

电工技术基础（电工学）

（第2版）

主 编 王 英
副主编 徐英雷 曹保江



微课



精品课程教材



课件

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容简介

本教材分两篇论述,第一篇电路分析,其主要内容有:线性电路的基本元件、基本定律(即 KCL、KVL)、基本的分析方法;正弦交流电路的基本计算分析方法、基本的功率因数和谐振的概念;三相对称正弦交流电路的基础分析与计算;一阶电路的时域分析。第二篇电机与控制,其主要内容有:磁路、变压器、电动机、继电-接触器控制电路分析与设计。各章前有学习指导,后有相应的章节小结、选择题和习题,书后附有部分习题答案。

本教材适用面广,可作为高等工科院校各本科专业“电工技术基础”课程的教材(或“电工学 I”课程的教材),也可作为职业大学、成人教育大学、电视大学和网络教育等各专业的教材或辅助教材,还可供相关专业的工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术基础. 电工学. I / 王英主编. —2 版
—成都: 西南交通大学出版社, 2021.8
ISBN 978-7-5643-8218-6

I. ①电… II. ①王… III. ①电工技术—高等学校—教材②电工学—高等学校—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 165103 号

Diangong Jishu Jichu (Diangongxue I)(Di er Ban)

电工技术基础(电工学 I)(第 2 版)

主编 王 英

责任编辑	李芳芳
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都蓉军广告印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	23.75
字 数	585 千字
版 次	2012 年 6 月第 1 版 2021 年 8 月第 2 版
印 次	2021 年 8 月第 3 次
书 号	ISBN 978-7-5643-8218-6
定 价	55.00 元

课件咨询电话: 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

第二版前言

随着高等教育的不断改革及培养目标的拓展，我校建立了“精品课程”和“品牌专业”教育体系。本教材是为高等工科大学各专业及网络精品课程“电工技术基础”编写的教材；其作者在主编的“十一五”“十二五”国家级规划教材《电工技术基础（电工学）》基础上，针对网络教学、职业教育等各工科专业的特殊性和学习特点编写了该电工技术基础教材，为后续课程的学习奠定基础。

本教材分为“电路分析”和“电机与控制”两个篇章论述：第一篇电路分析有五个章节：基本元件和定律、线性电路的分析和定理、正弦交流稳态电路分析、三相正弦交流电路的分析和一阶电路的时域分析，重点对线性电路理论的基本概念、基本元件、基本定律、基本定理、基本分析方法等做了深入浅出的阐述；第二篇电机与控制有四个章节：磁路、变压器、电动机、继电器-接触器控制电路设计与分析，重点讲解了变压器和异步电机的结构、工作原理和基本控制器件、基本控制电路分析与设计。在电工技术基础课程的授课中，可根据具体的授课学时（即51~68学时）和专业要求，对教材中的内容做适当的调整 and 选择。

本教材的编写体系由四个模块组成：学习指导、理论知识及例题、章节小结和课后作业。其内容以注重电工技术基础知识为主线，其例题以注重掌握与提高理论知识为目的，其习题以注重综合能力培养为目标，其文笔以通俗易懂为根本，整部教材利于学生阅读和自学，利于教师教学和指导，利于工程技术人员知识的学习与掌握。

本教材的配套学习指导教材为《电工技术学习指导及习题精解（电工学I）》（西南交通大学出版社，主编王英）。

本教材可作为高等工科院校本科教育、网络教育、成人教育、职业教育等各工科专业的“电工技术基础”课程教材，也可作为工程技术人员的学习和参考资料。

本教材由西南交通大学王英主编，徐英雷、曹保江副主编，陈曾川、何圣仲、李冀昆、曾欣荣、陈竹等参编。在本教材编写过程中，参考了众多优秀教材，很多“电工学”的前辈和同行也给予了大量的支持，在此编者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编者 王英

2021年7月

第一版前言

当前是中国高等教育发展的最快时期，中国要从教育大国发展为教育强国，网络教育承担着人才培养强国重任。我校十年来网络教育发展历程，正步入创建网络化“精品课程”和“品牌专业”。本教材是为创建网络精品课程“电工技术基础”而编写，为创建各专业“品牌专业”而奠定基础。

本教材是为高等工科大学各专业而编写的《电工技术基础（电工学）》教材，其作者在主编了“十一五”国家级规划教材《电工技术基础（电工学）》基础上，再次针对网络学习的特殊性和学生学习的特点，结合作者十年来对网络学习的体会及改革建设成果而编著。

本教材分为“电路基础”和“电机与控制”二个篇章论述。第一篇电路基础中有五个章节：基本元件和定律、线性电路的分析和定理、正弦交流稳态电路分析、三相正弦交流电路的分析和一阶电路的时域分析。重点对线性电路理论的基本概念、基本元件、基本定律、基本定理、基本分析方法等作了深入浅出的阐述。第二篇电机与控制中有四个章节：磁路、变压器、电动机、继电器。主要讲解了变压器和异步电机的结构、工作原理、基本控制方法。在电工技术基础课程的授课中，可根据具体的授课学时和专业要求，对教材中的内容做适当的调整 and 选择。

本教材根据“电工技术基础”网络课程的特点，在编写的体系上，明确各章由四个模块组成：学习指导、理论知识、小结、课后作业。

(1) 学习指导 主要介绍学习目标、学习时间分配及方法、学习重点及难点，指导学生如何掌握学习进度及方法；

(2) 理论知识 在注重基本知识的同时，通过例题的形式拓展教学内容，由浅入深，并在每个章节中，增加了“常见问题讨论”“特别提示”，用易错的问题强化各知识点的掌握；

(3) 小结 每章后的小结中给出了本章重点，有助自学；

(4) 课后作业 针对电路基础部分中的基本概念和基本知识点的学习，增加了选择题题型，循序渐进；对于电机与控制部分中的知识难点的学习，通过选择题题型，力求做到点面结合，培养学生独立思考的能力。

在教材的编写中，其内容以注重电工技术基础知识为主线，其例题以注重掌握与提高理论知识为目的，其习题以注重综合能力培养为目标，其文笔以通俗易懂为根本，整部教材利于学生阅读和自学，利于教师教学和指导，利于工程技术人员知识的学习与掌握。

“电工技术基础”是各工科专业的技术基础课程。本教材可作为高等工科院校大学本科、网络教育、成人教育、职业大学等各工科专业的“电工技术”（或“电工技术基础”）课程的教材，可以是工程技术人员的学习和参考资料。本教材可供 51~68 学时教学使用。

本教材由西南交通大学王英、徐英雷主编，陈曾川、刘淑萍、何圣仲、曾欣荣、李冀

昆等参与编写。其中，王英主编和统编本教材，徐英雷主编第二篇。王英编写第一篇电路基础中的第 1、2、4、5 章，陈曾川编写第 3 章，徐英雷编写第二篇电机与控制中的第 6、7、8、9 章，刘淑萍、曾欣荣参编了第一篇电路基础的各章节习题，何圣仲、李冀昆参编了第二篇电机与控制内容及习题。在教材编写过程中，参考了众多优秀教材，很多“电工学”的前辈和同行也给予了大量的支持，在此编者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编者 王英

2012 年 5 月

目 录

第一篇 电路分析

第一章 基本元件和定律	3
第一节 电路的基本概念	4
第二节 电阻、电源元件	10
第三节 基尔霍夫定律	18
第四节 等效概念与电阻电路	错误!未定义书签。
第五节 电源电路	错误!未定义书签。
第六节 电 位	错误!未定义书签。
小 结	错误!未定义书签。
选 择 题	错误!未定义书签。
习 题	错误!未定义书签。
第二章 线性电路的分析和定理	错误!未定义书签。
第一节 电源模型的等效变换法	错误!未定义书签。
第二节 支路电流法	错误!未定义书签。
第三节 结点电压法	错误!未定义书签。
第四节 叠加定理	错误!未定义书签。
第五节 戴维南定理与诺顿定理	错误!未定义书签。
第六节 最大功率传输定理	错误!未定义书签。
小 结	错误!未定义书签。
选 择 题	错误!未定义书签。
习 题	103
第三章 正弦交流稳态电路分析	109
第一节 电容 C 元件和电感 L 元件	110
第二节 正弦函数与相量	115
第三节 基尔霍夫定律和元件伏安特性的相量形式	128
第四节 阻 抗	139
第五节 正弦稳态电路的分析	150
第六节 功率及功率因数提高	156
第七节 谐 振	169
小 结	178

选 择 题	181
习 题	185
第四章 三相正弦交流电路的分析	191
第一节 三相正弦交流电路的基本概念	192
第二节 对称三相正弦交流电路的分析	197
第三节 对称三相正弦交流电路的功率	205
第四节 安全用电简介	210
小 结	213
选 择 题	214
习 题	217
第五章 一阶电路的时域分析	220
第一节 换路定则及初始值	221
第二节 换路后的稳态值	231
第三节 三要素法	233
第四节 零输入响应、零状态响应和全响应简介	245
小 结	255
选 择 题	257
习 题	261

