? 对图 1.2.2 所示电路中的电源来说,很明显它发出功率 P , 电压和电流的方向相反。但对电阻来说, P 是吸收功率, 电阻的电压和电流方向相反。所以 P 对我们所考虑的电路来说,究竟表示的是吸收功率还是发出功率,关键

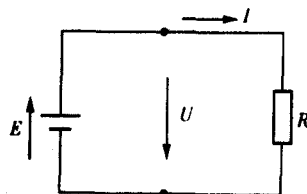


图 1.2.3 电路中的功率

是看电压和电流的正方向。如果电压和电流的正方向为关联方向,则 $P = UI$ 表示吸收功率(如图 1.2.3 中电阻 R 的情况)。这时

$P > 0$	吸收功率
$P < 0$	发出功率

如果电压和电流的正方向为非关联方向, 则 $P = UI$ 表示发出功率(如图 1.2.2 中的电源的情况), 即

$P > 0$	发出功率
$P < 0$	吸收功率

1.3 基尔霍夫定律

电路是相互联接着的元件的集合, 电路中所有元件的电流和电压应遵循由元件的相互联接所规定的约束关系(亦可称之为拓扑约束)。基尔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。基尔霍夫定律有两条, 即基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。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: 在集中参数电路中, 电路中的每一个分支成为支路, 同一条支路中各元件流过的电流相同。根据这个定义, 图 1.3.1 所示电路具有 7 条支路。

(2) 节点: 在集中参数电路中, 每条支路的端点叫做节点。2 条或 2 条以上的支路接于一点时, 此联接点只算作 1 个节点。通常把仅仅关联 2 条支路的节点叫做简单节点。图 1.3.1 所示电路具有 5 个节点, 其中节点④就是简单节点。

(3) 回路: 在集中参数电路中, 由 1 条或多条支路组成的闭合路径叫做回路。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。

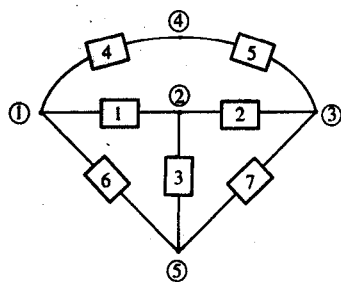


图 1.3.1 电路的支路、节点和回路

1.3.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(KCL)是用来确定联接在同一节点上各支路电流的约束关系的, 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, 根据基尔霍夫电流定律, 节点①、②、③可列出方程如下:

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

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

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

经适当的移项处理后写成:

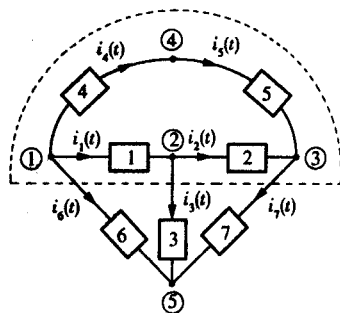


图 1.3.2 基尔霍夫电流定律示例

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

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

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

由此可见,基尔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

$$\sum i(t) = 0 \quad (1.3.1)$$

此式称为基尔霍夫电流方程,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的基尔霍夫电流方程为

$$i_4(t) = i_5(t) \quad (1.3.2)$$

因此,为了减少电路的基尔霍夫电流方程数,可以不考虑简单节点,而将关联简单节点的相互串联的元件作为一条支路看待。

图 1.3.2 中节点⑤的基尔霍夫电流方程为

$$i_3(t) + i_6(t) + i_7(t) = 0 \quad (1.3.3)$$

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基尔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,基尔霍夫电流定律可以适用于类似的任何一个闭合面。这种由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。

基尔霍夫电流定律,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,注入任一节点(广义节点或普通节点)的电荷[量]与流出该节点的电荷[量]必然相等。换言之,基尔霍夫电流定律表明了在任何节点上电荷的守恒性。

一般规定:把流入节点的电流看作是负的,把流出节点的电流看作正的。

尚须指出,基尔霍夫电流定律与元件的性质无关,节点电流方程的具体情况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。

例 1.3.1 在图 1.3.3 中, $I_1 = 2 \text{ A}$, $I_2 = -3 \text{ A}$, $I_3 = -2 \text{ A}$, 试求 I_4 。

解 由基尔霍夫电流定律可列出

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 + I_3 - I_4 &= 0 \\ 2 - (-3) + (-2) - I_4 &= 0 \end{aligned}$$

得

$$I_4 = 3 \text{ A}$$

由本例可见,式中有两套正负号, I 前的正负号是由基尔霍夫电流定律根据电流的参考方向确定的,括号内数字前的则是表示电流本身数值的正负。