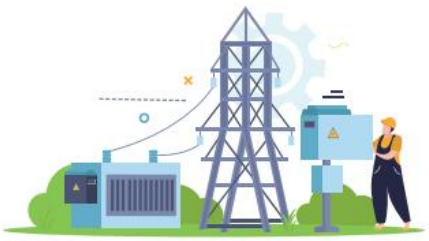
电工基础

类目：机械类
书名：电工基础
主编：许癸驹 邢文静 赵茹慧
出版社：电子科技大学出版社
开本：大 16 开
书号：978-7-5770-1597-2
使用层次：通用
出版时间：2025 年 5 月
定价：48.00 元
印刷方式：双色
是否有资源：是



电工基础

DIANGONG JICHU

策划编辑：万晓桐
责任编辑：万晓桐
封面设计：旗语书装

ISBN 978-7-5770-1597-2
定价：48.00元

机电类创新教材
教育改革新理念教材

电工基础

主编◎许癸驹　邢文静　赵茹慧

电子科技大学出版社

机电类创新教材
教育改革新理念教材

电工基础

DIANGONG JICHU

主　编◎许癸驹　邢文静　赵茹慧

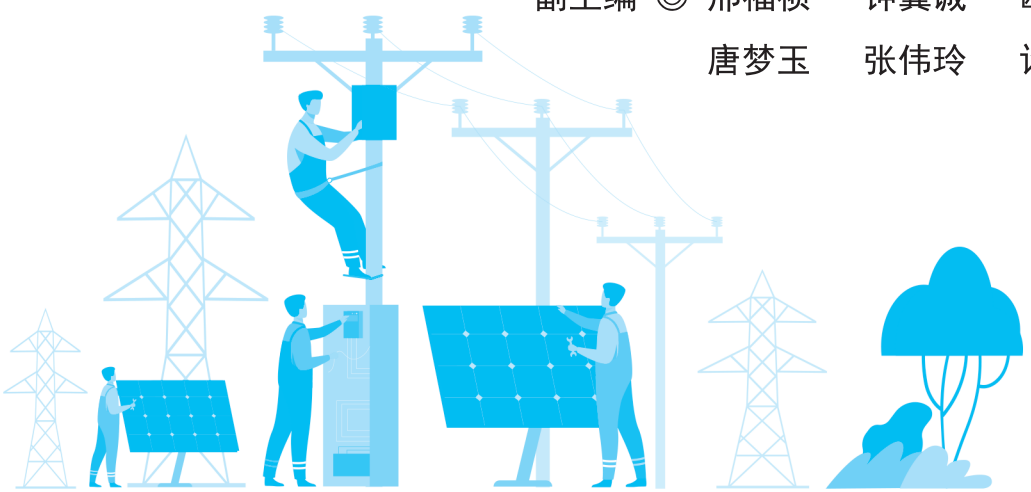
电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press

机电类创新教材
教育改革新理念教材

电工基础

DIANGONG JICHU

主　编◎许癸驹　邢文静　赵茹慧
副主编◎邢福祯　钟翼诚　欧阳聪
唐梦玉　张伟玲　许让鹏



电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press
·成都·

图书在版编目(CIP)数据

电工基础 / 许癸驹，邢文静，赵茹慧主编. --成都：成都电子科大出版社，2025. 5. -- ISBN 978-7-5770-1597-2

Ⅰ. TM1

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025E7P564 号

电工基础

DIANGONG JICHU

许癸驹　邢文静　赵茹慧　主编

策划编辑　万晓桐
责任编辑　万晓桐
责任校对　李燕芳
责任印制　梁　硕

出版发行　电子科技大学出版社
　　成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼　邮编 610051
主　　页　www. uestcp. com. cn
服务电话　028-83203399
邮购电话　028-83201495

印　　刷　涿州汇美亿浓印刷有限公司
成品尺寸　210mm×285mm
印　　张　13. 5
字　　数　366 千字
版　　次　2025 年 5 月第 1 版
印　　次　2025 年 5 月第 1 次印刷
书　　号　ISBN 978-7-5770-1597-2
定　　价　48. 00 元

版权所有，侵权必究

前　言

电工基础是高校电类专业的基础课程。通过本课程的学习，学生可掌握电工技术必要的基础理论、基本知识和基本技能，了解电工发展的概况，为学习后续课程以及从事相关的工程技术和科学研究工作打下良好的理论和实践基础。

本书共分为9个项目，系统全面地介绍了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、三相正弦交流电路、磁路与变压器、交流电动机、电气设备及低压电器控制线路、安全用电及电工测量等知识。

本书内容全面，体例新颖，实用性强。在内容编排上，采用任务驱动方式，基础理论知识由浅入深，原理清晰。在重点介绍电工技术基础知识的同时，每个项目给出了一些典型和新型的应用实例，并设置了相应的实验及习题，目的是让学生易于理解和掌握所学理论知识，提高学生的实践操作能力。每个任务都设置了知识拓展环节，以拓展学生的知识面。另外，在书中适当增加了安全用电知识，特别对电工测量部分做了相应的介绍。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥和疏漏之处，敬请读者给予批评指正。

编　者

2025年1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 …… 12
任务五　电路中的电位分析及其计算 …… 14
实验一　电阻、电源的伏安特性的测定 …… 17
小结 …… 18
习题 …… 19

项目二　电路的分析方法 …… 22

任务一　电阻串联、并联连接的等效变换 …… 23
任务二　电压源与电流源及其等效变换 …… 28
任务三　支路电流法的分析与应用 …… 31
任务四　节点电压法的分析与应用 …… 33
任务五　叠加原理的分析与应用 …… 34
任务六　戴维南定理和诺顿定理的分析与应用 …… 36
实验二　电路基本定律及定理的验证 …… 39
小结 …… 41
习题 …… 42

项目三　正弦交流电路 …… 44

任务一　认识交流电路中的基本物理量 …… 45
任务二　正弦量的相量表示 …… 49
任务三　电路基本定律的相量形式 …… 53
任务四　单一参数的正弦交流电路 …… 55

任务五　正弦交流电路中的功率 …… 67
实验三　功率因数的提高 …… 71
小结 …… 73
习题 …… 73

项目四　三相正弦交流电路 …… 75

任务一　认识三相电压 …… 76
任务二　负载星形连接的三相电路分析 …… 80
任务三　负载三角形连接的三相电路分析 …… 84
任务四　三相功率的计算 …… 86
实验四　三相电路电压、电流及功率的测量 …… 88
小结 …… 91
习题 …… 91

项目五　磁路与变压器 …… 93

任务一　初步认识磁路 …… 94
任务二　变压器的基本结构和工作原理 …… 98
任务三　实用中的常见变压器 …… 105
实验五　校验变压器连接组号的方法 …… 108
小结 …… 110
习题 …… 110

项目六　交流电动机 …… 112

任务一　电动机概述 …… 113
任务二　三相异步电动机的基本结构 …… 116
任务三　三相异步电动机的工作原理 …… 118
任务四　三相异步电动机的特性 …… 122
任务五　三相异步电动机的启动、反转和调速 …… 125
实验六　三相异步电动机的使用 …… 129
小结 …… 130
习题 …… 131

项目七　电气设备及低压电器控制线路 …… 132

任务一　电气设备 …… 133
任务二　常见低压电气控制线路 …… 152
实验七　三相异步电动机正、反转控制 …… 161

小结 …… 163
习题 …… 163

项目八 安全用电 …… 165

任务一 认识家庭安全用电 …… 166
任务二 保护接地和保护接零 …… 171
任务三 防雷保护 …… 174
实验八 常用照明装置的安装和维修 …… 175
小结 …… 179
习题 …… 179

项目九 电工测量 …… 181

任务一 电工仪表与测量的基本知识 …… 182
任务二 万用表的分析及其应用 …… 187
任务三 电压与电流的测量 …… 193
任务四 功率的测量 …… 195
任务五 电能的测量 …… 199
实验九 常用电工仪表的使用 …… 204
小结 …… 207
习题 …… 207

参考文献 …… 208

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，这些设备大多仍是由各种不同的电路所组成的。电路的结构不论多么复杂，它们遵循着相同的规律。本项目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。

任务分析

在日常生活中，使用着各种各样的电气设备，如电动机、雷达导航设备、计算机、电视机、手机等。从广义上说，这些电气设备都是由实际的电路组成的。本任务主要介绍电路的组成及功能，电路与电路模型的概念，以及它们之间的区别。

