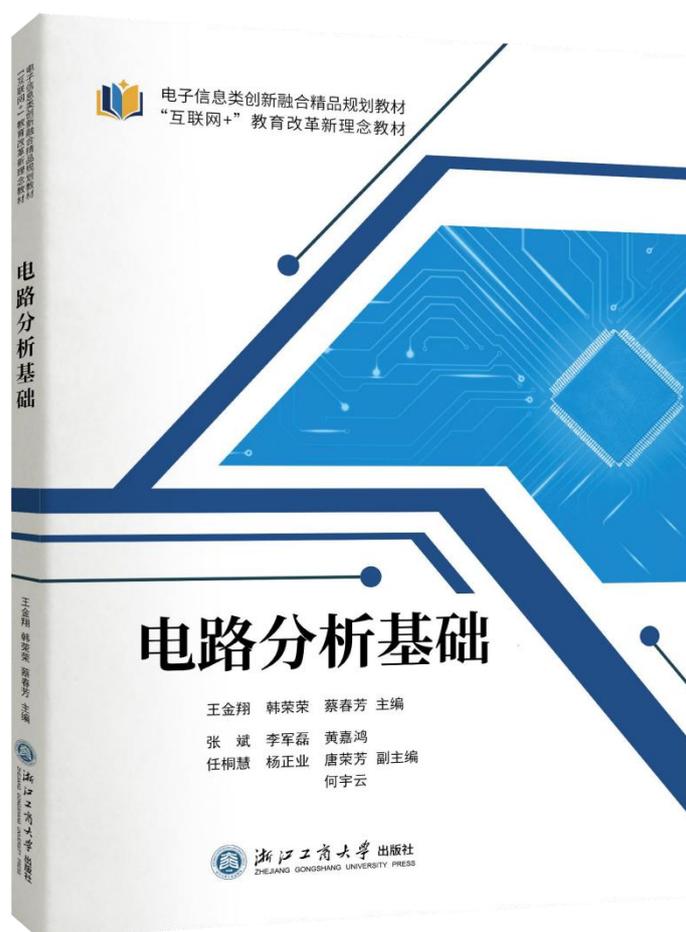


电路分析基础



类目：电子信息类

书名：电路分析基础

主编：王金翔 韩荣荣 蔡春芳

出版社：浙江工商大学社

开本：大 16 开

书号：978-7-5178-5457-9

使用层次：通用

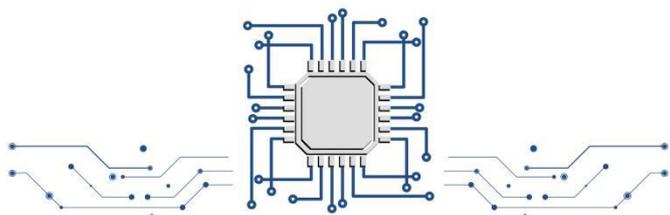
出版时间：2023 年 11 月

定价：48.00 元

印刷方式：双色

是否有资源：是

策划编辑: 谭娟娟
责任编辑: 李兰存
封面设计: 旗语书装



“互联网+”教育改革创新理念教材
电子信息类创新融合精品规划教材



电子信息类创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革创新理念教材

电路分析基础

电路分析基础

DIANLU FENXI JICHU



定价: 48.00元

王金翔 韩荣荣 蔡春芳 主编



浙江工商大学出版社
ZHEJIANG GONGSHANG UNIVERSITY PRESS

电路分析基础

王金翔 韩荣荣 蔡春芳 主编

张斌 李军磊 黄嘉鸿
任桐慧 杨正业 唐荣芳 副主编
何宇云



浙江工商大学出版社
ZHEJIANG GONGSHANG UNIVERSITY PRESS



电子信息类创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革创新理念教材

电路分析基础

王金翔 韩荣荣 蔡春芳 主编

张 斌 李军磊 黄嘉鸿

任桐慧 杨正业 唐荣芳 副主编

何宇云



浙江工商大学出版社
ZHEJIANG GONGSHANG UNIVERSITY PRESS

· 杭州 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析基础 / 王金翔, 韩荣荣, 蔡春芳主编. —
杭州: 浙江工商大学出版社, 2023. 11
ISBN 978-7-5178-5457-9

I. ①电… II. ①王… ②韩… ③蔡… III. ①电路分
析 IV. ①TM133

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 066177 号

电路分析基础

DIANLU FENXI JICHU

王金翔 韩荣荣 蔡春芳 主编

张 斌 李军磊 黄嘉鸿 任桐慧 杨正业 唐荣芳 何宇云 副主编

策划编辑 谭娟娟

责任编辑 李兰存

封面设计 旗语书装

出版发行 浙江工商大学出版社

(杭州市教工路 198 号 邮政编码 310012)

(E-mail: zjgsupress@163.com)

(网址: <http://www.zjgsupress.com>)

电话: 0571-88904980, 88831806 (传真)

排 版 天利排版

印 刷 唐山唐文印刷有限公司

开 本 880mm×1230mm 1/16

印 张 13.5

字 数 343 千

版 印 次 2023 年 11 月第 1 版 2023 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5178-5457-9

定 价 48.00 元

版权所有 侵权必究

如发现印装质量问题, 影响阅读, 请和营销与发行中心联系调换

联系电话 0571-88904970

前 言

本书结合高等职业教育的办学定位、相关专业的培养目标和就业岗位群的实际需要，对“电路分析基础”课程的内容进行整合，协调基础理论知识学习和职业技能培养之间的关系，使学生通过对课程的学习，既掌握基本的电路理论知识，又获得实际的操作技能。

本书的目的是提高学生运用所学的电路知识解决电路问题的能力，提高学生的逻辑推理、思辨和分析等理性思维能力，为学生学习专业课程奠定坚实的基础。

在内容的选取上，本书注重与学生已修课程的衔接，基于“必需和够用”为原则，将理论讲授与实际应用有机结合。内容安排合理，层次清晰，循序渐进。各章中的应用实例突出知识的应用，方便教师通过多种教学手段和教学方法传授知识，集“教、学、做”于一体。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，望各位专家和读者朋友批评指正。

编 者
2023 年 7 月

目 录

1 电路的基本概念和基本定律	(1)
1.1 电路和电路模型	(2)
1.2 电路的主要物理量	(5)
1.3 电阻元件	(12)
1.4 电压源与电流源	(13)
1.5 基尔霍夫定律	(20)
1.6 电路中电位的计算	(27)
小 结	(30)
习 题	(31)
2 电路基本分析方法	(38)
2.1 支路电流法	(38)
2.2 回路电流法	(40)
2.3 结点电压法	(43)
2.4 叠加定理	(46)
2.5 戴维南定理	(49)
小 结	(51)
习 题	(51)
3 正弦交流电路及应用	(54)
3.1 正弦交流电的基本概念	(55)
3.2 正弦交流电的相量表示法	(61)
3.3 单一元件的正弦交流电路	(65)
3.4 RLC 交流电路的分析	(72)
3.5 RLC 谐振电路的分析	(76)
3.6 正弦交流电路中的功率及功率因数	(82)



小 结	(86)
习 题	(89)
4 三相电路	(97)
4.1 三相电源	(97)
4.2 三相负载	(100)
4.3 三相电路的功率	(108)
小 结	(110)
习 题	(111)
5 耦合电路和变压器	(114)
5.1 耦合电感电路基础	(114)
5.2 互感电路的分析方法	(120)
5.3 空心变压器	(123)
5.4 理想变压器	(125)
5.5 全耦合变压器	(128)
小 结	(129)
习 题	(130)
6 线性电路的瞬态过程	(133)
6.1 瞬态过程及换路定律	(133)
6.2 RC 电路的瞬态过程	(137)
6.3 RL 电路的瞬态过程	(140)
6.4 一阶电路的三要素法	(143)
小 结	(147)
习 题	(148)
7 非正弦周期电流电路	(152)
7.1 非正弦周期信号	(152)
7.2 谐波分析和频谱	(154)
7.3 非正弦周期量的有效值、平均值和平均功率	(158)
7.4 非正弦周期信号作用下的线性电路分析	(161)
小 结	(163)
习 题	(164)



8 电路基础实验与实训	(168)
8.1 电路基础实验综述	(168)
8.2 基础实验	(170)
8.3 实 训	(196)
参考文献	(207)

电能之所以获得广泛应用，是因为其具有转换方便、便于传输和控制等特点。

电能可以由水能、热能、原子能、化学能（电池）、光能（光电池）及风能（风力发电）等转换而得；同时电能也可以转换为其他所需的能量形态（如热能、光能、机械能等）。电能能够以近 $300\ 000\ \text{km/s}$ 的速度快速地输送到远方，而且输电设备简单，输电效率高。只要断开或闭合开关即可完成操作，控制方便，利用电能可以达到高度自动化。电能污染少，有利于环境保护。

电能是现代生产、日常生活、国防技术和科学研究等各个方面得到了广泛应用。电能的应用离不开电路，实际电路的功能各异，繁简不一，结构形式多样，但其内在的规律。学生通过学习掌握电路的基本理论、基本规律和基本技能，学会分析电路的基本方法，能够为进一步学习后续专业课程和将来从事实际工程技术工作奠定坚实的基础。

学习目标

- (1) 了解电路的组成及作用；理解电路元件、电路模型、电路的三种状态；了解电路故障危害及防范措施。
- (2) 认识常用电路元件符号，能绘制简单的电气原理图。
- (3) 理解电流、电压、电位、电动势、电能的概念及相互关系；掌握电路中电流的参考方向、电压的参考极性及其关联参考方向。
- (4) 了解电阻参数、电阻元件的定义、线性电阻和非线性电阻；掌握电阻元件电压与电流的关系，即伏安关系。
- (5) 掌握电压源和电流源的电压与电流关系，以及实际电压源和实际电流源模型的等效变换。
- (6) 了解支路、节点、回路、网孔的定义；理解基尔霍夫电流定律和电压定律；掌握应用 KCL 列写电路的节点方程和应用 KVL 列写回路的电压方程的方法。
- (7) 掌握电路中各点电位的计算方法。

能力目标

- (1) 具有观察细微事物的能力，辩证地看待事物的发展。
- (2) 具有安全用电的能力，了解不安全用电造成的严重后果。



1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路的组成及作用



电路的组成及作用

1.1.1.1 电路的组成

电路是由用电设备或元器件（负载）与供电设备（电源）通过导线按一定方式连接起来而构成的，提供给电荷流动的通路；简而言之，电路就是电流流经的路径。一般把结构复杂的电路称为网络。电路和网络这两个术语是通用的。

一般来说，不管电路如何组成，都可分为三个部分：电源；消耗或转换电能的负载；连接和控制电源与负载的导线、开关等中间环节。这三个部分在任何电路中都是不可缺少的。

电路提供了电荷流动的通路，电荷携带着电能在电路中流动，从电源带走电能，而在负载中又消耗或转换电能，因此电路的工作伴随着能量的传输和转换。

1.1.1.2 电路的作用

电路的基本作用有两个：一是实现电能的生产、输送、分配和转换；二是实现信号的传递、处理和保护，如扩音机电路、计算机电路等。

(1) 进行电能的转换、传输和分配。强电系统的电路作用是实现电能的生产、传输和转换。它主要由发电设备、输电设备及用电设备组成，如图 1.1 所示。发电机是发电设备（电源），是产生电能的设备。输电线及变压器是输电设备，它起传输和分配电能的作用。电灯、电动机及其他用电器等是用电设备（负载），是取用电能的设备，各种用电负载将电能转换为其他形式的能量。强电系统的各种电路通常电压较高，电流较大。对这类电路的主要要求是传送功率大、效率高。