第二篇 电机与控制

第六章 磁路简介	269
第一节 磁场的基础知识	270
第二节 磁性材料	272
第三节 磁路基础和磁路的基本定律	276
第四节 直流磁路	279
第五节 交流磁路与交流铁芯线圈	281
第六节 电磁铁	286
小 结	289
选 择 题	290
习 题	291
第七章 变压器	293
第一节 变压器的分类、基本结构及工作原理	294
第二节 变压器的运行特性	300
第三节 变压器的应用简介	302
第四节 变压器使用中的问题	306

小 结	308
选 择 题	309
习 题	310
第八章 电动机	312
第一节 电动机概述	313
第二节 三相异步电动机的结构和工作原理	316
第三节 三相异步电动机的电路分析	323
第四节 三相异步电动机的转矩与机械特性	326
第五节 三相异步电动机的启动、制动和调速	329
第六节 三相异步电动机的型号和额定数据	336
第七节 电动机的选择	338
小 结	340
选 择 题	341
习 题	342
第九章 继电-接触器控制电路设计与分析	344
第一节 常用低压控制电器	345
第二节 继电-接触器控制电路	352
小 结	360
选 择 题	361
习 题	361
部分参考答案	364
参考文献	370

第一篇 电路分析

本篇主要学习线性电路的基本概念、基本元件（即电阻 R 、电压源和电流源等）、基本定律（即 KCL、KVL）、基本电路结构（即串联、并联、星形连接和三角形连接等）、基本定理（即叠加原理和戴维南定理等）和基本分析方法（即电源模型等效变换法、支路电流法、节点电压法、相量分析法和三要素法等）等知识；重点讨论直流电路、正弦稳态交流电路、对称三相交流电路和一阶电路等电路理论。

第一章 基本元件和定律

【学习指导】本章为电路分析的基础篇，主要讨论电路的基本概念、基本电阻和电源元件、基本定律、基本的电路连接结构和变化规律。

1. 学习目标

- (1) 了解电路的基本概念；
- (2) 掌握电路基本元件的伏安特性、KCL、KVL 定律；
- (3) 掌握电阻元件串并联等效电路计算方法；
- (4) 掌握理想电压源、理想电流源的基本电路分析方法；
- (5) 了解电位的基本概念。

2. 学习建议

(1) 学习时间：8~12 小时。

第一节建议学习时间：1.5 小时；

第二节建议学习时间：3 小时；

第三节建议学习时间：2 小时；

第四节建议学习时间：2 小时；

第五节建议学习时间：1.5 小时；

第六节建议学习时间：0.5 小时。

(2) 学习方法。

A. 学习本章新内容前，先复习电阻、电压、电流基本概念，复习串联、并联基本电路结构。

B. 点播学习网络课程第一章的内容，完成相关内容的“选择题”“习题”。

C. 参加在线导学直播学习。

D. 阅读参考资料：

王英主编，西南交通大学出版社《电工技术基础（电工学）》（第 2 版）第一章；

王英主编，西南交通大学出版社《电工技术学习指导及习题精解》。

E. 第一节、第二节学习完成后，提交第 1 次作业；第三节学习完成后，提交第 2 次作业；第四节学习完成后，提交第 3 次作业；第五节、第六节学习完成后，提交第 4 次作业，并进行本章学习小结。

3. 学习重点和难点

A. 重点掌握电路的基本概念（如：电路图、电压、电流及参考方向）。

B. 重点掌握电路的基本元件（如：电阻 R 、电压源、电流源等）的伏安特性。

C. 重点掌握电路的基本定律，即基尔霍夫定律（如：KCL、KVL）。

D. 重点掌握电路元件的基本连接，即串联、并联电路分析方法。

E. 难点是：基本概念的建立，基本元件伏安特性的理解，基本定律的应用，基本连接电路分析方法的掌握。

第一节 电路的基本概念

一、线性电路的概述

(一) 线性电路

电路是由电气设备、电路器件等通过各种方式相互连接并提供电流通过途径的系统。电路的结构和所能完成的任务是多种多样的，日常用的有手机、电脑等，工业中有电力系统、电子系统、电气控制系统等。

所谓线性电路是指由线性元件组成的电路。线性电路具有两个基本特性：叠加性和齐次性，其含义用电路图 1.1、图 1.2 简单说明，并设图 1.1、图 1.2 中电池和白炽灯均为线性元件。

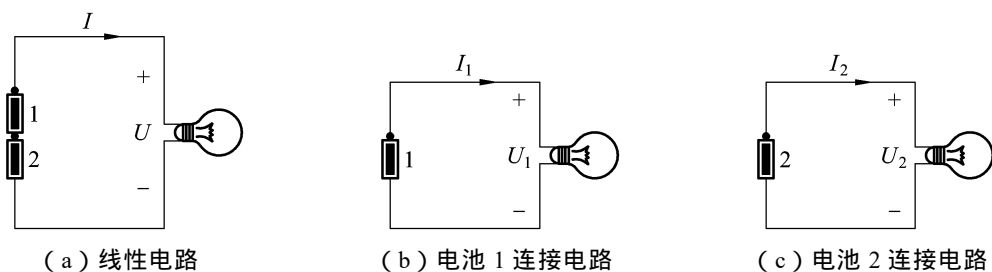


图 1.1 线性电路的叠加性

叠加性：如图 1.1 (a) 所示电路中，白炽灯两端电压为 U ，通过的电流为 I 。当移去图 1.1 (a) 中电池 2 时，电路如图 1.1 (b) 所示，白炽灯两端电压和通过的电流为 U_1 、 I_1 ；当移去图 1.1 (a) 中电池 1 时，电路如图 1.1 (c) 所示，白炽灯两端电压和通过的电流为 U_2 、 I_2 ；则图 1.1 (a) (b) (c) 中的电压、电流关系为

$$U = U_1 + U_2$$

$$I = I_1 + I_2$$

即线性电路中含有若干个理想电源同时作用时，其电路中的电压、电流等于各个理想电源单独作用时产生的电压、电流的叠加，称线性电路的叠加性。

齐次性：在如图 1.2 所示线性电路中，图 1.2 (a) 中白炽灯端电压和通过电流为 U_1 和 I_1 。若图 1.2 (b) 中电压 $U_2 = 5U_1$ ，则电流 $I_2 = 5I_1$ 。这就是线性电路的齐次性。

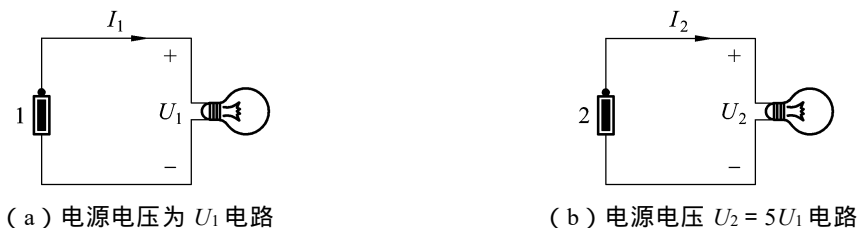


图 1.2 线性电路的齐次性

严格地讲，在实际中线性电路是不存在的。但是大量的实际电路通过“理想化”和“抽象化”处理，在一定条件下，可以视为线性电路进行分析。本篇作为电路理论的入门教材，只讨论研究线性电路。

(二) 电路的作用

1. 实现电能的传输、转换及分配

例如：电力系统示意图如图 1.3 所示，电路的主要作用是将发电机提供的电能传输和分配到各用电设备。

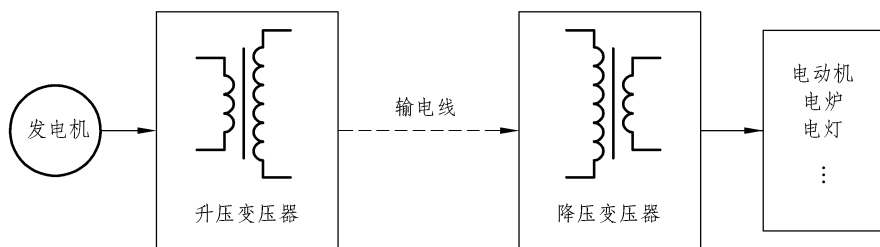


图 1.3 电力系统示意图

发电机又称为电源，是提供电能的设备，其功能是把热能、水能或核能等其他形式的能量转换成电能。

变压器和输电线的功能是实现电能的分配和传输。

电动机、电炉、电灯等用电设备统称为负载，其功能是把电能转换成为机械能、热能和光能等。

2. 实现信号的传递和处理

信号传递和处理的实例很多，如手机、计算机、电视机等，它们把载有语言、文字、音乐、图像信息的电磁波接收后转换为相应的电信号，通过电子电路对信号进行传递和处理，还原为原始信息（如声音、图像等）输出到扬声器、显示器等。