一、电路

电路是由元器件按一定方式连接起来的导电回路。如图 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。

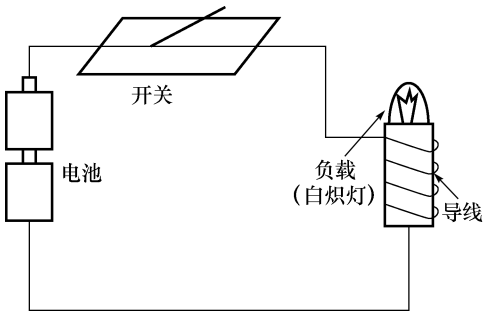


图 1-1　手电筒电路

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。一类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产生的电能通过变压器和输出线路远距离传输给用户，用户使用电能，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。另一类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，都由电源、负载和中间环节三部分组成。

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。

提　醒

工程应用中的实际电路，按照功能的不同可概括为以下两大类。

(1)电力系统中的电路。其特点是大功率、大电流，主要功能是对发电厂发出的电能进行传输、分配和转换。

(2)电子技术中的电路。其特点是小功率、小电流，主要功能是实现对电信号的传递、变换、存储和处理。

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。

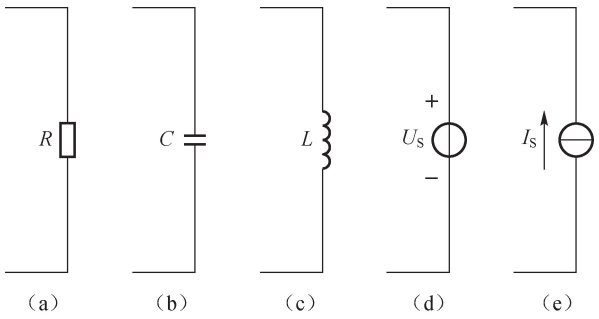


图 1-2　理想电路元件模型

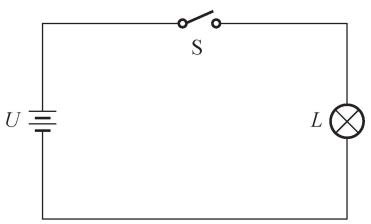


图 1-3　电路模型

任务二　电路的物理量及参考方向

任务描述

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

任务分析

在物理学的基础上，本任务将进一步学习电流、电压、电功率等电路物理量的概念，并学会从工程应用的角度重新理解它们，掌握其国际单位制。

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。

电流主要分为两类：一类是大小和方向均不随时间变化的电流，称为恒定电流，简称“直流”，简写为 DC 或 dc，其电流强度的大小用符号 I 表示；另一类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，如图 1-4(a)所示为直流，如图 1-4(b)所示为正弦交流电流，如图 1-4(c)所示为锯齿交流电流。

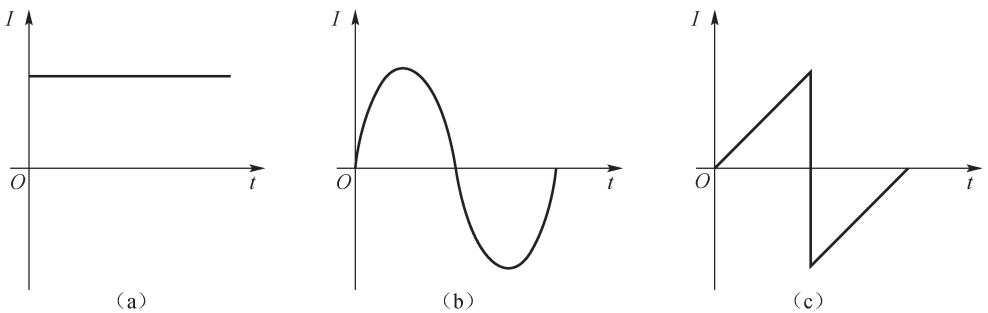


图 1-4　常见的电流

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

$$I=\frac{Q}{t} \tag{1-1}$$

对于变动电流，假设在很小的时间间隔 $\mathrm{d}t$ 内，通过导体横截面的电荷量为 $\mathrm{d}q$，则该瞬间电流强度为

$$i=\frac{\mathrm{d}q(t)}{\mathrm{d}t} \tag{1-2}$$

国际单位制(SI)中，电流的单位是安培，符号是 A。电力系统中安培单位小，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。

提　醒

电流值的正、负在设定参考方向的前提下才有意义。

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。

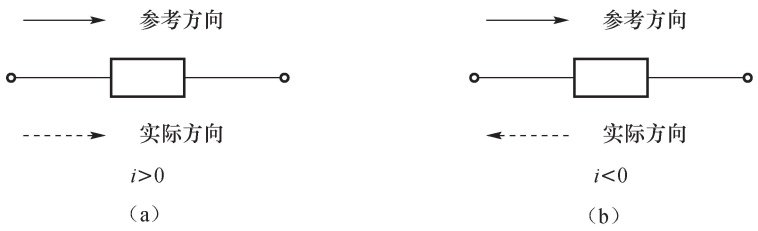


图 1-5　电流参考方向和实际方向的关系

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

解：在图 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 3 A。

在图 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 4 A。

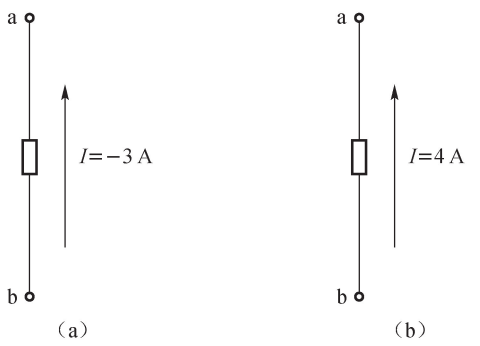


图 1-6　例 1-1 图

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

$$U=\frac{W}{Q} \tag{1-3}$$

在变动电流电路中，电压为一变值，用 u 表示，即

$$u=\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}q} \tag{1-4}$$

在国际单位制(SI)中，电压的电位是伏特，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(μV)的概念。

与分析电流相同，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。

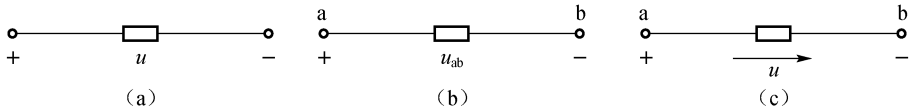


图 1-7　电压的参考方向

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；若计算后得到的电压值为负，则参考方向与实际方向相反，如图 1-8(b)所示。

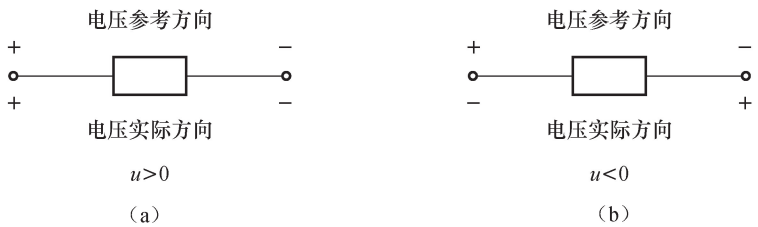


图 1-8　电压的实际方向和参考方向的关系

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。

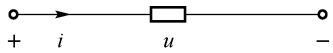


图 1-9　电压和电流参考方向关联

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

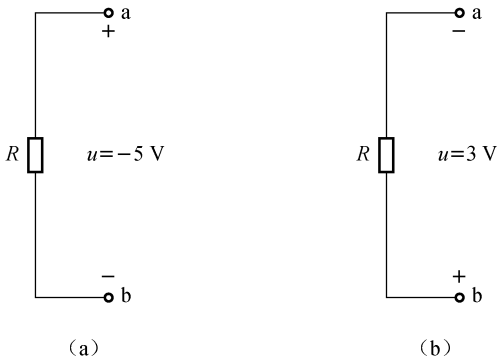


图 1-10　例 1-2 图

解： 在图(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 5 V。

在图(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 3 V。

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，以免造成设备损坏或者不能正常工作的情况。

电功率定义为单位时间内电路吸收或消耗的能量，即

$$p=\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t}=ui \tag{1-5}$$

在直流电路中，式(1-5)可写成

$$P=UI \tag{1-6}$$

式(1-5)和式(1-6)在计算功率时，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

$$p=-ui \text{ 或 } P=-UI \tag{1-7}$$

在国际单位制(SI)中，功率的单位是瓦特，简称“瓦”，符号为 W。

提　醒

无论电压和电流选择关联参考方向还是非关联参考方向，在计算某个元器件的功率时，主要有以下几种情况：

(1) $p>0$，说明该元器件吸收(或消耗)功率；

(2) $p<0$，说明该元器件放出(或产生)功率；

(3) $p=0$，说明该元器件不产生也不消耗功率。

【例 1-3】 已知电路如图 1-11 所示，$I_1=-1$ A，$I_2=2$ A，$I_3=-1$ A，$U_1=6$ V，$U_2=-8$ V，$U_3=2$ V，$U_4=2$ 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

