

电路基础



类目：电子信息类
书名：电路基础
主编：张斌 姜庆 王秋颖
出版社：中国建设科技出版社
开本：大 16 开
书号：978-7-5160-4354-7
使用层次：通用
出版时间：2025 年 8 月
定价：48.00 元
印刷方式：双色
是否有资源：有

项目统筹:李亚博
责任编辑:汪永涛
封面设计:旗语书装



电子信息类创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革新理念教材

电子信息类创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革新理念教材

电路基础

电路基础



开门出书·创造价值
专·精·志·远
编辑 部: 010-63567684
事业发展中心: 010-63567692
网 上 书 店: www.cjcb.com



本社微信公号

本社天猫旗舰店



定价: 48.00元

主 编 © 张 斌 姜 庆 王 秋 颖

中国建设科技出版社有限责任公司



电路基础



主 编 © 张 斌 姜 庆 王 秋 颖



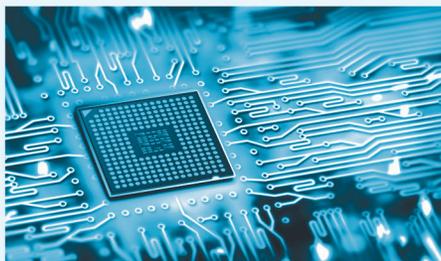
中国建设科技出版社有限责任公司
China Construction Science and Technology Press Co., Ltd.



电子信息类创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革新理念教材



电路基础



主 编 © 张 斌 姜 庆 王秋颖



中国建设科技出版社有限责任公司
China Construction Science and Technology Press Co., Ltd.

北 京

图书在版编目(CIP)数据

电路基础 / 张斌, 姜庆, 王秋颖主编. -- 北京 : 中国建设科技出版社有限责任公司, 2025. 8. -- (电子信息类创新融合精品规划教材)(“互联网+”教育改革新理念教材). -- ISBN 978-7-5160-4354-7

I. TM13

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024QD6693 号

电路基础

DIANLU JICHU

张 斌 姜 庆 王秋颖 主 编

出版发行: **中国建设科技出版社** 有限责任公司

地 址: 北京市西城区白纸坊东街 2 号院 6 号楼

邮 编: 100054

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 唐山唐文印刷有限公司

开 本: 880mm×1230mm 1/16

印 张: 12.25

字 数: 270 千字

版 次: 2025 年 8 月第 1 版

印 次: 2025 年 8 月第 1 次

定 价: **48.00 元**

本社网址: www.jskjcs.com, 微信公众号: [zgjskjcs](https://weixin.qq.com/r/zgjskjcs)

请选用正版图书, 采购、销售盗版图书属违法行为

版权专有, 盗版必究。本社法律顾问: 北京天驰君泰律师事务所, 张杰律师

举报信箱: zhangjie@tiantailaw.com 举报电话: (010) 63567684

本书如有印装质量问题, 由我社事业发展中心负责调换, 联系电话: (010) 63567692

编 委 会

主 编 张 斌 娄 庆 王秋颖

副主编 任桐慧 陈立涛 吕明华

陈杰菁 魏昌宁 李斌飞

前 言

“电路基础”是电气工程各专业必修的一门主要的专业基础课，是在物理“电学”的基础上较深入地研究电路基本理论的课程，着重于研究参数、线性、非时变电路。本课程的教学目的是使学生掌握电路的基本理论知识，掌握分析计算电路的基本方法，并为后续有关专业课程的学习和科研打下必要的电路理论基础。同时本课程在培养学生严肃认真的科学作风和抽象思维能力、分析计算能力、总结归纳能力等方面起到重要作用。

本书以电路理论中的经典内容为核心，文理渗透、启发诱导，旨在提高学生的电路理论水平，提高其分析问题和解决问题的能力。在内容的组织和讲解方面，本书力求做到符合教学规律和认知特点，在突出主要概念的同时更加贴近实用，增进学生对所学知识的系统性、规律性的认识。为增强学生的学习效果，提高学生自主解决问题的能力，本书在精选了丰富的例题和习题的同时，增加了典型例题的仿真内容，开阔了学生的视野，激发了学习兴趣。本书在例题解析上力求方法多样和步骤完整，使学生对所学知识有一个细致、全面的了解，在精讲电路内容的同时，兼顾学生解题能力的提高，解决了学生“上课听得懂，下课解题难”的问题，从而较好地解决了教学学时减少给电路教学带来的不利影响，使电路教学能够适应高等院校教学体系和内容的改革。

本书内容主要包括电路的基本概念和基本定律、电路的分析方法、正弦交流电路、三相交流电路、耦合电感电路的分析、电路的频率响应、二端口网络参数和电路的暂态分析。

限于编者水平，本书在内容取舍、编写方面难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2025年4月

目 录

项目一 电路的基本概念和基本定律 1

任务一 电路和电路模型	2
任务二 电路的物理量及参考方向	4
任务三 电阻元件	8
任务四 基尔霍夫定律	11
任务五 电路中的电位分析及其计算	13
思考练习	15

项目二 电路的分析方法 19

任务一 电阻串并联连接的等效变换	20
任务二 电压源与电流源及其等效变换	25
任务三 支路电流法的分析与应用	29
任务四 节点电压法的分析与应用	31
任务五 叠加原理的分析与应用	33
任务六 戴维南定理和诺顿定理的分析与应用	35
思考练习	38

项目三 正弦交流电路 41

任务一 认识交流电路中的基本物理量	42
任务二 正弦量的相量表示	45
任务三 电路基本定律的相量形式	50
任务四 单一参数的正弦交流电路	52
任务五 正弦交流电路中的功率	66
思考练习	70

项目四 三相交流电路 71

任务一 认识三相电压	72
------------------	----

任务二 负载星形连接的三相电路分析	76
任务三 负载三角形连接的三相电路分析	80
任务四 三相功率的计算	83
思考练习	85

项目五 耦合电感电路的分析 87

任务一 互感	88
任务二 含有耦合电感电路的计算	91
任务三 变压器	99
思考练习	106

项目六 电路的频率响应 109

任务一 网络函数	110
任务二 RLC 串联电路的谐振	113
任务三 RLC 并联电路的谐振	121
任务四 滤波器简介	126
思考练习	129

项目七 二端口网络参数 131

任务一 二端口网络的方程及其参数	132
任务二 二端口网络的等效电路模型	142
任务三 二端口网络的连接	145
思考练习	148

项目八 电路的暂态分析 151

任务一 电路的过渡过程及其初始条件	152
任务二 一阶电路的零输入响应	155
任务三 一阶电路的零状态响应	160
任务四 一阶电路的全响应	164
任务五 一阶电路的阶跃响应	169
任务六 一阶电路的冲激响应	171
任务七 二阶电路的暂态响应	176
思考练习	182

参考文献 186

项目一

电路的基本概念和基本定律

- 任务一 电路和电路模型
- 任务二 电路的物理量及参考方向
- 任务三 电阻元件
- 任务四 基尔霍夫定律
- 任务五 电路中的电位分析及其计算

随着科学技术的飞速发展，现代电工设备的种类日益繁多，规模和结构更是日新月异，但无论怎样设计和制造，这些设备大多是由各种不同的电路组成的。电路的结构不论多么复杂，它们和最简单的电路之间还是具有许多基本的共性，遵循着相同的规律。本章主要介绍电路与电路模型的概念，电路的基本物理量，电压、电流参考方向的概念，电阻元件，基尔霍夫定律及电位的分析与计算。

任务一 电路和电路模型

任务目标

1. 正确理解电路的基本概念；
2. 了解电路模型在电路分析中的作用；
3. 熟悉电路的组成及其功能。

一、电路

电路是由元器件按一定方式连接起来的整体，它提供电流流通的路径。图 1-1 所示是一个简单的实际电路——手电筒电路，它由电池、白炽灯、开关及连接导线组成。

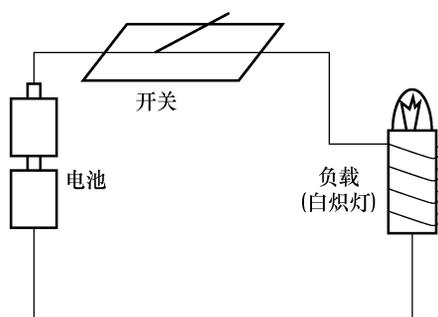


图 1-1 手电筒电路

电路的结构有多种形式，不同电路的作用也是各不相同的，按照完成的基本功能，电路可分为两类：一是能够进行能量转换和传输的电路，如电力系统，该系统是将发电机所发出的电能通过变压器和输出线路远距离传输给用户，用户将电能转换成光能、机械能和热能等。在这类电路中，要求在传输和转换过程中尽可能减少能量损耗，提高传输效率。二是能够实现信号的产生、传递和处理的电路，如扩音系统，该系统中话筒将语音信号转换为电信号，经过放大器进行放大处理，并传递给扬声器，以推动扬声器发声。对于这一类电路，虽然也有能量的传

输和转换问题，但是更关心的是信号传递的质量，如快速、准确、不失真等。

一般来说，无论电路具有什么功能，都是由三部分组成的，即电源、负载和中间环节。

电源是提供能量的设备。除发电机外，电池是常见的电源，它们分别将其他形式的能量转换为电能。

负载是耗用电能的设备，将电能转换成其他形式的能量。例如照明灯、电动机、电炉等都是负载，它们分别将电能转换为光能、机械能和热能；扬声器也是负载，是接收和转换信号的设备。

中间环节是连接电源和负载的，包括导线和控制设备等。例如为电流提供通路的导线，控制电路通、断的开关，保障安全用电的熔断器、漏电保护器等。这些设备不仅保证了电路安全、可靠地工作，而且能使电路自动完成某些特定工作。