二、电路模型

实际电路是由电子元件、电气器件和设备及导线等构成，这些实际部件在电路工作过程中往往同时产生几种物理效应，而在电路理论中的各个元件则仅描述了一种物理特征。

例如，一个白炽灯[见图 1.4 (a)]通电后除了发光发热（即电阻特性）外，在灯丝两端之间具有电压，故两端之间具有电场效应（即电容特性）；当灯丝中通过电流时，则又有磁场产生，即灯丝又具有电感性。可见白炽灯工作过程中同时存在三种物理效应，即电阻性、电容性和电感性。但是，在三种物理效应中，其电阻特性最为突出，而电容性和电感性较小，常常忽略不计。因此，可把实际的白炽灯理想化为只具有电阻特性的集中参数元件 R ，并在电路图中用抽象化的电路图形符号表示，如图 1.4 (b) 所示。

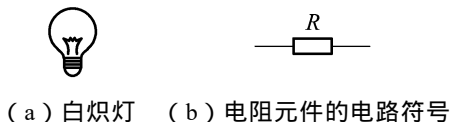


图 1.4 白炽灯与其电路模型

电路理论往往不是直接研究实际的电路，而是研究电路的模型（又简称电路图）。即电路图是由“抽象化”和“理想化”电路元件（简称元件）构成的。

本教材讨论的元件都满足集中参数条件，因此，电路图的大小和几何形状不影响电路的伏安特性。

三、电路的基本变量

在电路分析中，电压和电流称为电路的基本变量。通过已知的电压和电流变量可计算出电路图中的其他物理量，例如：直流电路的功率为 $P = UI$ 。

(一) 电 压

为了克服正电荷和负电荷之间存在引力，以功的形式施加一定的能量，将异性电荷拉开一定的距离，从而使异性电荷间存在一定的势能，这种电荷的势能差称为电势差，又称为电压。电压是电路中的驱动力，是产生电流的原因。

设一个定量的正电荷 dq 从电路中 a 点移动到 b 点时，能够放出的能量为 dW ，则电路中 a 、 b 两点间的电压 u 定义为

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1.1)$$

式中， u 的单位为伏特 (V)； w 的单位为焦耳 (J)； q 的单位为库仑 (C)。

在电路分析中常用电位来表示电压，即任意两点间的电位之差称为电压。

电路中的电位是相对参考点而定义的电压，如图 1.5 所示。图中 o 点设为电路的参考点 (即为零电位点 $u_o = 0 \text{ V}$)， a 点相对参考点 o 的电位为 $u_a = 18 \text{ V}$ ， b 点相对参考点 o 的电位为 $u_b = 9 \text{ V}$ ，则图 1.5 中 a 、 b 两点间的电压为 u_{ab} ，即 u_{ab} 为 a 、 b 两点间的电位之差：

$$u_{ab} = u_a - u_b = (18 - 9) \text{ V} = 9 \text{ V}$$

在实际电路中，参考点通常选为大地、设备机壳或某一个公共连接点。在电路分析中，可以任意选择电路中的某一点为参考点，即设参考点的电位为零。因此，电路中各点的电位值与所选定的参考点有关，但任意两点间的电压则与参考点的选择无关。

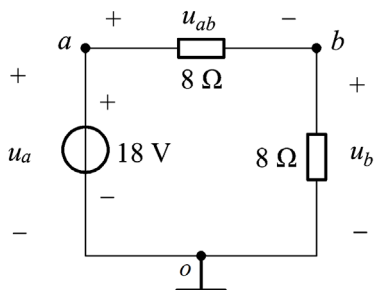


图 1.5 电压与电位

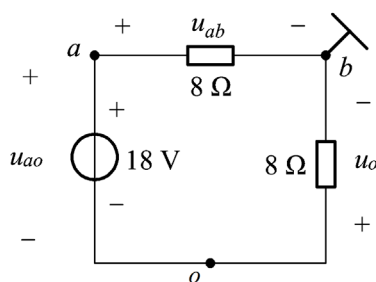


图 1.6 参考点、电位与电压

例如：图 1.5 中的参考点 o 改选为 b 点，如图 1.6 所示，这时 b 点的电位为零 (即 $u_b = 0 \text{ V}$)，相对参考点 b 的各点电位为 $u_o = -9 \text{ V}$ 、 $u_a = 9 \text{ V}$ ，可见，在图 1.6 中，因参考点由 o 点改设为 b 点，电路中 a 点、 b 点、 o 点电位值发生改变，而 a 、 b 两点间的电压 u_{ab} ：

$$u_{ab} = u_a - u_b = u_a = 9 \text{ V}$$

因此，选择的参考点不同，同一点的电位则不同，但任意两点间的电压是固定不变的，即电压与参考点的选择无关，不会因参考点的不同而发生变化。

注意：

(1) 电压是一个有方向的电量。

在电路分析中，电压的方向定义为：由高电位端（即用“+”符号表示）指向低电位端（即用“-”符号表示），如图 1.7 (a) 所示；电压的方向还可以用“下标”“箭头”两种方法表示，如图 1.7 (b) (c) 所示。

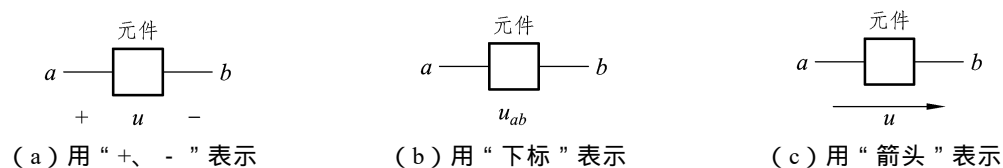


图 1.7 电压方向的表示方式

(2) “电位”单位与“电压”单位相同，即单位为伏特 (V)，“电位”是指电路中某一点相对参考点间的电压；“电压”是指电路中任意两点间的电位差。

(二) 电 流

电流的物理意义是电荷质点的定向运动。单位时间内通过导体横截面积的电量定义为电流强度 i (简称电流)，即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2)$$

式中， i 的单位为安培 (A)； q 的单位为库仑 (C)； t 的单位为时间秒 (s)。

在工程上规定正电荷移动的方向为电流方向。

注意：

(1) 电流是有方向的电量，有两种方法表示其方向，即“箭头”和“下标”表示法，如图 1.8 所示。



图 1.8 电流方向的表示方式

(2) 电流的单位为安培 (A)。

(三) 功率和能量

在电路分析时，经常分析电路中的能量及功率的分布和转移。因此，功率和能量是电路中的两个重要的物理量。功率定义为单位时间内所转换的电能，用 p 表示。功率 p 与能量 w 的关系如下所示

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

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau$$

式中，功率 p 的单位为瓦特 (W)，能量 w 的单位为焦耳 (J)。

在元件功率分析中，设元件上的电压与电流的参考方向如图 1.9 所示，即电流从电压的正极流到负极。

元件所吸收的能量为

$$dw = u(t) dq$$

则该元件吸收的功率为

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = u(t) \frac{dq}{dt} = u(t)i(t) \quad (1.4)$$

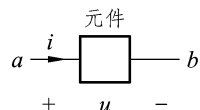


图 1.9 电压和电流表示功率

上式是通过元件的端电压和流过电流的乘积来定义功率。

注意：

(1) 图 1.9 中电流方向是由电压的“+”流到“-”。

(2) 当 $p(t) = u(t)i(t) > 0$ 时，说明元件吸收（输入、消耗）功率；当 $p(t) = u(t)i(t) < 0$ 时，说明元件提供（输出）功率。

本教材对各变量讨论时均采用国际单位制的基本单位，如表 1.1 所示。

表 1.1 国际常用词冠

词 冠	符 号		因 子
	中 文	国 际	
giga	吉	G	10^9
mega	兆	M	10^6
kilo	千	k	10^3
milli	毫	m	10^{-3}
micro	微	μ	10^{-6}
nano	纳	n	10^{-9}
pico	皮	p	10^{-12}

四、参考方向

在复杂的电路分析中，电压和电流都是根据设定的参考方向进行讨论，即任意假设电压、电流的正方向称为参考方向。参考方向概念的引入，解决了复杂电路中实际电压、电流方向难以确定的问题，同时又不影响电路分析的结果。

在参考方向条件下，电路分析计算的结果存在两种情况：

(1) 计算结果为“+”，说明参考方向与实际方向相同；

(2) 计算结果为“-”，说明参考方向与实际方向相反。

由于电压、电流的参考方向都是任意假设的，因此，参考电流从参考电压的正极（高电位）流到负极（低电位）称为关联参考方向，如图 1.10 (a) 所示。在关联参考方向条件下，如果功率 $p = ui > 0$ ，则说明元件吸收功率（称为负载）；功率 $p < 0$ ，则说明元件提供功率（称为电源）。