$$P_1=U_1I_1=6\times(-1)=-6 \text{ W}$$

即元件 1 产生的功率为 6 W。

元件 2 电压和电流为关联参考方向，故元件 2 的功率为

$$P_2=U_2I_1=(-8)\times(-1)=8 \text{ W}$$

即元件 2 消耗功率为 8 W。

元件 3 电压和电流为非关联参考方向，故元件 3 的功率为

$$P_3=-U_3I_3=-2\times(-1)=2 \text{ W}$$

即元件 3 消耗的功率为 2 W。

元件 4 电压和电流为非关联参考方向，故元件 4 的功率为

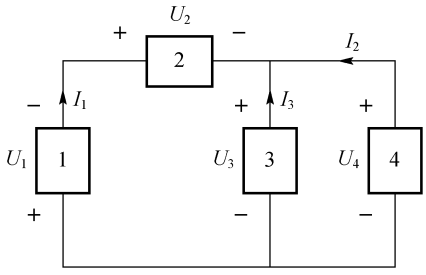


图 1-11　例 1-3 图

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

即元件 4 产生的功率为 4 W。

知识拓展

电流的三大效应

1. 热效应

导体通电时会发热，这种现象被称为电流热效应。

例如：焦耳定律是定量说明传导电流将电能转换为热能的定律。

2. 磁效应

电流的磁效应(动电会产生磁)：任何通有电流的导线，都可以在其周围产生磁场的现象，其被称为电流的磁效应。

3. 化学效应

电的化学效应是指电流通过导电液体时，带电粒子(电子或离子)参与反应而使得物质发生了化学变化并生成新的物质。化学中的电解水或电镀等都是电流的化学效应。

任务三 电阻元件

任务描述

了解电阻器及参数，会计算导体电阻，了解其典型应用；

掌握电阻串联、并联及混联的连接方式，会计算等效电阻。

任务分析

电阻器(如图 1-12 所示)是电气、电子设备中用得最多的基本元件之一，主要用于控制和调节电路中的电流和电压，或用作消耗电能的负载。本任务主要介绍电阻器的计算方法、典型应用，以及电阻的连接方式。

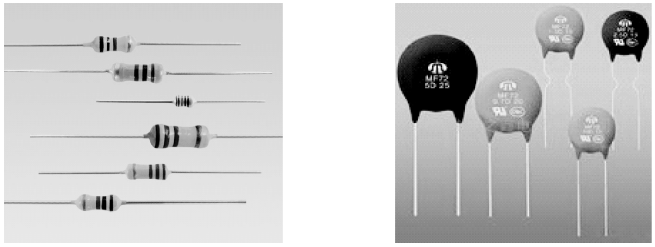


图 1-12 形形色色的电阻

一、电阻元件

电阻器的主要参数

(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：

±0.5%——0.2(或0)级、±5%——Ⅰ级、±10%——Ⅱ级、±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。

额定功率有两种标示方法：2 W以上的电阻，直接用数字印在电阻体上；2 W以下的电阻，以自身体积大小来表示功率。在电路图上表示电阻功率时，采用如图1-13所示的符号。

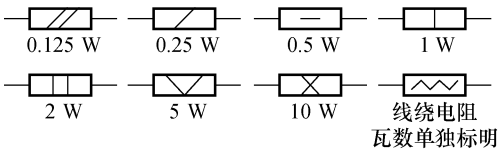


图1-13　电阻功率符号

(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 ℃所引起的电阻值的相对变化。温度系数越小，电阻的稳定性越好。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。

实践活动

电阻温度系数反映了随温度变化材料的电阻值的变化情况，试查阅相关资料初步了解材料的电阻温度特性。

(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1 V，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而产生的。

二、电阻的型号命名方法

国产电阻器的型号由四部分组成(不适用敏感电阻)，如图1-14所示。

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

第二部分：材料，用字母表示，表示电阻体的组成材料。例如，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，等。

图1-14　国产电阻器型号的组成

第三部分：分类，一般用数字表示，个别类型用字母表示，表示产品的类型。例如，1——普通，2——普通，3——超高频，4——高阻，5——高温，6——精密，7——精密，8——高压，9——特殊，G——高功率，T——可调。

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

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±20%。

例如：47 K ±5%、75 K ± 1%。

2. 文字符号法

用阿拉伯数字和文字符号两者有规律的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 3.3 Ω，误差为±10%；5K1J 表示阻值 5.1 kΩ，误差为±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。偏差通常采用文字符号表示。

100 J＝10×10^{0} Ω＝10 Ω，误差±5%；

472 K＝47×10^{2} Ω＝4.7 kΩ，误差±10%；

3 321 F＝332×10^{1} Ω＝3.32 kΩ，误差±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 所列。

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 1-15 表示出了色标法的具体标注方法。

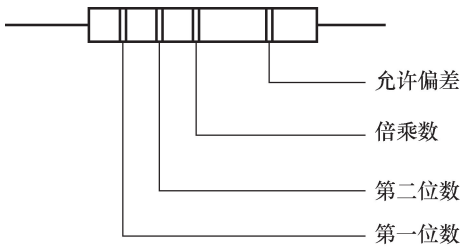


图 1-15　电阻器的阻值和误差的色标法

(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用色环表示的方法。

第一色环、第二色环、第三色环分别表示数值 X、Y、Z，则电阻阻值为 $R=XY\times10^{Z}\ \Omega$，第四色环仅表示该电阻的误差，如图 1-16 所示。

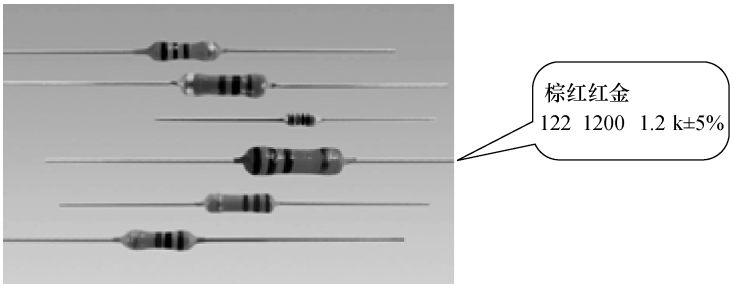


图 1-16　电阻的四环表示法

提　醒

如何正确识别首环?

(1)离端部近的为首环，如图 1-17 所示。

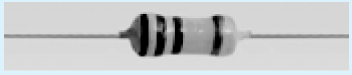


图 1-17　色标识别图(一)

(2)端头任一环与其他较远的一环为最后一环，即误差，如图 1-18 所示。

图 1-18　色标识别图(二)

(3)金、银在端头的为最后一环(误差)。

(4)黑在端头为倒数第二环，并且末环为无色，如图 1-19 所示。

图 1-19　色标识别图(三)

(5)紫、灰、白一般不会是倍率，即不太可能为倒数第二环。

知识拓展

正确选用电阻器的阻值和误差

阻值选用：原则是所用电阻器的标称阻值与所需电阻器阻值差值越小越好。

误差选用：时间常数 RC 电路所需电阻器的误差应尽量小，一般可选 5%以内的电阻器；而对偶电路、反馈电路、滤波电路、负载电路对误差要求不太高，可选 10%～20%的电阻器。

任务四 基尔霍夫定律

任务描述

理解基尔霍夫定律的内容；

掌握基尔霍夫定律的简单应用。

任务分析

通过前面的学习可以掌握电阻元件的性质以及对其电压和电流所形成的约束——部分电路的欧姆定律。电路作为一些元件互联的整体，还有其互联的规律——基尔霍夫定律，它阐述了电路中各支路电流间和回路中各部分电压间所遵循的规律。

