

电路分析基础与模拟电子技术

李海芳 杜欣慧 丁芳 郭军 编著

中国建材工业出版社

27
23

电路分析基础与模拟电子技术

李海芳 杜欣慧 丁芳 郭军 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析基础与模拟电子技术/李海芳等编著. -北京: 中国建材工业出版社, 1999. 8

ISBN 7-80090-564-0

I. 公… II. 周… III. ①电路分析②模拟-电子技术 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 34511 号

内 容 简 介

本书分两篇共十章。第一篇为电路分析基础共四章, 内容包括: 电路的基本概念及基本定律、电路的基本分析方法、单相交流电路、三相交流电路、一阶和二阶动态电路、耦合电感和理想变压器。第二篇为模拟电子技术共六章, 内容包括: 半导体二极管、三极管和场效应管、基本放大电路、集成运算放大电路、负反馈放大电路和正弦振荡电路、集成功率放大电路、直流稳压电源。

每章之后均附有习题, 以便学生复习、总结提高和自我检查。

本书对电专业的本科、专科学生及有关的工程技术人员均有参考价值。

电路分析基础与模拟电子技术

李海芳 杜欣慧 丁芳 郭军 编著

*

中国建材工业出版社出版

(北京海淀区三里河路 11 号 邮编: 100831)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京密云红光印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 21.25 字数: 551 千字

1999 年 8 月第一版 1999 年 8 月第一次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 28.60 元

ISBN 7-80090-564-0/TP·22

《电路分析基础与模拟电子技术》编著说明

电路分析基础与模拟电子技术是计算机专业的一门专业基础课，也是计算机专业后续课程必备的一门先行基础课，它为计算机专业的学生学习计算机系统结构奠定了电路与模拟电子的基本知识，同时为学生进一步学习打下了扎实的基本功。长期以来电路与模拟一直作为两门课分别讲授，占用学时很多，随着计算机技术的飞速发展，越来越多的新知识需学生去学习，掌握这些新知识使得四年的学习显得相当紧张，为了适应新的需求，使学生既有扎实的基础，又能学到新的知识，在太原理工大学计算机系领导的支持下，我们着手编写了这本教材。在编写过程中，我们参阅了大量的相关资料，并结合多年的教学经验，针对计算机专业的特点，将电路与模拟电子合二为一，除考虑到各部分内容的份量恰当外，删简了一些较繁琐的公式推导或过分强调技巧的内容，而力图突出基本概念和基本原理，并采用比较有效和精炼的方式将问题交待清楚，这样便于培养学生在教师指导下的自学能力。编者经过近三年的努力和通力合作，终于实现了预期的目的，完成了本教材的编写工作。本教材可作为计算机专业本科生、专科生的试用教材及大中专生的自学参考书。

太原理工大学信息工程学院

1999.7

前 言

21 世纪的钟声即将敲响，计算机的应用也已渗透到各行各业，它给人类社会和国民经济带来了革命性的变化，计算机专业人才的培养成了大学教育的首要任务。计算机由硬件和软件组成，电路与模拟是计算机硬件的主要基础之一，因此，电路分析基础与模拟电子技术是计算机专业必备的一门专业基础课，长期以来，电路与模拟一直作为两门课分别讲授，占用学时很多，为了适应新的要求，使学生既有扎实的基础又可学到新的知识，根据“计算机学科教学计划”，在太原理工大学计算机系领导的支持下，我们着手编写了这本教材。在编写过程中，我们查阅了大量资料，并结合多年的教学经验，针对计算机专业的特点，将电路与模拟合二为一，除考虑到各部分内容的份量恰当外，删简了一些较繁琐的公式推导或过分强调技巧的内容，力图突出基本概念和基本原理。全书共分两篇共十章，第一篇为电路分析基础共四章，内容包括：电路的基本概念及基本定律，电路的基本分析方法，单相交流电路，三相交流电路，一阶和二阶动态电路，耦合电感和理想变压器；第二篇为模拟电子技术共六章，内容包括：半导体二极管、三极管和场效应管，基本放大电路，集成运算放大电路，负反馈放大电路和正弦振荡电路，集成功率放大电路、直流稳压电源。每章之后均附有习题，以便学生复习、总结提高和自我检查。

本书由李海芳、杜欣慧、丁芳、郭军编著，李海芳执笔第一章、第四章和第八章；杜欣慧执笔第二章、第三章和第九章；丁芳执笔第七章、第十章和书末后续内容；郭军执笔第五章、第六章。李海芳做了主要策划和组织工作。在编写过程中受到谢克明，李小维，余雪丽，段富等各位教授的大力支持，他们提出了很多宝贵意见和建议，本书正是遵照这些意见修改而成，在此谨向他们表示衷心的感谢。