图 1.10 电压、电流的参考方向

图 1.11 (b) 中，参考电流从参考电压的负极流到正极称为非关联参考方向。在非关联参考方向条件下，如果用 $p = -ui$ 计算功率，计算出的功率性质的判断与关联参考方向的相同，即 $p > 0$ 的元件吸收功率， $p < 0$ 的元件提供功率。

注意：

(1) 元件上的电压、电流参考方向是否关联与元件的属性（电源或负载）无关。

(2) 非关联参考方向条件下，也可以用 $p = ui$ 计算功率，只是此时功率 $p > 0$ 的元件为提供功率， $p < 0$ 的元件为吸收功率。

(3) 电源在电路中是提供能源还是消耗能量，由电源外接电路的结构、元件性质及参数决定。

例 1.1 已知图 1.11 所示电路中 $U_1 = 5\text{ V}$ ， $U_2 = -5\text{ V}$ ， $U_3 = U_4 = 10\text{ V}$ ， $I_1 = 1\text{ A}$ ， $I_2 = -1\text{ A}$ ， $I_3 = -2\text{ A}$ ， $I_4 = -1\text{ A}$ 。(1) 试说明电路中各元件上的电压、电流参考方向是否关联。(2) 计算各元件吸收的功率，并判断元件的性质（电源或负载），验证功率是否平衡。

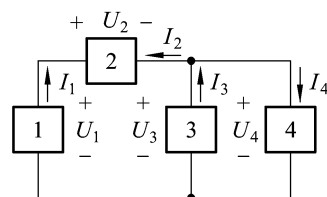


图 1.11 例 1.1 图

分析：当电流方向是由电压的正极流向负极时，为关联参考方向，否则为非关联参考方向；吸收功率为负载，提供功率为电源。

解 (1) 试说明电压、电流参考方向是否关联。

元件 1、2、3 的电流参考方向是从参考电压的负极流向正极，故其电压、电流参考方向为非关联参考方向；元件 4 的电流参考方向是从参考电压的正极流向负极，故其电压、电流参考方向为关联参考方向。

(2) 计算各元件吸收的功率，并判断元件的性质，验证功率平衡。

根据电路中电压、电流的参考方向，各元件的功率为：

$$\text{元件 1} \quad P_1 = -U_1 I_1 = [-(5 \times 1)] \text{ W} = -5 \text{ W} \quad (\text{提供功率})$$

$$\text{元件 2} \quad P_2 = -U_2 I_2 = [-(-5) \times (-1)] \text{ W} = -5 \text{ W} \quad (\text{提供功率})$$

$$\text{元件 3} \quad P_3 = -U_3 I_3 = [-(10 \times (-2))] \text{ W} = 20 \text{ W} \quad (\text{吸收功率})$$

$$\text{元件 4} \quad P_4 = U_4 I_4 = [(10 \times (-1))] \text{ W} = -10 \text{ W} \quad (\text{提供功率})$$

由于各元件功率的分析计算是设定在关联参考方向条件下，因此，元件 3 功率大于零为吸收功率，即元件 3 是负载；元件 1、2、4 的功率小于零，说明在电路中提供功率，即元件 1、2、4 是电源。

验证功率平衡

$$\sum P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = [(-5) + (-5) + 20 + (-10)] \text{ W} = 0 \text{ W}$$

结论：电能的守恒是指“电源提供的功率等于电路消耗的功率”，常称为功率平衡。在电路分析计算中，可利用功率平衡的概念，检验计算结果的正误。

五、常见问题讨论

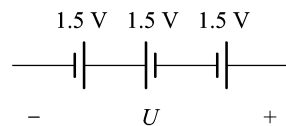
(1) 实际元件与电路元件有何区别？

解答：主要区别在于所反映的物理效应上，实际元件工作时常常具有多种物理特性，而电路元件工作时只具有一种物理特性。

(2) 电压、电流是有方向的电量，分析电路时是否要关注其电量的方向？

解答：分析电路时必须关注电压、电流的方向。

例如：在图 1.12 所示的电压源串联电路中，如果不关注电压源的正负方向，则可能得出端电压 $U = 4.5 \text{ V}$ ，但此答案显然是错的。正确的解答为： $U = 1.5 \text{ V}$ ，即运算式中含有电量的方向因素。



(3) 电压、电流参考方向的不同设定，是否会改变实际电路中的电压、电流方向？

解答：电压、电流参考方向可以任意设定，不会改变实际电路中的电压、电流方向。当计算结果为“+”，说明参考方向与实际方向相同；计算结果为“-”，说明参考方向与实际方向相反。

(4) 电压、电流参考方向的不同设定，是否会改变元件功率的特性？

解答：元件功率的特性与电路中电压、电流参考方向的设定无关。即元件功率特性是由电路元件特性、电路结构和电气参数所决定的。

六、特别提示

任意设定的电压方向、电流方向称为参考方向；参考方向与实际方向可能相同（计算结果为“+”值），也可能不相同（计算结果为“-”值）。

第二节 电阻、电源元件

电路元件 电路元件是电路图最基本的组成单元。每一种元件都有唯一对应的物理特性和电路符号，在分析电路元件时，重点关注电路元件的线性元件的数学模型和伏安特性。

电路元件分类 按电路元件特性可分为有源元件和无源元件两种。

(1) 对于只是用来表征电能消耗，以及电场、磁场能量的储存和转换的元件称为无源元件，这类元件的特点是本身并不能产生电能，例如耗能元件电阻 R 、储能元件电感 L 和电容 C 。

(2) 有源元件主要有理想电压源、理想电流源和受控电源元件。

一、电阻 R

在电路理论中，电阻元件是一种反映消耗电能转换成其他形式能量物理特征的电路模型。

线性电阻元件(简称电阻)的电路符号、电压 u 和电流 i 的参考方向、伏安特性曲线($u-i$)等,如图 1.13 所示。从图 1.13 (c) 中可以看出线性电阻的伏安特性曲线在 $u-i$ 平面上是过原点的直线,即电阻 R 值为常数。

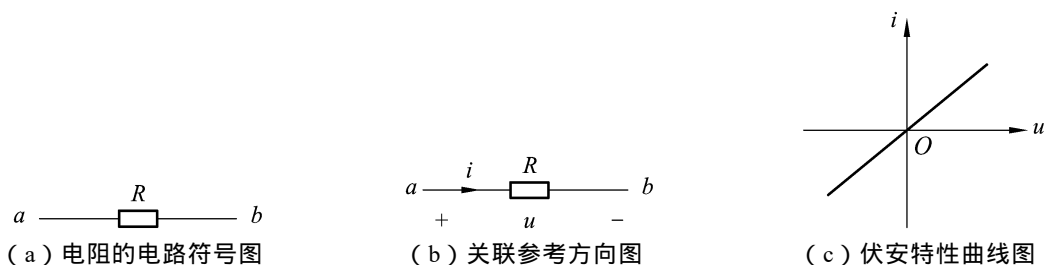


图 1.13 线性电阻元件

(一) 定 义

在电阻元件两端电压与电流为关联参考方向时,电阻元件的欧姆定律为

$$u = R i \quad (1.5)$$

式中, R 为线性电阻,单位为欧姆 (Ω)。

令 $G = \frac{1}{R}$, 则

$$i = G u$$

式中, G 为电阻元件的电导,单位为西门子 (S)。 R 和 G 都是电阻元件的参数。

(二) 讨 论

1. 数学模型 $u = R i$ 的讨论

数学模型 $u = R i$ 表明:电阻元件上某时刻的端电压 u 由该时刻的电流 i 确定,而与过去的电流值大小无关,即电阻 R 为“无记忆”的元件。

2. 电阻元件的开路特性

当电阻值 R 为无穷大(即 $R = \infty$)时,称电阻 R 为开路。

3. 电阻元件的短路特性

当电阻值 R 为零(即 $R = \frac{u}{i} = 0 \Omega$),称电阻 R 为短路。

4. 功 率

在电压 u 和电流 i 的实际方向为关联参考方向时,电阻元件吸收的功率为

$$p = u i = R i^2 = \frac{u^2}{R} > 0$$

即电阻 R 是耗能元件。

在直流电路的稳态分析中,其电压、电流和功率的变量用大写字母 (U 、 I 、 P) 表示。在关联参考方向条件下功率为

$$P = UI \quad (1.6)$$

(三) 注意

(1) 电阻元件上的电压 u 与电流 i 为非关联参考方向时，如图 1.14 所示，欧姆定律方程式中应加一个负号，即 $u = -Ri$ 。

(2) 电路图中的电压 u 、电流 i 参考方向与数学分析计算的结果结合起来才有物理意义。

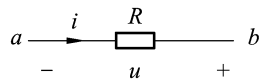


图 1.14 u 与 i 为非关联参考方向

(3) 功率的物理性质与参考方向的设置无关。

(4) 电路理论中的“电阻元件 R ”是一个抽象理想化的物理元件模型，具有更深层次的内涵。

例 1.2 电路如图 1.14 所示，已知电阻 $R = 6\Omega$ ，电流 $I = -2\text{A}$ ，试求电阻上的电压 U 和功率 P 。

分析：电流 I 由电压 U 的“-”极流到“+”极，即参考方向为非关联参考方向；则欧姆定律数学模型为 $U = -IR$ ，其吸收功率的数学模型为 $P = -UI$ 。