基尔霍夫定律是电路理论的核心，是分析电路的依据。它反映的是所有电路的基本规律，具有广泛的适用性，不仅对直流电路适用，也适用于交流电路和非线性电路。本任务将学习基尔霍夫定律及其初步应用，为解决复杂电路问题打下良好基础。

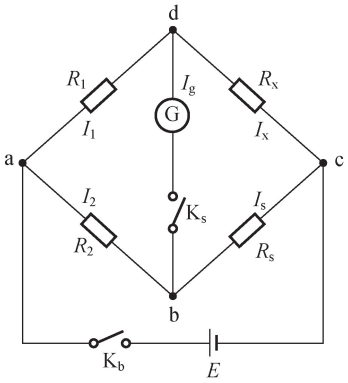


图 1-20 电桥电路

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：如图 1-20 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，电桥电路是最常见的电路之一。请分析一下电路中有几条支路、几个节点、几个回路和网孔。

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节点的电流之和。

例如，如图 1-21 所示电路中的节点 a，连接在 a 点的支路共有 5 个，按各支路电流的参考方向，流出节点的电流为 i_2 和 i_5，流入节点的电流为 i_1、i_3 和 i_4，则

$$i_2+i_5=i_1+i_3+i_4 \tag{1-8}$$

式(1-8)可以写成

$$-i_1+i_2-i_3-i_4+i_5=0 \tag{1-9}$$

对于任意一个节点，有

$$\sum i=0 \text{ 或 } \sum I=0 \tag{1-10}$$

式(1-10)称为基尔霍夫第一定律，也叫“电流定律

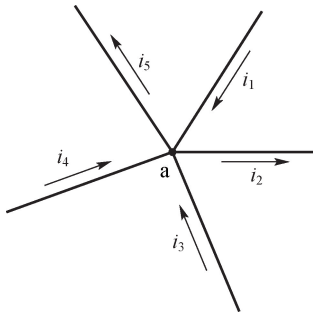


图 1-21 说明 *KCL* 的电路

(KCL)”。它表明汇集于任意一个节点电流的代数和等于零。

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式(1-11)来表示：

$$\sum i_{in}=\sum i_{out} \text{ 或 } \sum I_{in}=\sum I_{out} \tag{1-11}$$

提　醒

根据 KCL，每一个节点可以列出一个电流方程，但不是所有方程都是独立的。如果电路共有 n 个节点，则只能列出$(n-1)$个独立方程。

KCL 适用于电路的节点，根据电流连续性原理，也可以推广应用于电路中的任一假设的封闭面：通过电路中任一封闭面的电流的代数和为零。

如图 1-22 所示，对虚线封闭面包围的电路，有

$$I_1+I_2=I_3$$

对于图 1-23，两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。

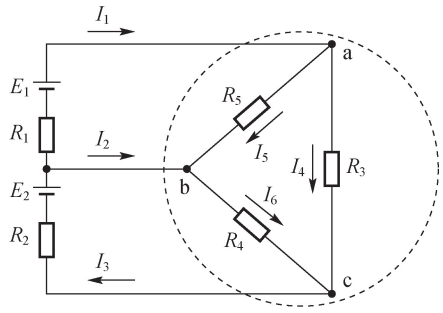


图 1-22　KCL 应用于一个封闭面

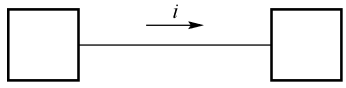


图 1-23　两部分电路之间只有一条导线相连

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

$$\sum u=0 \text{ 或 } \sum U=0 \tag{1-12}$$

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。

在如图 1-24 所示的电路中，若选定回路的绕行方向为顺时针方向，可列出电压方程为

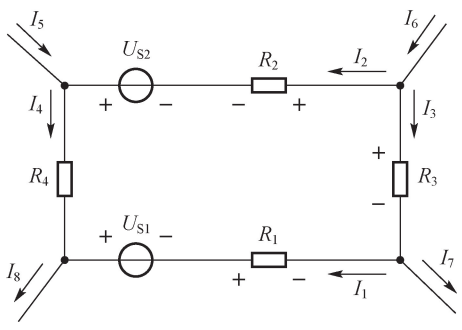


图 1-24　任一电路中的一个回路

$$-I_4R_4+U_{S2}-I_2R_2+I_3R_3-I_1R_1-U_{S1}=0$$

KVL 也可以推广应用于假想回路。例如，在图 1-25 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，如图 1-25 所示，顺时针方向绕行一周，按图中规定的参考方向，有

$$u+u_2-u_1=0$$

则

$$u=u_1-u_2 \tag{1-13}$$

有了 KVL 这个推论，就可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，KVL 定律都是适用的。

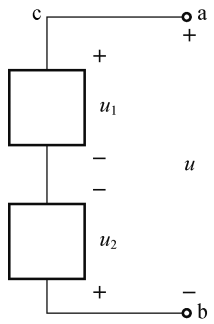


图 1-25　KVL 应用于假想回路

知识拓展

基尔霍夫定律的发现背景

基尔霍夫定律是求解复杂电路的电学基本定律。从 19 世纪 40 年代开始，由于电气技术发展得十分迅速，电路变得愈来愈复杂，某些电路呈现出网络形状，并且网络中还存在一些由 3 条或 3 条以上支路形成的交点(节点)。这种复杂电路不是串联、并联电路的公式所能解决的，刚从德国哥尼斯堡大学毕业，年仅 21 岁的基尔霍夫在他的第 1 篇论文中提出了适用于这种网络状电路计算的两个定律，即著名的基尔霍夫定律。利用该定律能够迅速地求解任何复杂电路，从而成功地解决了这个阻碍电气技术发展的难题。基尔霍夫定律建立在电荷守恒定律、欧姆定律及电压环路定理的基础之上，在稳恒电流条件下严格成立。当基尔霍夫第一、第二方程组联合使用时，可正确迅速地计算出电路中各支路的电流值。由于似稳电流(低频交流电)具有的电磁波波长远大于电路的尺度，所以它在电路中每一瞬间的电流与电压均能在足够好的程度上满足基尔霍夫定律。因此，基尔霍夫定律的应用范围也可扩展到交流电路之中。

任务五　电路中的电位分析及其计算

任务描述

掌握电路中各点电位的分析方法；

熟悉电子线路图的习惯画法。

任务分析

在电子电路中，电位的分析非常重要。例如，在分析晶体管的工作状态时，首先应分析它的三个极的电位高低。本任务主要介绍电路中的电位分析及其计算方法。

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 1-26 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 $V_A=0$ V。从图中可以看出

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

根据 KVL 方程得 $10I+10I-5=0$，则

$$I=0.25\ \text{A}$$

因此

$$V_C=-10I=-2.5\ \text{V}$$

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

以 B 为参考点，则

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

$$V_C=10I=2.5\ \text{V}$$

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

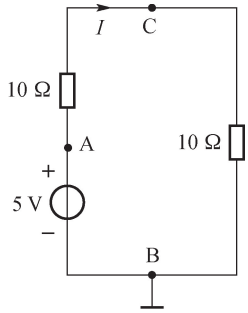


图 1-26　例 1-4 图

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，参考点选择的不同，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，在图 1-27 中，选择地为参考点，则 a 点和 b 点的电位分别为

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

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

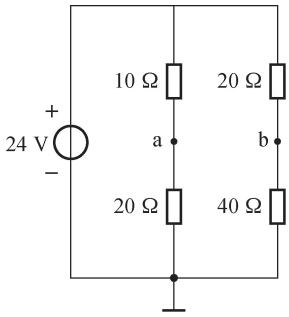


图 1-27　等电位点示意图

a 点和 b 点电位相等，它们是等电位点。等电位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。

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 1-28(a)可以用图 1-28(b)做简化表示。在图 1-28(b)中，+10 V 表示该点电位是 10 V，可以看作为该点 10 V 接理想电压源的正极，它的负值意味着接地。−6 V 表示该点电位是 6 V，可以看作为该点接 6 V 理想电压源的负极，它的正极意味着接地。