按照“计算机学科教学计划 1993”的要求，为计算机学科各专业编写电路与模拟电子技术教材，应该说还是一种尝试，由于我们水平有限，经验不足，不当之处在所难免，恳请得到读者的批评指正。来信请寄太原理工大学信息工程学院计算机系。

编 者

1999.7

目 录

第一篇 电路分析基础

| | |
|--------------------------------------|-------|
| 第一章 电路的基本概念、定律及直流电路分析方法 | (3) |
| 第一节 电路的基本物理量..... | (3) |
| 第二节 基尔霍夫定律..... | (7) |
| 第三节 电路基本元件..... | (11) |
| 第四节 电阻电路的基本分析方法..... | (18) |
| 第五节 单口网络..... | (31) |
| 第六节 线性电路的几个定理..... | (36) |
| 习题一..... | (49) |
| 第二章 动态元件与动态电路 | (58) |
| 第一节 电容元件..... | (58) |
| 第二节 电感元件..... | (62) |
| 第三节 一阶电路..... | (67) |
| 第四节 二阶电路..... | (83) |
| 习题二..... | (90) |
| 第三章 交流动态电路 | (96) |
| 第一节 正弦电路分析基础..... | (96) |
| 第二节 正弦稳态分析..... | (104) |
| 第三节 正弦稳态电路的功率和能量..... | (116) |
| 第四节 三相电路..... | (127) |
| 习题三..... | (132) |
| 第四章 耦合电感与理想变压器 | (137) |
| 第一节 耦合电感..... | (137) |
| 第二节 理想变压器..... | (145) |
| 习题四..... | (150) |

第二篇 模拟电子技术

| | |
|-----------------------------|-------|
| 第五章 半导体二极管和三极管 | (155) |
| 第一节 半导体的导电特性..... | (155) |
| 第二节 PN 结..... | (158) |
| 第三节 半导体二极管..... | (160) |
| 第四节 稳压管..... | (163) |
| 第五节 半导体三极管..... | (164) |
| 第六节 场效应管..... | (170) |
| 习题五..... | (176) |

| | |
|----------------------------------|-------|
| 第六章 基本放大电路 | (180) |
| 第一节 基本共射放大电路的组成及放大作用..... | (180) |
| 第二节 共射放大电路的分析方法..... | (182) |
| 第三节 共集电极电路和共基极电路..... | (194) |
| 第四节 放大电路工作点的稳定问题..... | (198) |
| 第五节 级间耦合与多级放大电路..... | (203) |
| 第六节 场效应管放大电路..... | (205) |
| 习题六..... | (209) |
| 第七章 集成运算放大器 | (214) |
| 第一节 差动放大电路..... | (214) |
| 第二节 集成运放的简单介绍..... | (221) |
| 第三节 集成运放在信号运算方面的应用..... | (226) |
| 第四节 集成运放在信号测量方面的应用..... | (244) |
| 第五节 集成运放在信号处理方面的应用..... | (247) |
| 第六节 集成运放在波形产生方面的应用..... | (260) |
| 第七节 专用型集成运放..... | (264) |
| 第八节 使用集成运放时应注意的几个问题..... | (265) |
| 习题七..... | (269) |
| 第八章 负反馈放大电路与正弦波振荡电路 | (277) |
| 第一节 反馈的基本概念..... | (277) |
| 第二节 负反馈的四种类型..... | (280) |
| 第三节 反馈的一般表示方法..... | (283) |
| 第四节 负反馈对放大电路性能的影响..... | (284) |
| 第五节 正弦波振荡电路..... | (286) |
| 习题八..... | (289) |
| 第九章 功率放大电路 | (291) |
| 第一节 功率放大电路的特点、性能指标和工作方式..... | (291) |
| 第二节 功率放大电路..... | (293) |
| 第三节 互补对称功率放大电路..... | (293) |
| 习题九..... | (301) |
| 第十章 直流稳压电源 | (303) |
| 第一节 单相整流电路..... | (303) |
| 第二节 滤波电路..... | (308) |
| 第三节 分立元件组成的直流稳压电路..... | (311) |
| 第四节 串联型集成稳压电路..... | (315) |
| 第五节 开关型集成稳压电路..... | (317) |
| 习题十..... | (322) |
| 附录一 电阻器标称阻值系列 | (327) |
| 附录二 半导体器件型号命名方法 | (328) |
| 附录三 常用半导体器件参数 | (329) |

