

电路原理·上册

周守昌 主编

高等教育出版社

内容提要

《电路原理》(第2版)是2003年公布的“高等教育百门精品课程教材建设计划”中的精品项目,是1999年出版的面向21世纪课程教材的修订版,是重庆大学电路课程多年教学经验的结晶。

上册的具体内容为:基尔霍夫定律和电阻元件、电阻电路的分析、动态元件和动态电路导论、一阶电路和二阶电路、正弦电流电路导论、正弦电流电路的分析、三相电路、非正弦周期电流电路的分析、拉普拉斯变换、电路的复频域分析,还有一个附录(非线性电阻电路)。为配合本书的使用,同步推出本书的配套教学指导书——《电路原理(第2版)教学指导书》。

本书可供普通高等学校电气信息、电子信息专业作为电路课程的教材使用,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路原理.上册/周守昌主编.—2版.—北京:高等教育出版社,2004.7

ISBN 7 - 04 - 014531 - 6

.电... .周... .电路理论-高等学校-教材 .TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第049076号

策划编辑 刘激扬 责任编辑 刘素馨 封面设计 刘晓翔 责任绘图 朱静
版式设计 胡志萍 责任校对 杨雪莲 责任印制

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010 - 82028899

购书热线 010 - 64054588
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷

开 本 787×960 1/16
印 张 24.75
字 数 460 000
定 价 28.40元

版 次 1999年9月第1版
年 月第2版
印 次 年 月第 次印刷

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

第2版序言

本书第1版自1999年9月出版以来，上、下册分别印刷了4次和3次，上册总印数为27 000余册，下册总印数为18 000余册。经过四个学年教学实践的检验，深感本书还存在一些不足之处。为了进一步提高教材质量，我们决定在保持原有特色的前提下，对本书就下述诸方面予以修订。

(1) 改进教材内容的讲述。例如对运算放大器模型的讲述，由原书先讲理想模型后讲有限增益模型，改变成先讲有限增益模型后讲理想模型。有限增益模型的转移特性是实际运算放大器转移特性的分段线性近似，而理想模型的转移特性则是实际运算放大器转移特性的理想分段线性近似，是有限增益模型转移特性的线性区域趋近于输出电压坐标轴的极限情况。把理想模型和有限增益模型的讲述次序颠倒过来，符合由接近实际的模型到理想极限情况渐进的过渡原则，便于读者接受理想模型。此外，改写了三相电源相序仪的讲述，改写了状态方程的复频域解法中的两道例题。对其余的改动面不大之处不再一一列举。

(2) 在不过分增大篇幅的前提下，根据需要适当补充教材内容。例如在支路分析法一节末，以脚注的形式补充了2b法。为了体现本书主要适用于电气信息类专业的编写宗旨，增强三相电路的教材内容，把三相电路作为专章，补充了例题和习题；又在非正弦周期电流电路一章末补充了对称三相电路中的高次谐波一节，并选配了相关的习题。在非正弦周期电流和电压的有效值及电路的平均功率一节末，顺便补充了非正弦周期电流电路的功率因数的概念并举例计算。在拉普拉斯变换的基本性质一节中补充了初值定理与终值定理，并选配了相关的习题。在原对偶网络一节末，补充了对偶原理并改变该节的标题。

(3) 删节一些可有可无的内容或文字叙述。例如在状态方程的复频域解法一节中，删去了有关转移函数矩阵的内容；删去了上册附录中的分段线性处理法和一阶分段线性电路两节以及下册附录全部内容。此外，还删去了分散在有关章节中的对偶性讲述。

(4) 订正原书第二次印刷以后版面上的错误约计有100余处。对个别字句的修改则未予统计。

本书虽经修订，但疏漏、欠缺乃至错误之处仍在所难免，欢迎同行专家和广大读者批评指正。

本书上册修订初稿第一、二、八章由周守昌提供，第三、四、五、六、七

章由谢品芳提供，第九、十章由李盛才提供，附录由彭扬烈提供。本书下册修订初稿第一、二、四章由彭扬烈提供，第三章由谢品芳提供，第五、六章由周守昌提供。此外，周守昌负责提出修订方案、统稿、修改定稿和全书索引的编写工作，谢品芳负责书稿打印等工作。

本书送审稿承蒙清华大学江缉光教授仔细审阅，提出了许多中肯的宝贵意见。本书的立项和出版得到了重庆大学和该校电气工程学院以及电工理论与新技术系的大力支持和资助。在此一并表示衷心的感谢。