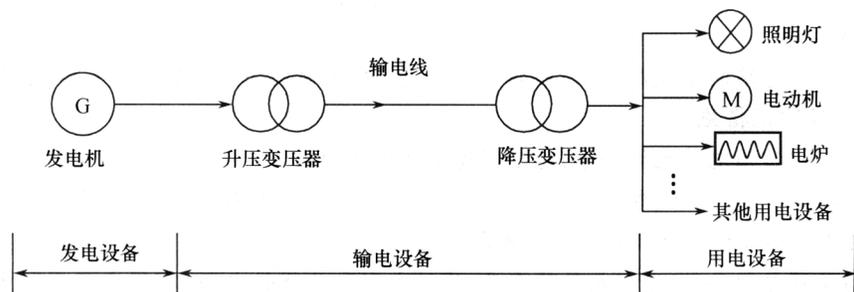


图 1.1 强电系统的电路示意图

(2) 进行信号的传递和处理。弱电系统的电路作用是传输和处理信号。它主要由信号源、中间环节及负载组成，如图 1.2 所示。传声器是输出电信号的设备，称为信号源。扬声器是接收和转换信号的设备，称为负载。输入级、中间级、功放级是处理信号的设备，称为中间环节。弱电系统的



各种电路一般电压较低，电流较小，是精密的信号传输系统。对这类电路的主要要求是抗干扰能力强、电信号在传输过程中不失真。

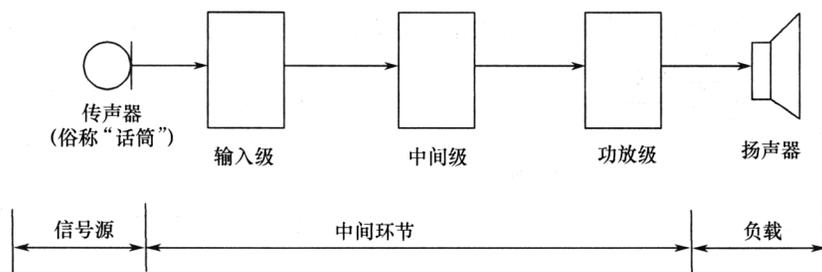


图 1.2 弱电系统的电路示意图（以扩音机电路为例）

电路的分类方法有很多种，按照电路的用途将电路分为电力电路和信号电路；按电流的性质将电路分为直流电路和交流电路；按电压的高低将电路分为高压电路和低压电路；按电路的结构将电路分为有分支电路和无分支电路；按电路的范围将电路分为内电路和外电路。

1.1.2 理想元件和电路模型

在对电路进行研究分析和计算时，并不注重电路中电气设备和元器件的具体结构，而是对它们的物理特性进行分析、抽象使其理想化（或模型化），将其主要性能用一些具有特定化、理想化的元件（称为理想电路元件，即理想元件）重构出来。

1.1.2.1 理想元件

理想元件是实际电气器件主要电磁特性的科学抽象。在一定条件下，突出实际电路元件的主要电磁性质，忽略其次要性质，近似地用一个足以表征其主要电磁性能的理想电路元件表示该实际电路元件。例如，电阻器在频率不太高的时候所产生的感抗比电阻小得多，分析、计算电路时可以突出其电阻性质，忽略其电感性质，近似地用理想电阻元件来表示电阻器的电磁性质。

基本理想元件有两大类：不产生能量的无源元件；为电路提供能量的有源元件。无源元件包括表示实际电路中消耗电能特性的理想电阻元件 R 、表示实际电路中建立磁场特性的理想电感元件 L 和表示实际电路中建立电场特性的理想电容元件 C ；有源元件包括理想电压源和理想电流源。理想电路元件用规定的文字符号与图形符号来表示，如图 1.3 所示。理想导线是阻值为 0 的电阻元件，用线段表示。

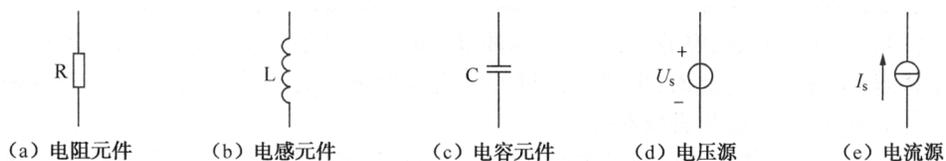


图 1.3 理想电路元件的文字符号与图形符号



1.1.2.2 电路模型

利用理想元件重构出来的电路，称为原电路的电路模型，即用理想电路元件及其组合代替实际电路元件，用特定符号代表理想元件，用特定符号绘制的电路图代替实际电路图的连接关系及功能，就构成实际电路的电路模型。电路模型反映了原电路工作的主要特性。电路模型中构成电路的不是千差万别的各种实际元件，而是数量有限的理想元件，有利于研究、设计和交流。构成电路模型的理想元件数量应尽可能少，否则，电路模型将失去其存在的价值。

以手电筒电路为例，其实际电路和电路模型分别如图 1.4 (a) 和图 1.4 (b) 所示。干电池由电压源 U_s 及内阻 R_0 的组合表示，电路中的开关用开关模型 S 表示，照明灯用电阻元件 R 表示。

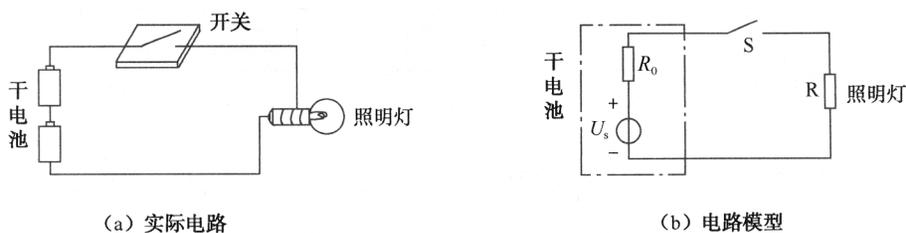


图 1.4 手电筒电路

根据对电路模型的分析所得出的结论，有着广泛的实际指导意义。若无特别说明，一般说电路元件均指理想元件，电路均指电路模型，并用由理想元件构成的电路模型来阐述电路的基本规律，分析、讲解计算电路的基本方法。

1.1.3 电路的工作状态

电路的工作状态包括负载状态、开路状态和短路状态三种，如图 1.5 所示。

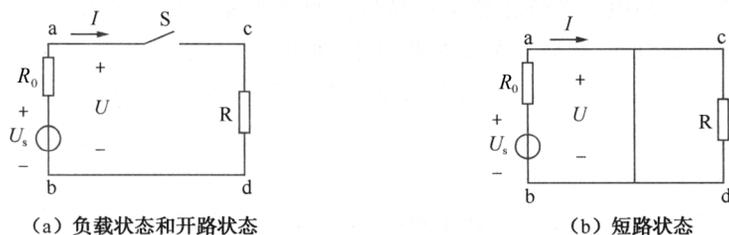


图 1.5 电路的三种工作状态

1.1.3.1 负载状态

在图 1.5 (a) 中，开关 S 闭合，电路构成一个完整的闭合回路，电路中有电流流过，该状态称为电路的有载状态，又称负载状态。该工作状态有如下三种情况。

(1) 额定工作状态：电源、负载和中间环节都能长期处于安全可靠、合理运行的工作状态，又称满载。此时，电路中流过的电流称为额定电流，能保证电气设备有相对较长的寿命（电气寿命和机械寿命）。

(2) 轻载状态：指电路中流过的电流小于额定电流的工作状态。该状态下电气设备安全，但没



有得到充分利用。

(3) 过载状态：指电路中流过的电流大于额定电流的工作状态。短时间内少量的过载不会立即导致电气设备损坏，但长时间的严重过载可能大大缩短电气设备的使用寿命，甚至使电气设备因过热而烧损。

1.1.3.2 开路状态

在图 1.5 (a) 中，若开关 S 正常断开或电路的某处因故障断开，电路未构成闭合回路，电路中的电流为 0，该状态称为电路的开路状态。该工作状态有如下两种情况。

(1) 空载状态：指电路正常，人为控制开关 S 断开的状态。

(2) 断路状态：指开关 S 闭合，电路的某处为非正常断开的状态。该状态电路无电流流过，不能正常工作，如实际电路中的断线、虚焊等。

1.1.3.3 短路状态

在图 1.5 (b) 中，当电路的一部分被电阻忽略不计的导线连接时，这部分电路处于短路状态。在该状态下，电路短路的部分电压为 0，电路中流过的电流称为短路电流，其值可能达到额定电流的几倍甚至几十倍，从而使电气设备因过热而烧损，严重时可能引起火灾。

显然，电路最理想的工作状态是额定工作状态。过载状态、断路状态和短路状态都是电路的故障状态。其中，短路是电路最严重的故障，人们往往在电路中接入熔断器、自动开关、断路器等保护设备，当电路发生故障时，这些设备自动断开故障电路，避免短路可能造成的危害。

1.2 电路的主要物理量

电路的主要物理量有电流、电压、电功率和电能等。

1.2.1 电流及参考方向

1.2.1.1 电流的基本概念

带电粒子（电子、离子等）在电源作用下有规律地定向运动形成电流。金属导体中的带电粒子是自由电子，半导体中的带电粒子是自由电子和空穴，电解液中的带电粒子是正、负离子。

电流是电路的一个基本物理量，它的大小用电流强度来衡量。电流强度在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电荷量。

电流强度简称电流，用小写字母 i 表示。其数学表达式为：

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



大小和方向都不随时间变化的电流称为稳恒电流，简称直流（Direct Current, DC），用大写字母 I 表示。此时上式改写为：

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.2)$$

大小和方向随时间呈周期性变化的电流称为周期电流。若周期电流在一个周期内的算术平均值等于 0，则称为交变电流，简称交流（Alternating Current, AC）。通常所说的交流电多指正弦交流电，它随时间按正弦规律变化，用小写字母 i 表示（详见第 3 章）。

电流的国际单位是安培，简称安，符号是 A。常用的单位还有千安（kA）、毫安（mA）和微安（ μA ），它们之间的关系为：

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$$

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

1.2.1.2 电流的参考方向

在物理课程的学习过程中，电流的正方向规定为正电荷定向移动的方向。在简单直流电路中，电流方向容易判断，但在分析、计算较为复杂的直流电路时，往往难以判断电流的实际方向。而在交流电路中电流的实际方向随时间不断改变，在电路图中很难且也没有必要标出它的实际方向。为此，在分析、计算电路时，可任意假设某一方向为电流的正方向，这个假定的方向称为电流的参考方向。

在电路图中，电流的参考方向有两种表示方式，一是用带箭头的实线表示，如图 1.6 (a) 所示；二是用双下标的变量表示，如图 1.6 (b) 所示的电流 I ，可用符号 I_{ab} 表示电流的参考方向，即从 a 流向 b。

电流的实际方向用带箭头的虚线表示，如图 1.6 所示。当电流的实际方向与参考方向相同时，其值为正；当电流的实际方向与参考方向相反时，其值为负。

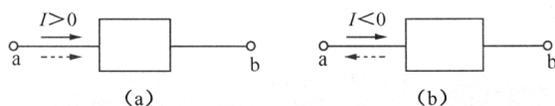


图 1.6 电流的参考方向

例 1.1 请根据图 1.7 (a) 中电流的参考方向及数值，标出电流的实际方向。

解：由已知条件知，电流 $I = 5 \text{ A} > 0$ ，数值“5”说明电流的大小为 5 A。

因 $I > 0$ ，说明其值为正，即实际方向与参考方向相同。

故电流的实际方向为由左指向右，如图 1.7 (b) 虚线所示。

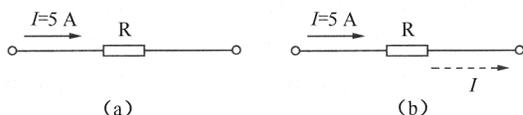


图 1.7 电流的参考方向、实际方向及数值



电流是既有大小又有方向的物理量（注意：电流并不是空间矢量）。只有当电流的参考方向选定以后，电流的正负才有意义。在参考方向一定的情况下，数值表示电流的大小，正、负表示电流的方向。离开参考方向来谈电流的正、负是没有意义的。