解
$$U = -IR = -(-2)\text{A} \times 6\Omega = 12\text{V}$$

$$P = -UI = -12\text{V} \times (-2)\text{A} = 24\text{W} \text{ (吸收功率)}$$

结论：在应用欧姆定律分析电阻元件上的电气参数（即：电阻值、电压值、电流值）时，首先应关注电压与电流参考方向是“关联”还是“非关联”，“关联”则有 $U = IR$ ，“非关联”则为 $U = -IR$ 。

二、独立电源

独立电源是指在电路中能独立提供能量的元件（电压源或电流源）。实际的独立电源有电池、发电机、信号源等。

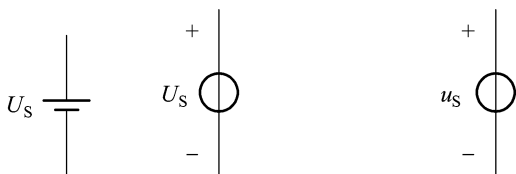
在电路分析中，实际电源抽象理想化为只表征一种物理特征的独立电源元件，所以又称为理想电源元件。

本教材中如不做特殊说明，电压源、电流源指的是理想电压源（或独立电压源）、理想电流源（或独立电流源）。

(一) 电压源

电压源表征了一个二端有源元件所提供的电压与流过的电流无关的物理特征。

直流电压源 U_S 和交流电压源 u_S 的电路符号如图 1.15 所示。直流电压源的伏安特性曲线如图 1.16 所示。



(a) 直流电压源 U_S 电路符号 (b) 交流电压源 u_S 电路符号

图 1.15 电压源电路符号图

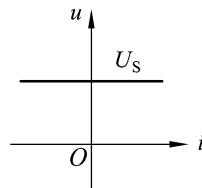


图 1.16 直流电压源 U_S 伏安特性曲线

1. 电压源的性质

无论流过电压源的电流值大小、方向如何，其电压源的端电压总是保持为规定的函数值 U_S 或 $u_S(t)$ ，其流过电压源的电流由外接电路决定。所以电压源又称为独立电压源。

2. 注意

(1) 电压源在实际应用中不允许直接短路。

因为实际电压源的内电阻很小，当发生短路时，短路电流和输出的功率非常之大，会导致实际电压源损坏。即注意理想元件与实际元件的区别。

(2) 在电路分析中，电压源电压为零，相当于短路。

例 1.3 电路如图 1.17 所示，直流电压源 $U_S = 10\text{ V}$ ， R 为可变电阻，试求可变电阻 R 分别为 $5\ \Omega$ 和 $10\ \Omega$ 时的电流和电压源、电阻的功率。

分析：(1) 因电压源上的电压值 U_S 与电流 I 无关，所以，直接通过电压源是无法计算电流 I ；可以通过可变电阻 R 计算电流 I ，即欧姆定律 $U = RI$ ；(2) 可变电阻 R 上电压与电流为关联参考方向， $P = UI$ ；电压源 U_S 上电压与电流为非关联参考方向， $P = -UI$ 。

解 (1) $R = 5\ \Omega$ 时。

$$I = \frac{U_S}{R} = \frac{10\text{ V}}{5\ \Omega} = 2\text{ A}$$

电压源 U_S 的功率

$$P_{U_S} = -U_S I = (-10 \times 2)\text{ W} = -20\text{ W} \quad (\text{提供功率})$$

可变电阻 R 的功率

$$P_R = U_S \times I = (10 \times 2)\text{ W} = 20\text{ W} \quad (\text{消耗功率})$$

(2) $R = 10\ \Omega$ 时。

$$I = \frac{U_S}{R} = \frac{10\text{ V}}{10\ \Omega} = 1\text{ A}$$

电压源 U_S 的功率

$$P_{U_S} = -U_S I = (-10 \times 1)\text{ W} = -10\text{ W} \quad (\text{提供功率})$$

可变电阻 R 的功率

$$P_R = U_S \times I = (10 \times 1)\text{ W} = 10\text{ W} \quad (\text{消耗功率})$$

结论：流过电压源中电流的大小取决于外接电路。例如：图 1.17 中外接电阻 $R = 5\ \Omega$ 时，电流为 2 A ；外接电阻值改变为 $R = 10\ \Omega$ 时，电流为 1 A ，而电压源 U_S 输出的电压值 10 V 不随电流的变化而改变，或者说，电压源本身并没有对其流过的电流作任何约束，即电压源

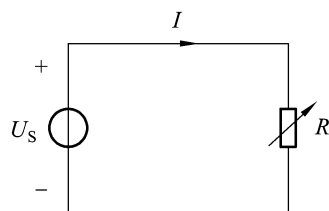


图 1.17 例 1.3 图

中的电流大小、方向随外接电路的变化而发生改变。

例 1.4 电路如图 1.18 所示, 已知电阻 $R=10\ \Omega$, 电压源 $U_{S1}=10\ \text{V}$, $U_{S2}=20\ \text{V}$, 试求电流 I 和电压源 U_{S1} 的功率。

分析: (1) 因电阻 R 与电压源构成串联闭合回路, 则所有元件中的电流 I 相同, 即 $U=RI$ 计算电流 I ; (2) 根据电压、电流的参考方向及功率计算结果, 判断元件是吸收功率还是提供功率。

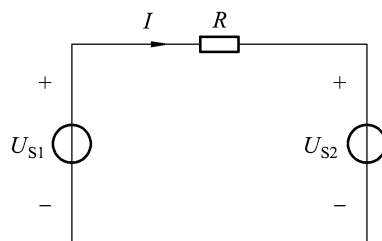


图 1.18 例 1.4 图

解 电流 I

$$I = \frac{U_{S1} - U_{S2}}{R} = \frac{10 - 20}{10} \text{ A} = -1 \text{ A}$$

电压源 U_{S1} 的功率

$$P_{U_{S1}} = -U_{S1}I = [-10 \times (-1)] \text{ W} = 10 \text{ W} \quad (\text{吸收功率})$$

结论: (1) 在分析电路时, 一定要注意电压、电流的参考方向关系, 这是写其数学模型式前首先要确定的。

(2) 电压源 U_{S1} 为吸收功率, 说明电压源 U_{S1} 在电路中起负载作用; 而电压源 U_{S2} 提供功率, 起电源作用。可见电压源在电路中有可能提供功率, 也有可能消耗功率。

(二) 电流源

电流源表征了一个二端有源元件提供的电流与其端电压完全无关的物理特征。

直流电流源 I_S 和交流电流源 i_s 的电路符号如图 1.19 所示。直流电流源的伏安特性曲线如图 1.20 所示。



(a) 直流电流源 I_S

(b) 交流电流源 i_s

图 1.19 电流源的电路符号图

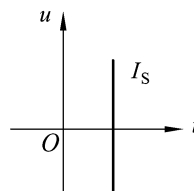


图 1.20 直流电流源 I_S 伏安特性曲线

1. 电流源的性质

无论电流源两端电压值大小、方向如何, 其电流源的电流值总保持规定的 I_S 或 $i_s(t)$, 其电流源的端电压由外接电路决定。所以电流源又称为独立电流源。

2. 注意

(1) 实际应用中的电流源不允许开路。

因为实际电流源的内电阻很大, 当开路时, 其两端的电压和输出的功率非常之大, 将会导致实际电流源损坏, 所以, 在不使用实际电流源时, 可以用一根导线将实际电流源短路。

(2) 在电路分析计算中, 理想电流源的电流值为零时, 相当于断路。

例 1.5 电路如图 1.21 所示, 直流电流源 $I_S=2\ \text{A}$, R 为可变电阻, 试求可变电阻 R 分别为 $5\ \Omega$ 和 $10\ \Omega$ 时电压 U 。

分析：由于电流源输出的电流值 I_S 与其端电压 U 无关，所以，可根据欧姆定律计算其电压 U 。

解（1）当 $R=5\ \Omega$ 时：

$$U = I_S R = (2 \times 5)\ \text{V} = 10\ \text{V}$$

（2）当 $R=10\ \Omega$ 时：

$$U = I_S R = (2 \times 10)\ \text{V} = 20\ \text{V}$$

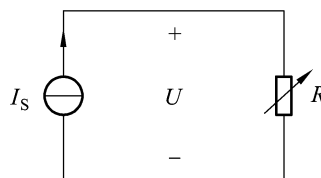
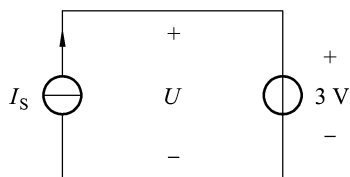