二、电路模型

实际电路中存在着各种各样的电气元器件，如电阻器、电容器、电感器、灯泡、电池、晶体管、变压器等。实际的电路部件虽然种类繁多，但在电磁现象方面却有许多共同的地方。进行电路分析计算时，如果要考虑一个器件的所有的电磁性质是十分困难的，因此，对于实际电路的各种器件，应忽略其次要性质，只抓住主要的电磁特性，把工程实际中的各种设备和电路元件用有限的几个理想化的电路元件来表示。例如，电阻器、灯泡、电炉等，它们都是消耗电能的，这样可以用一个具有两个端钮的理想电阻来反映消耗电能的特征，当电流流过它时，在它内部进行着将电能转换成其他形式的能量的过程，理想电阻模型如图 1-2(a)所示；各种电容器主要是储存电能的，用一个理想的二端电容来反映储存电能的特征，理想电容的模型符号如图 1-2(b)所示；同样，用一个理想的二端电感来反映储存磁场的特征，其模型符号如图 1-2(c)所示。这种由一个或几个具有单一电磁特性的理想电路元件所组成的电路就是实际电路的电路模型，图 1-3 就是图 1-1 的电路模型。

理想电路元件简称电路元件，通常包括电阻元件、电感元件、电容元件、理想电压源和理想电流源。前三种元件均不产生能量，称为无源元件；后两种元件是电路中提供能量的元件，称为有源元件，如图 1-2(d)、图 1-2(e)所示。

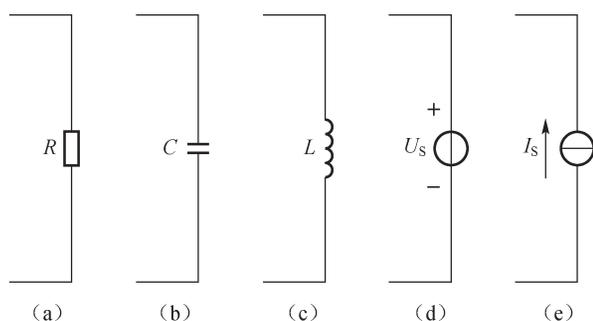


图 1-2 理想电路元件模型

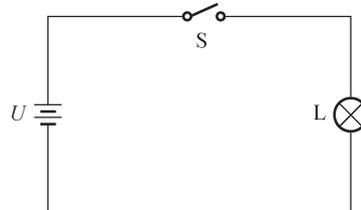


图 1-3 电路模型

任务二 电路的物理量及参考方向

任务目标

1. 掌握电流的定义、分类及参考方向；
2. 掌握电压的定义、单位及参考方向；
3. 掌握电功率的计算方法。

一、电流及参考方向

电荷的定向移动形成电流，通常把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度，简称电流，用符号 I 或 i 表示。

电流主要分为两种：一是大小和方向均不随时间变化的电流，称为恒定电流，简称为直流，简称为 DC 或 dc，其电流强度的大小用符号 I 表示；二是大小和方向均随时间变化的电流，称为变动电流，其强度大小用符号 i 表示，其中，一个周期内电流的平均值为零的变动电流称为交流，用 AC 或 ac 表示。

图 1-4 给出了几种常见的电流，其中图 1-4(a)所示为直流，图 1-4(b)所示为正弦交流电流，图 1-4(c)所示为锯齿交流电流。

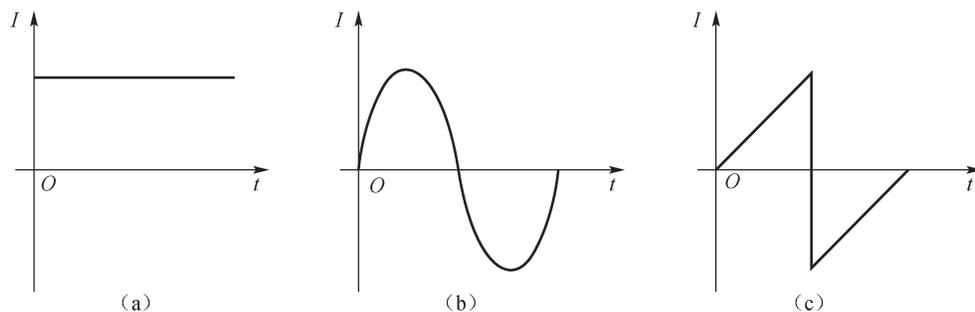


图 1-4 常见的电流

对于直流电流，单位时间内通过导体横截面的电荷量是不变的，其电流强度定义为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-1)$$

对于变动电流，假设在很小的时间间隔 dt 内，通过导体横截面的电荷量为 $dq(t)$ ，则该瞬间电流强度为

$$i = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1-2)$$

国际单位制(SI)中, 电流的单位是安培, 符号是 A。电力系统中, 安培这个单位太小, 有时取千安(kA)为电流强度的单位; 而在无线电系统中(如晶体管电路中), 安培这个单位又太大, 常用毫安(mA)或微安(μA)作为电流强度的单位。它们之间的换算关系为

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

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

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

电流有大小也有方向, 通常把正电荷的运动方向定义为电流的实际方向。但是电路较复杂时, 很难确定电流的实际方向, 为了分析电路方便, 在一段电路中, 事先任意假定一个电流方向称为电流的参考方向, 电流的参考方向可以任意假设, 但电流的实际方向客观存在, 因此, 假设的电流参考方向并不一定是电流的实际方向, 在对电路中的电流设定了参考方向后, 若经计算得出电流为正值, 说明所设参考方向与实际方向一致; 若经计算得到电流为负值, 说明所设参考方向与实际方向相反。

在本书中, 电路图上所标的电流方向均为参考方向。电流的实际方向和参考方向的关系可以用图 1-5 表示。



图 1-5 电流参考方向和实际方向的关系

【例 1-1】 如图 1-6 所示电路, 电路中电流的参考方向已经选定, 指出电流的实际方向。

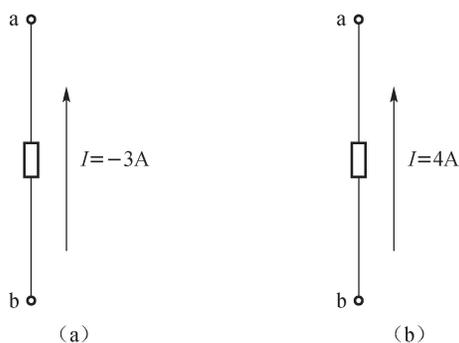


图 1-6 例 1-1 图

解 图 1-6(a)中, $I < 0$, 电流 I 的实际方向与参考方向相反, 因此 I 的实际方向由 a 流向 b, 大小为 3A。

图 1-6(b)中, $I > 0$, 电流 I 的实际方向与参考方向相同, 因此 I 的实际方向由 b 流向 a,

大小为 4A。

二、电压及参考方向

在物理学中已经讲过，a, b 两点间的电压定义为电场力把单位正电荷由 a 点移动到 b 点所做的功，电压的实际方向就是正电荷在电场力中受电场力作用移动的方向。

在直流电路中，电压为一恒定值，用 U 表示，即

$$U = \frac{W}{Q} \quad (1-3)$$

在变动电流电路中，电压为一变值，用 u 表示，即

$$u = \frac{d\tau w}{dq} \quad (1-4)$$

在国际单位制(SI)中，电压的单位是伏特，简称伏，符号为 V；在电力系统中，会用到千伏(kV)的概念；在无线电系统中，还会用到毫伏(mV)和微伏(μ V)的概念。

和分析电流相同，电压也有大小和方向。规定电位真正降低的方向为电压的实际方向。在分析电路时，也需要事先选择电压的参考方向，电压的参考方向也是任意选择的，在电路中通常用“+”“-”极性表示，如图 1-7(a)所示；电压的参考方向还可以用双下标 u_{ab} (电压参考方向由 a 点指向 b 点)表示，如图 1-7(b)所示；也可以用实线箭头表示，如图 1-7(c)所示。

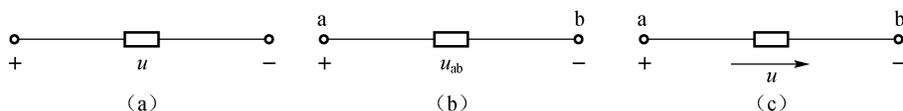


图 1-7 电压的参考方向

在设定的参考方向下进行计算，若计算后得到的电压值为正，则说明电压的参考方向与实际方向一致，如图 1-8(a)所示；若为负，则参考方向与实际方向相反，如图 1-8(b)所示。



图 1-8 电压的实际方向和参考方向的关系

在电路分析中，电流和电压的参考方向可以任意单独假设，但是为了分析电路方便，通常将一段电路或一个元件的电压和电流设成关联参考方向，即电流从电压的“+”极流向“-”极，如图 1-9 所示。

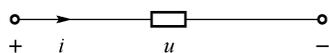


图 1-9 电压和电流参考方向关联

【例 1-2】 电路如图 1-10 所示，电路上各电压的参考方向已经设定，指出各电压的实际方向。

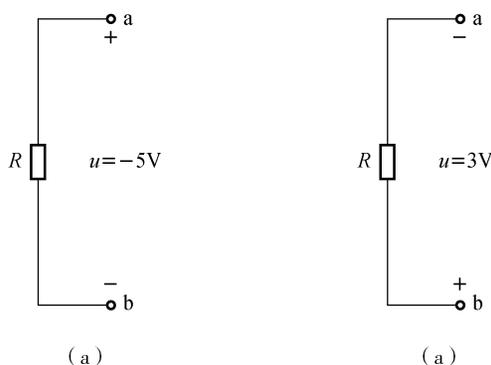


图 1-10 例 1-2 图

解 图 1-10(a)中， $u < 0$ ，电压 u 的实际方向与参考方向相反，因此 u 的实际方向 b 端为“+”，a 端为“-”，大小为 5V。

图 1-10(b)中， $u > 0$ ，电压 u 的实际方向与参考方向相同，因此 u 的实际方向 b 端为“+”，a 端为“-”，大小为 3V。

三、电功率

在电路的分析和计算中，功率和能量是很重要的概念。一方面，电路在工作时总伴随有其他形式能量的互相交换；另一方面，电气设备和电路部件本身都有功率的限制，在使用时要注意是否超过其额定值，避免造成设备损坏或者不能正常工作。