周守昌

2003年9月

第 1 版序言

本书于 1997 年经原国家教委批准为国家教委“九五”重点教材（现更名为教育部“九五”重点教材），1998 年又经教育部批准为面向 21 世纪课程教材。

本书的编写大纲是根据我们在“九五”重点教材立项申请书中提出的立项目标来制订的。其基本指导思想是：本着当前高等学校教育改革中注重素质培养和能力培养的精神，加强基础，拓宽专业的原则，21 世纪对电气信息类专业人才的要求，处理好教材内容的体系、深度和广度，既要重视教材内容的先进性，又要特别注意教学适用性。

本书的前身是江泽佳主编，周守昌、吴宁、彭扬烈修订的《电路原理》（第三版）。本着“承前启后，继往开来”，肯定 20 年来我们所积累的好的教学经验和教材编写经验，并予以发扬光大的精神，凡经教学实践证明是成功的、切实可行的教学内容，不轻易改动。但全部教材必须重新组织，调整体系，进行增删、更新，提高科学水平，以适应本书的编写思路，满足本书的要求。

在上述思想指导下所形成的本书的主要特色可概述如下：

本书的内容尽量按模块式结构原则进行编排，以便教师根据各校各专业的要求取舍内容，组织教学。首先，我们把全书分为两册出版，即《电路原理》上册和下册，但两册内容划分原则与过去不同，二者相对独立而又有密切联系，相互呼应。《电路原理》上册为必修教材，其内容能够满足原国家教委 1995 年颁布的电路课程教学基本要求。作为必修教材，特别注重教学适用性，同时也纳入了少量反映近代电路理论的内容，并在传统内容中贯穿了近代电路理论的观点。但因受篇幅的限制，为避免不必要的重复，对反映近代电路理论的主要内容，原则上纳入作为选修教材的《电路原理》下册，作较系统、完整和深入的介绍。《电路原理》下册的内容在深广度上既保持了教材的先进性，又注意到处理好先进性与教学适用性这一对矛盾之间的关系，使之在总体上能为广大读者所接受。

在《电路原理》上册中，作为附录的非线性电路包含着一些小的模块，可供教师选用，安排在适当的章节讲授。这样，在教材编排上不影响主要内容——线性电路理论较强的系统性。《电路原理》下册中的状态方程、二端口网络、均匀传输线的正弦稳态响应、无损耗均匀传输线的波过程，以及作为附录的状态空间和状态轨迹等也是一些小的模块，可作适当取舍。

此外，为了进一步增进教学适用性，本书在编写过程中，既保持了充实的内容，又注意到了删繁就简。同时，把精品意识贯穿到逐章逐节的编写中去，力争使全部教材不仅具有合理的科学体系，而且具有重点突出，深入浅出，便于自学等特点。

纵然如此，本书因受编者科学水平和教学水平的限制，谅也必有所失，恳请同行专家和广大读者批评指正。

《电路原理》上册初稿第一、二章由周守昌执笔，第三、四章由谢品芳执笔，第五、六章由周维维执笔，第七章由贺兴柏执笔，第八、九章由李盛才执笔，附录由彭扬烈执笔。《电路原理》下册初稿第一、二、四章和附录由彭扬烈执笔，第三章由谢品芳执笔，第五、六章由贺兴柏执笔。此外，周守昌负责起草全书编写大纲、统稿、修改定稿和全书索引的编写工作，谢品芳负责绘图和书稿打印的组织工作。

本书送审稿承蒙清华大学江缉光教授、陆文娟教授仔细审阅，提出了许多宝贵意见。本书的立项和出版得到了教育部、高等教育出版社、重庆大学和该校电气工程学院以及原电工原理教研室的大力支持和资助。谨在此一并表示衷心的感谢。

本书编者深知，如果没有江泽佳主编的《电路原理》第一版至第三版，就不可能有本书的问世。因此，我们要对这三个版本教材的所有编者，特别是主编江泽佳教授，表示深切的感谢。