图 1.21 例 1.5 图

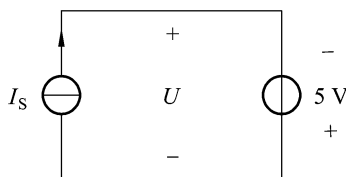
结论：电流源两端电压的大小取决于外电路，例如，当 $R=5\ \Omega$ 时，电流源值为 $2\ \text{A}$ ，电流源端电压 $U=10\ \text{V}$ ；当 $R=10\ \Omega$ 时，电流源值仍为 $2\ \text{A}$ ，电流源端电压为 $U=20\ \text{V}$ ，可见，电流源输出的电流值始终不变。

例 1.6 电路如图 1.22 所示，已知电流源 $I_S=2\ \text{A}$ ，试求电流源 I_S 两端的电压 U 和功率。

分析：电压源与电流源直接构成串联回路，认识这点很重要。即电压源中的电流由电流源提供；电流源的端电压由电压源决定。



（a）例 1.6 图（a）



（b）例 1.6 图（b）

图 1.22 例 1.6 图

解（1）图 1.22（a）：

电流源 I_S 两端的电压

$$U = 3\ \text{V}$$

电流源 I_S 的功率

$$P = -UI_S = (-3 \times 2)\ \text{W} = -6\ \text{W}$$

上式表明电流源 I_S 提供 $6\ \text{W}$ 功率。

（2）图 1.22（b）：

电流源 I_S 两端的电压

$$U = -5\ \text{V}$$

电流源 I_S 的功率

$$P = -UI_S = [-(-5) \times 2]\ \text{W} = 10\ \text{W}$$

上式表明电流源 I_S 在电路中起负载作用，电流源 I_S 消耗的功率为 $10\ \text{W}$ 。

结论：（1）电流源两端电压的方向可以随外电路的变化而改变，而电流源输出的电流值大小和方向始终不变。

（2）电流源在电路中有可能提供功率，也有可能消耗功率。

（3）电压、电流的参考方向的设置不改变电路元件的功率特性。

(三) 实际电源的电路模型

实际的电源因存在一定的内部电阻，其等效电路模型如图 1.23 (a)、(b) 所示。

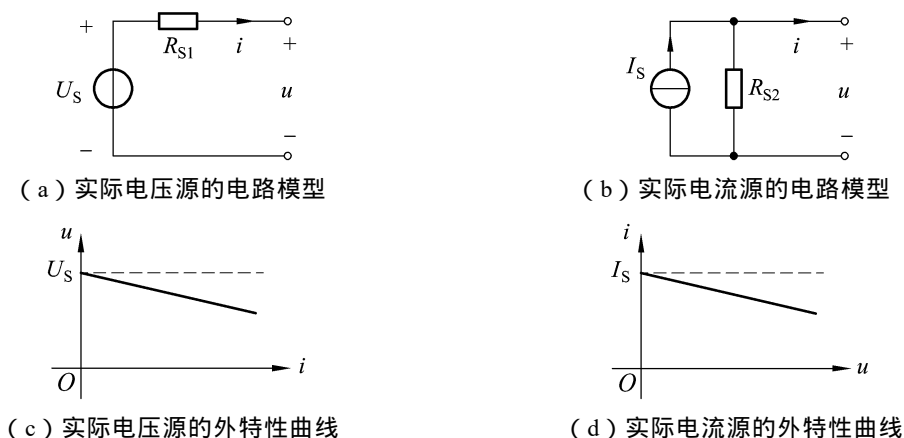


图 1.23 实际电源的电路模型和外特性曲线

当实际电源接有外电路时，电源内部电阻会产生一定的内耗，其外特性如图 1.23 (c)、(d) 所示。可见，实际电源与外电路连接后，其值会有一定的变化，其变化的大小与实际电源的内电阻有关。

对于实际电压源，内电阻越小其特性越接近理想电压源，性能越好；对于实际电流源，内电阻越大其特性越接近理想电流源，性能也越好。

理想电源最主要的特点就是电源输出的值与外接电路无关。

三、受控电源简介

受控电源又称为非独立电源，它不同于独立电源，独立电源所提供的电量是独立量，而且是一种二端元件；受控电源所提供的电量是受电路中某部分电压或电流控制，是一个非独立量，一旦控制量变化，受控电源的电量也会发生相应的变化。因此，受控电源可看成是一种四端元件。本教材只讨论线性受控电源（简称受控源），即受控电源的电量与控制量成比例关系。

受控电源是实际电子器件中存在的两处信号之间的一种耦合关系模型，是分析电子电路的重要元件模型。在电路分析中，用受控源来反映电路中某处的电压或电流能控制另一处的电压或电流这一物理现象；或表示一处的电路变量与另一处电路变量之间的一种耦合关系。与独立电源类似，根据输出电量的不同，受控源可分为电压源和电流源。

受控电压源输出的电压受另一处电路的电压或电流控制，因此，有 2 种受控电压源电路模型，分别为电压控制电压源（VCVS）和电流控制电压源（CCVS），如图 1.24 (a)、(c) 所示。

受控电流源输出的电流受另一处支路的电压或电流控制，也有 2 种受控电流源电路模型，分别为电压控制电流源（VCCS）和电流控制电流源（CCCS），如图 1.24 (b)、(d) 所示。

由于受控源的电量值是非独立的，其值大小取决于控制量，因此，在分析电路时受控源可以作为电源处理，但必须注意其控制量在分析过程中要始终保留。

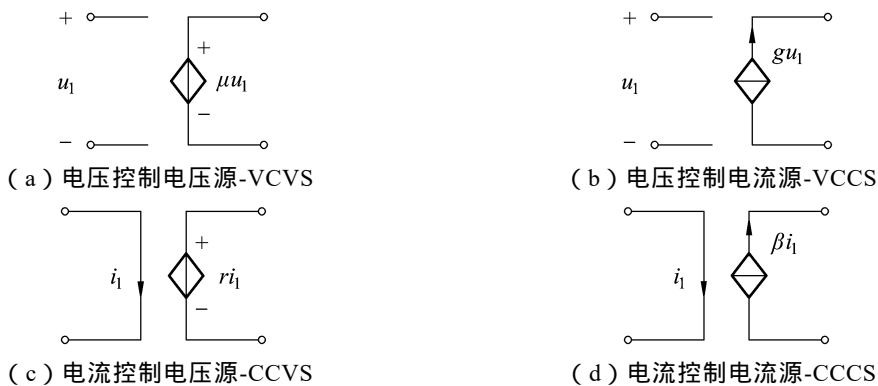


图 1.24 4 种受控源

四、开路、短路特性

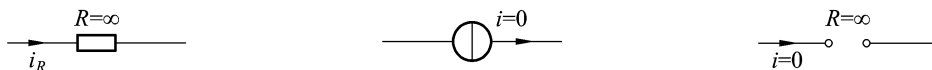
“开路”与“短路”是电路元件的一种特殊伏安特性。

(一) 开路

“开路”是指电路中两点间的电流恒为零的物理特征，如图 1.25 所示。

(1) 当电阻 R 的阻值为无穷大（即 $R = \infty$ ）时，如图 1.25 (a) 所示，根据欧姆定律有 $i_R = \frac{u}{R} = 0$ ，即流过电阻 R 的电流 i_R 为零，电阻 R 相当于开路，在电路图中可用“开路”等效替代电阻 R ，如图 1.25 (c) 所示。

(2) 当电流源的电流值恒为零（即 $i = 0$ ）时，如图 1.25 (b) 所示，电流源相当于开路，在电路图中可用“开路”等效替代电流源，如图 1.25 (c) 所示。



(a) 电阻值为无穷大

(b) 电流源值为零

(c) $R = \infty$ 和 $i = 0$ 的等效电路

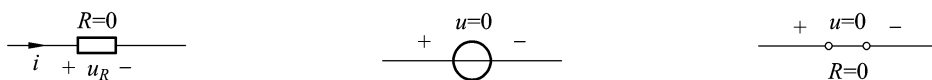
图 1.25 开路特性的等效电路图

(二) 短路

“短路”是指电路中两点间电压恒为零的物理特征，如图 1.26 所示。

(1) 当电阻 R 的阻值为零（即 $R = 0$ ）时，如图 1.26 (a) 所示，其端电压 u_R 恒为零，则电阻 R 相当于短路，在电路图中可用“短路线”等效替代电阻 R ，如图 1.26 (c) 所示。

(2) 当电压源的电压值恒为零（即 $u = 0$ ）时，如图 1.26 (b) 所示，电压源相当于短路，在电路图中可用“短路线”等效替代电压源，如图 1.26 (c) 所示。