电功率定义为单位时间内电路吸收或消耗的能量，即

$$p = \frac{d\omega}{dt} = ui \quad (1-5)$$

在直流电路中，式(1-5)可写成

$$P = UI \quad (1-6)$$

上面两个式子计算功率时，电压和电流选择为关联参考方向。若电压与电流选择为非关联参考方向，则

$$p = -ui \text{ 或 } P = -UI \quad (1-7)$$

在国际单位制(SI)中，功率的单位是瓦特，简称瓦，符号为 W。

【例 1-3】 已知电路如图 1-11 所示， $I_1 = -1\text{A}$ ， $I_2 = 2\text{A}$ ， $I_3 = -1\text{A}$ ， $U_1 = 6\text{V}$ ， $U_2 = -8\text{V}$ ， $U_3 = 2\text{V}$ ， $U_4 = 2\text{V}$ 。求各元件的功率。

解 元件 1 电压和电流为关联参考方向，故元件 1 的功率为

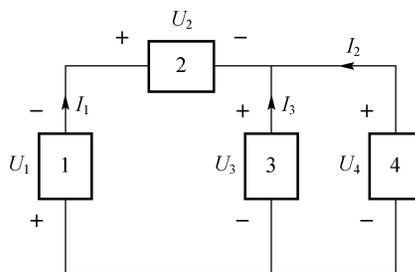


图 1-11 例 1-3 图

$$P_1 = U_1 I_1 = 6 \times (-1) = -6 \text{ W}$$

即元件 1 产生的功率为 6W。

元件 2 电压和电流为关联参考方向，故元件 2 的功率为

$$P_2 = U_2 I_1 = (-8) \times (-1) = 8 \text{ W}$$

即元件 2 消耗的功率为 8W。

元件 3 电压和电流为非关联参考方向，故元件 3 的功率为

$$P_3 = -U_3 I_3 = -2 \times (-1) = 2 \text{ W}$$

即元件 3 消耗的功率为 2W。

元件 4 电压和电流为非关联参考方向，故元件 4 的功率为

$$P_4 = -U_4 I_2 = -2 \times 2 = -4 \text{ W}$$

即元件 4 产生的功率为 4W。

任务三 电阻元件

任务目标

1. 了解电阻器及其参数，会计算导体电阻，了解其典型应用；
2. 掌握电阻串联、并联及混联的连接方式，会计算等效电阻。

一、电阻元件

电阻器的主要参数如下。

(1) 标称阻值：电阻器上面所标示的阻值。

(2) 允许误差：标称阻值与实际阻值的差值跟标称阻值之比的百分数称为允许误差，它表示电阻器的精度。

允许误差与精度等级对应关系如下：

$\pm 0.5\%$ —0.2(或 0)级， $\pm 5\%$ —I 级， $\pm 10\%$ —II 级， $\pm 20\%$ —III 级。

(3) 额定功率：在正常的条件下，电阻器长期工作所允许耗散的最大功率。

额定功率有两种标志方法：2W 以上的电阻器，直接用数字印在电阻体上；2W 以下的电阻器，以自身体积大小来表示功率。在电路图上表示电阻器功率时，采用如图 1-12 所示的符号。

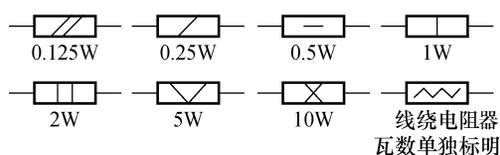


图 1-12 电阻器功率符号

(4)额定电压：是指由阻值和额定功率换算出的电压。

(5)最高工作电压：是指允许的最大连续工作电压。在低气压工作时，最高工作电压较低。

(6)温度系数：是指温度每变化 1°C 所引起的电阻值的相对变化。温度系数越小，电阻器的稳定性越好。阻值随温度升高而增大的为正温度系数，反之为负温度系数。

(7)老化系数：是指电阻器在额定功率长期负荷下，阻值相对变化的百分数，它是表示电阻器寿命长短的参数。

(8)电压系数：是指在规定的电压范围内，电压每变化 1V 电阻器的相对变化量。

(9)噪声：是指产生于电阻器中的一种不规则的电压起伏，包括热噪声和电流噪声两部分，热噪声是由于导体内部不规则的电子自由运动使导体任意两点的电压不规则变化产生的。

二、电阻的型号命名方法

国产电阻器的型号由四部分组成(不适用于敏感电阻)，如图 1-13 所示。

第一部分：主称，用字母表示，表示产品的名字。如 R 表示电阻，W 表示电位器。

第二部分：材料，用字母表示，表示电阻体用什么材料组成。如 T—碳膜，H—合成碳膜，S—有机实心，N—无机实心，J—金属膜，Y—氮化膜，C—沉积膜，I—玻璃釉膜，X—线绕。

第三部分：分类，一般用数字表示，个别类型用字母表示，表示产品属于什么类型。1—普通，2—超高频，3—高阻，4—高温，5—精密，6—高压等，G—高功率，T—可调等。

第四部分：序号，用数字表示，表示同类产品不同品种，以区分产品的外形尺寸和性能指标等。



图 1-13 电阻器型号命名方法

三、电阻器标注法

1. 直标法

用数字和单位符号在电阻器表面标出阻值，其允许误差直接用百分数表示，若电阻上未注偏差，则均为 $\pm 20\%$ 。

例如： $47\text{K} \pm 5\%$ 、 $75\text{K} \pm 1\%$ 。

2. 文字符号法

用阿拉伯数字和文字符号两者有规律组合来表示标称阻值，其允许偏差也用文字符号表示。符号前面的数字表示整数阻值，后面的数字依次表示第一位小数阻值和第二位小数阻值。

例如：3R3K 表示阻值为 3.3Ω ，误差为 $\pm 10\%$ ；5K1J 表示阻值为 $5.1k\Omega$ ，误差为 $\pm 5\%$ 。

3. 数码法

数码从左到右，前面的为有效值，最末位为指数，即零的个数，单位为欧姆。偏差通常采用文字符号表示。

例如： $100J=10\times 10^0\Omega=10\Omega$ ，误差为 $\pm 5\%$ ； $472K=47\times 10^2\Omega=4.7k\Omega$ ，误差为 $\pm 10\%$ ； $3321F=332\times 10^1\Omega=3.32k\Omega$ ，误差为 $\pm 1\%$ 。

最末位为 9 是例外，应该乘 10^{-1} 。

4. 色标法

色标法是用四环或五环颜色表示元件的标称阻值和允许偏差。国外电阻大部分采用色标法。电阻色环与数值的对应关系见表 1-1。

表 1-1 电阻色环与数值的对应关系

颜色	黑	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	金	银	无色
表示数值	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10^{-1}	10^{-2}	—
表示误差(%)	± 1	± 2	± 3	± 4							± 5	± 10	± 20

图 1-14 示出了色标法的具体标注方法。

(1) 四环普通型电阻，电阻体上有四条色环，前两条表示数字，第三条表示倍乘，第四条表示误差。

(2) 五环精密型电阻，电阻体上有五条色环，前三条表示数字，第四条表示倍乘，第五条表示误差。

下面以四环表示法为例来具体说明电阻是如何用色环表示的。

第一环和第二环：代表电阻阻值的有效数字。不同颜色对应不同数字，例如棕色为 1、红色为 2、橙色为 3、黄色为 4、绿色为 5、蓝色为 6、紫色为 7、灰色为 8、白色为 9、黑色为 0。比如，若第一环为红色(2)，第二环为紫色(7)，则有效数字为“27”。

第三环：表示倍率(10 的幂数)，用于将有效数字乘以相应的倍数。常见颜色对应的倍率为黑色 $\times 10^0$ (即 1)、棕色 $\times 10^1$ (10)、红色 $\times 10^2$ (100)、橙色 $\times 10^3$ (1000)、黄色 $\times 10^4$ (10000)、绿色 $\times 10^5$ (100000)、蓝色 $\times 10^6$ (1000000)，而金色代表 $\times 10^{-1}$ (0. 1)、银色代表 $\times 10^{-2}$ (0. 01)。例如，第三环为橙色($\times 10^3$)，则前面的有效数字“27”需乘以 1000，得到 27000Ω (27k Ω)。

第四环：表示允许误差范围，即实际阻值与标称阻值的偏差范围。常见颜色对应的误差为金色 $\pm 5\%$ 、银色 $\pm 10\%$ ，若第四环为无色，则误差为 $\pm 20\%$ 。比如，第四环为金色，说明该电阻的实际阻值在标称值的 95%~105% 之间。

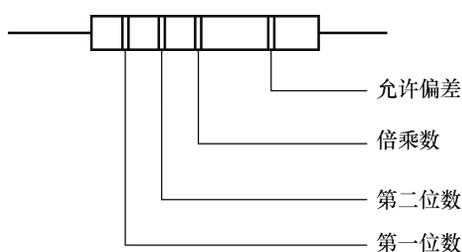


图 1-14 电阻器的阻值和误差的色标法

电阻的四环表示法如图 1-15 所示。

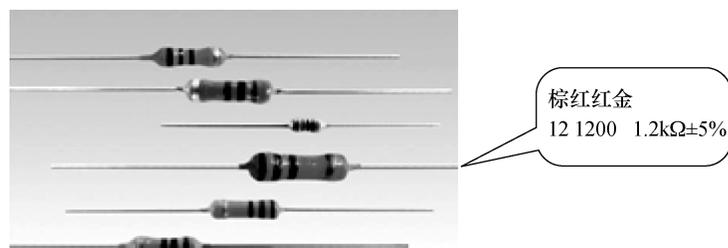


图 1-15 电阻的四环表示法

任务四 基尔霍夫定律

任务目标

1. 理解基尔霍夫定律的内容；
2. 掌握基尔霍夫定律的简单应用。

一、复杂电路的几个术语

支路：电路中一段无分支且电流相等的电路。

节点：电路中三条或三条以上支路的连接点。

回路：电路中的任意一个闭合路径。

网孔：电路中不含有支路的回路，即单孔回路。

思考：图 1-16 所示的电路叫作电桥电路，它是一种用途很广的复杂电路，特别是在测量仪表中，电桥电路是常见的电路之一。请分析一下电路中有几条支路、几个节点、几个回路和网孔。