第一篇

电路分析基础

第一章 电路的基本概念、定律 及直流电路分析方法

电能在日常生活、工农业生产、科研以及国防等各个方面都得到了广泛的应用，现代一切新的科学技术的发展无不与电有着密切的关系，而各行各业电的提供都离不开电路。工作要求不同，电路的功能也不同，例如计算机电路可以对数据进行运算和处理，可以存贮信息，可以进行信息的传输。虽然电路的功能不同，但任何电路都是由电阻、电容、电感、晶体管等各种元器件组成，并受共同的基本规律约束。

在电路理论中，讨论的电路元件均指“理想化”元件。所谓“理想化”就是指每一种理想元件只能表示一种物理现象，其特性可用数学方法精确定义。例如电阻只是一种耗能元件（将电能转变成热能或其它形式的能），电容只能存贮电场能，电感只能存贮磁场能，它们的特性可以用一数学公式表示。实际电路中的元件可以用足以表示其特征的理想化元件来表示。由理想元件组成的电路称为理想电路模型，在理想电路模型中，将每一种理想元件用符合国际标准的图形符号来表示（电器件图形符号见附录一），采用这些符号绘出的理想电路模型称为电气图，简称电路图，本章将着重讨论电路的基本知识、定律及直流电路分析方法。

第一节 电路的基本物理量

电路分析就是利用各种分析方法求解描述电路电性能的一组电路变量，最常用的电路变量有电流、电压和功率。

一、电流

带电粒子在电路中有秩序的流动形成了电流，每单位时间内通过导体横截面的电量称为电流强度，简称电流，电流是时间的函数，通常用符号 $i(t)$ 表示。

$$\text{即} \quad i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

在国际单位制中，电流的单位是安培（A），简称安。当每秒通过导体截面的电量为1库仑时，电流为1安培。计量微小电流时，以毫安（mA）或微安（ μA ）为单位。其中 $1(\text{A}) = 1000(\text{mA})$ ， $1(\text{mA}) = 1000(\mu\text{A})$ 。

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的正方向。若电流的大小和方向不随时间变化称为直流电（DC），通常用符号 I 来表示；若电流的大小和方向随时间变化称为交流电（AC），通常用符号 i 来表示。

在电路图中，电流的实际方向往往难以准确标出。例如在交流电路中，电流的方向随时间变化无法准确标出，即便是直流电路在电路未分析之前并不知道电流的真实方向，因而电流的方向也难以标出，因此我们引出了电流的参考方向这一概念。在电路图中电流的参考方向可任意选定，用箭头标出，如图1.1电流 i_1 ，如果电流的真实方向和电流的参考方向一致则电流为正值，如果电流的真实方向和电流的参考方向相反则电流为负值。在分析电路时，可根据所求电流的正负来判断电路中该电流的真实方向。

例 1.1 图 1.1 中的方框表示一个元件，设电流的真实方向由 a 流向 b ，图 1.1 (a) 中电

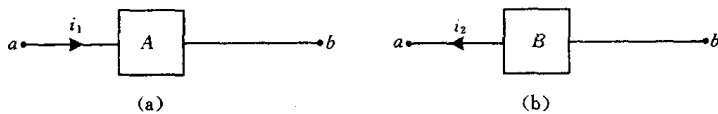


图 1.1 例 1.1 的电路

流为 1A，图 1.1 (b) 中电流为 2A，求参考电流 i_1 ， i_2 各为多少？

解：因为图 1.1 (a) 中电流的参考方向由 a 指向 b ，与电流的真实方向一致，所以参考电流： $i_1=1A$ 。

因为图 1.1 (b) 中电流的参考方向由 b 指向 a ，与电流的真实方向相反，所以参考电流： $i_2=-2A$ 。

例 1.2 图 1.2 (a) 电路中电流 $i_1=2A$ ，图 1.2 (b) 电路中电流 $i_2=-1A$ ，求图 1.2 (a)、(b) 电路中电流的真实方向。