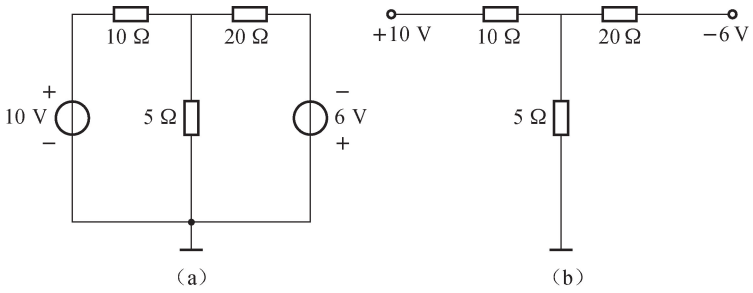


图 1-28　电路图的电位表示法

【例 1-5】　已知电路如图 1-29(a)所示，求 a 点电位。

解：如图 1-29(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 1-29(b)所示，根据电压源和电流源模型之间的等效原则，可以得到如图 1-29(c)所示的电路，则

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

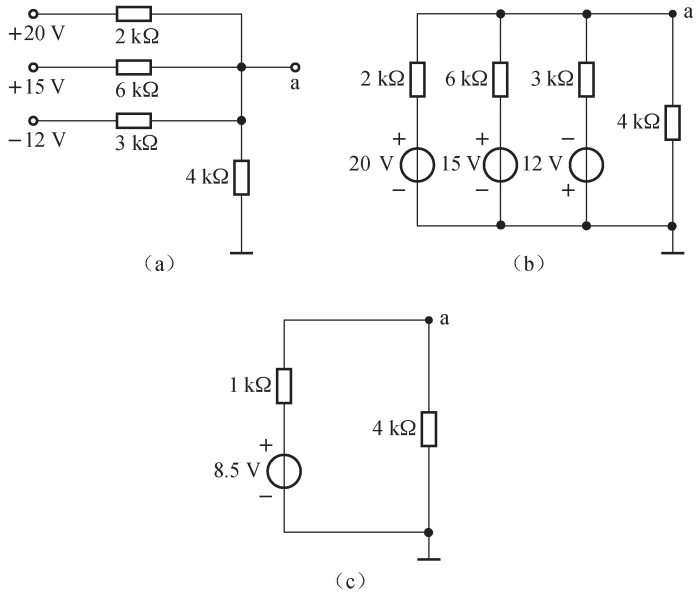


图 1-29　例 1-5 图

知识拓展

等势面

可以用电场线来形象地描绘电场中各点场强的分布情况。同样，也可以用等势面形象地描绘电场中各点电势的分布情况，使电势和场强的关系更为明显。

为了描述静电场中各点电势的分布情况，将静电场中电势相等的各点连接成一个面，叫作等势面。

点电荷电场中的等势面是以点电荷为中心的一系列同心球面。

点电荷电场的电场线是由电荷发出或向电荷汇集的一系列径向直线。很明显，这些电场线和等势面(这里是球面)是处处正交的。考虑到在静电场中，关系式总是适用的。

如果单位正电荷沿着某一等势面从点 a 到点 b 有一微小的位移 $\mathrm{d}l$(因为在等势面上各点电势相等)，那么 $u_a=u_b$，即 $u_{ab}=u_a-u_b=0$。

实验一　电阻、电源的伏安特性的测定

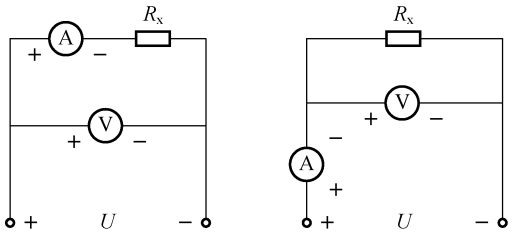
一、实验目的

(1)进一步熟悉晶体管直流稳压电源的正确使用方法。
(2)学习使用滑动变阻器。
(3)根据实验电路图，正确选择电流表、电压表量限。
(4)掌握电阻及电源的伏安特性测试原理及方法。
(5)获得线性电阻、非线性电阻及电源伏安特性的感性认识，学习绘制实验曲线。

二、实验原理与说明

元件的伏安特性是指元件的端电压 U 和通过该元件的电流 I 之间的关系。元件的伏安特性曲线就是表征其端电压 U 和通过该元件电流 I 之间的变化关系的曲线图形。

电阻元件的伏安特性测试的原理电路如图 1-30 所示，其中图 1-30(a)是电流表内接法，适用于被测电阻 R_X 较大的情况；图 1-30(b)是电流表外接法，适用于被测电阻较小的情况。



(a) 内接法　　(b) 外接法

图 1-30　电阻伏安特性测试原理电路图

电阻元件分为线性电阻和非线性电阻两类。线性电阻的伏安特性曲线是一条过原点的直线；非线性电阻的伏安特性曲线是一条过原点的曲线。

电压源的电压固定不变，它不随外电路的变化而变化。由于实际的电压源总存在一定的内阻，当所接的负载变化时，其端电压将随负载的增加、电流的增大而下降。电压源的伏安特性测试的原理电路如图 1-31 所示。

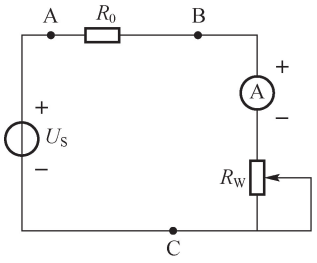


图 1-31　电压源伏安特性测试的原理电路图

三、实验内容与步骤

(1)认识滑动变阻器。
1)仔细观察滑动变阻器电阻丝的绕法，区分其固定端钮与滑动触点的引出端钮。
2)从滑动变阻器的铭牌上查找其额定值。
3)用万用表的电阻挡测量滑动变阻器固定端钮间的电阻值。将万用表的电阻挡的两支测试棒分别与滑动变阻器的固定端钮、滑动触点的引出端钮连接，改变滑动触点的位置，观察仪表指示值的变化，检查滑动变阻器的好坏。

(2)线性电阻伏安特性的测试。

1)按图 1-30(a)接线，其中，电阻 R_X 是线性电阻。

2)改变电压 U 的大小，读出电流表对应的指示值，并计算电阻 R_X。

3)根据实验测量数据，绘制伏安特性曲线。

(3)非线性电阻伏安特性的测试。

1)按图 1-30(a)接线，其中，电阻 R_X 是非线性电阻(例如，小电珠)。

2)改变电压 U 的大小，读出电流表对应的指示值，并计算电阻 R_X。

3)根据实验测量数据，绘制伏安特性曲线。

(4)电源伏安特性的测试。

1)按图 1-31 接线，其中电压源 U_S 是晶体管稳压电源、电阻 R_0 是其模拟的内阻、R_W 是滑动变阻器，作为可变负载。

2)改变滑动变阻器 R_W 的大小，读出电流表对应的指示值，并用电压表测量对应的电压 U_{AC}、U_{BC}。

3)根据实验测量数据，绘制伏安特性曲线。

四、注意事项

(1)不能将电流表并联在电阻两端。

(2)在实验测试中，不能将电流表、电压表的正、负极接反，并且根据被测电压、电流的大小适时选择和更换恰当的量限。

(3)电源的正、负极不能相碰，否则会引起电源短路而烧毁电源设备。

(4)万用表测量电阻前，必须将欧姆调零。

(5)不能带电测量电阻。

(6)用万用表电压挡测量电压时，万用表应与被测电路并联；用电流挡测量电流时，万用表应串联在被测电路中。

(7)在设置实验参数时，勿将被测试器件电流超过额定值。

五、实验报告

按规定要求完成实验报告，并回答以下问题。

(1)电阻的测试电路有两种，各自的适用范围是什么？为什么？

(2)如何用晶体管稳压电源构成实际电压源？

(3)如何用万用表测量直流电压、电流？

(4)万用表测量电阻前，为什么必须将欧姆调零？

小　结

1. 电路是由电气设备和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。

2. 电路可分为两类：一类是能够进行能量转换和传输的电路，另一类是能够实现信号的产生、传递和处理的电路。

3. 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。

4. 电路分析的主要变量有电压、电流和电功率等。在分析电路时，电流、电压的参考方向是重

要的概念，必须注意熟练掌握和正确运用。

5. 基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律是电路中两个非常重要的基本定律，它们只取决于电路的连接方式，与元件的性质无关，两定律不仅适用于直流电路，也适用于交流电路。

运用基尔霍夫电流定律、基尔霍夫电压定律两大定律列写方程式时，必须注意电压、电流的参考方向以及回路的绕行方向，由此来进一步理解和掌握参考方向的重要性。

6. 电路中某一点电位等于该点与参考点之间的电压，计算电位时与所选择的路径无关。

习　题

1-1　如图 1-32 所示，图中标出的是各元器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 1-32　习题 1-1 图