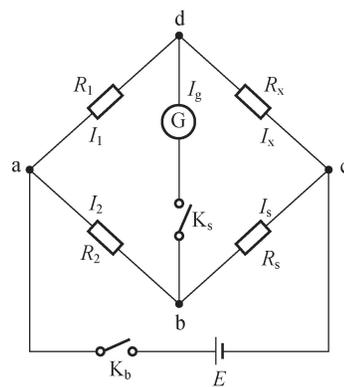


图 1-16 电桥电路

二、基尔霍夫电流定律

流进某处某一电荷量的电荷，必须同时从该处流出同一电荷量的电荷，这一结论称为电流的连续性原理。根据这一原理，电路中任一节点在任一瞬间流出节点的电流之和必定等于流入该节点的电流之和。

例如，图 1-17 所示电路中的节点 a，连接在 a 点的支路共有五个，按各支路电流的参考方向，流出节点的电流为 i_2 和 i_3 ，流入节点的电流为 i_1 、 i_3 和 i_4 ，则

$$i_2 + i_3 = i_1 + i_3 + i_4 \quad (1-8)$$

式(1-8)可以写成

$$-i_1 + i_2 - i_3 - i_4 + i_5 = 0 \quad (1-9)$$

对于任意一个节点, 有

$$\sum i = 0 \text{ 或 } \sum I = 0 \quad (1-10)$$

式(1-10)称为基尔霍夫第一定律, 也叫电流定律(KCL)。它表明汇集于任意一个节点电流的代数和等于零。

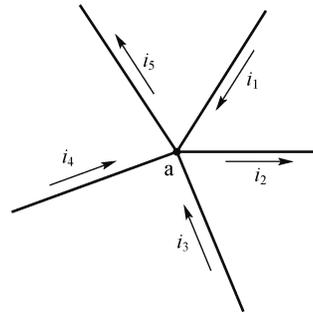


图 1-17 说明 KCL 的电路

规定: 流出节点的电流为正, 流入节点的电流为负。

在实际运用中, 任意一个节点的电流方程也可以用下式来表示:

$$\sum i_{in} = \sum i_{out} \text{ 或 } \sum I_{in} = \sum I_{out} \quad (1-11)$$

如图 1-18 所示, 对虚线封闭面包围的电路, 有

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1-12)$$

对于图 1-19, 两部分电路之间只有一条导线相连接, 根据 KCL, 流过该导线的电流 i 必为零。

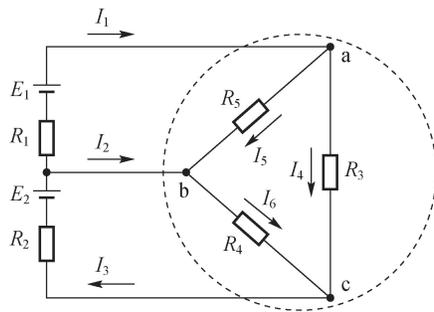


图 1-18 KCL 应用于一个封闭面

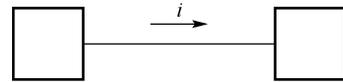


图 1-19 两部分电路之间只有一条导线相连

三、基尔霍夫电压定律

电荷在电场中从一点移动到另一点时, 它所具有的能量的改变量只与这两点的位置有关, 与移动的路径无关。基尔霍夫电压定律是电压与路径无关这一性质在电路中的体现。

基尔霍夫电压定律指出: 从回路中任一点出发绕行一周回到出发点, 电位不变, 电位差为零。在闭合回路绕行一周的过程中, 电压有升有降, 规定电压降为正, 电压升为负, 电路各段电压升降的代数和等于零。其公式为

$$\sum u = 0 \text{ 或 } \sum U = 0 \quad (1-13)$$

即电路中的任一瞬间, 任一回路的各支路电压的代数和为零, 这就是基尔霍夫第二定律, 又称为回路电压定律, 简称为 KVL。

应用基尔霍夫电压定律列电压方程时, 首先需要选定回路的绕行方向, 凡电压的参考方向与绕行方向一致时, 在该电压前面取正号; 凡电压的参考方向与绕行方向相反时, 在该电压前

面取负号。

如图 1-20 所示电路，若选定回路的绕行方向为顺时针方向，可列出电压方程为

$$-I_4 R_4 + U_{S2} - I_2 R_2 + I_3 R_3 - I_1 R_1 - U_{S1} = 0 \quad (1-14)$$

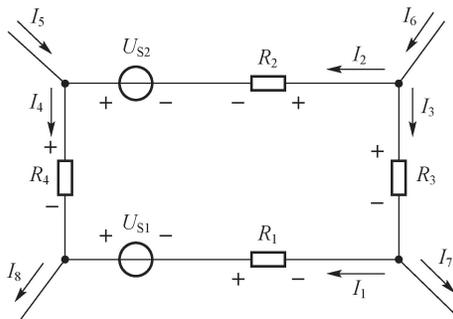


图 1-20 任一电路中的一个回路

KVL 也可以推广应用于假想回路，例如在图 1-21 中，可以假想有回路 abca，其中 ab 段未画出支路。对于这个假想回路，如从 a 出发，顺时针方向绕行一周，按图中规定的参考方向，有

$$u + u_2 - u_1 = 0 \quad (1-15)$$

则

$$u = u_1 - u_2 \quad (1-16)$$

有了 KVL 这个推论，就可以方便地求出电路中任意两点的电压。

KVL 规定了电路中任一回路内电压必须服从约束关系，至于回路内是些什么元件与定律无关。因此，不论是线性电路还是非线性电路，定律都是适用的。

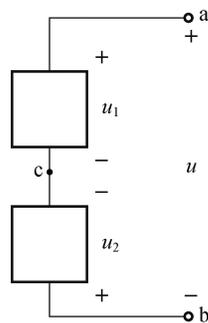


图 1-21 KVL 应用于假想回路

任务五 电路中的电位分析及其计算

任务目标

1. 掌握电路中各点电位的分析方法；
2. 熟悉电子线路图的习惯画法。

一、电路中各点电位分析

电位即电路中某点到参考点之间的电压。因此，要求某点的电位，必须在电路中选择一点

作为参考点，这个参考点叫作零电位点，即该点的电位为零。零电位点可以任意选择，通常选择电路的接地点作为参考点，用“⊥”表示。若某点的电位为正值，则说明该点电位比参考点电位高，负值表示该点电位比参考点电位低。

电路中某点的电位，就是从该点出发，沿任意一条路径走到参考点的电压。因此，计算电位的方法与计算两点间电压的方法完全相同。计算电路中某点电位的步骤如下：

(1) 选择一个参考点，假设参考点为 O；

(2) 求 a 点的电位时，任意选定一条从 a 点到 O 点的路径，沿该路径将所有的元器件上的电压求和，即为 a 点的电位，在求和的过程中要注意电压的正负。

【例 1-4】 已知电路如图 1-22 所示，分别以 A 和 B 为参考点，求 C 点的电位和 C 点与 B 点之间的电压。

解 以 A 为参考点，则 $V_A = 0V$ 。从图中可以看出

$$V_B = -5V$$

根据 KVL 方程得 $10I + 10I - 5 = 0$ ，则

$$I = 0.25A$$

因此

$$V_C = -10I = -2.5V$$

$$U_{CB} = V_C - V_B = -2.5 - (-5) = 2.5V$$

以 B 为参考点，则

$$V_B = 0V$$

$$V_C = 10I = 2.5V$$

$$U_{CB} = V_C - V_B = 2.5 - 0 = 2.5V$$

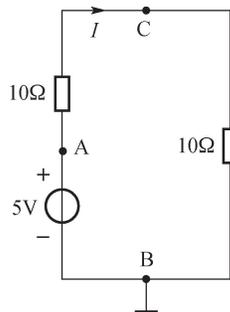


图 1-22 例 1-4 图

从以上分析可以得出结论：电位是一个相对值，它的大小和参考点的选取有关，参考点选择不同，电位值也不同，但电压值的大小与参考点的选择无关。

二、等电位点

所谓等电位点是指电路中电位相同的点。例如图 1-23 中，选择地为参考点，则 a 点和 b 点的电位分别为

$$V_a = \frac{24}{10+20} \times 20 = 16V$$

$$V_b = \frac{24}{20+40} \times 40 = 16V$$

a 点和 b 点电位相等，它们是等电位点。等电位点之间虽然没有直接相连，但电压等于零。若用导线或电阻元件将等电位点连接起来，因其中没有电流流过，因此不影响电路的原有工作状态。

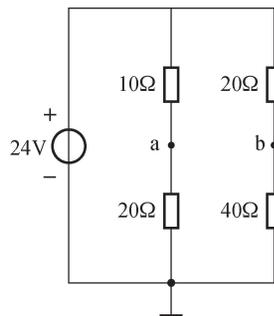


图 1-23 等电位点示意图

三、电子线路图的习惯画法

在电子线路中，电路原理图也常用电位简略图表示，即不再画出电源，而改为电位标出，如图 1-24(a) 可以用图 1-24(b) 做简化表示。在图 1-24(b) 中，+10V 表示该点电位是 10V，可以看作该点 10V 理想电压源的正极，它的负值意味着接地。-6V 表示该点电位是 6V，可以看作该点接 6V 理想电压源的负极，它的正极意味着接地。