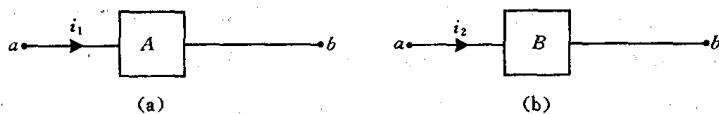


图 1.2 例 1.2 的电路

解：因为图 1.2 (a) 电路中电流的参考方向由 a 指向 b 且为正值，故该电路中电流的真实方向是从 a 流向 b 。

因为图 1.2 (b) 电路中电流的参考方向由 a 指向 b 且为负值，故该电路中电流的真实方向是从 b 流向 a 。

二、电压

电在电路中流动，必然有能量交换发生，电荷在某些地方获得能量（如电源处），在某些地方失去能量（如电阻元件），为了衡量电场力对电荷做功的能力，引入电压这一物理量。如图 1.3，单位正电荷由 a 移到 b 时所获得或失去的能量称为 a 、 b 两点间的电位差，简称电压，电压是时间的函数，通常用符号 $u(t)$ 表示。

$$\text{即} \quad u(t) = \frac{dw}{dq} \quad (1.2)$$

在国际单位制中，电压的单位是伏特 (V)，简称伏。当电场力把 1 库仑的电量从一点移到另一点所做的功为 1 焦耳时，则该两点的电压为 1 伏特。计量微小电压时，以毫伏 (mV) 或微伏 (μV) 为单位。其中 $1(V) = 1000(mV)$ ， $1(mV) = 1000(\mu V)$ 。

如图 1.3，习惯上规定，如果正电荷由 a 转移到 b 获得能量，则 a 点为低电位称为负极， b 点为高电位称为正极；如果正电荷由 a 转移到 b 失去能量，则 a 点为高电位称为正极， b 点为低电位称为负极。由此可见，当正电荷从 a 转移到 b 电位降低则正电荷失去能量，反之正电荷获得能量。如果电压的大小和极性不随时间变化称为直流电压 (DC)，用符号 U 表示；如果电压的大小和极性随时间变化称为交流电压 (AC)，用符号 u 表示。

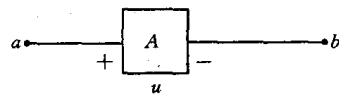


图 1.3 电压参考极性的表示方式

与电流相同，在电路图中，电压的实际极性也难以准确标出，因此也需为电压规定一个参考极性，电流的参考方向在电路图中用箭头表示，电压的参考极性则在元件或电路的两端用

“+”、“-”符号表示。“+”号表示正极，“-”号表示负极。如图 1.3, a 为正极, b 为负极。如果电压的真实极性和所标电压的参考极性一致则电压为正值; 如果电压的真实极性和所标电压的参考极性相反, 则电压为负值。在分析电路时, 我们根据所求电压的正负来判断电路中电压的真实极性。

例 1.3 已知正电荷由 a 转移到 b 失去能量, 电压降为 5V , 电压参考极性如图 1.4 (a)、(b) 所示, 求图 1.4 (a)、(b) 电路中电压 u 等于多少。

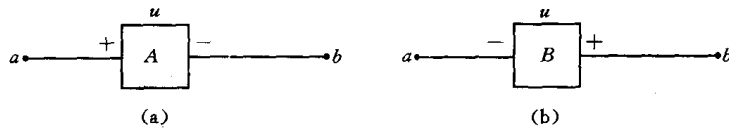


图 1.4 例 1.3 的电路

解: 因为正电荷由 a 转移到 b 失去能量, 所以电压的真实极性是 a 为正极, b 为负极。

图 1.4 (a) 电路中电压的参考极性 a 为正极, b 为负极, 与真实极性一致, 所以电压: $u = 5\text{V}$ 。

图 1.4 (b) 电路中电压的参考极性 a 为负极, b 为正极, 与真实极性相反, 所以电压: $u = -5\text{V}$ 。

例 1.4 已知图 1.5 (a) 中电压 $u = +5\text{V}$, 图 1.5 (b) 中电压 $u = -5\text{V}$, 试问 a 、 b 两点哪点电位高。

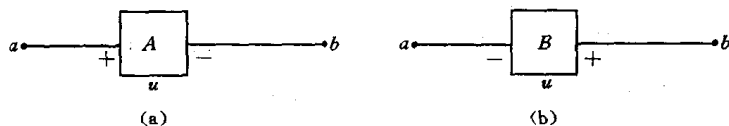


图 1.5 例 1.4 的电路

解: 图 1.5 (a) 中电压的参考极性 a 为正极, b 为负极而电压 u 为正值, 故电压的真实极性与参考极性一致, a 点的电位高于 b 点。

图 1.5 (b) 中电压的参考极性 a 为负极, b 为正极, 而电压 u 为负值, 故电压的真实极性与参考极性相反, a 点的电位高于 b 点。

综上所述, 在分析电路时, 我们既要为电流假设参考方向, 又要为电压假设参考极性, 两者本来是彼此独立且任意假定的, 但为了给以后的电路分析提供方便, 我们常将两者关联起来, 定义如下:

若电流的参考方向与电压参考极性“+”极到“-”极的方向一致, 即电流从正极流向负极, 称电流的参考方向和电压的参考极性关联。如图 1.6 所示, 图 1.6 (a) 电流和电压的参考方向关联, 图 1.6 (b) 电流和电压的参考方向非关联。

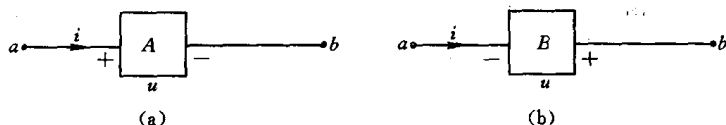


图 1.6 电流、电压参考方向的关联性

(a) 关联; (b) 非关联

三、功率

电荷通过某一段电路所产生或吸收能量的速率称为功率，通常用符号 $p(t)$ 表示。

$$\text{即} \quad p(t) = \frac{dw}{dt} \quad (1.3)$$

在国际单位制中，功率的单位是瓦特 (W)，简称瓦。当电荷在单位时间内通过某一段电路所产生或吸收的能量为 1 焦耳时，该电路的功率为 1 瓦特。计量微小功率时，以毫瓦 (mW) 或微瓦 (μW) 为单位。计量较大功率时，以千瓦 (kW) 为单位。其中 $1\text{W}=1000\text{mW}$, $1\text{kW}=1000\text{W}$ 。

至此，我们已经介绍了电压、电流和功率三个基本电路变量，那么功率与电压、电流有无联系呢？功率有无参考方向呢？下面就来详细讨论这个问题。

如图 1.7 所示，电流 i 的参考方向和电压 u 的参考极性是关联的。设 dt 时间内由 a 流到 b 的正电荷为 dq ，且由 a 到 b 的电压降为 u ，则正电荷由 a 转移到 b 失去能量，根据电压的定义， a 、 b 两端的电压为

$$u = \frac{dw}{dq}$$

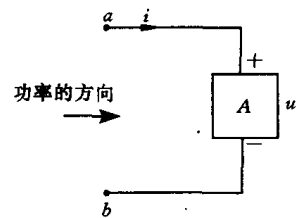


图 1.7 功率的参考方向

所以从 a 到 b 单位正电荷获得的能量为

$$dw = u \cdot dq$$

根据能量守恒定律，正电荷流过这段电路时失去能量意味着这段电路元件吸收能量，设功率参考方向如图 1.7 所示，这段电路吸收的功率为

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = \frac{udq}{dt}$$

根据电流的定义

$$i = \frac{dq}{dt}$$

因此功率

$$p(t) = i(t) \cdot u(t) \quad (1.4)$$

从 t_0 到 t 时刻该段电路吸收的能量为

$$W(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\zeta) d\zeta = \int_{t_0}^t u(\zeta) i(\zeta) d\zeta \quad (1.5)$$

由以上推导过程可见，如果电路部分的电压和电流的参考方向关联，功率的参考方向是进入该电路的，则功率 $p(t)$ 的计算如 (1.4) 式。若求得功率为正，说明该电路部分吸收功率；若求得功率为负，说明该电路部分产生功率。如果 u 、 i 、 p 三者有一个的参考方向改变，则功率计算公式应为

$$p(t) = -u(t) \cdot i(t) \quad (1.6)$$

若求得功率为正，则电路吸收功率，否则电路产生功率。

例 1.5 计算图 1.8 所示各元件所吸收的功率；其电压、电流为：

图 1.8 (a): $u = -2\text{V}$, $i = 1\text{A}$; 图 1.8 (b): $u = -3\text{V}$, $i = 2\text{A}$; 图 1.8 (c): $u = 2\text{V}$, $i = -3\text{A}$;

图 1.8 (d): $u=10\text{V}$, $i=5\text{mA}$; 图 1.8 (e): $u=10\text{V}$, $i=2\text{mA}$ 。