1.2.2 电位、电压及电动势

1.2.2.1 电位

电位又称电势，是衡量电荷在电路中某点具有的能量大小的物理量。在电场中的某点，电荷所具有的电势能跟它的电荷量之比是一个常数，称为该点的电位（电势）。即电路中某点的电位在数值上等于正电荷在该点所具有的能量（电势能）与电荷所带的电荷量之比。电位是由电场本身的性质决定的，与电荷大小以及电荷存在与否无关。电位用字母 U 加单下标表示。电位的定义式为：

$$U_A = \frac{\epsilon_A}{q}。式中，\epsilon_A 为电势能；q 为电荷量。$$

在电路中选定某一点 O 为电位参考点，就是规定该点的电位为 0 ，即 $U_O = 0$ 。电场中某点相对于参考点 O 的电位之差，称为该点的电位（这是电位的另一定义）。

电位在数值上等于电场力将单位正电荷由电场中某点 A 移到参考点 O 时所做的功。其数学表达式为： $U_A = U_{AO} = \frac{W_{AO}}{q}$ 。

电位只有高低，没有方向。

电位参考点是在分析电路时事先假定的，又称零电位点。在工程中常选大地作为电位参考点，即认为大地电位为 0 。在电子电路中，电路不一定接地，通常以金属底板或电路的公共点（即电子线路中的地线）为电位参考点，规定参考点的电位为 0 。高于参考点的电位是正电位，低于参考点的电位是负电位，可见电位有正、负之分。在电路中电位参考点通常用符号“ \perp ”表示。

当参考点变化时，电路中各点的电位随之变化。

电位的国际单位是伏特，简称伏，符号是 V 。常用的电位单位还有千伏（ kV ）、毫伏（ mV ）和微伏（ μV ），它们之间的关系为：

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$$

$$1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$$

$$1 \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}$$

1.2.2.2 电压

电压是电路的另一个重要的物理量，它是衡量电场力做功能力的物理量。如图 1.8 所示，设 a 、 b 分别是电源的正极和负极，则两极间产生电场，其方向由 a 指向 b 。如果用导线连接 a 、 b ，电场力将做功，使正电荷从 a 极板沿导线移至 b 极板。

电场力把单位正电荷从电路中的 a 点移至 b 点所做的功称为 a 、 b 两点间的电压。设电场力把正电荷 dq 从 a 点移动到 b 点所做的功为 $d\omega$ ，则 a 、 b 两点间的电压为：



$$u = \frac{d\omega}{dq} \quad (1.3)$$

大小和方向都不随时间变化的电压称为直流电压，用大写字母 U 表示。此时式 (1.3) 改写为：

$$U = \frac{W}{q} \quad (1.4)$$

大小和方向随时间变化的电压称为交流电压，用小写字母 u 表示。

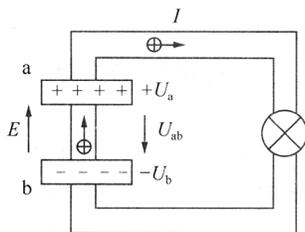


图 1.8 电动势与电压

1.2.2.3 电动势

在图 1.8 中，在电场力的作用下，正电荷从电源正极 a 端沿着导线移动到了电源负极 b 端。为了维持导线中的电流连续并保持恒定，必须借助非静电力，克服电场力的作用，将负极 b 端上的正电荷经过电源内部移向正极 a 端，这种非静电力又称电源力。电源力克服电场力所做的功使电荷获得了能量，把其他形式的能量（如电池的化学能、发电机的电磁能等）转换为电能。

在电源内部，电源力把单位正电荷从电源负极移动到电源正极所做的功，称为电动势，用大写字母 E 表示。

电动势的方向规定为从电源的负极指向电源的正极，在图中可用箭头或“+”“-”表示。电动势的单位与电压相同。

人们把电源设备内部的电路称为内电路；电源设备以外的电路称为外电路。在内电路中，正电荷在电源力的作用下从低电位移至高电位，并获得电能；在外电路中，正电荷在电场力的作用下从高电位移至低电位，并释放电能。

1.2.2.4 电压的参考方向

电压的实际方向是正电荷在电场中受电场力作用而移动的方向，即使正电荷电能减少的方向。与电流分析类似，在分析、计算电路时，也要预先假设电压的参考方向（又称参考极性）。

在电路图中，电压的参考极性有三种表示方式，如图 1.9 所示。



图 1.9 电压的参考方向

(1) 用带箭头的实线表示。

(2) 用双下标表示，图 1.9 (a) 中的电压 U_{ab} 表示电压的参考方向为 a 指向 b ，图 1.9 (b) 中



的电压 U_{ba} 表示电压的参考方向为 b 指向 a, 显然, $U_{ab} = -U_{ba}$ 。

(3) 用“+”“-”号表示, 分别称为参考正极和参考负极。

电压的实际方向用带箭头的虚线表示, 如图 1.9 所示。当电压的实际方向与参考方向相同时, 其值为正; 反之, 其值为负。同理, 离开参考方向来谈电压的正、负是没有意义的。

在电路中, 若选择某点 O 为电位参考点, 则电路中 a、b 两点间的电压为:

$$U_{ab} = U_{aO} + U_{Ob} = U_{aO} - U_{bO} = U_a - U_b \quad (1.5)$$

电路中某两点之间的电压即为它们之间的电位差。当参考点变化时, 电路中各点的电位随之变化, 但电路中任意两点间的电压不会改变, 即电压与参考点的选择无关。 $U_{ab} > 0$, $U_a > U_b$; $U_{ab} < 0$, $U_a < U_b$ 。

例 1.2 请根据图 1.10 (a) 中电压的参考方向及数值, 标出电压的实际方向。

解: 由已知条件知, 电压 $U = -10 \text{ V} < 0$, 数值“10”说明电压的大小为 10 V。

因 $U < 0$, 说明其值为负, 即实际方向与参考方向相反。故电压的实际方向为由下指向上, 如图 1.10 (b) 虚线所示。



图 1.10 电压的参考方向、实际方向及数值

1.2.2.5 电压与电流参考方向的关系

电压、电流的参考方向原则上可以分别任意假定, 但为了分析、计算的方便, 常采用关联参考方向。关联参考方向是指电压和电流的参考方向一致, 即电流的流入端对应的是电压的参考正端, 如图 1.11 (a) 所示; 反之, 称为非关联参考方向, 如图 1.11 (b) 所示。

当选择电压、电流的参考方向关联时, 在电路图中可以只标出二者之一的参考方向; 反之, 当只标出了一个参考方向时, 可认为电压、电流为关联参考方向, 如图 1.12 所示。

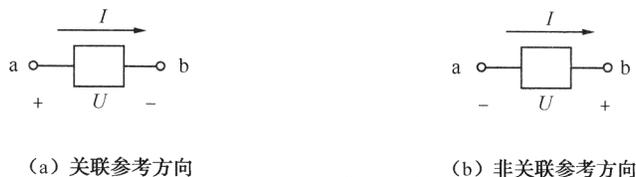


图 1.11 电压与电流参考方向的关系



图 1.12 关联参考方向



1.2.3 电功率及电能

1.2.3.1 电功率

电场力在单位时间内所做的功称为电功率，简称功率，用小写字母 p 表示。设电场力在 dt 时间内做的功为 $d\omega$ ，则：

$$p = \frac{d\omega}{dt} \quad (1.6)$$

功率的国际单位是瓦特，简称瓦，符号是 W。常用的功率单位还有千瓦 (kW)、毫瓦 (mW)，它们之间的关系为：

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$$

$$1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$$

在电路中，人们更关注的是功率与电压和电流之间的关系。根据电压和电流的定义，即 $u = \frac{d\omega}{dq}$ ， $i = \frac{dq}{dt}$ 可推出功率与电压和电流之间的公式为：

$$p = ui \quad (1.7)$$

式 (1.7) 中，如果元件的电压和电流是非关联参考方向， ui 前加负号，即 $p = -ui$ 。

若是稳恒直流电路，则电压、电流、功率均为恒定值，用大写字母表示，即：

$$P = \pm UI \quad (1.8)$$

根据式 (1.7) 和式 (1.8) 计算结果的正、负，可以判断元件是电源还是负载。如果计算结果 $P > 0$ ，表示元件吸收功率（或消耗功率），起负载的作用；反之，表示元件释放功率（或提供功率、产生功率），起电源的作用。

根据能量守恒定律，电路中各元件产生的功率与元件消耗的功率相等。换句话说，可以用功率平衡关系验算电路中各元件的功率计算是否正确。

例 1.3 计算图 1.13 中各元件的功率，并指出是吸收功率还是释放功率，起电源作用还是负载作用。

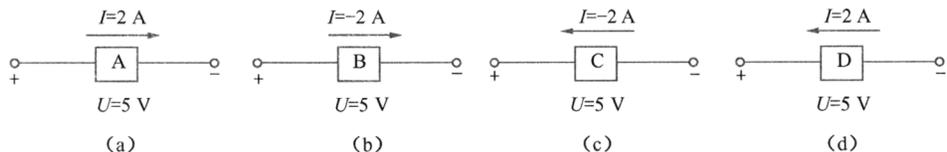


图 1.13 电路

解：在图 1.13 (a) 中，电压 U 与电流 I 是关联参考方向，故 $P = +UI = 5 \times 2 \text{ W} = 10 \text{ W}$ 。 $P > 0$ ，说明元件 A 吸收功率，起负载作用。

在图 1.13 (b) 中，电压 U 与电流 I 是关联参考方向，故 $P = +UI = 5 \times (-2) \text{ W} = -10 \text{ W}$ 。 $P < 0$ ，说明元件 B 释放功率，起电源作用。



在图 1.13 (c) 中, 电压 U 与电流 I 是非关联参考方向, 故 $P = -UI = -5 \times (-2) \text{ W} = 10 \text{ W}$ 。
 $P > 0$, 说明元件 C 吸收功率, 起负载作用。

在图 1.13 (d) 中, 电压 U 与电流 I 是非关联参考方向, 故 $P = -UI = -5 \times 2 \text{ W} = -10 \text{ W}$ 。
 $P < 0$, 说明元件 D 释放功率, 起电源作用。

例 1.4 如图 1.14 所示, 已知 $I = 1 \text{ A}$, $U_1 = 10 \text{ V}$, $U_2 = 6 \text{ V}$, $U_3 = 4 \text{ V}$ 。
 求各元件的功率, 并分析电路的功率平衡关系。

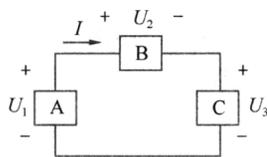


图 1.14 电路

解: 由已知条件知, 元件 A 的电压和电流为非关联参考方向, 所以
 $P_1 = -U_1 I = -10 \times 1 \text{ W} = -10 \text{ W}$ 。

$P_1 < 0$, 说明元件 A 释放功率, 起电源作用。

元件 B、C 的电压和电流为关联参考方向, 所以 $P_2 = U_2 I = 6 \times 1 \text{ W} = 6 \text{ W}$, $P_3 = U_3 I = 4 \times 1 \text{ W} = 4 \text{ W}$ 。

P_2 、 P_3 均为正值, 说明元件 B、C 均吸收功率, 起负载作用。各元件的功率之和为 $P_1 + P_2 + P_3 = (-10 + 6 + 4) \text{ W} = 0 \text{ W}$ 。

计算结果表明, 该电路中元件释放的功率与元件吸收的功率相等, 符合功率平衡关系。

1.2.3.2 电能

根据电功率的定义, 若电场力在 dt 时间内做的功为 $d\omega$, 则 $d\omega = p dt = u i dt$ 。

若通电时间 $\Delta t = t - t_0$, 则在此时间内消耗的电能总共为 $\Delta\omega = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t u i dt$ 。

在直流电路中, 电压、电流、功率均为恒定值, 电路消耗的电能 $W = P (t - t_0) = UI (t - t_0)$ 。

当选择 $t_0 = 0$ 时, 电能公式为:

$$W = Pt = UI t \quad (1.9)$$

电能的单位与功或能量的单位相同, 其国际单位均为焦耳 (即瓦·秒), 简称焦, 符号是 J, $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$ 。

实际用于电能计量的电能表以千瓦·时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) 为单位。功率为 1 kW 的用电器工作 1 h 所消耗的功率即为 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 又称 1 度电。1 度电换算成焦耳为 $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$ 。

例 1.5 教室里有荧光灯 8 只, 每只功率为 46 W (包括镇流器), 每天用电 4 h , 该教室 4 月份用电多少度? 如果每度电价格是 0.65 元, 每月需缴纳多少电费?