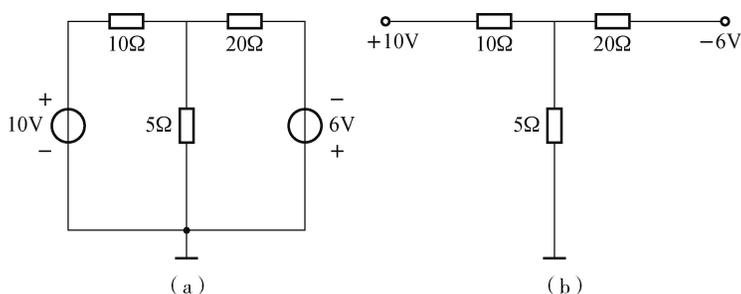


图 1-24 电路图的电位表示法

【例 1-5】 已知电路如图 1-25(a) 所示，求 a 点电位。

解 图 1-25(a) 所示为电子线路中的习惯画法，该电路图可以转换为电路图的常用画法，如图 1-25(b) 所示，根据电压源和电流源模型之间的等效原则，可以得到图 1-25(c) 所示电路，则

$$V_a = \frac{8.5}{1+4} \times 4 = 6.8 \text{ V}$$

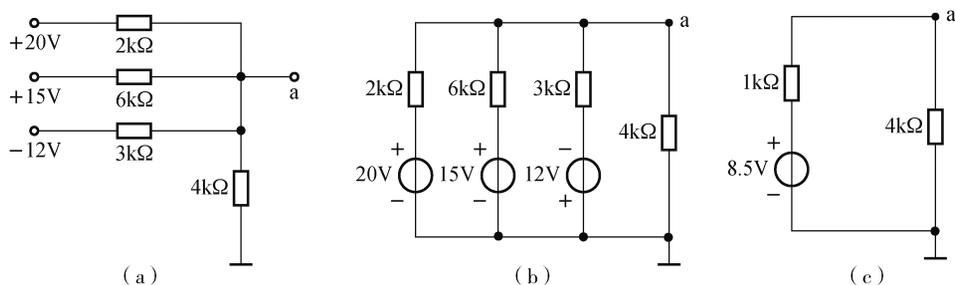


图 1-25 例 1-5 图

思考练习

1-1 电路如图 1-26 所示，图中标出的是各元件的电压和电流的参考方向，分别计算各元件的功率，并判断该元件是耗能元件还是电源。



图 1-26 习题 1-1 图

1-2 已知电阻为 5Ω ，电流源为 $2A$ ，电压源为 $20V$ ，分别求图 1-27 中各元件的功率。

1-3 已知电路如图 1-28 所示，求 $10V$ 的电压源的功率。

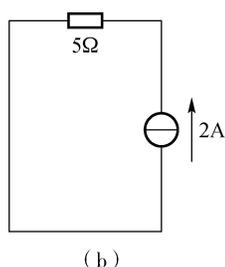
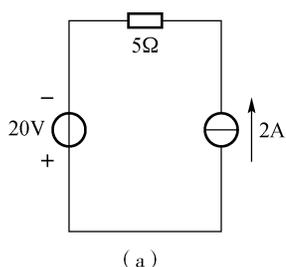