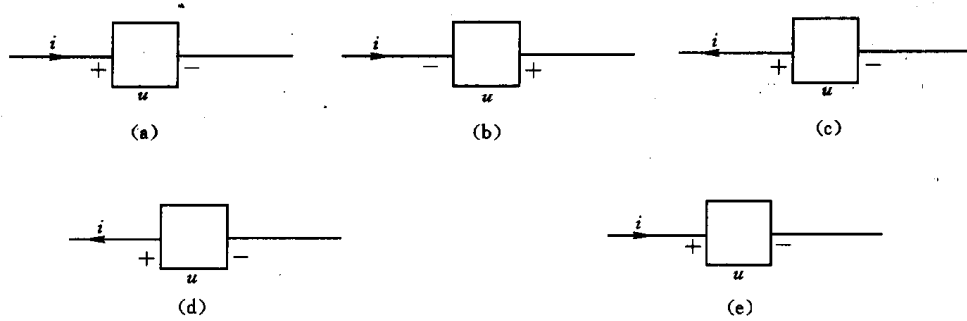


图 1.8 例 1.5 图

解：图 1.8 (a)：因为电流 i 与电压 u 的参考方向关联，所以

$$p = u \cdot i = -2 \times 1 = -2(\text{W})$$

答：图 1.8 (a) 中元件吸收功率为 -2W ，产生功率 2W 。

图 1.8 (b)：因为电流 i 与电压 u 的参考方向非关联，所以

$$p = -i \cdot u = -2 \times (-3) = 6(\text{W})$$

答：图 1.8 (b) 中元件吸收功率为 6W 。

图 1.8 (c)：因为电流 i 与电压 u 的参考方向非关联，所以

$$p = -i \cdot u = -(-3) \times 2 = 6(\text{W})$$

答：图 1.8 (c) 中元件吸收功率为 6W 。

图 1.8 (d)：因为电流 i 与电压 u 的参考方向非关联，所以

$$p = -u \cdot i = -10 \times 5 = -50(\text{mW})$$

答：图 1.8 (d) 中元件吸收功率为 -50mW ，产生功率 50mW 。

图 1.8 (e)：因为电流 i 与电压 u 的参考方向关联，所以

$$p = u \cdot i = 10 \times 2 = 20(\text{mW})$$

答：图 1.8 (e) 中元件吸收功率为 20mW 。

注：在计算过程中各变量单位应全部采用国际标准单位。

第二节 基尔霍夫定律

上一节对电路变量电流、电压和功率已作了详细的介绍，分析电路的主要任务就是分析计算出电路中各处的电压、电流的大小和真实方向，以及电路中功率的传递情况。分析计算电路的依据之一是电路中各处电压和电流之间所应遵守的规律，通常称之为基尔霍夫定律。基尔霍夫定律包括两部分内容，应用于节点的基尔霍夫电流定律和应用于支路的基尔霍夫电压定律。

电路是由分离元件如电阻、电容、电感通过理想导体连接而成的，具有两个端钮的元件，称为二端元件（或单口元件），如电阻、电容、电感等；我们以后还会遇到具有四个端钮的元件，称为四端元件，如：受控源、耦合电感等。电路中的每一个二端元件可视为一条支路，如图 1.9 中共有 5 条支路。流经元件的电流称为支路电流，元件两端的电压称为支路电压。分析电路时，在电

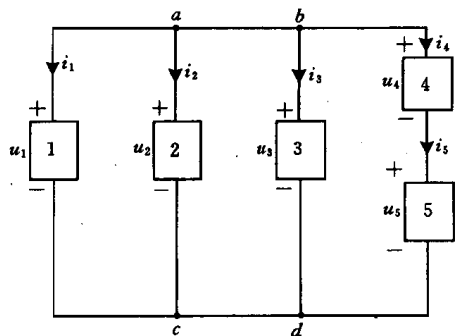


图 1.9 电路举例

路图上要标出电流及其参考方向、支路电压及其参考极性，如图 1.9 支路电流 i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 、 i_5 ，支路电压 u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 、 u_5 。由于串联的二端元件其支路电流相等，即 $i_4=i_5$ ，故支路 4 和支路 5 可视为一条支路。电路中两条或两条以上支路的联接点称为节点，在图 1.9 中共有 2 个节点。由理想导体联接的点，如图 1.9 中的点 c 和 d ，其节点电压相等，因此看作一个节点。电路中的任一闭合路径称为回路，在图 1.9 中共有 6 个回路。在回路中不另含有支路的回路称为网孔，在图 1.9 中共有 3 个网孔。元件 1、2，元件 2、3，元件 3、4、5 构成三个网孔。

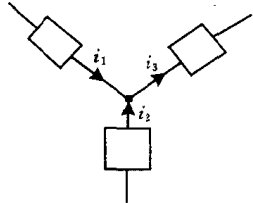


图 1.10 电路中的一个节点

一、基尔霍夫电流定律(简称 KCL)