解: 4 月份有 30 天, 该教室 4 月份用电量为:

$$W = Pt = 8 \times 46 \times 10^{-3} \times 4 \times 30 \text{ kW} \cdot \text{h} = 44.16 \text{ kW} \cdot \text{h} = 44.16 \text{ 度}$$

$$\text{需缴纳电费} = 44.16 \text{ kW} \cdot \text{h} \times 0.65 \text{ 元} / (\text{kW} \cdot \text{h}) = 28.7 \text{ 元}$$

即该教室 4 月份用电 44.16 度, 需付电费 28.7 元。



1.3 电阻元件

1.3.1 电阻元件及伏安特性

电阻元件是反映电路中消耗电能这一物理性质的理想二端元件，简称电阻，如电炉、电灯、电阻器等。电阻元件的图形符号如图 1.15 (a) 所示。

电阻元件的电压和电流之间的关系称为电阻元件的伏安特性。如果电阻元件的伏安特性是一条通过坐标原点的直线，如图 1.15 (b) 所示，这样的电阻元件称为线性电阻元件。线性电阻元件两端的电压和电流遵循欧姆定律，当电压和电流为关联参考方向时，有：

$$u = Ri \quad (1.10)$$

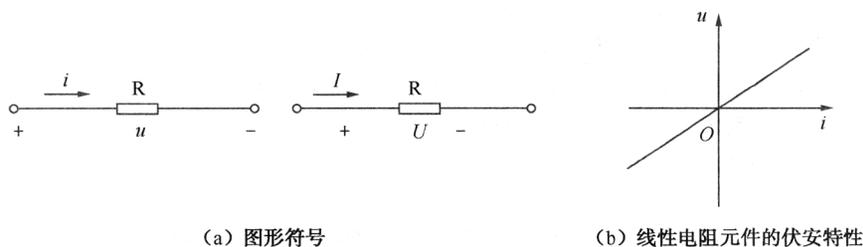


图 1.15 电阻元件的图形符号和伏安特性

对于直流电路，有：

$$U = RI \quad (1.11)$$

式中， R 为电阻元件的电阻，它反映了电阻元件对电流阻碍作用的大小，是一个与电压、电流无关的常数。同时说明，电阻元件的电压和电流总是同时存在、同时消失、同时增大、同时减小的，它们的实际方向总是一致的。电阻元件又称即时元件。

电阻的国际单位为欧姆，简称欧，符号是 Ω 。常用的单位还有千欧 ($k\Omega$) 和兆欧 ($M\Omega$)，它们之间的关系为：

$$1 \text{ k}\Omega = 10^3 \Omega$$

$$1 \text{ M}\Omega = 10^6 \Omega$$

如果电阻元件的电压和电流之间不是线性函数关系，则称为非线性电阻元件。非线性电阻元件的伏安特性是曲线。二极管是典型的非线性电阻元件，在后续课程中会学习其特性。



1.3.2 电阻元件的功率

当电压和电流为关联参考方向时，电阻元件的功率为：

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1.12)$$

式 (1.12) 表明，电阻元件吸收的功率恒为正值。电阻元件是耗能元件，只要有电流流过，就会消耗电能，并将其转化为热能。

例 1.6 试计算将 220 V、40 W 的白炽灯泡分别误接到 110 V 和 380 V 电压时的实际功率，并说明其后果。

解：根据额定电压和额定功率，得白炽灯的电阻为：

$$R = \frac{u^2}{p} = \frac{220^2}{40} \Omega = 1\,210 \Omega$$

接 110 V 电压时，白炽灯的实际功率为：

$$p' = \frac{u_1^2}{R} = \frac{110^2}{1\,210} \text{ W} = 10 \text{ W}$$

由于电压过低，导致灯光昏暗。

接 380 V 电压时，白炽灯的实际功率为：

$$p'' = \frac{u_2^2}{R} = \frac{380^2}{1\,210} \text{ W} = 119.3 \text{ W}$$

由于电压过高，以至于实际功率超过额定功率，白炽灯会被烧坏。

线性电阻元件有两种特殊情况值得注意：一种情况是电阻值为无限大，电压为任何有限值时（实际电路电压一定为有限值），其电流总是 0，这时的状态称为“开路”；另一种情况是电阻值为 0，电流为任何有限值时（实际电路电流一定为有限值），其电压总是 0，这时的状态称为“短路”。

1.4 电压源与电流源

实际使用的电源种类繁多，但它们在电路中的作用都是使电路产生电流和电压。在电路理论中，通常把电源对电路的作用称为激励，而把在电源作用下电路中产生的电压、电流称为响应。

1.4.1 理想电压源与实际电压源

1.4.1.1 理想电压源

理想电压源是一个理想二端元件，能产生并维持一定的输出电压，简称电压源。其图形符号如



图 1.16 (a) 所示, 其中, u_s 为电压源的电压。

电压源具有以下两个特点:

(1) 电压源的电压 u_s 为确定的时间函数 (电压值固定不变或按某一规律变化), 与通过它的电流及它所连接的外电路无关。

(2) 通过电压源的电流随外接电路不同而不同, 由其自身参数和所连接的外电路确定。

若电压源的电压为恒定值, 则称为直流电压源, 又称恒压源, 其图形符号如图 1.16 (b) 所示。

电源的端电压 u 与输出电流 i 之间的关系称为电源的伏安特性, 又称电源的外特性。直流电压源的伏安特性如图 1.16 (c) 所示, 是一条平行于 I 轴的直线。它表明: 当外接负载变化时, 电源提供的电流发生变化, 但其端电压始终保持恒定值 U_s 。

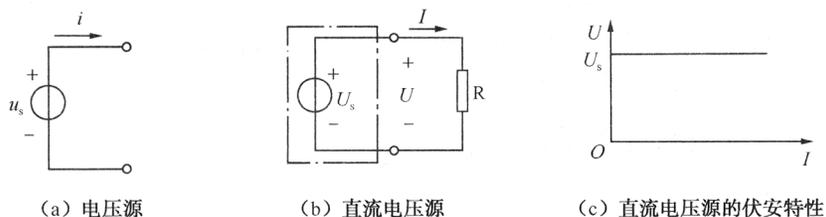


图 1.16 电压源的图形符号及伏安特性

例 1.7 在图 1.17 所示的电路中, R 为可调电阻器, 其阻值可在 $0 \sim +\infty$ 范围内调节, 试分别计算 $R \rightarrow \infty$ 和 $R=0$ 两种情况下电路中的电流。

解: (1) $R \rightarrow \infty$ 时, 根据欧姆定律, 电路中的电流为:

$$I = \frac{U_s}{R} = 0$$

(2) $R=0$ 时, 因为电压源的电压与外电路无关, 所以电压源的电压仍为 $U_s = 5 \text{ V}$ 。

根据欧姆定律, 电路中的电流为 $I = \frac{U_s}{R} \rightarrow \infty$ 。

电压源的电压为恒定值, 电流可为任意值; 电压源不能短路, 否则从理论上说, 此时流过的电流为无穷大。

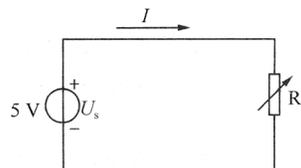


图 1.17 电路

1.4.1.2 实际电压源

理想电压源实际上是不存在的, 电源内部总是存在一定的电阻, 称为内阻, 用 R_0 表示。以电池为例, 当电池两端接上负载并有电流流过时, 内阻就会有能量损耗, 且电流越大, 损耗越大, 输出端电压越低, 不具有恒压输出的特性。

实际电压源可以用一个电压源 U_s 与一个内阻 R_0 串联的电路模型来表示, 如图 1.18 (a) 点画线框内所示的电路。图中 R_L 为负载, 即电源的外电路。

实际电压源的伏安特性为:

$$U = U_s - IR_0 \quad (1.13)$$

其伏安特性如图 1.18 (b) 所示, 为一条直线。从式 (1.13) 和伏安特性可以看出: 电压源的



端电压 U 随着电流 I 的增加而下降；内阻 R_0 越小，内阻上的分压 IR_0 越小，直线越平坦，越接近恒压源的情况。常见的直流稳压电源及大型电网的输出电压基本不随外电路变化，在一定范围内可近似看成是恒压源。

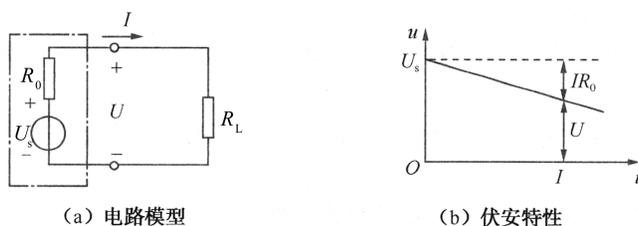


图 1.18 实际电压源

实际电压源在使用时不允许短路（负载电阻为 0），这种情况下，短路电流很大，可能烧损电气设备，甚至引发火灾。实际电压源不使用时应开路放置（负载电阻为无穷大），此时电流为 0，不消耗电压源的电能。

1.4.2 理想电流源与实际电流源

1.4.2.1 理想电流源

理想电流源是一种能产生并维持一定输出电流的理想电源元件，简称电流源，其图形符号如图 1.19 (a) 所示，其中， i_s 为电流源的电流。

电流源具有以下两个特点：

(1) 电流源的电流 i_s 为确定的时间函数（电流值固定不变或按某一规律变化），与它两端的电压及它所连接的外电路无关。

(2) 电流源两端的电压可以是任意值，由其自身参数和所连接的外电路确定。

若电流源的电流为恒定值，则称为直流电流源，又称恒流源，其图形符号如图 1.19 (b) 所示。

直流电流源的伏安特性如图 1.19 (c) 所示，是一条垂直于水平轴的直线。这表明：当外接负载变化时，电源两端的电压变化，但其电流始终保持恒定值 I_s 。

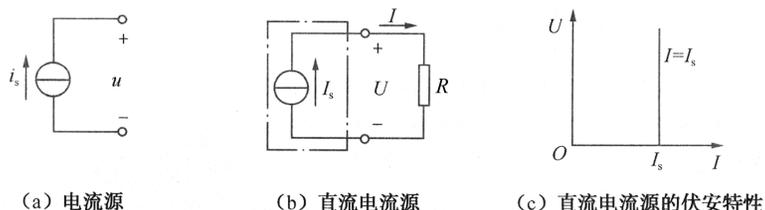


图 1.19 电流源的图形符号及伏安特性

例 1.8 在图 1.20 所示的电路中， R 为可调电阻器，其阻值可在 $0 \sim +\infty$ 范围内调节，试分别计算 $R=0$ 和 $R \rightarrow \infty$ 两种情况下电流源两端的电压 U 。

解： (1) $R=0$ 时，根据欧姆定律，电流源两端的电压为：

$$U = RI_s = 0 \times 2 \text{ V} = 0 \text{ V}$$



(2) $R \rightarrow \infty$ 时, 因为电流源的电流与外电路无关, 所以电流源的电流仍为 $I_s = 2 \text{ A}$ 。
根据欧姆定律, 电流源两端的电压为 $U = RI_s = 2R \rightarrow \infty$ 。