图 1-27 习题 1-2 图

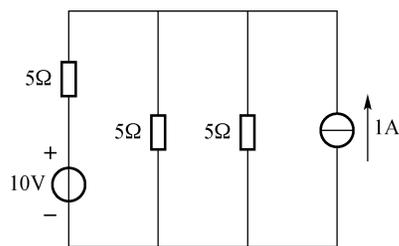


图 1-28 习题 1-3 图

1-4 电路如图 1-29 所示，每个方框表示一个元器件，根据已知的电流值求 I 。

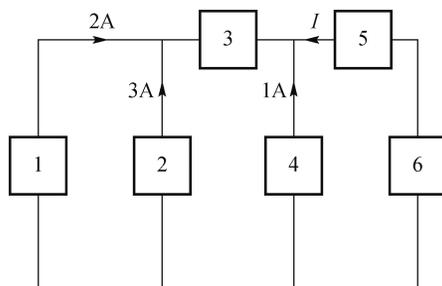


图 1-29 习题 1-4 图

1-5 电路如图 1-30 所示，分别求各支路的未知数。

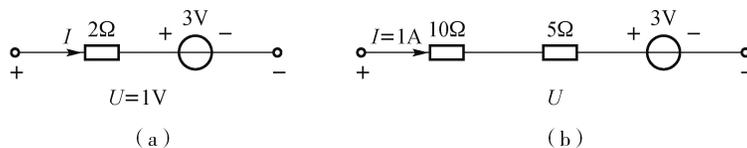


图 1-30 习题 1-5 图

1-6 电路如图 1-31 所示，分别求 a 点和 b 点的电位。

1-7 电路如图 1-32 所示，求 a 点的电位。

1-8 电路如图 1-33 所示，求开路电压 U_{ab} 。

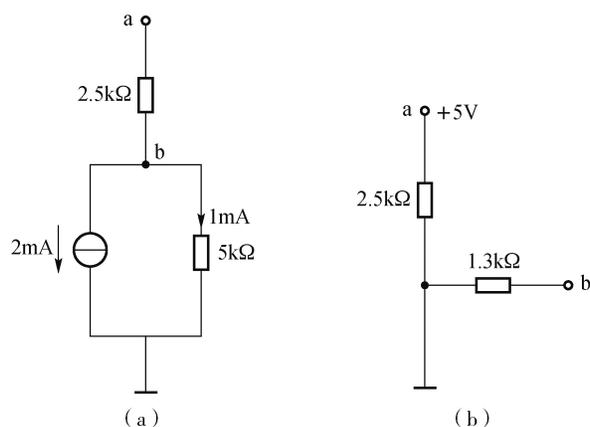


图 1-31 习题 1-6 图

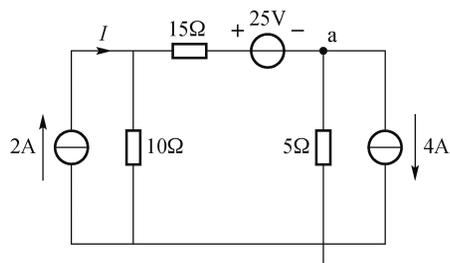


图 1-32 习题 1-7 图

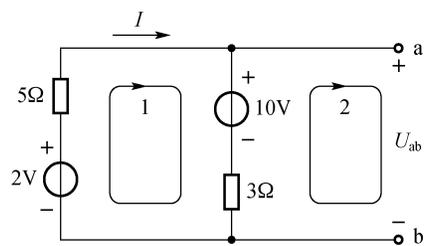


图 1-33 习题 1-8 图

1-9 电路如图 1-34 所示, 求通过两电压源的电流 I_{S1} 和 I_{S2} 以及两电流源的端电压 U_{S1} 和 U_{S2} 。

1-10 求图 1-35(a)和(b)所示电路中 a 点的电位。

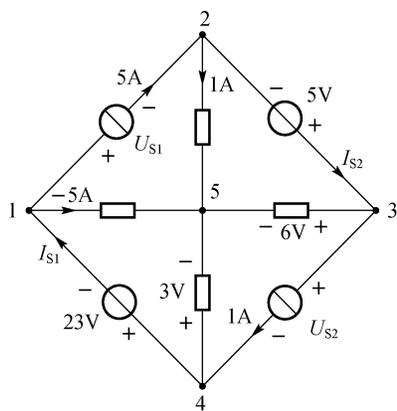


图 1-34 习题 1-9 图

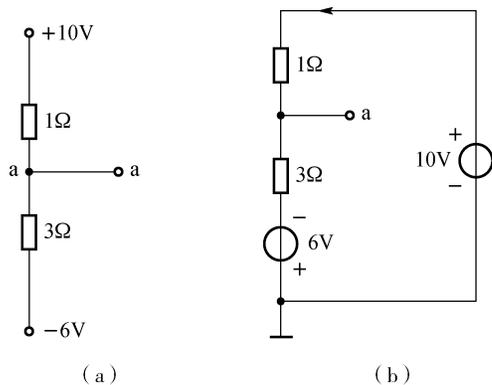


图 1-35 习题 1-10 图

1-11 求图 1-36(a)和(b)所示电路中的未知电流。

1-12 求图 1-37 所示电路中的 U_1 、 U_2 、 U_3 。

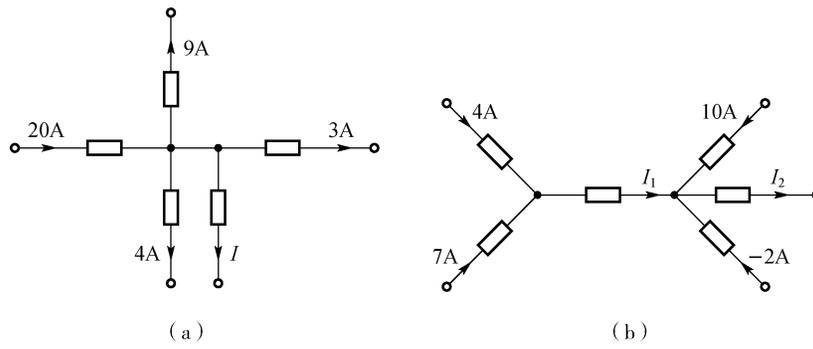


图 1-36 习题 1-11 图

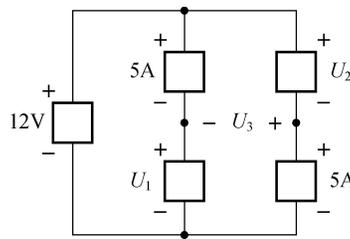


图 1-37 习题 1-12 图

1-13 求图 1-38 所示电路中的 i_1 和 U_{ad} 。

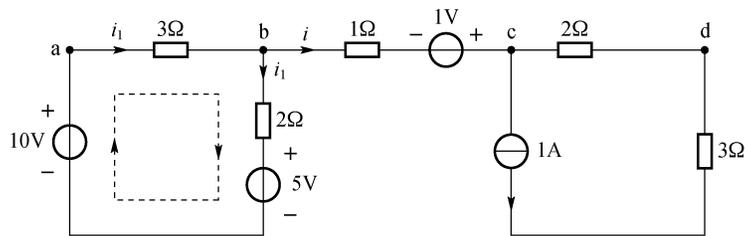


图 1-38 习题 1-13 图

1-14 求图 1-39 所示电路中 a 点电位。

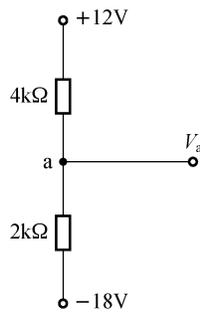


图 1-39 习题 1-14 图

项目二

电路的分析方法

- 任务一 电阻串并联连接的等效变换
- 任务二 电压源与电流源及其等效变换
- 任务三 支路电流法的分析与应用
- 任务四 节点电压法的分析与应用
- 任务五 叠加原理的分析与应用
- 任务六 戴维南定理和诺顿定理的分析与应用

通过项目一的学习，可以知道电路的分析与计算要利用欧姆定律和基尔霍夫定律，但是对于复杂的电路，仅仅使用这两大定律是不够的。本项目将以直流电路为例介绍几种复杂电路的分析方法，包括电阻的串并联、电源模型及其等效变换、支路电流法、节点电压法、叠加原理、戴维南定理和诺顿定理。这些都是分析电路的基本原理和方法。

任务一 电阻串并联连接的等效变换

任务目标

1. 了解电阻串联、并联和混联电路及其应用；
2. 掌握混联电路的等效变换和计算。

一、电阻的串联

将两个或多个电阻一个一个地首尾相接，中间没有分支的连接方式叫作电阻的串联。

如图 2-1 所示电路，由基尔霍夫电压定律可得

$$\begin{aligned} U &= U_1 + U_2 = IR_1 + IR_2 \\ &= I(R_1 + R_2) \end{aligned}$$

设

$$R = R_1 + R_2$$

则

$$U = IR \tag{2-1}$$

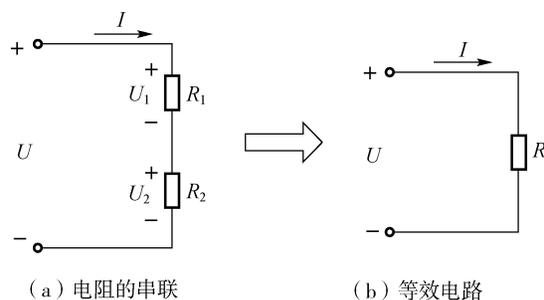


图 2-1 电阻的串联电路

由式(2-1)可知：在输入电压和电流不变的条件下，图 2-1(a)可用图 2-1(b)来代替，即 R_1 与 R_2 的串联可用一个电阻 R 代替， R 称为串联等效电阻，其阻值为各串联电阻阻值的和。

两个串联电阻的电压分别为

$$\begin{cases} U_1 = IR_1 = \frac{U}{R_1 + R_2} R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \\ U_2 = IR_2 = \frac{U}{R_1 + R_2} R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \end{cases} \quad (2-2)$$

可见,各串联电阻具有分压作用。电阻阻值与分压成正比关系,即电阻阻值越大,则分压值越高。

综上所述,电阻的串联电路有以下特点:

- (1) 串联电路中,电流处处相同,且为同一电流。
- (2) 电阻的串联网路的端口电压等于各电阻电压之和,即 $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ 。
- (3) 电阻的串联网路的等效电阻等于各电阻之和,即 $R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ 。

串联电阻的等效电阻比每个电阻都大,在端口电压一定时,串联电阻越多,电流则越小,因此串联电阻有“限流”作用。

- (4) 串联电路具有分压作用,各电阻分得的电压之比等于它们的电阻之比,即

$$U_1 : U_2 : \dots : U_n = R_1 : R_2 : \dots : R_n$$

在端口电压一定时,适当选择串联电阻,可使每个电阻得到所需要的电压。

- (5) 各电阻所消耗的功率与电阻成正比,电阻串联电路的总功率等于各电阻功率之和,即

$$P_1 : P_2 : \dots : P_n = R_1 : R_2 : \dots : R_n$$

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

串联电路中任何一个电阻发生变化,都会引起总电流的变化,并导致电压分配的改变和功率的变化。只要有一个电阻断路,整个电路就断开,故一般电力负载不采用串联方式。电阻串联电路在实际应用中被广泛用于分压器和限流器。

二、电阻的并联

电路中两个或更多个电阻连接在两个公共的节点之间,则这样的连接法称为电阻的并联。在各个并联支路(电阻)上电压相等。

如图 2-2 所示电路,由基尔霍夫电流定律可得

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

$$= U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

设

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

则

$$I = \frac{U}{R} \quad (2-3)$$

式(2-3)表明:在输入电压和电流不变的条件下,图 2-2(a)可用图 2-2(b)来代替,即 R_1 与 R_2 的并联可用一个电阻 R 代替, R 称为并联等效电阻,其阻值的倒数等于各并联电阻阻值倒

数之和。

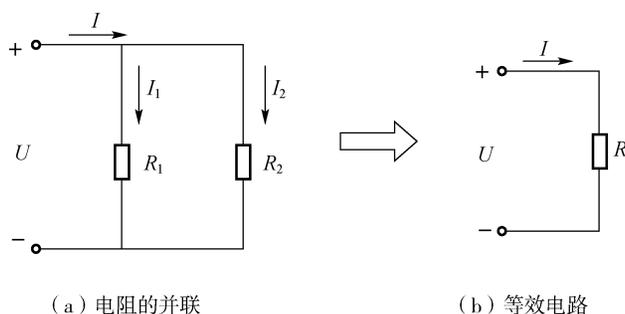


图 2-2 电阻的并联电路

图 2-2 中在电路总电流 I 一定的情况下，总电压为

$$U = RI = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I$$

则流过两并联电阻的电流分别为

$$\begin{cases} I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \\ I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \end{cases} \quad (2-4)$$

从式(2-4)可知：各并联电阻都具有分流作用。电阻阻值与其流过的电流成反比，即阻值越大，分得的电流越小。

综上所述，电阻的并联电路有以下特点：

(1) 各个电阻两端的电压相等，都等于端口电压，这是并联接法的主要特征。

(2) 电阻的并联网络的端电流等于各电阻电流之和，即 $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ 。

(3) 电阻的并联网络的等效电阻的倒数等于各电阻倒数之和，或电阻的并联网络的等效电导等于各电阻的电导之和，且并联电阻的等效电阻比每个电阻都小。

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \text{ 或 } G_{\text{eq}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n$$

(4) 并联电路具有分流作用，且各电阻的电流与它们的电导成正比，与它们的电阻成反比，即

$$I_1 : I_2 : \dots : I_n = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \dots : \frac{1}{R_n} = G_1 : G_2 : \dots : G_n$$

在端电流一定时，适当选择并联电阻，可使每个电阻得到所需要的电流。

(5) 并联电路中总功率等于各支路电阻消耗功率之和。各支路电阻所消耗的功率与各支路电阻的阻值成反比，与它们的电导成正比，即

$$P_1 : P_2 : \dots : P_n = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \dots : \frac{1}{R_n} = G_1 : G_2 : \dots : G_n$$

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

三、电阻的混联

在实际应用中,电路里包含的电阻常常不是单纯的串联或并联,而是既有串联又有并联,电阻的这种连接方式称为电阻的混联。

对于混联电路,最重要的是要分析清楚各电阻之间的串、并联关系。较简单的电路可以通过观察直接看出,如图 2-3 所示。当电阻串、并联的关系不易看出时,可以在不改变元件间连接关系的条件下将电路画成比较容易判断出串、并联关系的形式。

例如图 2-4(a)改画成图 2-4(b)后,串、并联关系就可以很明显地看出。

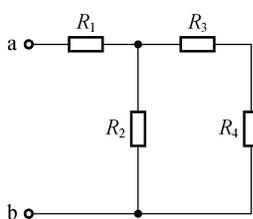


图 2-3 电阻的混联

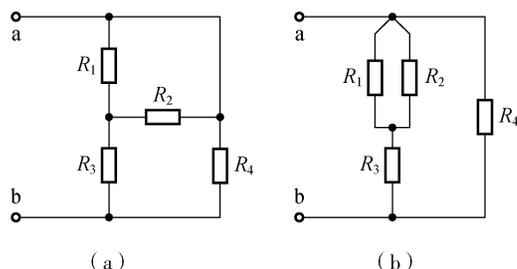


图 2-4 混联电路举例一

又如图 2-5 (a)中,当 S_1 闭合 S_2 断开时, R_1 、 R_2 被短接,等效电路如图 2-5(b)所示。当 S_1 、 S_2 都断开时, R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 相互串联。当 S_1 与 S_2 都闭合时,可依次将 R_1 、 R_2 、 R_3 重画在 a、c 两节点间,如图 2-5(c)所示,显然,这时 R_1 、 R_2 、 R_3 是并联的。