图 1.10 是电路中的一个节点，由三条支路相交而成，各支路电流的参考方向如图所示，流进该节点电流的代数和为 $i_1+i_2-i_3$ 。我们知道电流是单位时间流过导体横截面的电量，即

$$i = \frac{dq}{dt}$$

所以流进节点电荷的速率可表示为

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

流进节点的电荷可表示为

$$dq = (i_1 + i_2 - i_3)dt$$

节点是支路的交点，不能堆积电荷，电荷既不能创造，也不能消灭，因而节点处的电荷 dq 必须为零，即

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0 \quad (1.7a)$$

由此得出，流进该节点电流的总和为零。

现在再来看流出该节点的电流，流出节点的电流为 $-i_1-i_2+i_3$ ，也就是说 (1.7a) 式乘以 -1 ，仍然为零，即 $-i_1-i_2+i_3=0$ 。

综上所述，KCL 可表述为：电路中的任一节点，在任一时刻流出（或流进）该节点的所有支路电流的代数和为零，其数学表达式为

$$\sum_{k=1}^K i_k(t) = 0 \quad (1.7b)$$

式中 $i_k(t)$ ——为流出（或流进）节点的第 k 条支路的电流；

k ——为节点处的支路数。

可见，若已知其中 $k-1$ 条支路的电流，第 k 条支路电流便可求得。

KCL 原是运用于节点的，我们也可以把它推广运用于电路中的任一假设的闭合面，如图 1.11 所示的闭合面包围的电路有三个节点。应用电流定律可列出

$$I_A = I_1 - I_2; I_B = I_3 - I_1; I_C = I_2 - I_3$$

上列三式相加，便得

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

可见，在任一时刻，流进闭合面的电流的代数和为零。

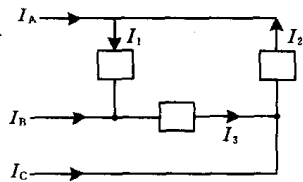


图 1.11 KCL 的推广应用

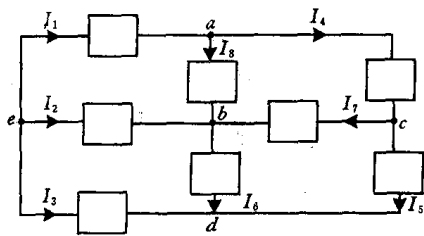


图 1.12 例 1.6 的电路

例 1.6 如图 1.12, 试问该电路有几条支路, 几个节点, 几个网孔; 若已知 $I_1=5\text{A}$, $I_3=-1\text{A}$, $I_4=2\text{A}$, $I_5=3\text{A}$, 求其余各支路电流。

解: 由图 1.12 可知该电路有 8 条支路、5 个节点、4 个网孔, 为了解出未知支路电流, 列出各节点的 KCL 方程。设流进节点的电流为正。

$$\text{节点 } a \quad I_1 - I_8 - I_4 = 0 \quad (1.8a)$$

$$\text{节点 } b \quad I_2 + I_8 + I_7 - I_6 = 0 \quad (1.8b)$$

$$\text{节点 } c \quad I_4 - I_5 - I_7 = 0 \quad (1.8c)$$

$$\text{节点 } d \quad I_3 + I_5 + I_6 = 0 \quad (1.8d)$$

$$\text{节点 } e \quad -I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad (1.8e)$$

将 $I_1=5\text{A}$, $I_3=-1\text{A}$, 代入方程 (1.8e), 有

$$I_2 = -I_1 - I_3 = -5 - (-1) = -4(\text{A})$$

将 $I_1=5\text{A}$, $I_4=2\text{A}$, 代入方程 (1.8a), 有

$$I_8 = I_1 - I_4 = 5 - 2 = 3(\text{A})$$

将 $I_3=-1\text{A}$, $I_5=3\text{A}$, 代入方程 (1.8d), 有

$$I_6 = -I_3 - I_5 = -(-1) - 3 = -2(\text{A})$$

将 $I_4=2\text{A}$, $I_5=3\text{A}$, 代入方程 (1.8c), 有

$$I_7 = I_4 - I_5 = 2 - 3 = -1(\text{A})$$

本例中电流 I_2 、 I_3 、 I_6 、 I_7 为负值, 说明其参考方向与实际方向相反。在这种情况下, 不必把图中所标出的方向改过来, 如 $I_2=-4\text{A}$, 根据图 1.12, 即可知 I_2 的实际方向是由节点 b 流向节点 e 。