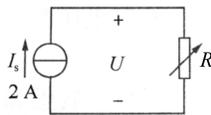


图 1.20 电路

电流源的电流为恒定值, 端电压可为任意值。电流源不能开路, 否则从理论上说, 此时端电压为无穷大。

1.4.2.2 实际电流源

理想电流源实际上是不存在的, 由于内阻的存在, 电流源的电流不可能全部输出到负载, 有一部分将被内阻分流。

实际电流源可以用一个电流源 I_s 与一个内阻 R'_0 并联的电路模型来表示, 如图 1.21 (a) 点画线框内所示的电路。

实际电流源的伏安特性为:

$$I = I_s - \frac{U}{R'_0} \quad (1.14)$$

其伏安特性如图 1.21 (b) 所示, 为一条直线。从式 (1.14) 和伏安特性可以看出: 电流源的端电压 U 随着电流 I 的增加而下降; 内阻 R'_0 越大, 分流越小, 直线越陡峭, 越接近恒流源。晶体管稳流电源及光电池等器件在一定范围内可近似看成是恒流源。

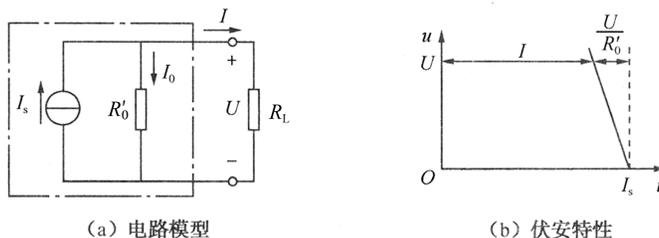


图 1.21 实际电流源的电路模型和伏安特性

实际电流源在应用时不允许处于开路状态。开路时, 电流源与内阻形成闭合回路, 电能全部消耗在内阻上, 电流源对负载没有能量输出。

例 1.9 电路如图 1.22 所示, 已知: 电流源 $I_s = 2 \text{ A}$, 电压源 $U_s = 6 \text{ V}$, 电阻 $R = 10 \Omega$, 试计算电阻器的端电压 U_1 和电流源的端电压 U_2 。

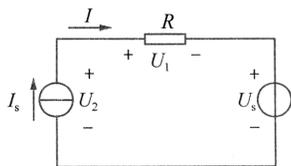


图 1.22 电路



解：在这个简单电路中有一个电流源，根据电流源的性质，由于它向外电路提供恒定不变的电流 I_s ，该特性与外电路无关，所以该电路中的电流为：

$$I = I_s = 2 \text{ A}$$

电阻器的端电压为：

$$U_1 = IR = 2 \times 10 \text{ V} = 20 \text{ V}$$

设 U_2 的参考方向如图 1.22 所示，电流源的端电压为：

$$U_2 = U_1 + U_s = (20 + 6) \text{ V} = 26 \text{ V}$$

电压源的端电压 U_2 由外电路确定，如果 R 改变， U_2 也改变。

例 1.10 电路如图 1.23 所示，已知：电流源 $I_s = 3 \text{ A}$ ，电压源 $U_s = 16 \text{ V}$ ，电阻 $R = 8 \Omega$ ，试计算电流 I_R 和 I 。

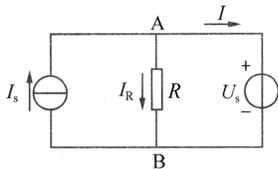


图 1.23 电路

解：根据电压源的性质，可知 $U_{AB} = U_s = 16 \text{ V}$ 。

流过电阻器的电流为：

$$I_R = \frac{U_s}{R} = \frac{16}{8} \text{ A} = 2 \text{ A}$$

流过电压源的电流为：

$$I = I_s - I_R = (3 - 2) \text{ A} = 1 \text{ A}$$

可见，流过电压源的电流 I 由外电路确定，如果 R 改变， I 也改变。

1.4.3 实际电源模型的等效变换

若实际电压源或实际电流源向同一个负载电阻供电，产生相同的供电效果，即负载上的电压和电流均相等，则这两个电源是等效的，它们之间可以进行等效变换，如图 1.24 所示。

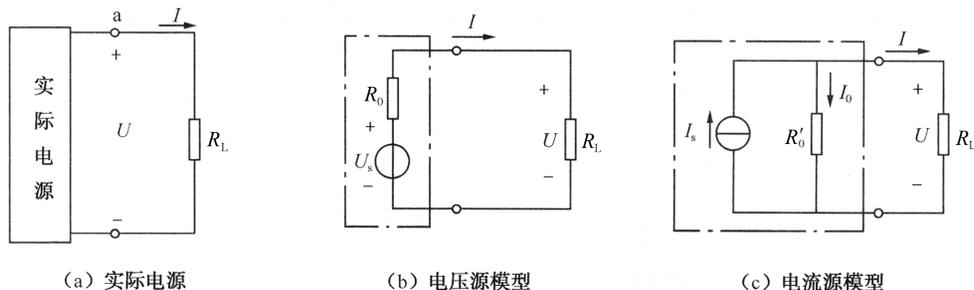


图 1.24 实际电源和它的两种模型

电压源与电流源之间等效变换的条件为：

$$I_s = \frac{U_s}{R_0} \quad (1.15)$$



或：

$$U_s = I_s R'_0 \quad (1.16)$$

且：

$$R_0 = R'_0 \quad (1.17)$$

实际电压源和实际电流源进行等效变换时要注意以下几点：

(1) 等效关系是对外电路而言的，电源内部不等效。例如，当外电路开路时，实际电压源流过的电流为 0，内阻不消耗功率，电压源不发出功率，而实际电流源内阻有电流流过，内阻上有功率损耗。

(2) 注意电源极性。因为电源对外电路产生的电压、电流方向相同，所以等效变换时电压源电压的正极对应电流源的电流流出端。

(3) 理想电压源与理想电流源之间没有等效关系。

推而广之，任一电压源与电阻元件串联的电路都可以等效为电流源与电阻元件并联的电路，反之亦然，如图 1.25 所示。

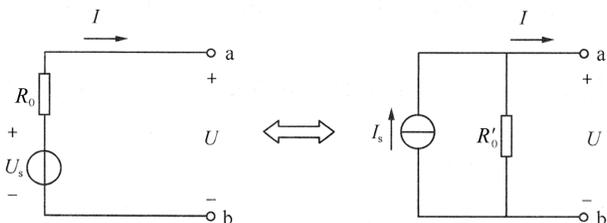


图 1.25 电压源和电流源的等效变换

几个电压源串联的电路，其等效电压源等于各串联电压源电压的代数和；几个电流源并联的电路，其等效电流源等于各并联电流源电流的代数和。根据电路的具体组成，灵活运用电源的等效变换，可以对结构复杂的电路进行化简，下面举例说明。

例 1.11 将图 1.26 (a) 中的电路等效化简为一个电压源与电阻元件串联的模型。

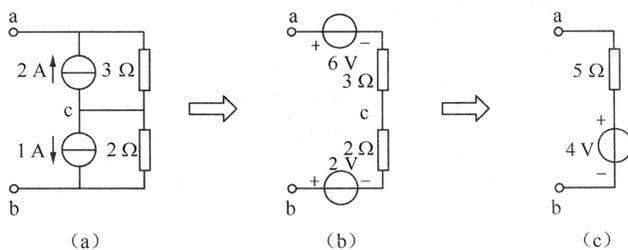


图 1.26 电路

解：(1) 在图 1.26 (a) 中，a、c 之间为 2 A 电流源与 3 Ω 电阻元件并联的实际电流源，可变换为实际电压源，其电压为 $2 \times 3 \text{ V} = 6 \text{ V}$ ，阻值为 3 Ω；c、b 之间为 1 A 电流源与 2 Ω 电阻元件并联的实际电流源，可变换为实际电压源，其电压为 $1 \times 2 \text{ V} = 2 \text{ V}$ ，阻值为 2 Ω。电路图如图 1.26 (b) 所示。

(2) 将图 1.26 (b) 化简为图 1.26 (c)，即为电压源与电阻元件串联的模型，注意电压源极性与图 1.26 (b) 中较大的电压源极性相同。



例 1.12 将图 1.27 (a) 中的电路等效化简为一个实际电压源。

解: (1) 将图 1.27 (a) 中的两个实际电压源分别变换成实际电流源, 电流源极性及电路图如图 1.27 (b) 所示。

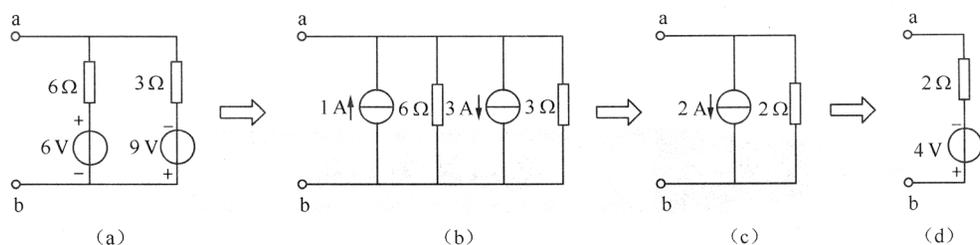


图 1.27 电路

(2) 将图 1.27 (b) 化简, 电流源极性与图 1.27 (b) 中较大的电流源电流流出端相同; $6\ \Omega$ 与 $3\ \Omega$ 电阻元件并联, 化简得:

$$R = \frac{6 \times 3}{6 + 3}\ \Omega = 2\ \Omega$$

进而得如图 1.27 (c) 所示的实际电流源。

(3) 将图 1.27 (c) 变换为图 1.27 (d) 所示的实际电压源, 其电压为 $2 \times 2\ \text{V} = 4\ \text{V}$, 阻值为 $2\ \Omega$ 。

例 1.13 电路如图 1.28 (a) 所示, 试用等效变换的方法求电路中的电流 I 。

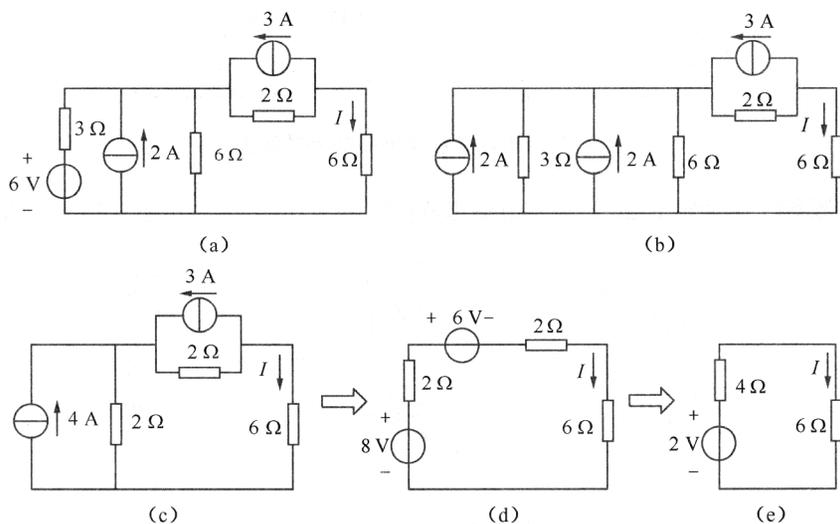


图 1.28 电路

解: (1) 将图 1.28 (a) 中的 $6\ \text{V}$ 电压源与 $3\ \Omega$ 电阻元件串联的实际电压源变换为 $2\ \text{A}$ 电流源与 $3\ \Omega$ 电阻元件并联的电流源, 如图 1.28 (b) 所示。

(2) 将图 1.28 (b) 中的电流源合并, 并联电阻等效变换, 得 $4\ \text{A}$ 电流源与 $2\ \Omega$ 电阻元件并联的实际电流源, 如图 1.28 (c) 所示。

(3) 将图 1.28 (c) 中的实际电流源变换为 $8\ \text{V}$ 电压源与 $2\ \Omega$ 电阻元件串联的实际电压源, 同时将 $3\ \text{A}$ 电流源与 $2\ \Omega$ 电阻元件并联的实际电流源变换为实际电压源, 如图 1.28 (d) 所示。