(a) 电阻值为零

(b) 电压源值为零

(c) $R = 0$ 和 $u = 0$ 的等效电路

图 1.26 短路特性的等效电路图

五、常见问题讨论

(1) 电阻元件 R 的伏安特性表达式为 $u = Ri$ ，试问 $u = Ri$ 与其电压 u 、电流 i 的参考方向有关吗？

解答：有关。

电阻元件 R 的伏安特性数学模型与其电压 u 、电流 i 的参考方向有关，即在关联参考方向条件下伏安特性数学模型 $u = Ri$ 才成立。

(2) 本教材电路中的电压源、电流源指的是实际电源吗？

解答：不是。

本教材电路中的电压源、电流源指的是理想电源（又称独立电源）。

(3) 电路中理想电压源、理想电流源有内阻吗？

解答：理想电源没有内阻存在。

理想电压源表征的是电压值由电压源决定，与其流过的电流值大小、方向无关的物理特性；理想电流源表征的是电流值大小、方向由电流源决定，与其电流源两端电压大小、方向无关的物理特性。

(4) 理想电压源的电压值大小、方向会随外接电路的性质变化而发生改变吗？

解答：不会改变。

理想电压源的电压值大小、方向由电压源决定，流过电压源的电流大小、方向则是由外接电路所决定，电压源的电压值与其流过的电流无关。

(5) 理想电流源的电流值大小、方向会随外接电路的性质变化而发生改变吗？

解答：不会改变。

理想电流源的电流值大小、方向由电流源决定，而电流源两端的电压大小、方向则是由外接电路所决定，电流源的电流值与其端电压无关。

(6) 电路中如果某个元件两端电压值为零，则该元件可用“开路”等效替代吗？

解答：不能。

当电路中任意两点发生短路时，则这两点间的电压为零。所以，该元件可用“短路”等效替代。

(7) 理想的开关元件可以看成特殊的电阻元件，当它断开时，其电阻值为多少？

解答：无穷大。

当电阻值为无穷大时，电阻电路中的电流为零，即电阻元件等效为开路。

六、特别提示

- ① 电阻元件反映消耗电能转换成其他形式能量物理特征的电路模型；
- ② 电压源反映一定的电压与其流过的电流大小、方向无关物理特征的电路模型；
- ③ 电流源反映一定的电流与其端电压大小、方向无关物理特征的电路模型；
- ④ 受控电源反映电路中某处的电压或电流能控制另一处的电压或电流物理特征的电路模型。

第三节 基尔霍夫定律

在电路分析中，电压和电流受到两类约束，即一类是对电路元件的电压和电流约束，另

一类是对电路的电压和电流约束。

电路元件的约束是指对元件自身特性的约束。例如，如图 1.27 所示线性电阻的约束是欧姆定律 $u = R i$ 。

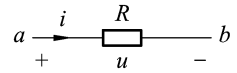


图 1.27 电阻

电路的约束是指对电路的回路电压、支路电流的约束。即对支路电流的约束有基尔霍夫电流定律，对回路电压的约束有基尔霍夫电压定律。

基尔霍夫定律与元件的性质无关，任何电路（线性电路和非线性电路）均满足基尔霍夫定律。

一、支路、结点和回路

在讨论基尔霍夫定律之前，必须先明确电路中的几个基本概念。下面以图 1.28 所示电路为例，讨论支路、结点和回路的基本概念。

1. 支路

在电路中没有分支的一段电路称为支路，支路中的电流称为支路电流。

支路的特点：同一支路中只会流过同一电流。例如，图 1.28 支路 BD 中，电阻 R_3 和电压源 U_{S3} 在同一支路上，即 R_3 与电压源 U_{S3} 流过同一电流 I_3 。

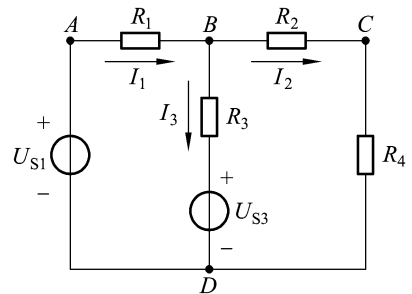


图 1.28 讨论基本概念电路图

2. 结点

电路中 3 条或 3 条以上支路的汇集点称为结点。例如，图 1.28 中有 2 个结点，即结点 B 和结点 D 。

注意：汇集点之间如果直接用导线连接，视为一个结点。

3. 回路

电路中由支路构成的闭合路径称为回路。如果回路中不包含其他支路，则称这样的回路为网孔。例如，图 1.28 中有 3 个回路，即 $ABDA$ 、 $BCDB$ 、 $ABCD$ ；3 个回路中有 2 个是网孔，即 $ABDA$ 、 $BCDB$ 。

二、基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是分析计算电路的基本定律，它分为基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

（一）基尔霍夫电流定律

1. 定律（简称 KCL）

KCL：在集中参数电路中，任何时刻，对任一结点，所有支路电流的代数和恒等于零。

基尔霍夫电流定律体现了电流的连续性。即在电路中，任意选择一个电路结点，则有

$$\sum i = 0 \quad (1.7)$$

例 1.7 电路如图 1.29 所示，试列出所有结点电流方程，并分析其独立性。

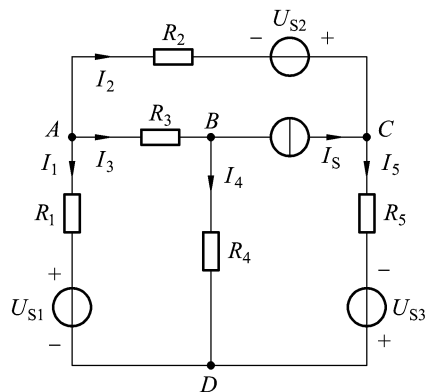


图 1.29 例 1.7 图

分析:(1)方程的独立性。图 1.29 所示电路中有 A 、 B 、 C 、 D 四个结点,可列出四个 KCL 方程。四个 KCL 方程中任选取三个 KCL 方程为独立方程,余下的一个 KCL 方程为非独立方程。(2)列 KCL 方程。定律中描述的是电流的“代数和”,所以在列 KCL 方程前,首先要设定流入结点的电流为“+”,则流出结点的电流为“-”。根据电路图中所设的各支路电流参考方向列 KCL 方程。

解 (1)列独立的 KCL 方程

$$\text{结点 } A \quad -I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$\text{结点 } B \quad I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

$$\text{结点 } C \quad I_5 + I_2 - I_5 = 0$$

$$\text{结点 } D \quad I_1 + I_4 + I_5 = 0$$

(2)证明 KCL 方程独立性

以结点 D 的 KCL 方程为例,证明非独立性,即将结点 A 、 B 、 C 的 KCL 方程相加,得

$$(-I_1 - I_2 - I_3) + (I_3 - I_4 - I_5) + (I_5 + I_2 - I_5) = 0$$

化简得

$$I_1 + I_4 + I_5 = 0$$

得证结点 D 的 KCL 方程为非独立方程。

结论:(1)在 n 个 KCL 方程中,任意一个方程均可用其余 $(n-1)$ 个方程的线性组合来表示,称 n 个 KCL 方程中存在一个非独立方程。(2)对于一个含有 n 个结点的电路,可列出 $(n-1)$ 个独立 KCL 方程。

2. KCL 的拓展与应用

(1)图 1.29 中结点 B 的 KCL 方程还可以写成

$$I_3 = I_4 + I_5$$

上式表明 KCL 也可以表述为:流出结点的支路电流等于流入该结点的支路电流,即

$$\sum i_{\text{出}} = \sum i_{\text{入}} \quad (1.8)$$

例 1.8 电路如图 1.30 所示,已知电压源 $U_S = 15 \text{ V}$,电流源 $I_S = 2 \text{ A}$,电阻 $R = 5 \Omega$,试求电压源中的电流 I_U 。

分析:因为,电压源 U_S 、电流源 I_S 和电阻 R 之间的连接方式为“并联”,所以,电阻 R 元件上的端电压 U_S 与电流 I_R 为关联参考方向,即 $I_R = \frac{U_S}{R}$;再由 $\sum i_{\text{出}} = \sum i_{\text{入}}$ 解得电流 I_U 。

解 根据 KCL 得

$$I_U = I_R - I_S = \frac{U_S}{R} - I_S = \frac{15 \text{ V}}{5 \Omega} - 2 \text{ A} = 1 \text{ A}$$

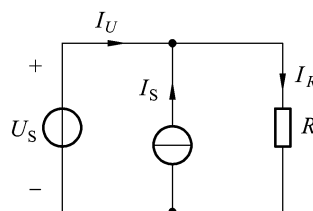


图 1.30 例 1.8 图

结论:本题解题过程中涉及 3 个知识点:一是各元件之间的连接方式;二是元件的伏安特性;三是电流定律 KCL。即综合应用元件的伏安特性、连接方式和 KCL 分析电路。