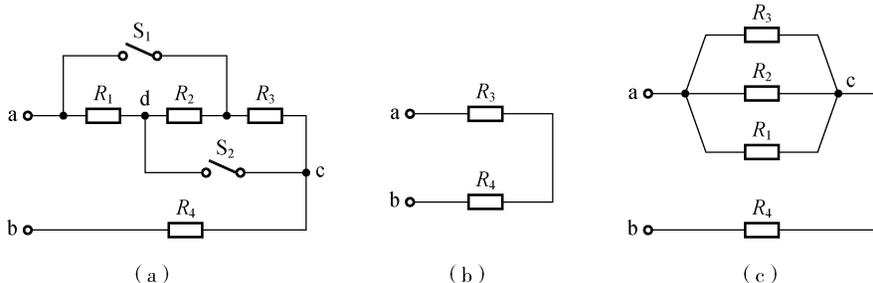


图 2-5 混联电路举例二

求混联电路中等效电阻(总电阻)的方法——等电位法,步骤如下:

- (1) 标出各等电位点。
- (2) 用等位线(直线)代表各等电位点,求解两端画在最外,中间依次画出各等位线。
- (3) 在各等位线之间连接电阻,注意:电阻不能漏掉。
- (4) 化简,如果出现“工”连接(桥式连接),桥不平衡,则需进行星形与三角形变换。
- (5) 最终的一个电阻就是等效电阻。

【例 2-1】 求图 2-6(a)、(b)所示电路 a、b 两端的等效电阻。

【例 2-2】 计算图 2-7(a)所示电路中的电流 I_1 。已知电路中 $R_1=10\Omega$, $R_2=8\Omega$, $R_3=2\Omega$, $R_4=6\Omega$, 端电压 $U=140\text{V}$ 。

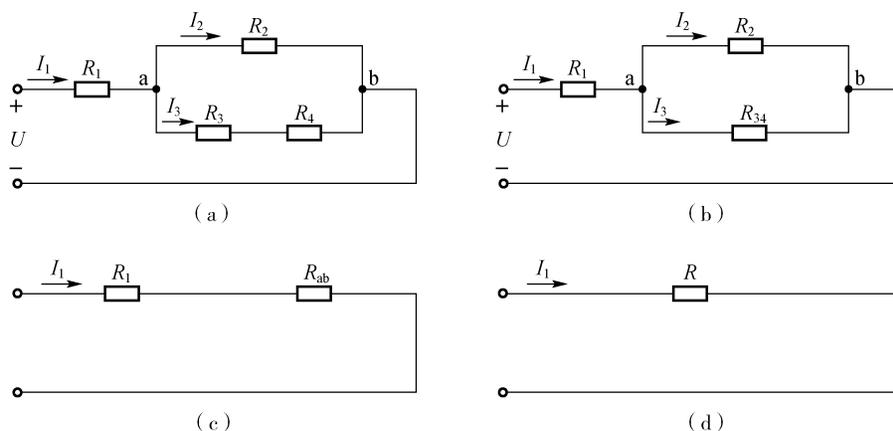


图 2-7 例 2-2 电路图及简化电路

解 由图 2-7(b)得

$$R_{34} = R_3 + R_4 = 2 + 6 = 8\Omega$$

由图 2-7(c)得

$$R_{ab} = \frac{R_2 R_{34}}{R_2 + R_{34}} = \frac{8 \times 8}{8 + 8} = 4\Omega$$

由图 2-7(d)得

$$R = R_1 + R_{ab} = 10 + 4 = 14\Omega$$

最后得

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{140}{14} = 10\text{A}$$

任务二 电压源与电流源及其等效变换

任务目标

1. 了解电压源与电流源的基本知识；
2. 掌握电压源与电流源的等效变换。

一、电压源

1. 理想电压源

(1) 定义。

如果一个二端元件接到任一电路后，该元件两端均能保持其规定的电压值 U_S ，则此二端元件称为理想电压源，又称恒压源，如图 2-8 (a) 所示。

在时间 t 时，理想电压源在 $u-i$ 平面的特性(称伏安特性)是一条平行于 i 轴的直线，它与 u 轴的交点即此时的 U_S 值，如图 2-8(b) 所示。如果 U_S 是与时间 t 无关的常数，则称该理想电压源为直流恒压源。

(2) 特点。

①恒压源的端电压为定值(例如 E)或一定的时间函数(例如 $220\sqrt{2}\sin\omega t$)，与流过它的电流 i 无关。

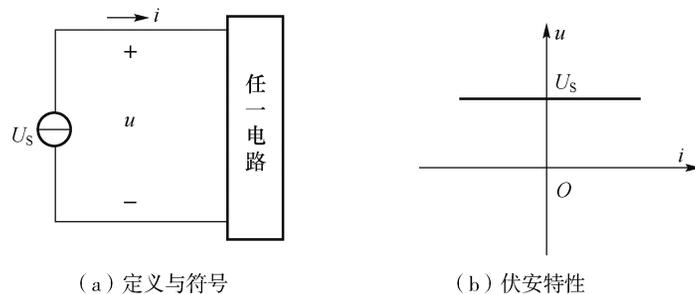


图 2-8 理想电压源

②流过它的电流 i 不是由恒压源本身决定的，主要由与之连接的外电路决定，即随外电路的改变而改变。

③若恒压源的电压值等于零，则该恒压源实际上就是短路，其伏安特性与 i 轴重合。无论流过它的电流为何值，其端电压恒为零。

2. 实际电压源模型

实际电源都是有内阻的，一个实际电源可用一个恒压源 U_S 与一个内阻 R_0 串联的电路模型表示，该电路模型称为电压源模型(简称电压源)，如图 2-9(a) 所示，由图可得

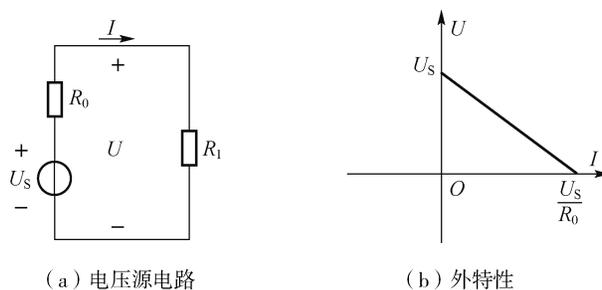


图 2-9 电压源

$$U = U_s - IR_0 \quad (2-5)$$

令 $I=0$ 时, $U=U_s$; $U=0$ 时, $I=\frac{U_s}{R_0}$, 可作出其伏安特性(又称外特性)曲线, 如图 2-9(b)所示。

二、电流源

1. 理想电流源

(1) 定义。

如果一个二端元件接到任一电路后, 该元件流入电路的电流均能保持其规定的值 i_s , 则此二端元件称为理想电流源(又称恒流源), 如图 2-10(a)所示。

在 t 时刻理想电流源在 $i-u$ 平面的特性曲线(伏安特性)是一条平行于 u 轴的直线, 它与 i 轴的交点即为此时的 i_s 值, 如图 2-10(b)所示。

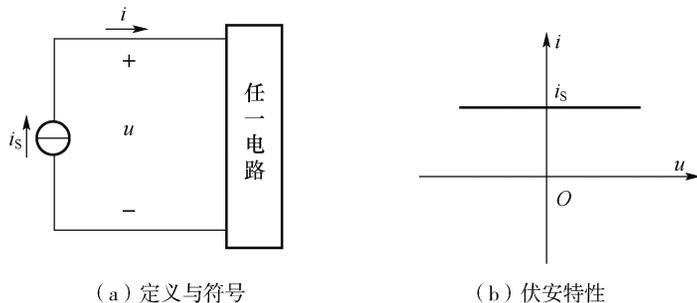


图 2-10 理想电流源

如果 i_s 是与时间 t 无关的常数, 即 $i_s = I_s$ 为定值, 则称该理想电流源为直流恒流源。

(2) 特点。

- ①恒流源的电流 i_s 为定值或一定的时间函数, 与其端电压 u 无关。
- ②其端电压 u 不是由恒流源本身决定的, 主要由与之连接的外电路决定, 即随外电路的改变而改变。
- ③若恒流源的电流恒等于零($i_s=0$), 则恒流源就是开路, 其伏安特性与 u 轴重合。无论它的端电压为何值, 其电流恒为零。

2. 实际电流源

一个实际电源还可以用一个恒流源 i_s 与内导 G_0 (或内阻 R_0)并联的电路模型表示。该电路模型称为电流源模型(简称电流源), 如图 2-11(a)所示, 由图可得

$$I = I_s - UG_0 \quad (2-6)$$

令 $U=0$ 时, $I=I_s$; $I=0$ 时, $U=\frac{I_s}{G_0}$, 可作出其外特性曲线, 如图 2-11(b)所示。

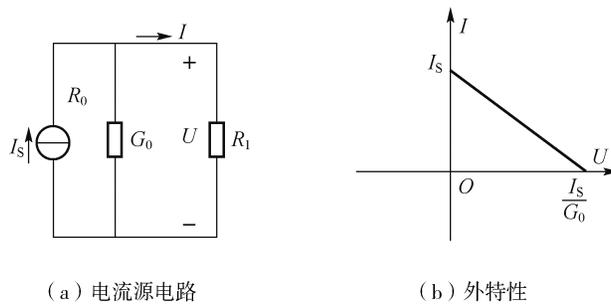


图 2-11 电流源

三、电压源与电流源的等效变换

电压源和电流源之间，当其外特性相同，即对外电路等效的前提下，两种模型间可以互换。由图 2-9(b)和图 2-11(b)可知，当外特性相同时，即有如下结论。

当 $I=0$ 时：

$$U = U_s = \frac{I_s}{G_0}$$

当 $U=0$ 时：

$$I = I_s = \frac{U_s}{R_0}$$

可得两种模型互换时，参数间的关系为

$$\begin{cases} U_s = \frac{I_s}{G_0}, & I_s = \frac{U_s}{R_0} \\ R_0 = \frac{1}{G_0}, & G_0 = \frac{1}{R_0} \end{cases} \quad (2-7)$$