1-2　已知电阻为 5 Ω，电流源为 2 A，电压源为 20 V，分别求图 1-33 中各元件的功率。

1-3　已知电路如图 1-34 所示，求 10 V 的电压源的功率。

1-4　电路如图 1-35 所示，每个方框表示一个元器件，根据已知的电流值求 I。

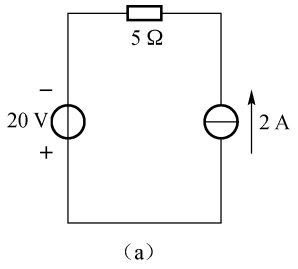


图 1-33　习题 1-2 图

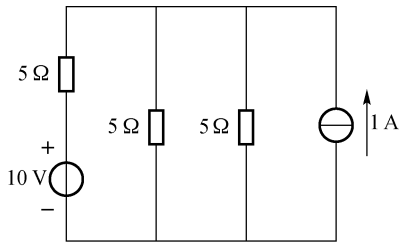


图 1-34　习题 1-3 图

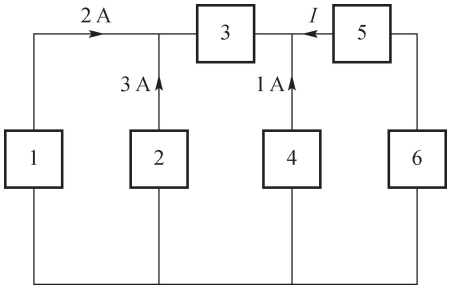


图 1-35　习题 1-4 图

1-5　在如图 1-36 所示的电路中，分别求各支路的未知数。

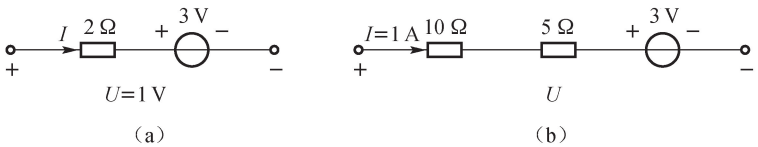


图 1-36　习题 1-5 图

1-6　电路如图 1-37 所示，分别求 a 点和 b 点的电位。

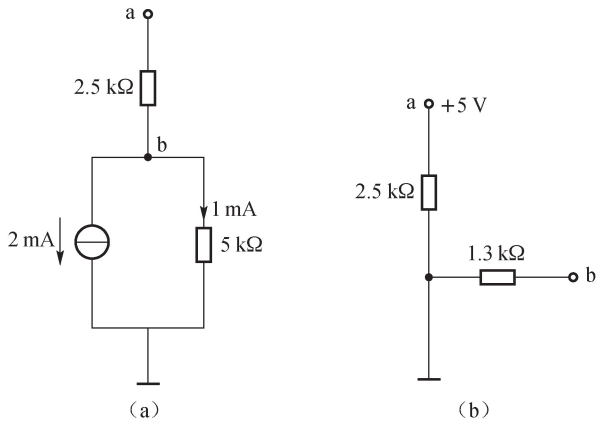


图 1-37　习题 1-6 图

1-7　电路如图 1-38 所示，求 a 点的电位。

1-8　电路如图 1-39 所示，求开路电压 U_{ab}。

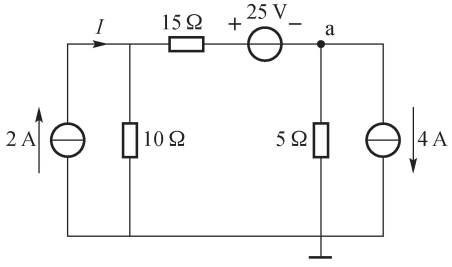


图 1-38　习题 1-7 图

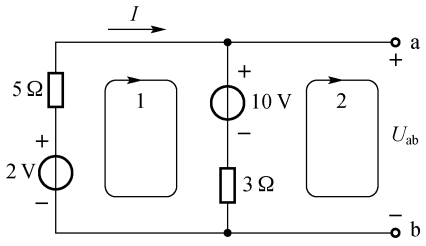


图 1-39　习题 1-8 图

1-9　电路如图 1-40 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　求如图 1-41 所示的电路中 a 点的电位。

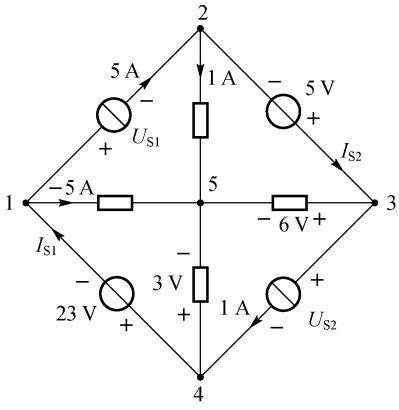


图 1-40　习题 1-9 图

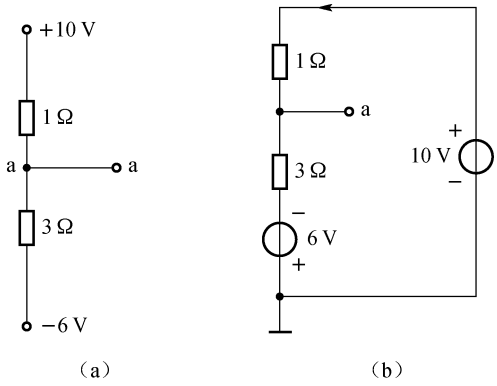


图 1-41　习题 1-10 图

1-11　求如图 1-42(a)和(b)所示电路中的未知电流。

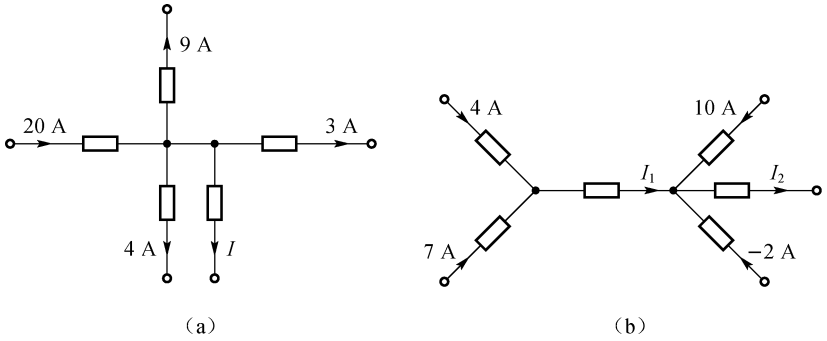


图 1-42　习题 1-11 图

1-12　求如图 1-43 所示电路中的 U_1、U_2、U_3。

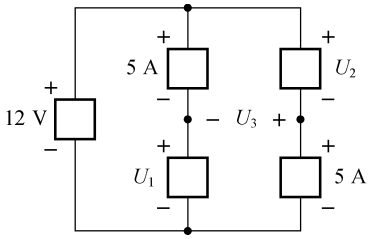


图 1-43　习题 1-12 图

1-13　求如图 1-44 所示电路中的 i_1 和 U_{ad}。

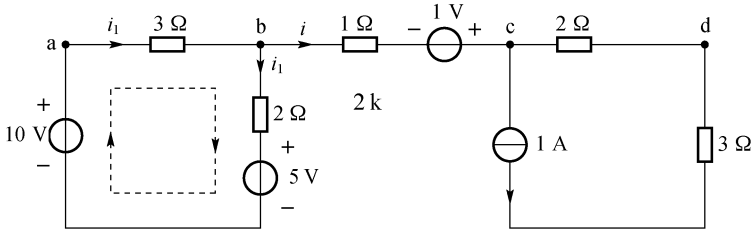


图 1-44　习题 1-13 图

1-14　求如图 1-45 所示电路中的 a 点电位。

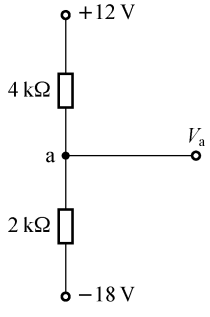


图 1-45　习题 1-14 图

项目二
电路的分析方法

- 任务一　电阻串联、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

通过前面知识的学习，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化、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　电阻串联、并联连接的等效变换