(4) 将图 1.28 (d) 所示的电路化简, 得图 1.28 (e) 所示的实际电压源。



由图 1.28 (e) 所示电路, 得:

$$I = \frac{2}{4+6} \text{ A} = 0.2 \text{ A}$$

1.5 基尔霍夫定律



基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是德国物理学家古斯塔夫·罗伯特·基尔霍夫 (Gustav Robert Kirchhoff) 提出的。基尔霍夫定律是电路理论中最基本也是最重要的定律之一。它概括了电路中电流和电压分别遵循的基本规律, 是分析和计算复杂电路的基础。它包括基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, KCL) 和基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law, KVL)。前者应用于电路中的节点, 后者应用于电路中的回路。

1.5.1 电路的几个常用名词

在讨论基尔霍夫定律之前, 先以图 1.29 所示的基本电路为例介绍几个电路名词。

节点: 三个或三个以上元件的连接点称为节点。图 1.29 所示的电路有两个节点: a 点和 b 点。

支路: 连接两个节点的一段无分支电路称为支路。图 1.29 所示电路有三条支路: acb 支路、adb 支路、aeb 支路。其中, acb 支路和 adb 支路中接有电源, 称为含源支路; aeb 支路中没有电源, 称为无源支路。

回路: 电路中的任一闭合路径称为回路。显然, 一个电路至少应该有一个回路。如图 1.29 所示, 电路有三个回路: 回路 adbca、回路 aebda 和回路 aebca。

网孔: 电路回路内部不含有支路的回路称为网孔。网孔就是不包括其他支路的最简单回路。如图 1.29 所示, 电路有两个网孔: 网孔 adbca、网孔 aebda。注意, 回路 aebca 不是网孔, 它内部包含了支路 adb。网孔一定是回路, 回路不一定是网孔。在同一电路中, 网孔个数小于或等于回路个数。

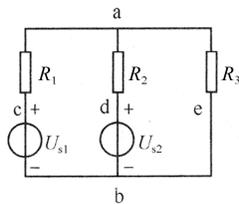


图 1.29 基本电路

1.5.2 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律是描述电路中任意节点所连接各支路电流之间相互关系的定律。其内容表述为: 任一时刻, 流入电路中任一节点的电流之和恒等于流出该节点的电流之和。数学表达式为:

$$\sum i_{\lambda} = \sum i_{\text{出}} \quad \text{或} \quad \sum I_{\lambda} = \sum I_{\text{出}} (\text{直流}) \quad (1.18)$$



例如, 对于如图 1.30 所示的节点, 在图示参考方向下, 根据 KCL, 则有 $I_1 = I_2 + I_3$ 。将式子进行等效变换, 则有 $I_1 - I_2 - I_3 = 0$ 。

可见, 基尔霍夫电流定律又可以表述为: 任一时刻, 电路中任一节点所连接的各支路电流的代数和恒等于 0, 即:

$$\sum i = 0 \quad \text{或} \quad \sum I = 0 (\text{直流}) \quad (1.19)$$

式 (1.19) 为 KCL 的数学表达式, 称为 KCL 方程, 又称节点电流方程。

应用式 (1.19) 时各电流前的符号规定为: 参考方向流入 (指向) 节点的电流取 “+”, 流出 (背离) 节点的电流取 “-”。如图 1.30 所示, 流入节点的电流 I_1 前面的符号为 “+”, 流出节点的电流 I_2 、 I_3 前面的符号为 “-”。

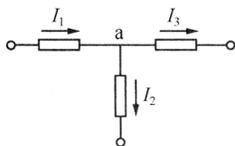


图 1.30 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律的理论依据是电流连续性原理, 即电荷在电路中的运动是连续的, 在任何地方都不能消失, 也不能创造, 是电荷守恒定律在电路中的体现。基尔霍夫电流定律既适用于线性电路, 也适用于非线性电路。

值得注意的是, 基尔霍夫电流定律表述的是电路节点所连接的各支路电流之间的关系, 与电路所包含元件的性质无关。

列 KCL 方程的步骤如下:

- (1) 选定列 KCL 方程的节点。
- (2) 假设并标示各电流的参考方向。
- (3) 根据各电流的参考方向与该节点的关系 (流入还是流出), 确定各电流变量前的符号。
- (4) 根据基尔霍夫电流定律, 列 KCL 方程。

最后, 可根据计算结果 (各电流值的正、负号), 确定该电流的实际方向与参考方向的关系 (相同还是相反)。

各电流变量前的正、负号与各电流值的正、负号的物理意义完全不同, 二者不可混为一谈。

例 1.14 在图 1.31 所示的电路中, 已知: $I_1 = 2 \text{ A}$, $I_2 = -1 \text{ A}$, $I_3 = -5 \text{ A}$, $I_5 = 3 \text{ A}$, 求 I_4 。

解: 由基尔霍夫电流定律, 可知:

$$I_2 + I_5 = I_1 + I_3 + I_4$$

即:

$$I_4 = I_2 + I_5 - I_1 - I_3 = [-1 + 3 - 2 - (-5)] \text{ A} = 5 \text{ A}$$

依据电流连续性原理, KCL 不仅适用于电路中的任意节点, 还可以推广应用于电路中的任意假设的封闭面, 即在任一瞬间, 通过电路中任一假设封闭面的电流代数和为 0。

如图 1.32 所示, 将这部分电路用一个假想的封闭面包围起来, 看成一个节点, 称为广义节点, 根据基尔霍夫电流定律, 有:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

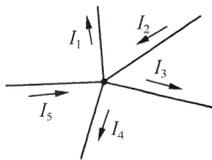


图 1.31 电路

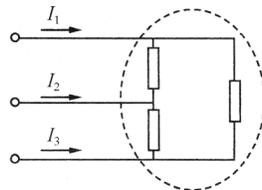


图 1.32 KCL 的扩展应用

例 1.15 图 1.33 是电路的一部分，已知： $I_1=2\text{ A}$ ， $I_2=-1\text{ A}$ ， $I_5=3\text{ A}$ ，计算 AB 支路和 BC 支路的电流。

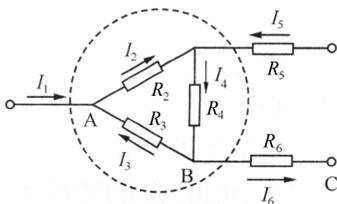


图 1.33 电路

解：在图 1.33 中，支路电流的参考方向下，对于 A 节点，KCL 方程为：

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

即：

$$I_3 = I_2 - I_1 = (-1 - 2)\text{ A} = -3\text{ A}$$

将电阻元件 R_2 、 R_3 、 R_4 组成的闭合回路看成广义节点，用假想封闭面包围，如图 1.33 虚线所示，该广义节点的 KCL 方程为：

$$I_1 + I_5 - I_6 = 0$$

即：

$$I_6 = I_1 + I_5 = (2 + 3)\text{ A} = 5\text{ A}$$

例 1.16 晶体三极管电路如图 1.34 所示，已知： $I_B=0.05\text{ mA}$ ， $I_C=2\text{ mA}$ ，计算电流 I_E 。

解：用一个假想的封闭面把晶体三极管包围起来，根据 KCL，有：

$$I_E = I_B + I_C = (0.05 + 2)\text{ mA} = 2.05\text{ mA}$$

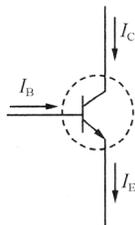


图 1.34 晶体三极管电路



1.5.3 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律是描述电路中任一闭合回路各元件（或各支路）电压之间相互关系的定律。其内容表述为：任一时刻，沿电路任一回路绕行一周，所有电压的代数和恒等于0，即：

$$\sum u = 0 \quad \text{或} \quad \sum U = 0 (\text{直流}) \quad (1.20)$$

式(1.20)为KVL的数学表达式，称为KVL方程，又称回路电压方程。

式(1.20)各电压前的符号规定：电压参考方向（从“+”到“-”）与绕行方向一致时该电压前取“+”，反之取“-”。

以图1.35所示的电路为例，设绕行方向为顺时针方向，如图1.35中虚线所示，从A点出发沿回路绕行一周，KVL方程为：

$$U_{s1} + U_1 - U_2 - U_{s2} + U_4 = 0$$

根据欧姆定律，上式可改写为：

$$U_{s1} + I_1 R_1 - I_2 R_2 - U_{s2} - I_3 R_3 + I_4 R_4 = 0$$

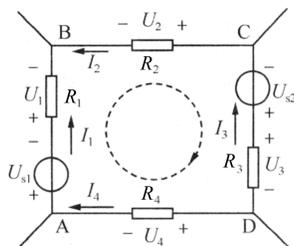


图 1.35 基尔霍夫电压定律

归纳：应用式(1.20)时，电阻元件电压降写成 $\pm IR$ 形式，回路绕行方向与电阻元件电流的参考方向一致（绕行时顺着电流的参考方向）时，该电阻元件的电压 IR 前取“+”，反之取“-”（可记为顺流取“+”，反之取“-”）；电压源的电压写成 $\pm U$ 的形式，绕行方向与电压源电压的参考方向一致（绕行时先经过电压源正极）时， U_s 前取“+”，反之取“-”（可记为先碰正就取“+”，反之取“-”）。

将上式作等效变换，则有 $I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_3 R_3 + I_4 R_4 = -U_{s1} + U_{s2}$ 。

基尔霍夫电压定律又可表述为：任一时刻回路中所有电阻元件电压降的代数和等于回路中电压源电压的代数和，即：

$$\sum IR = \sum U_s \quad (1.21)$$

式(1.21)各变量前的符号规定为：电流参考方向与绕行方向一致时，电阻压降 IR 前取“+”，反之取“-”；电压源电压的参考方向与绕行方向一致时， U_s 前取“-”，反之取“+”，要注意与式(1.20)的规定进行对比。

基尔霍夫电压定律的理论依据是电位的单值性原理，即相对于电位参考点，任意一点都有确定的电位值。沿任意闭合路径绕行一周，电位有升有降，但电位升的总和一定等于电位降的总和，即其代数和为0，以确保重新回到原出发点，该点电位值不变，是能量守恒定律在电路中的体现。



基尔霍夫电压定律表述的是电路中任一闭合回路各元件（或各支路）电压之间的相互关系，与电路所包含元件的性质无关。基尔霍夫电压定律既适用于线性电路，也适用于非线性电路。

列 KVL 方程的步骤如下：

- (1) 选定列 KVL 方程的网孔。
- (2) 假设并标示回路的绕行方向及各电压、电流的参考方向。
- (3) 根据各电压、电流的参考方向与该网孔回路的绕行方向的关系（相同还是相反），确定各电压、电流变量前的符号。
- (4) 根据基尔霍夫电压定律，列 KVL 方程。

最后，可根据计算结果（各电压、电流值的正、负号），确定该电压、电流的实际方向与参考方向的关系（相同还是相反）。

例 1.17 列出图 1.36 中电路的节点电流和回路电压方程。

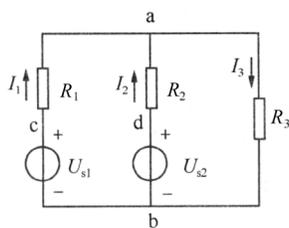


图 1.36 电路

解：设各电流的参考方向如图 1.36 所示，根据基尔霍夫电流定律，各节点的电流方程分别为：

$$\text{节点 a:} \quad I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad \text{①}$$

$$\text{节点 b:} \quad -I_1 - I_2 + I_3 = 0 \quad \text{②}$$

上述两个方程中，任意一个都可以由另一个方程导出，即只有一个方程是独立的。

设回路绕行方向为顺时针方向，根据基尔霍夫电压定律，各回路电压方程分别为：

$$\text{adbca 回路:} \quad I_1 R_1 - I_2 R_2 = U_{s1} - U_{s2} \quad \text{③}$$

$$\text{aR}_3\text{bda 回路:} \quad I_2 R_2 + I_3 R_3 = U_{s2} \quad \text{④}$$

$$\text{aR}_3\text{bca 回路:} \quad I_1 R_1 + I_3 R_3 = U_{s1} \quad \text{⑤}$$

上述三个方程中，任意一个都可以由其余两个方程导出，即只有两个方程是独立的。

对于具有 n 个节点、 b 条支路的复杂电路，只能列出 $(n-1)$ 个独立的 KCL 方程和 $b - (n-1)$ 个独立的 KVL 方程。 $b - (n-1)$ 为网孔个数，所以，通常可选网孔来列 KVL 方程。