最后，我们还要感谢为打印书稿和绘图付出了辛勤劳动的同志们以及所有支持本书出版工作的其他同志。

周守昌
1998年11月

目 录

第一章 基尔霍夫定律和电阻元件	1
§ 1 - 1 电路和电路模型	1
§ 1 - 2 电流和电压的参考方向	3
§ 1 - 3 基尔霍夫定律	4
§ 1 - 4 电阻元件	9
§ 1 - 5 独立源	10
§ 1 - 6 受控源	13
§ 1 - 7 运算放大器	16
§ 1 - 8 支路分析法	21
习题	27
第二章 电阻电路的分析.....	35
§ 2 - 1 线性电路的性质·叠加定理.....	35
§ 2 - 2 替代定理	39
§ 2 - 3 戴维宁定理	41
§ 2 - 4 诺顿定理	45
§ 2 - 5 有伴电源的等效变换	50
§ 2 - 6 星形电阻网络与三角形电阻网络的等效变换	54
§ 2 - 7 特勒根定理	58
§ 2 - 8 互易定理	61
§ 2 - 9 节点分析法	64
§ 2 - 10 回路分析法.....	72
§ 2 - 11 电源的转移.....	77
习题	80
第三章 动态元件和动态电路导论	89
§ 3 - 1 电容元件	89
§ 3 - 2 电感元件	93
§ 3 - 3 耦合电感元件	97
§ 3 - 4 单位阶跃函数和单位冲激函数.....	100
§ 3 - 5 动态电路的输入 - 输出方程.....	106
§ 3 - 6 初始状态和初始条件.....	109

§ 3 - 7 零输入响应.....	115
§ 3 - 8 零状态响应.....	117
§ 3 - 9 全响应.....	121
习题	122
第四章 一阶电路和二阶电路	128
§ 4 - 1 一阶电路的零输入响应.....	128
§ 4 - 2 一阶电路的阶跃响应.....	135
§ 4 - 3 一阶电路的冲激响应.....	142
§ 4 - 4 一阶电路对阶跃激励的全响应.....	148
§ 4 - 5 二阶电路的冲激响应.....	156
§ 4 - 6 卷积积分及零状态响应的卷积算法.....	165
习题	173
第五章 正弦电流电路导论	183
§ 5 - 1 正弦电压和电流的基本概念.....	183
§ 5 - 2 线性电路对正弦激励的响应·正弦稳态响应	187
§ 5 - 3 正弦量的相量表示法.....	189
§ 5 - 4 基尔霍夫定律的相量形式.....	195
§ 5 - 5 电路元件方程的相量形式.....	196
§ 5 - 6 阻抗和导纳.....	205
§ 5 - 7 阻抗的串联和并联.....	208
习题	216
第六章 正弦电流电路的分析	220
§ 6 - 1 正弦电流电路的相量分析.....	220
§ 6 - 2 正弦电流电路中的功率.....	226
§ 6 - 3 谐振电路.....	238
§ 6 - 4 含有耦合电感元件的正弦电流电路.....	247
§ 6 - 5 理想变量器.....	254
习题	256
第七章 三相电路.....	262
§ 7 - 1 对称三相电压.....	262
§ 7 - 2 三相制的联接法.....	263
§ 7 - 3 对称三相电路的计算.....	267
§ 7 - 4 不对称三相电路的计算.....	271
§ 7 - 5 三相电路中的功率.....	275
习题	279

第八章 非正弦周期电流电路的分析	282
§ 8 - 1 周期函数的傅里叶级数展开式	282
§ 8 - 2 线性电路对周期性激励的稳态响应	287
§ 8 - 3 非正弦周期电流和电压的有效值·平均功率	292
* § 8 - 4 傅里叶级数的指数形式	296
* § 8 - 5 周期信号的频谱简介	298
* § 8 - 6 对称三相电路中的高次谐波	300
习题	305
第九章 拉普拉斯变换	309
§ 9 - 1 拉普拉斯变换	309
§ 9 - 2 拉普拉斯变换的基本性质	311
§ 9 - 3 进行拉普拉斯逆变换的部分分式展开法	319
§ 9 - 4 线性动态电路方程的拉普拉斯变换解法	324
习题	326
第十章 电路的复频域分析	329
§ 10 - 1 基尔霍夫定律的复频域形式	329
§ 10 - 2 电路元件的复频域模型·复频域阻抗和复频域导纳	330
§ 10 - 3 用复频域模型分析线性动态电路	336
§ 10 - 4 网络函数	343
习题	350
附录 非线性电阻电路	356
§ 1 非线性电阻元件及其约束关系	356
§ 2 非线性电阻元件的串联和并联	358
§ 3 非线性电阻电路的图解分析法	360
§ 4 小信号分析法	364
习题	368
部分习题答案	369
主要参考书目	377
索引	378

第一章 基尔霍夫定律和电阻元件

本章的中心内容是阐明基尔霍夫定律和电阻元件的特性。前者是由电路元件的相互联接所规定的约束关系;后者则是电阻元件自身的约束关系。此外,本章还着重介绍了作为电路理论基本概念的模型概念和参考方向。