通过本例, 我们可以看出在运用 KCL 时常需和两套符号打交道, 第一套符号是方程各项前的正负号, 其正负取决于电流参考方向对节点的相对关系, 若设流进节点电流为正, 则参考方向流出节点的电流在 KCL 方程中, 前面应加负号, 如方程 (1.8a), 电流 I_1 前面为正号, 电流 I_4 、 I_8 前面为负号; 另一套符号是电流本身数值的正负, 如电流 I_3 为 -1A , 则在 KCL 方程中括弧内加负号, 如方程 (1.8e), 电流 I_3 流出节点, 并且为 -1A , 故在 KCL 方程中应表示为 $-I_3 = -(-1)\text{A}$ 。在实际运用中两套符号千万不能混淆。

例 1.7 图 1.13 两电路中, I_0 各为多少? 应如何考虑 (⊥ 系接机壳符号)。

解: 如图 1.13 (a) 所示, 电流 I_1 流入和流出节点 a 各一次, 根据 KCL 列节点 a 的 KCL 方程

$$I_1 - I_1 - I_0 = 0 \quad \therefore I_0 = 0$$

同理, 也可从节点 b 判断, $I_0=0$ 。

图 1.13 (b) 电路中, 同一电流 I 流入和流出节点 a 各一次, 因此, $I_0=0$ 。

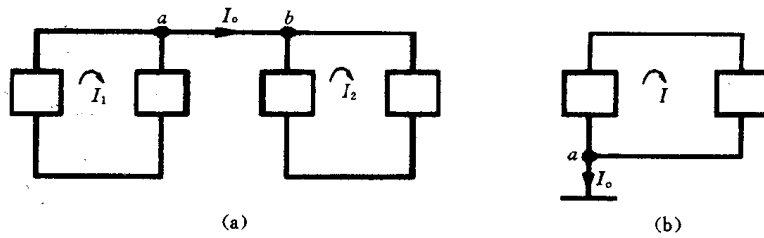


图 1.13 例 1.7 的电路

二、基尔霍夫电压定律 (简称 KVL)

设图 1.14 电路中各元件所得到的能量分别为 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 、 W_5 、 W_6 ，根据能量守恒定律可知

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

上式对时间求微分，则有

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 0 \quad (1.9)$$

其中 $P_i = \frac{dw_i}{dt}$ ($i=1,2,3,4,5,6$)

式 (1.9) 表明在每一瞬间电路中所有元件获得功率的总和为零，根据功率的计算公式，(1.9) 式可表示为

$$-I_1 U_1 + I_2 U_2 + I_3 U_3 + I_4 U_4 + I_5 U_5 + I_6 U_6 = 0 \quad (1.10)$$

由图 1.14 可知： $I_3 = I_5$ ， $I_1 = I_4 = I_6$ ，所以式 (1.10) 又可表示如下

$$\begin{aligned} -I_1 U_1 + I_2 U_2 + I_3 U_3 + I_1 U_4 + I_3 U_5 + I_1 U_6 &= 0 \\ (-U_1 + U_4 + U_6)I_1 + I_2 U_2 + (U_3 + U_5)I_3 &= 0 \end{aligned} \quad (1.11)$$

根据 KCL 可得： $I_2 = I_1 + I_3$ ，代入 (1.11) 式得

$$(-U_1 + U_4 + U_6 + U_2)I_1 + (U_2 + U_3 + U_5)I_3 = 0 \quad (1.12)$$

因为 I_1 、 I_3 是线性无关的 (参见线性代数)，所以式 (1.12) I_1 、 I_3 前面的系数必须为零。

即 $-U_1 + U_2 + U_4 + U_6 = 0 \quad (1.13)$

$$U_2 + U_3 + U_5 = 0 \quad (1.14)$$

将式 (1.14) 代入式 (1.13) 得

$$-U_1 + U_4 + U_6 - U_5 - U_3 = 0 \quad (1.15)$$

从图 1.14 可见元件 1、2、4、6，元件 2、3、5，元件 1、3、5、4、6，各构成一个回路，因此上述三个式子分别表明了沿三个回路各元件电压降的代数和为零。式 (1.13) 是沿逆时针方向计算电压降的；式 (1.14) 是沿顺时针方向计算电压降的。

综上所述，KVL 可表述为：电路中的任一回路，在任一时刻，沿着该回路所有支路电压降 (或电压升) 的代数和为零，其数学表达式为

$$\sum_{k=1}^K U_k(t) = 0 \quad (1.16)$$

式中 $U_k(t)$ ——回路中第 k 条支路的支路电压；

k ——回路中的支路数。