(2)KCL 除了用于结点,还可以推广到封闭面。即任何时刻,流入封闭面的各支路电流

的代数和恒等于零；或者说，流出封闭面的电流等于流入该封闭面的电流，又称为广义节点的 KCL。

例 1.9 电路如图 1.31 所示，已知电路中电流 $I_1=10\text{ A}$ ， $I_2=4\text{ A}$ 。试求电路中电流 I_3 。

分析：注意电路中各元件的电量参数都是未知量，所以直接应用元件的伏安特性是求不出电流 I_3 的。此时可在电路图 1.31 中作一个封闭面（如图 1.31 中虚线所示的封闭面），即电流 I_2 流入封闭面， I_1 、 I_3 为流出封闭面。根据广义节点的 KCL，设流入封闭面电流为“+”，则流出为“-”。

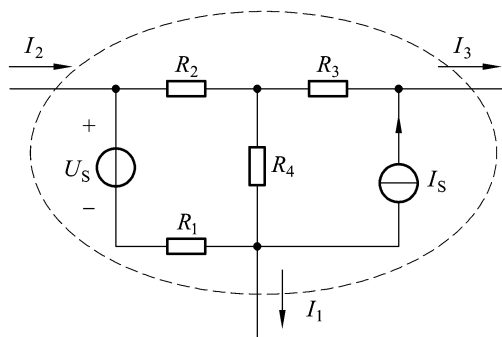


图 1.31 例 1.9 图

解 根据 KCL，得

$$-I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$I_3 = I_2 - I_1 = (4 - 10)\text{ A} = -6\text{ A}$$

结论：在利用广义节点列 KCL 方程时，注意“封闭面”的概念。同理，也可直接按“流出封闭面的电流等于流入该封闭面的电流”列写 KCL 方程，如可直接写出： $I_2 = I_1 + I_3$ 。

(二) 基尔霍夫电压定律

1. 定律（简称 KVL）

KVL：在集中参数电路中，任何时刻，沿着任一回路，所有电压的代数和恒等于零。

基尔霍夫电压定律体现了电压的单值性。即在电路中，任意地选择一个回路，沿着一个绕行方向写出其回路的电压方程为

$$\sum u = 0 \quad (1.9)$$

例 1.10 试列出如图 1.32 所示电路回路 1、2、3 的 KVL 方程。

分析：图 1.32 所示回路的电压降绕行方向均以顺时针方向，则可沿着这个设定的顺时针绕行方向列 KVL 方程。

解 列 KVL 方程：

回路 1 $-U_{S1} - R_1 I_1 + R_3 I_3 + R_4 I_4 = 0$

回路 2 $-U + R_5 I_5 - U_{S3} - R_4 I_4 = 0$

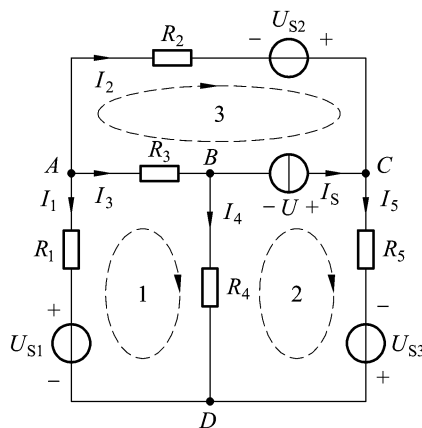


图 1.32 例 1.10 图

回路 3 $R_2 I_2 - U_{S2} + U - R_3 I_3 = 0$

结论：在写 KVL 方程时，当元件上端电压参考方向与所设的回路绕行方向一致时，KVL 方程中取正号，否则取负号。

2. 注意

在写 KVL 方程时，回路绕行方向和电压参考方向都可以任意假设，但是一旦确定，在整个分析过程中就不能更改。

例 1.11 电路如图 1.33 所示，已知电阻 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 2 \Omega$ ，电压源 $U_{S1} = U_{S2} = 10 \text{ V}$ ，电流源 $I_S = 1 \text{ A}$ ，试求开路电压 U_O 和电压 U_{AB} 。

分析：(1) 由于电路 E 、 F 端为开路，所以电阻 R_2 、 R_4 中的电流为零，流过电阻 R_1 、 R_3 的电流为 I_S ， A 、 B 两点的电压 U_{AB} 等于电阻 R_1 端电压和电压源 U_{S1} 代数和。(2) 由于电流源 I_S 的端电压为 $U_{AC} = U_{AB} + R_3 I_S$ ，则开路电压 U_O 等于 U_{AC} 与电压源 U_{S2} 代数和。

解 根据 KVL 方程有

$$U_{AB} = I_S R_1 + U_{S1} = (1 \times 2 + 10) \text{ V} = 12 \text{ V}$$

$$U_O = U_{AB} + R_3 I_S + U_{S2} = (12 + 2 \times 1 + 10) \text{ V} = 24 \text{ V}$$

结论：(1) 任意两点间的电压与所计算的路线无关。

(2) 由开路电压和其他支路电压组成的回路（又称为虚拟回路），仍然可以应用 KVL 进行分析。即 KVL 不仅适用于闭合回路，也可应用于虚拟回路。

例 1.12 电路如图 1.34 所示，试求电路中电流 I_1 、 I_2 和电压 U 。

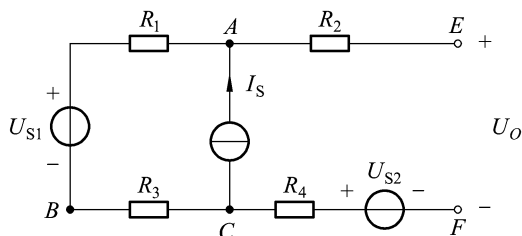


图 1.33 例 1.11 图

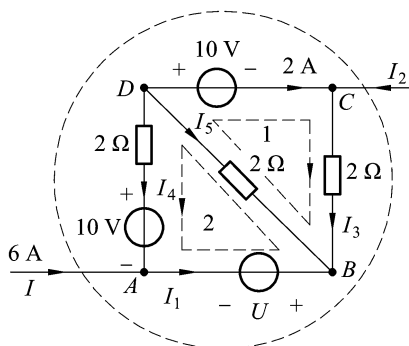


图 1.34 例 1.12 图

分析：先在图 1.34 中作一个封闭面（虚线圆）构成广义结点，由 KCL 解得 I_2 ；由结点 C 解得 I_3 ；由回路 1 列 KVL 方程解得电压 $U_{DB} = U_{DC} + U_{CB}$ ；根据电阻元件的伏安特性，解得电流 I_5 ；根据 KCL，由结点 D 解得电流 I_4 ，由结点 B 解得电流 I_1 ；由回路 2 列 KVL 方程解得电压 U 。

解

$$I_2 = -I = -6 \text{ A}$$

$$I_3 = I_2 + 2 \text{ A} = (-6 + 2) \text{ A} = -4 \text{ A}$$

$$U_{DB} = 10 + 2 I_3 = [10 + 2 \times (-4)] \text{ V} = 2 \text{ V}$$

$$I_5 = \frac{U_{DB}}{2} = \frac{2}{2} \text{ A} = 1 \text{ A}$$

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

$$I_1 = -(I_3 + I_5) = [-(-4 + 1)] \text{ A} = 3 \text{ A}$$

$$U = -U_{DB} + 2I_4 + 10 \text{ V} = [-2 + 2 \times (-3) + 10] \text{ V} = 2 \text{ V}$$

结论：电路中各个支路（或元件）电压、电流受到两类约束，即元件特性和基尔霍夫定律的约束。

三、常见问题讨论

(1) KCL 是针对电路中的回路电流展开讨论的吗？

解答：不是。

KCL 是针对电路中的结点电流展开讨论的。

(2) KVL 是针对电路中的回路电流展开讨论的吗？

解答：不是。

KVL 是针对电路中的回路电压展开讨论的。

(3) 列 KCL 方程时应注意什么？

解答：注意各支路电流的参考方向。

如果设流入结点电流为“正”，则流出结点电流为“负”，列结点上连接的所有支路电流代数和为零的 KCL 方程。

(4) 一个结点上可列出的 KCL 方程有几个？

解答：一个。

每个结点对应的 KCL 方程是唯一的。

(5) 列 KVL 方程时应注意什么？

解答：注意各支路电压参考方向与回路绕行方向的关系。

当支路电压的参考方向与回路绕行方向一致时，KVL 方程中取正号，否则取负号。

(6) 一个回路中可列出的 KVL 方程有几个？

解答：一个。

每个回路对应的 KVL 方程是唯一的。

(7) 如果电路中有 n 个结点，则可列出多少个 KCL 独立方程？

解答：可列出 $(n-1)$ 个独立的 KCL 方程。

对于一个含有 n 个结点的电路，可列出 $(n-1)$ 个独立 KCL 方程。

(8) 如果电路出现开路，则由开路与其他支路所构成的“回路”能应用 KVL 进行分析计算吗？

解答：可以。

由开路电压和其他支路电压组成的回路，仍然可以应用 KVL 进行分析，即用“开路电压”表示“开路支路”的电压特性。

四、特别提示

列 KCL、KVL 方程时注意电流、电压的参考方向。