§ 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,称为电路(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)。

然而电路理论中所研究的电路和电路元件(circuit element)(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电磁性能的抽象模型(model)。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[以下简称信号(signal)],例如语言信号、图像信号和控制信号等。不论哪一种实际电路,随着电流的通过,电路中总是进行着电能与其他形式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。电路中还可能由其他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)。

电路中有电压(voltage)就有电场(electric field);有电流(current)就有磁场(magnetic field)。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(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、磁场储能具有连续分布的特性,故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。但是在电路中的电压与电流的频率(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(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。当其发热损耗很低时,就可以把电容器抽象成为一个理想的电容元件。当需要考虑发热损耗时,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 1-1-1(a)表示在低频条件下,一个电感线圈与电容器串联的集中参数电路模型;图 1-1-1(b)表示在低频条件下,一个电感线圈与电容器并联的集中参数电路模型。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(b)也可用以表示一个电感线圈在高频条件下的集中参数电路模型,这时 C 是代替分布电容的等效集中电容。

电磁波即在空间传播的交变电磁场(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。

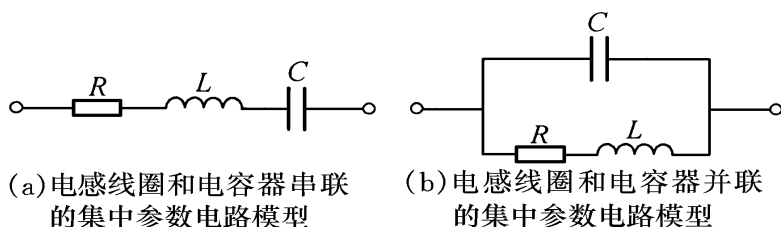


图 1 - 1 - 1 集中参数电路

本册中将只涉及集中参数电路。分布参数电路将在作为选修教材的《电路原理》(下册)中介绍。

§ 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,只着重介绍电流和电压的参考方向(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。要确定电流(或电压)函数值的正负,必须预先规定参考方向。电流(或电压)的参考方向可以随意规定。但是一经规定,在计算过程中便不得任意改变。电流(或电压)的方向与参考方向一致时,其函数值为正,反之为负。

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。

电压 $u(t)$ 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。

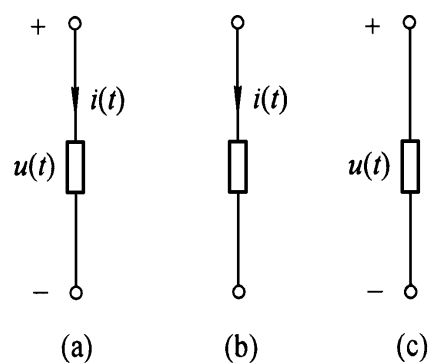


图 1 - 2 - 1 任意二端元件的电流和电压一致的参考方向

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,而称为一致的参考方向(associated reference directions)。图 1 - 2 - 1(a)所示电流与电压的参考方向就是一致的参考方向。选定一致的参考方向后,元件的端电压即为顺电流方向电位降,从而在任一瞬时 t , 电压 $u(t)$ 与电流 $i(t)$ 的乘积等于该

有些书上称为关联参考方向。

元件在该瞬时吸收的功率[常称为瞬时功率(*instantaneous power*)] $p(t)$,即

$$p(t) = u(t) i(t)$$

采用一致的参考方向时,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 1-2-1(b)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 1-2-1(c)所示。本书在未作特殊声明时均采用一致的参考方向。

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

§ 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*)]。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(branch):在集中参数电路中,每一个二端元件构成一条支路。根据这个定义,图 1-3-1 所示电路具有七条支路。

(2) 节点(node):在集中参数电路中,每条支路的端点称为节点。两条或两条以上的支路接于一点时,此联接点只算作一个节点。通常把仅仅关联两条支路的节点称为简单节点(*simple node*)。图 1-3-1 所示电路具有五个节点,其中节点 ⑤ 就是简单节点。

(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条支路(而且只与两条支路)相联接的闭合路径称为回路。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。