任务描述

了解电阻串联、并联和混联电路及其应用；

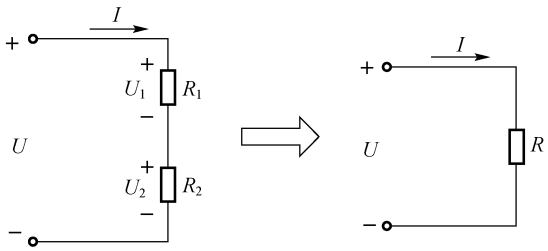
掌握混联电路的等效变换和计算。

任务分析

在电路中电阻的连接方式多种多样，本任务将详细讲解电阻的串联、电阻的并联和电阻的混联，以及对电阻混联的等效电阻计算。

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。



（a）电阻的串联　　（b）等效电路

图 2-1　电阻的串联电路

在如图 2-1 所示的电路中，由基尔霍夫电压定律可得

$$U=U_1+U_2=IR_1+IR_2$$
$$=I(R_1+R_2)$$

设

$$R=R_1+R_2$$

则

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

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

$$\begin{cases} U_1 = IR_1 = \dfrac{U}{R_1+R_2}R_1 = \dfrac{R_1}{R_1+R_2}U \\ U_2 = IR_2 = \dfrac{U}{R_1+R_2}R_2 = \dfrac{R_2}{R_1+R_2}U \end{cases} \tag{2-2}$$

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)在串联电路中，电流处处相同，且为同一电流。

(2)电阻的串联网络的端口电压等于各电阻电压之和，即 $U=U_1+U_2+\cdots+U_n$。

(3)电阻的串联网络的等效电阻等于各电阻之和，即 $R_{eq}=R_1+R_2+\cdots+R_n$。

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

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

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

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

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

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。

在如图 2-2 所示的电路中，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

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2} \tag{2-3}$$

则

$$I = \frac{U}{R} \tag{2-4}$$

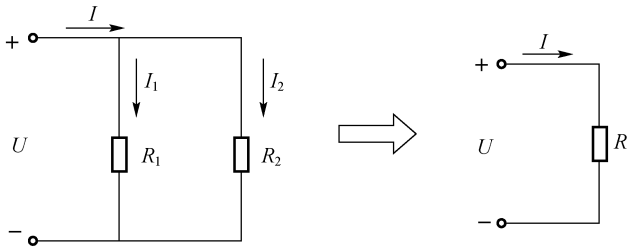
式(2-4)表明：在输入电压和电流不变的条件下，图 2-2(a)可用图 2-2(b)来代替，即 R_1 与 R_2 的并联，可用一个电阻 R 代替，R 称为并联等效电阻，其阻值的倒数等于各并联电阻阻值倒数的和。

图 2-2 中在电路总电流 I 一定的情况下，总电压为

$$U = RI = \frac{R_1R_2}{R_1+R_2}I$$

则流过两并联电阻的电流分别为

$$I_1=\frac{U}{R_1}=\frac{R_2}{R_1+R_2}I$$
$$I_2=\frac{U}{R_2}=\frac{R_1}{R_1+R_2}I \tag{2-5}$$



（a）电阻的并联　　（b）等效电路

图 2-2　电阻的并联电路

从式(2-5)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几个特点。

(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 $I=I_1+I_2+\cdots+I_n$。

(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。

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

(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

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

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

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

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联、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。当电阻串联、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联、并联关系的形式。

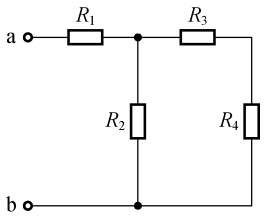


图 2-3　电阻的混联

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

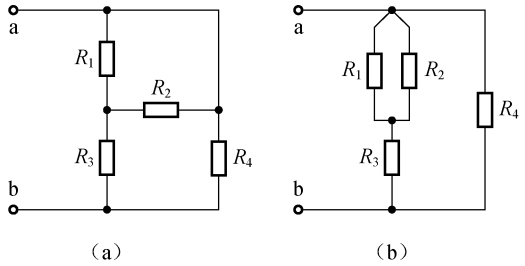


图 2-4　混联电路举例一

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。

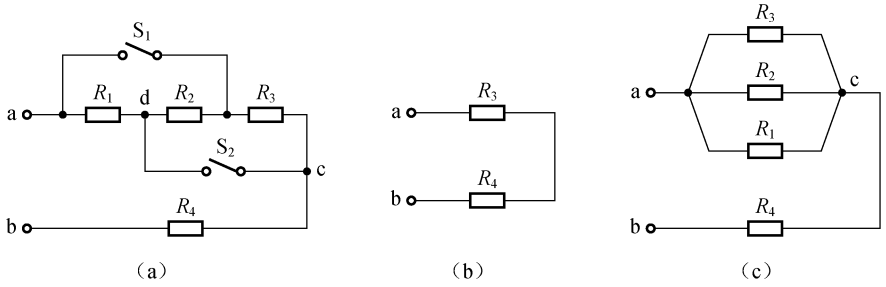


图 2-5　混联电路举例二

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)变换的最终的一个电阻就是等效电阻。

【例 2-1】　求如图 2-6(a)、图 2-6(b)所示的电路中 a、b 两端的等效电阻。

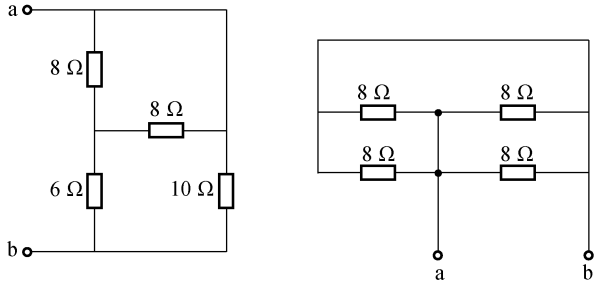
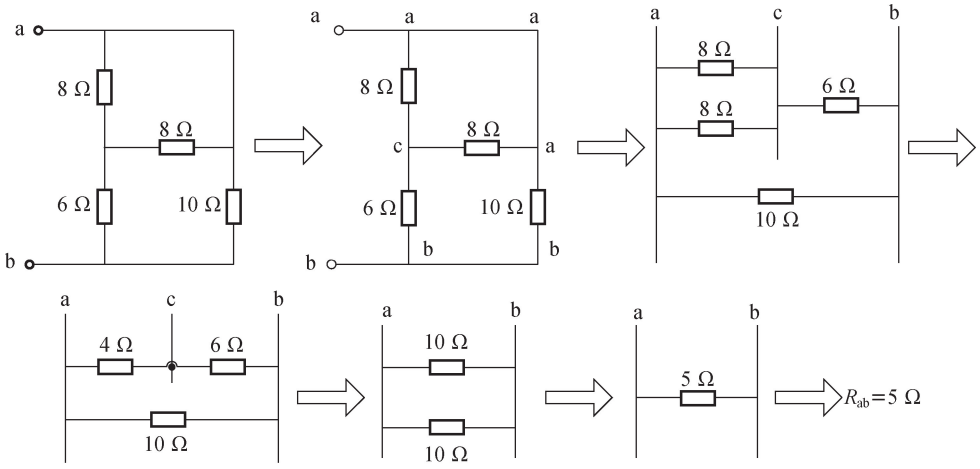
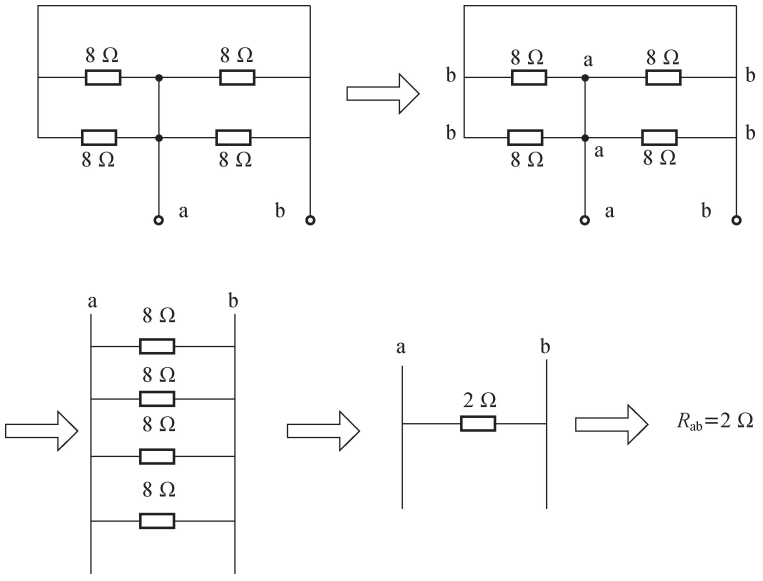