由电压源模型变换为电流源模型，如图 2-12 所示。

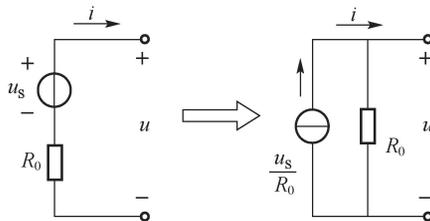


图 2-12 由电压源模型变换为电流源模型

由电流源模型变换为电压源模型，如图 2-13 所示。

互换时还要注意两种模型的极性必须一致。要特别强调的是，等效是对外电路而言的，前提是外特性一致，而两种模型本身(即内部)的工作状态并不相同。例如电压源开路时，功耗为零；电流源开路时，功耗全部消耗在内阻上。而电流源短路时，功率为零；电压源短路时，功耗全部消耗在内阻上。

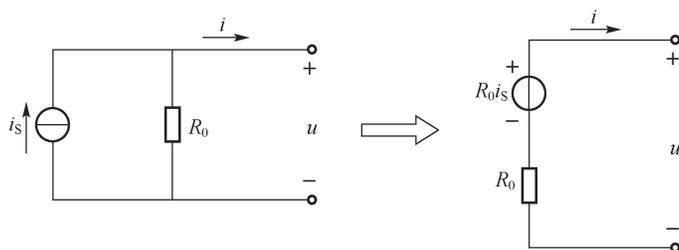


图 2-13 由电流源模型变换为电压源模型

另外，恒压源和恒流源间不能等效互换，但在电路分析时，可将与恒压源串联的电阻或与恒流源并联的电阻看成其内阻，进行等效互换。

【例 2-3】 电路及参数如图 2-14(a)所示，试求图中的电流 I 。

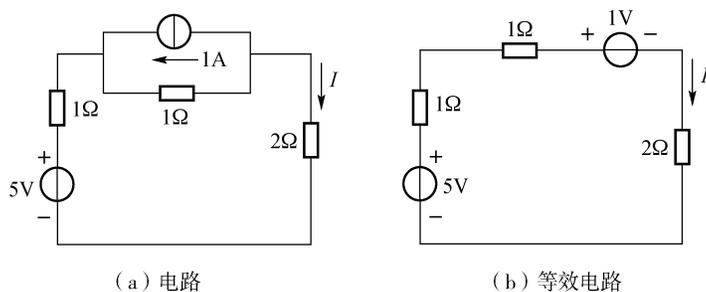


图 2-14 例 2-3 图

解 利用等效变换将图 2-14(a)等效变换为图 2-14(b)所示电路，则可得

$$I = \frac{5-1}{1+1+2} = 1\text{A}$$

任务三 支路电流法的分析与应用

任务目标

1. 理解支路电流法的概念；
2. 掌握应用支路电流法解题的一般步骤。

支路电流法是以支路电流为变量，直接运用基尔霍夫节点电流定律和回路电压定律列方程，然后联立求解的方法，它是电路分析最基本的方法。如图 2-15 所示电路，共有 3 条支路、2 个节点、2 个网孔，运用支路电流法分析的一般步骤如下。

(1) 确定各个支路电流的参考方向，并在图中标出。

(2) 根据 KCL 列节点电流方程， n 个节点的电路可列出 $(n-1)$ 个独立方程。在图 2-15 中，有两个节点 a 和 b。

对节点 a:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (2-8)$$

对节点 b:

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0 \quad (2-9)$$

方程(2-9)不是独立方程，它是方程(2-8)的同解方程。两个节点只能列出 1 个独立的节点电流方程。

(3) 根据 KVL 列回路电压方程。为保证所列方程为独立方程，每次选取回路时最少应包含一条前面未曾用过的新支路，最好选用网孔作回路。如果电路有 m 个网孔，则可列出 m 个独立的回路电压方程。

在图 2-15 中有两个网孔，标出网孔的绕行方向。

对左边网孔:

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 - U_{S1} = 0 \quad (2-10)$$

对右边网孔:

$$-R_3 I_3 - R_2 I_2 + U_{S2} = 0 \quad (2-11)$$

应用 KCL 和 KVL 共可列出 $(n-1) + m = b$ 个独立方程，根据欧拉公式可知 b 正好为支路数。

(4) 联立求解方程组，即可求出各支路电流。

联立求解式(2-8)、式(2-10)和式(2-11)即可求出图 2-15 中各支路电流 I_1 ， I_2 和 I_3 。

【例 2-4】 图 2-15 中，若 $R_1 = R_2 = R_3 = 1\Omega$ ， $U_{S1} = 3V$ ， $U_{S2} = 1V$ ，求各支路电流。

解 将已知数据代入节点电流方程式(2-8)和网孔电压方程式(2-10)和式(2-11)可得

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$I_1 + I_3 = 3$$

$$I_2 + I_3 = 1$$

解之得

$$I_1 = \frac{5}{3} \text{ A}$$

$$I_2 = -\frac{1}{3} \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{4}{3} \text{ A}$$

【例 2-5】 试用支路电流法求图 2-16 中的电流 I_1 和 I_2 。

解 图 2-16 中共有三条支路，其中一条支路的电流已知为 I_S ，求另外两条支路电流 I_1 和 I_2 ，故只需列两个

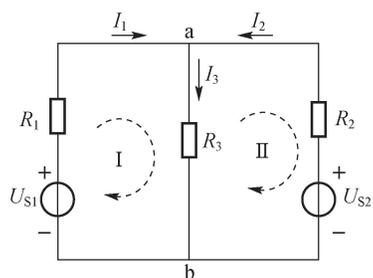


图 2-15 支路电流法

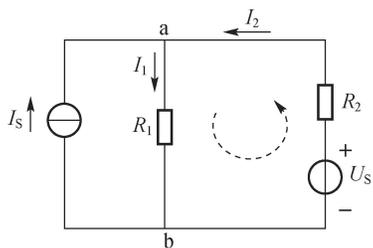


图 2-16 例 2-5 图

独立方程。

(1) I_1 和 I_2 的正方向和所选回路绕行方向如图 2-16 所示。

(2) 根据 KCL, 由节点 a 可得

$$I_1 - I_2 = I_s$$

(3) 根据 KVL, 由右边网孔可得

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 = U_s$$

(4) 联立求解, 得

$$I_1 = \frac{U_s + R_2 I_s}{R_1 + R_2}, \quad I_2 = \frac{U_s - R_1 I_s}{R_1 + R_2}$$

任务四 节点电压法的分析与应用

任务目标

1. 熟悉基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律;
2. 掌握节点电压法并分析复杂电路。

图 2-17 所示为两个节点多条支路的电路, 设 a, b 两节点间的电压为 U , 其参考方向如图所示, 由 a 指向 b, 则根据 KCL 由节点 a 可得

$$I_1 - I_{s2} - I_2 = 0 \quad (2-12)$$

式中:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{U_{s1} - U}{R_1} \\ I_2 = \frac{U}{R_3} \end{cases} \quad (2-13)$$

将式(2-13)代入式(2-12)得

$$\frac{U_{s1} - U}{R_1} - I_{s2} - \frac{U}{R_3} = 0 \quad (2-14)$$

节点间电压为

$$U = \frac{\frac{U_{s1}}{R_1} - I_{s2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}} \quad (2-15)$$

注意: 式(2-15)中不含 R_2 , 即与恒流源串联的电阻对 U 无影响。

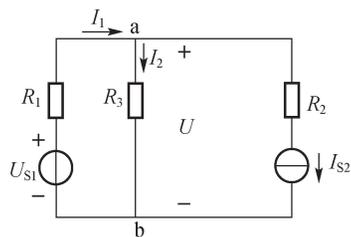


图 2-17 节点电压法

对两个节点的电路,由式(2-15)先求出两节点的电压,再代入式(2-13)求各支路电流,这种方法称为节点电压法。

在求两点间电压时,在式(2-15)中,分子实质上是流入节点 a 的所有电流源的代数和(流入该节点的电流取正号,流出该节点的电流取负号)。分母为连接到 a, b 两点的各支路电导之和(但与恒流源串联的电阻除外)。因此,两节点间的电压又可写为

$$U = \frac{\sum \frac{U_s}{R}}{\sum \frac{1}{R}} = \frac{\sum I_s}{\sum G} \quad (2-16)$$

式(2-16)又称为弥尔曼(J. Millman)定理。

【例 2-6】 图 2-17 所示电路中,已知 $R_1=R_2=R_3=2\Omega$, $U_s=6V$, $I_{s2}=1A$ 。求 I_1 和 I_3 。

解 由题意可得

$$U = \frac{\frac{U_s}{R_1} - I_{s2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}} = \frac{\frac{6}{2} - 1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} = 2V$$

$$I_1 = \frac{U_s - U}{R_1} = \frac{6 - 2}{2} = 2A$$

$$I_2 = \frac{U}{R_3} = \frac{2}{2} = 1A$$

【例 2-7】 图 2-18 所示电路中,已知 $U_{s1}=2V$, $U_{s2}=U_{s3}=6V$, $R_1=1\Omega$, $R_2=2\Omega$, $R_3=3\Omega$, $R_4=6\Omega$ 。求电流 I 。

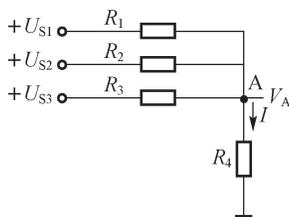


图 2-18 例 2-7 图

解 由题意可得

$$V_A = \frac{\sum I_s}{\sum G} = \frac{\frac{U_{s1}}{R_1} + \frac{U_{s2}}{R_2} + \frac{U_{s3}}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}$$

$$= \frac{2 + 3 + 2}{1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{6}} = 3.5V$$

$$I = \frac{V_A}{R_4} = \frac{3.5}{6} = \frac{7}{12}A$$