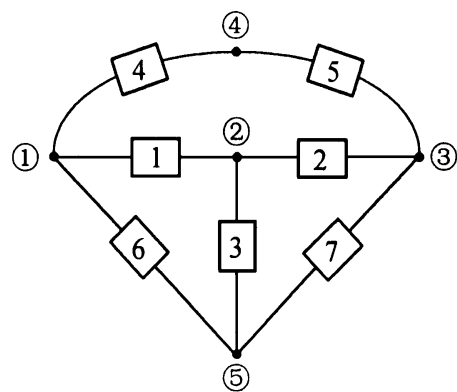


图 1-3-1 电路的支路、节点和回路

1-3-1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's current law, 缩写为 KCL)反映了集中参数

电路中汇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,根据基尔霍夫电流定律,可对节点 、 、 分别列出方程如下

节点 $i_1(t) + i_4(t) + i_6(t) = 0$

节点 $i_2(t) + i_3(t) = i_1(t)$

节点 $i_7(t) = i_2(t) + i_5(t)$

经适当的移项处理后写成

节点 $i_1(t) + i_4(t) + i_6(t) = 0$

节点 $- i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = 0$

节点 $- i_2(t) - i_5(t) + i_7(t) = 0$

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

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

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 的基尔霍夫电流方程为

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

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,而将关联着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 的基尔霍夫电流方程为

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

这表明任一瞬时流入节点 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 、 、 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,可以称为电路的广义节点(supernode)。

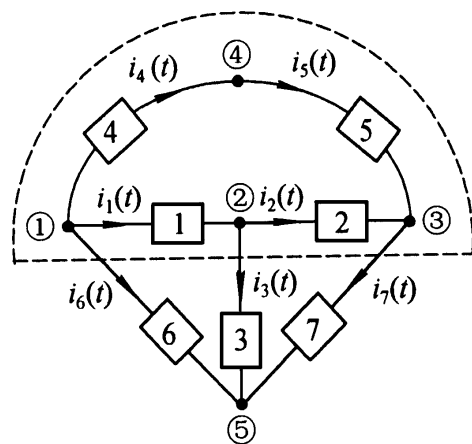


图 1 - 3 - 2 基尔霍夫电流定律示例

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,在任何一个趋近于零的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。

尚需指出,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 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's voltage law, 缩写为 KVL)反映了任何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(即回路循行方向,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。

回路 1

$$\begin{aligned} & u_1(t) + u_3(t) - u_6(t) \\ &= [v_1(t) - v_2(t)] + [v_2(t) - v_5(t)] \\ &\quad - [v_1(t) - v_5(t)] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (1 - 3 - 2)$$

式中, $v_1(t)$ 、 $v_2(t)$ 、 $v_5(t)$ 分别代表节点 ①、②、⑤ 的电位瞬时值。

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,其结果均等于零。即

$$\text{回路 2} \quad u_2(t) + u_7(t) - u_3(t) = 0$$

$$\text{回路 3} \quad u_4(t) + u_5(t) - u_2(t) - u_1(t) = 0$$

基尔霍夫电压定律指出,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

$$u(t) = 0 \quad (1 - 3 - 3)$$

此式称为基尔霍夫电压方程,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,基尔霍夫电压定律的成立,是由于集中参数电路

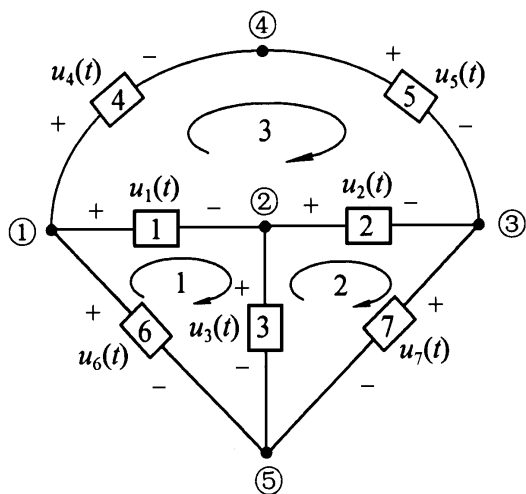


图 1 - 3 - 3 基尔霍夫电压定律示例

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,基尔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,电位有升就必有降,升多少就降多少,回到原来的出发点时,该点的电位不会发生变化。因此,基尔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,基尔霍夫电压定律同基尔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。

尚需指出,基于瞬时电压(或电位)单值性的基尔霍夫电压定律,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 当电路中各支路电压为已知时,根据基尔霍夫电压定律,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 ④ 的电压和各节点的电位。