例 1.18 在图 1.36 所示的电路中，已知： $U_{s1} = 20 \text{ V}$ ， $U_{s2} = 6 \text{ V}$ ， $R_1 = 2 \Omega$ ， $R_2 = 1 \Omega$ ， $R_3 = 2 \Omega$ ，试求：各支路电流。

解：将例 1.17 中①、③、④式联立，并代入已知数据，得方程组：

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ 2I_1 - I_2 = 20 - 6 \\ I_2 + 2I_3 = 6 \end{cases}$$

解方程组，得：



$$\begin{cases} I_1 = 6 \text{ A} \\ I_2 = -2 \text{ A} \\ I_3 = 4 \text{ A} \end{cases}$$

例 1.19 在图 1.37 所示的电路中, 已知: $U_1 = 5 \text{ V}$, $U_2 = 2 \text{ V}$, $I = 3 \text{ A}$, $R_2 = 2 \Omega$, 试求: U_s 、 U_3 、 I_1 、 I_2 、 R_1 和 R_3 。

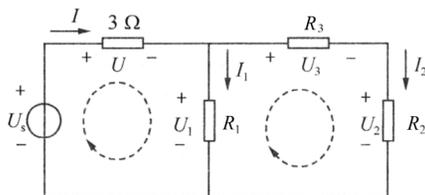


图 1.37 电路

解: U_s 、 R_1 和 3Ω 电阻元件构成一闭合回路, 由基尔霍夫电压定律, 得:

$$-U_s + U + U_1 = 0$$

即:

$$U_s = U + U_1 = 3I + U_1 = (3 \times 3 + 5) \text{ V} = 14 \text{ V}$$

电阻元件 R_1 、 R_2 和 R_3 构成一闭合回路, 由基尔霍夫电压定律, 得:

$$-U_1 + U_3 + U_2 = 0$$

即:

$$U_3 = U_1 - U_2 = (5 - 2) \text{ V} = 3 \text{ V}$$

因为 I_2 为通过电阻元件 R_2 的电流, 故:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{2}{2} \text{ A} = 1 \text{ A}$$

这个电流也流过电阻元件 R_3 , 即 $I_2 = I_3$, 由欧姆定律, 得:

$$R_3 = \frac{U_3}{I_3} = \frac{3}{1} \Omega = 3 \Omega$$

根据基尔霍夫电流定律, 有:

$$I - I_1 - I_2 = 0$$

即:

$$I_1 = I - I_2 = (3 - 1) \text{ A} = 2 \text{ A}$$

由欧姆定律, 得:

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{5}{2} \Omega = 2.5 \Omega$$

基尔霍夫电压定律不仅适用于闭合回路, 还可以推广应用于电路中的任一不闭合电路, 只要将开口处的电压列入方程即可。即在任一瞬间, 沿回路绕行一周, 假想的回路中各段电压的代数和为 0。

例如, 在图 1.38 (a) 所示的电路中, a、b 两点没有闭合, 可以设 a、b 两点间的电压为 U_{ab} , 参考方向如图所示。从 a 点出发, 沿图示方向绕行, 基尔霍夫电压定律方程为:

$$U_{ab} + U_{s3} + I_3 R_3 - I_2 R_2 - U_{s2} - I_1 R_1 - U_{s1} = 0$$



可得：

$$U_{ab} = U_{s1} + I_1 R_1 + U_{s2} + I_2 R_2 - I_3 R_3 - U_{s3}$$

由此可见，电路中 a、b 两点的电压 U_{ab} 等于以 a 为起点、以 b 为终点，沿任一路径绕行方向上各段电压的代数和。其中，a、b 可以是某一元件或一条支路的两端，也可以是电路中的任意两点。

图 1.38 (b) 所示的电路 KVL 方程为 $U = -IR + U_s$ 。

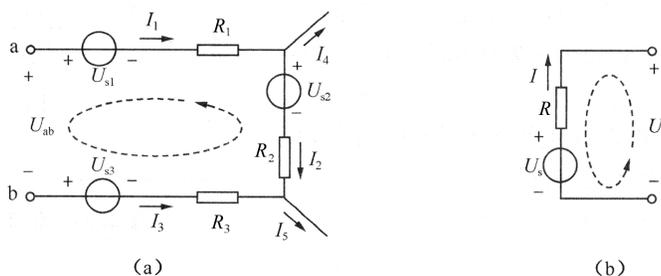


图 1.38 KVL 的扩展应用

例 1.20 在图 1.39 所示的电路中，已知： $U_{s1} = 12 \text{ V}$ ， $U_{s2} = 3 \text{ V}$ ， $R_1 = 3 \Omega$ ， $R_2 = 9 \Omega$ ， $R_3 = 10 \Omega$ ，试求：开口处 ab 两端的电压 U_{ab} 。

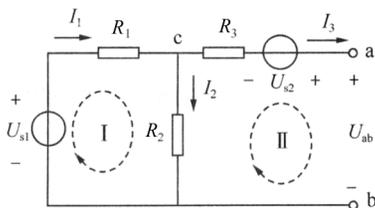


图 1.39 电路

解： 设电流 I_1 、 I_2 、 I_3 的参考方向和回路 I、II 的绕行方向如图 1.39 所示。

对节点 c 列 KCL 方程，有：

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

因为 ab 处为开路状态，即 $I_3 = 0$ ，所以 $I_1 = I_2$ 。

对回路 I 列 KVL 方程，有：

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 - U_{s1} = 0$$

即：

$$I_2 = I_1 = \frac{U_{s1}}{R_1 + R_2} = \frac{12}{3 + 9} \text{ A} = 1 \text{ A}$$

对假想的回路 II，有：

$$U_{ab} = I_2 R_2 - I_3 R_3 + U_{s2} = (1 \times 9 - 0 \times 10 + 3) \text{ V} = 12 \text{ V}$$

例 1.21 在图 1.40 所示的电路中，已知： $U_s = 11 \text{ V}$ ， $I_s = 1 \text{ A}$ ， $R_1 = 1 \Omega$ ， $R_2 = 4 \Omega$ 。计算电流源的端电压 U 和电压 U_{AB} 。

解： 设各电压、电流参考方向如图 1.40 所示。

根据电流源的性质，电路电流 $I = I_s = 1 \text{ A}$ 。

根据基尔霍夫电压定律，列 KVL 方程，有：

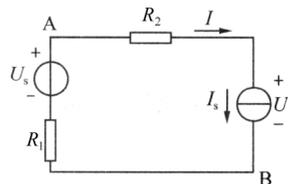


图 1.40 电路



$$IR_1 - U_s + IR_2 + U = 0$$

代入数据, 得:

$$U = U_s - IR_1 - IR_2 = (11 - 1 \times 1 - 1 \times 4) \text{ V} = 6 \text{ V}$$

根据 KVL 的扩展应用, 列 KVL 方程, 有:

$$U_{AB} + IR_1 - U_s = 0$$

即:

$$U_{AB} = U_s - IR_1 = (11 - 1 \times 1) \text{ V} = 10 \text{ V}$$

在包含电流源的电路中, 列 KVL 方程时, 不要漏掉电流源的端电压。

1.6 电路中电位的计算

在电路分析中, 常常利用电路中某些点的电位来判断电路的工作情况。例如晶体管的工作状态要根据各个电极的电位来判断, 在检测实际工作中的电路时, 测量电位也比测量电流方便。另外, 对于比较复杂的电路, 用电位表示电路中的某些特殊点可使电路图清晰明了, 更便于分析研究。

在 1.2 节中讲过, 电路中某一点的电位 U_A 就是该点到电位参考点 O 的电压, 也即 A、O 两点间的电位差, 即 $U_A = U_{AO}$ 。

以图 1.41 为例, 若已知各电源电压、各支路电流和电阻, 求 A、B、C 各点的电位。

从图可见 $U_O = 0$; $U_A = U_{AO} = U_{s1}$ 或 $U_A = I_1 R_1 + I_3 R_3$; $U_B = U_{BO} = I_3 R_3$; $U_C = U_{s2}$ 。

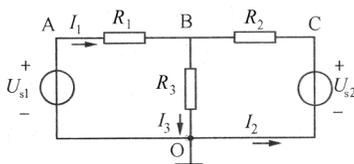


图 1.41 各点电位计算举例

计算电路中某点电位的方法如下:

- (1) 确认电位参考点的位置。
- (2) 确定电路中的电流方向和各元件两端电压的正、负极性。
- (3) 从被求点开始通过一定的路径绕到电位参考点, 则该点的电位等于此路径上所有电压降的代数和。

电阻元件电压降写成 $\pm IR$ 的形式, 当电流 I 的参考方向与路径绕行方向一致时, 选取 “+”, 反之则选取 “-”。电源电压写成 $\pm U_s$ 的形式, 当电源电压的方向与路径绕行方向一致 ($+\rightarrow-$) 时, 选取 “+”; 反之, 则选取 “-”。



例 1.22 在图 1.42 所示的电路中, 已知: $U_{s1}=45\text{ V}$, $U_{s2}=12\text{ V}$, 电源内阻忽略不计; $R_1=5\ \Omega$, $R_2=4\ \Omega$, $R_3=2\ \Omega$ 。求 B、C、D 三点的电位 U_B 、 U_C 、 U_D 和电压 U_{AB} 、 U_{BC} 。

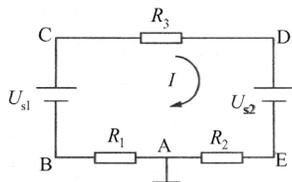


图 1.42 电路

解: 以电路中 A 点为电位参考点 (零电位点), 电流方向为顺时针方向, 即:

$$I = \frac{U_{s1} - U_{s2}}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{45 - 12}{5 + 4 + 2} \text{ A} = 3 \text{ A}$$

$$B \text{ 点电位 } U_B = U_{BA} = -IR_1 = -(3 \times 5) \text{ V} = -15 \text{ V};$$

$$C \text{ 点电位 } U_C = U_{CA} = U_{s1} - IR_1 = (45 - 15) \text{ V} = 30 \text{ V};$$

$$D \text{ 点电位 } U_D = U_{DA} = U_{s2} + IR_2 = (12 + 12) \text{ V} = 24 \text{ V}。$$

$$U_{AB} = U_A - U_B = [0 - (-15)] \text{ V} = 15 \text{ V};$$

$$U_{BC} = U_B - U_C = (-15 - 30) \text{ V} = -45 \text{ V}。$$

若以 B 点为电位参考点 (零电位点), 电流的大小和方向不变, 则:

$$B \text{ 点电位 } U_B = 0;$$

$$C \text{ 点电位 } U_C = U_{CB} = U_{s1} = 45 \text{ V};$$

$$D \text{ 点电位 } U_D = U_{DB} = U_{s2} + IR_2 + IR_1 = (12 + 12 + 15) \text{ V} = 39 \text{ V};$$

$$\text{或者 } U_D = U_{DB} = -IR_3 + U_{s1} = (-6 + 45) \text{ V} = 39 \text{ V};$$

$$A \text{ 点电位 } U_A = U_{AB} = IR_1 = 3 \times 5 \text{ V} = 15 \text{ V}。$$

$$U_{AB} = U_A - U_B = (15 - 0) \text{ V} = 15 \text{ V};$$

$$U_{BC} = U_B - U_C = (0 - 45) \text{ V} = -45 \text{ V}。$$

从以上的分析可见:

(1) 电路中两点间的电位差 (即电压) 是绝对的, 不随电位参考点的不同而发生变化, 即电压值与电位参考点无关。

(2) 电路中某点的电位等于该点与参考点之间的电压, 电路中某一点的电位则是相对电位参考点而言的, 电位参考点不同, 该点电位值也不同。

(3) 电位 (或者电压) 与路径无关。

例如, 在例 1.22 中, 假如以 E 点为电位参考点, 则:

$$A \text{ 点的电位变为 } U_A = U_{AE} = -IR_2 = -3 \times 4 \text{ V} = -12 \text{ V};$$

$$B \text{ 点的电位变为 } U_B = U_{BE} = -IR_1 - IR_2 = (-3 \times 5 - 3 \times 4) \text{ V} = -27 \text{ V};$$

$$C \text{ 点的电位变为 } U_C = U_{CE} = IR_3 + U_{s2} = (3 \times 2 + 12) \text{ V} = 18 \text{ V};$$

$$D \text{ 点的电位变为 } U_D = U_{DE} = U_{s2} = 12 \text{ V}。$$

$$U_{AB} = U_A - U_B = [-12 - (-27)] \text{ V} = 15 \text{ V};$$

$$U_{BC} = U_B - U_C = (-27 - 18) \text{ V} = -45 \text{ V}。$$

明确了电位的概念后, 就可以简化电路了, 当参考点选定以后可以不画出电源, 各端钮以电位



来表示, 例如图 1.41 可简化为图 1.43 所示的电路。

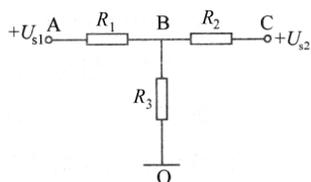


图 1.43 图 1.41 的简化电路

拓展阅读

防电击接地保护电路

在这个迅猛发展的时代, 随处可以看到各种电子产品和设备。设备正常运行离不开电, 在正常用电的同时, 特别需要注意用电安全, 如果稍有麻痹或疏忽, 很可能造成人身触电事故, 甚至引起火灾或爆炸。

人体是导体, 人体的电阻抗在 $700 \sim 6\ 100\ \Omega$, 电阻大小主要取决于皮肤潮湿程度、电流路径、接触面积、接触电压等。一旦有电流通过人体, 将会受到不同程度的危害, 而这种危害程度主要取决于通过人体电流的大小和通电时间的长短。能引起人感觉的最小电流值称为感知电流, 交流电为 $1\ \text{mA}$, 直流电为 $5\ \text{mA}$ 。人触电后能自己摆脱的最大电流称为摆脱电流, 交流电为 $10\ \text{mA}$, 直流电为 $50\ \text{mA}$, 故 $10\ \text{mA}$ 称为通过人身的交流安全电流。在较短的时间内危及生命的电流称为致命电流。

工业用电电压一般为 $380\ \text{V}$, 生活用电电压一般为 $220\ \text{V}$, 一般情况下, 人体能够接受的最大安全电压为 $36\ \text{V}$ 。通常采用设备外壳接地、串联熔断器、使用漏电保护器、采用不接地的局部等电位连接等方式保障设备安全, 其中最常见的是设备外壳接地。一般来说, 用电设备在使用过程中, 设备本身是安全、不导电的, 但若设备外壳受损, 则会存在漏电, 而外壳接地措施则会使得电路中大部分漏电电流流向大地, 流过接触设备外壳的人体的电流便很小, 从而在一定程度上保证人身安全, 实际电路如图 1.44 所示。这个过程便可以用理想元件重构电路模型来分析, 图 1.45 为防电击接地电路模型。

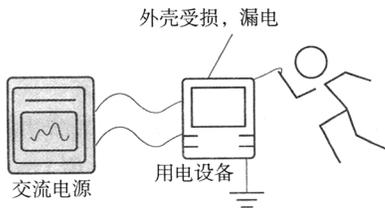


图 1.44 防电击接地电路

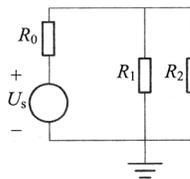


图 1.45 防电击接地电路模型

电路模型中, U_s 是交流电源, R_0 是电源内阻, R_1 是用电设备外壳接地电阻, R_2 是人体接地的等效电阻。由于 R_1 比 R_2 小得多, 所以大部分电流经外壳地线直接流向大地。这里, 接地电阻越小, 流过人体的电流就越小。



小 结

1. 电路及电路模型

- (1) 基本理想电路元件有电阻元件、电感元件、电容元件、电压源、电流源等。
- (2) 由理想电路元件组成的电路是实际的电路模型，简称电路。
- (3) 电路由电源、负载、中间环节三个基本部分组成。
- (4) 电路有负载、开路、短路三种工作状态。

2. 电路变量及参考方向

- (1) 电路的基本物理量有电压、电流、功率、电位等。
- (2) 电压、电流的参考方向是假定的，其值为正，表示实际方向与参考方向相同，否则相反。电压、电流的参考方向一致时为关联参考方向。
- (3) 功率 $P = \pm UI$ 。如果元件的电压和电流是关联参考方向，公式取正号，反之取负号；如果计算结果 $P > 0$ ，表示元件吸收功率，起负载作用，反之释放功率，起电源作用。电路中各元件产生的功率与元件消耗的功率相等。
- (4) 电路中某点与参考点之间的电压称为该点的电位。一个电路只能有一个参考点；参考点改变，各点电位值随之改变，但任意两点间的电压不变。电路中电位相等的点称为等电位点。

3. 电阻元件

- (1) 电阻表示元件对电流的阻碍能力。
- (2) 电阻元件的电压、电流取关联参考方向时， $U = IR$ ， $P = UI = I^2 R = U^2 / R$ 。
- (3) 电阻元件是耗能元件，其吸收的能量转换成热能或其他形式的能量消耗掉。

4. 电压源和电流源

- (1) 直流电压源端电压不变，流过的电流可以改变。
- (2) 直流电流源流过的电流不变，端电压可以改变。
- (3) 实际电源可由电压源 U_s 与电阻元件 R_0 串联或电流源 I_s 与电阻元件 R'_0 并联的电路模型等效。相互之间等效变换的条件是 $I_s = U_s / R_0$ 或 $U_s = I_s R'_0$ 且 $R_0 = R'_0$ 。
- (4) 电压源不得短路；电流源不得开路。

5. 电路的基本定律

- (1) 欧姆定律表示电阻元件中电压与电流之间的关系，电压、电流取关联参考方向时， $U = IR$ ，否则 $U = -IR$ 。



(2) 基尔霍夫电流定律表示电路中任一节点各电流之间的关系, $\sum I = 0$, 列 KCL 方程时应先假定各电流的参考方向。

(3) 基尔霍夫电压定律表示电路中任一闭合回路各电压之间的关系, $\sum U = 0$, 列 KVL 方程应先假定各电压参考方向和回路绕行方向。

6. 电位的计算

在电路中选定某一点 O 为电位参考点, 即规定该点的电位为 0, $U_O = 0$ 。电路中某一点 A 的电位 U_A 是该点到电位参考点 O 的电压, 也即 A、O 两点间的电位差, 即 $U_A = U_{AO} = U_A - U_O$ 。

习 题

1. 填空题

- (1) 电路就是_____流过的路径, 电路一般由_____、_____和_____三部分组成。
- (2) 电阻元件、电感元件、电容元件、理想电压源、理想电流源的图形符号分别为_____、_____、_____、_____。
- (3) 当电流、电压、电动势的实际方向与参考方向相同时, 其值为_____; 实际方向与参考方向相反时, 其值为_____。
- (4) 单电源闭合回路中, 对外电路而言, 电流是从_____电位流向_____电位; 对内电路而言, 电流是从_____电位流向_____电位。
- (5) 电压是衡量电场力_____能力的物理量, 电路中某两点之间的电压等于该两点的_____。
- (6) 在直流电路中, 某点的电位等于_____与_____之间的电压。
- (7) 某点电位的高低与_____的选择有关, 若选择不同, 同一点电位的高低可能会不同。
- (8) 电阻定律指出, 导体的电阻与导体的_____成正比, 与导体的_____成反比, 并与导体的材料性质有关。
- (9) 对于_____电阻, 当选择电压的参考方向与电流的参考方向为_____时, 有 $U = IR$ 。
- (10) 在一段电路中, 流过导体的电流与这段导体的_____成正比, 而与这段导体的_____成反比。
- (11) 电流在单位时间内所做的功称为_____。
- (12) 基尔霍夫电流定律又称节点电流定律, 其内容是_____, 数学表达式是_____。
- (13) 基尔霍夫电压定律又称回路电压定律, 其内容是_____, 数学表达式是_____。
- (14) 电路如图 1.46 所示, $U_A =$ _____, $U_B =$ _____, $U_C =$ _____, $U_O =$ _____,



$U_{AB} = \underline{\hspace{2cm}}$, $U_{BC} = \underline{\hspace{2cm}}$, $U_{AC} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

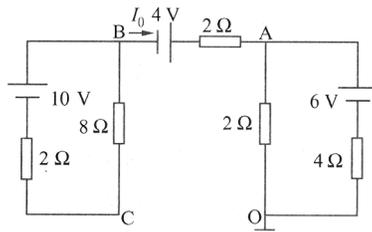


图 1.46 电路

(15) 在图 1.47 所示的电路中, 当 $I=2\text{ A}$ 时, $U=\underline{\hspace{2cm}}$, 外电路的 $P=\underline{\hspace{2cm}}$; 当 $I=-2\text{ A}$ 时, $U=\underline{\hspace{2cm}}$, 外电路的 $P=\underline{\hspace{2cm}}$ 。

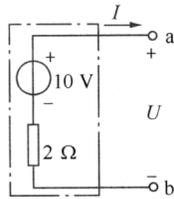


图 1.47 电路

(16) 在图 1.48 所示的电路中, $I_1=\underline{\hspace{2cm}}$, $I=\underline{\hspace{2cm}}$, $R_2=\underline{\hspace{2cm}}$ 。

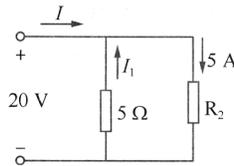


图 1.48 电路

(17) 在图 1.49 所示的两个电路中, 图 1.49 (a) 中 a、b、c 点电位分别为 $\underline{\hspace{2cm}}$ 、 $\underline{\hspace{2cm}}$ 、 $\underline{\hspace{2cm}}$, $U_{ab}=\underline{\hspace{2cm}}$, $U_{cd}=\underline{\hspace{2cm}}$ 。图 1.49 (b) 中 A 点电位为 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

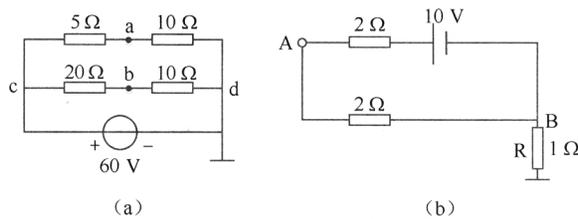


图 1.49 电路

(18) 在图 1.50 所示的电路中, $U_{ab}=\underline{\hspace{2cm}}$, $I=\underline{\hspace{2cm}}$, $I'=\underline{\hspace{2cm}}$, $U=\underline{\hspace{2cm}}$, $\sum P_R = \underline{\hspace{2cm}}$, 电流源功率 $P_{I_s} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

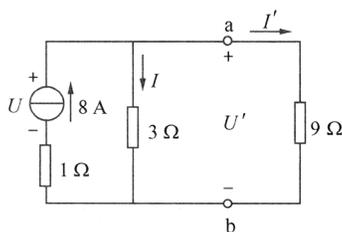


图 1.50 电路