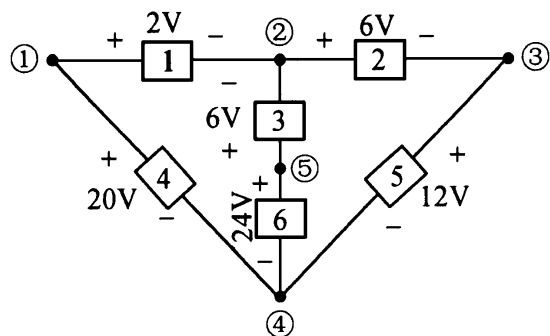


图 1 - 3 - 4 电位的计算

解: 将基尔霍夫电压定律应用于假想回路 可得

$$u_{12} + u_{23} + u_{34} = 0V$$

或
$$u_{12} + u_{25} - u_{54} = 0V$$

从而求出由节点 ① 到节点 ④ 的电压

$$u_{14} = u_{12} + u_{23} = u_{12} - u_{34} = (2 - 6)V = -4V$$

同一电压也可由另一路径求得

$$u_{14} = u_{15} + u_{54} = u_{15} - u_{45} = (20 - 24)V = -4V$$

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)。

(1) 如以节点 ④ 作为电位参考点,即令节点 ④ 的电位

$$v_{44} = 0V$$

则节点 ① 的电位

$$v_{14} = u_{14} = 20V$$

节点 ② 的电位

$$v_{24} = u_{24} = u_{23} + u_{34} = (-6 + 24)V = 18V$$

或
$$v_{24} = u_{25} + u_{54} = (-2 + 20)V = 18V$$

或 $v = u = u + u = (6 + 12) \text{ V} = 18 \text{ V}$

节点 的电位

$$v = u = 24 \text{ V}$$

节点 的电位

$$v = u = 12 \text{ V}$$

(2) 又如以节点 作为电位参考点, 即令节点 的电位

$$v = 0 \text{ V}$$

则节点 的电位

$$v = u = -2 \text{ V}$$

节点 的电位

$$v = u = u + u = (6 - 2) \text{ V} = 4 \text{ V}$$

或 $v = u = u + u = (24 - 20) \text{ V} = 4 \text{ V}$

节点 的电位

$$v = u = -20 \text{ V}$$

节点 的电位

$$v = u = u + u = (-6 - 2) \text{ V} = -8 \text{ V}$$

或 $v = u = u + u = (12 - 20) \text{ V} = -8 \text{ V}$

由此可见, 各点电位将随所选择的电位参考点的不同而改变同一个数值, 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 设题 1-3-1 图中的各电压、电流分别按以下四种情况给定, 试问能否满足 KCL 和 KVL?

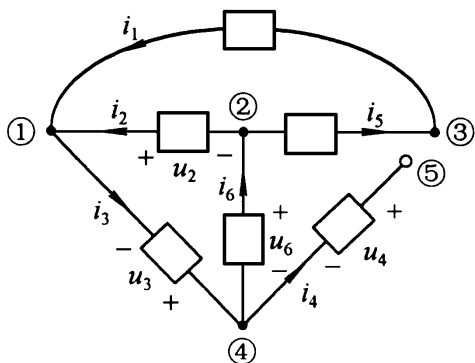
(a) $i_1 = 2 \text{ A}$, $i_2 = 5 \text{ A}$, $i_3 = -7 \text{ A}$, $i_4 = 10 \text{ A}$, $i_5 = -2 \text{ A}$ 。

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

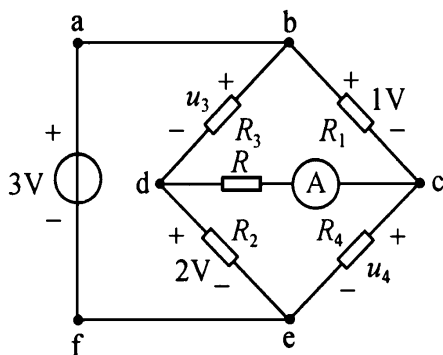
(c) $u_2 = 5 \text{ V}$, $u_3 = 7 \text{ V}$, $u_4 = 2 \text{ V}$, $u_6 = 2 \text{ V}$ 。

(d) $u_2 = 5\cos 3t \text{ V}$, $u_3 = -7\cos 3t \text{ V}$, $u_6 = 2\cos 3t + \frac{1}{3} \text{ V}$ 。

1-3-2 题 1-3-2 图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 1V 和 2V , 问电阻 R 中是否有电流? 并求电阻 R_3 和 R_4 上的电压 u_3 和 u_4 。



题 1-3-1 图



题 1-3-2 图