图 2-6　例 2-1 图

解： 将图 2-6(a)用等电位法依次进行等效变换为



将图 2-6(b)用等电位法依次进行等效变换为



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

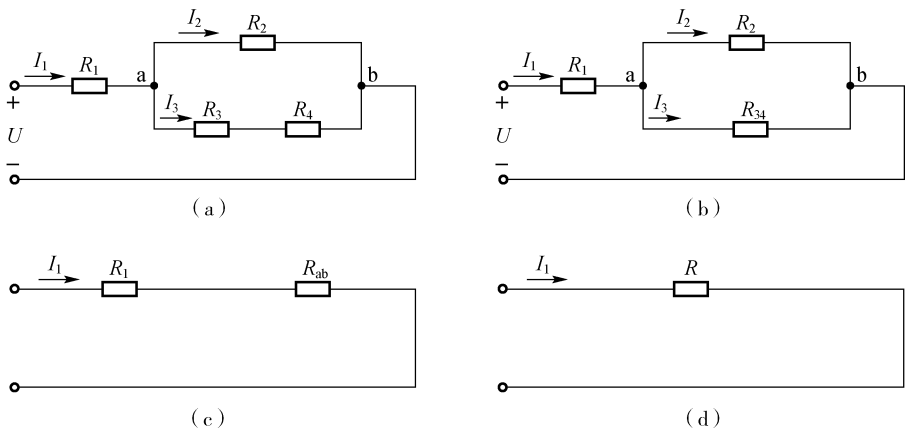


图 2-7　例 2-2 电路图及简化电路

解： 由图 2-7(a)、(b)得

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

由图 2-7(c)得

$$R_{ab}=\frac{R_2R_{34}}{R_2+R_{34}}=\frac{8\times 8}{8+8}=4\ \Omega$$

由图 2-7(d)得

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

最后得出

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

任务二 电压源与电流源及其等效变换

任务描述

了解电压源与电流源的基本知识；

掌握电压源与电流源的等效变换。

任务分析

电源有多种，如干电池、光电池、发电机等，在电路理论中任何一个实际电源都可以用电压源或电流源两种模型表示。本任务将主要介绍电压源与电流源基本知识以及两者的等效变换。

电源的电路模型有两种表示形式：一种是以电压形式表示的电路模型，称为电压源；另一种是以电流形式表示的电路模型，称为电流源。

一、电压源

1. 理想电压源

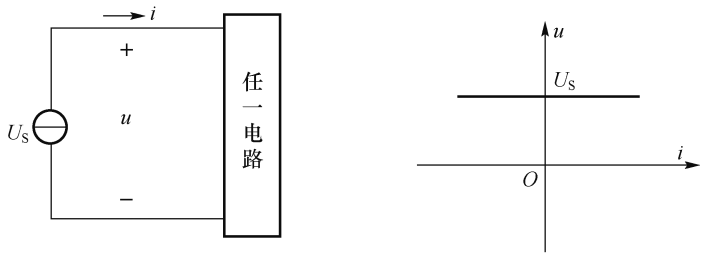
(1)定义。

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。



（a）定义与符号　　（b）伏安特性

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。

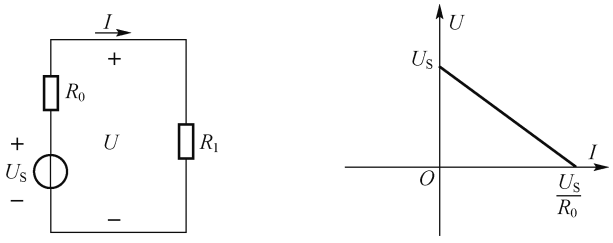
③若恒压源的电压值等于零，则该恒压源实际上就是短路，其伏安特性与 i 轴重合。不管流过它的电流为何值，其端电压恒为零。

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)所示可得

$$U=U_S-IR_0 \tag{2-6}$$

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



（a）电压源电路　　（b）外特性

图 2-9　电压源

二、电流源

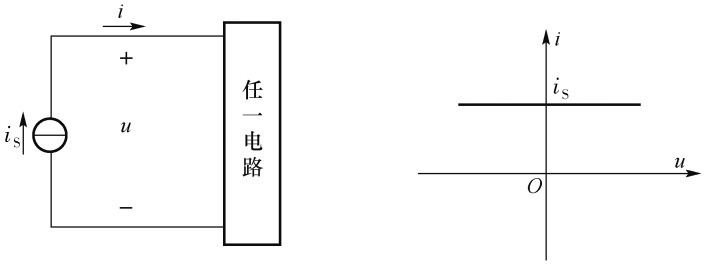
1. 理想电流源

(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。

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。



（a）定义与符号　　（b）伏安特性

图 2-10　理想电流源

(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。

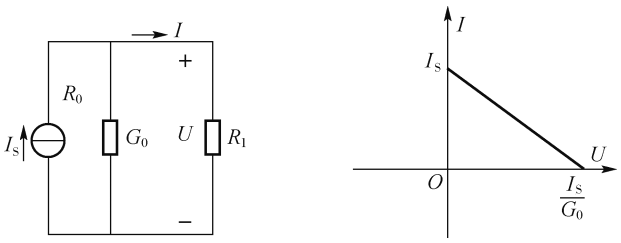
③若恒流源的电流恒等于零(即 $i_S=0$)，则恒流源就是开路，其伏安特性与 u 轴重合。不管它的端电压为何值，其电流恒为零。

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

$$I=I_S-UG_0 \tag{2-7}$$

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



(a) 电流源电路　　(b) 外特性

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

当 $I=0$ 时：　　$U=U_S=\dfrac{I_S}{G_0}$

当 $U=0$ 时：　　$I=I_S=\dfrac{U_S}{R_0}$

可得两种模型互换时，参数间的关系为

$$\begin{cases} U_S=\dfrac{I_S}{G_0}, & I_S=\dfrac{U_S}{R_0} \\ R_0=\dfrac{1}{G_0}, & G_0=\dfrac{1}{R_0} \end{cases} \tag{2-8}$$

由电压源模型变换为电流源模型，如图 2-12 所示。

由电流源模型变换为电压源模型，如图 2-13 所示。

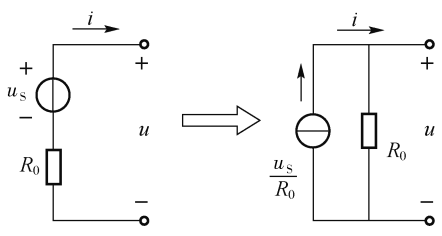


图 2-12　由电压源模型变换为电流源模型

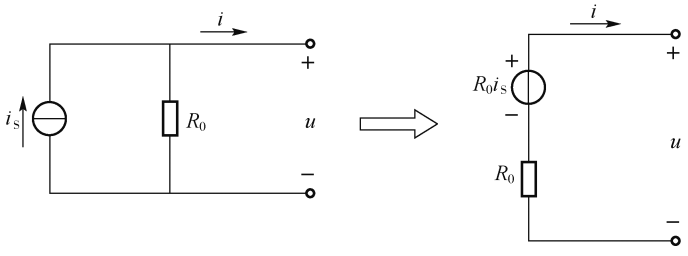


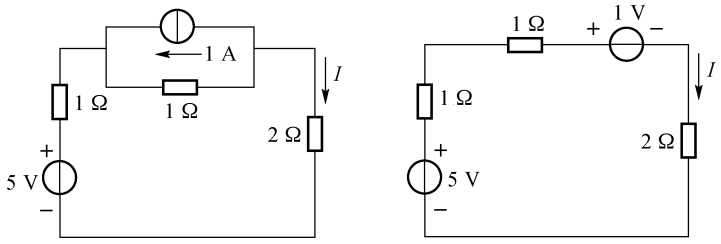
图 2-13　由电流源模型变换为电压源模型

模型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；当电流源开路时，功耗全部消耗在内阻上。而当电流源短路时，功率为零；当电压源短路时，功耗全

部消耗在内阻上。

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。



（a）电路　　（b）等效电路

图 2-14　例 2-3 图

解：利用等效变换将图 2-14(a)等效变换为如图 2-14(b)所示的电路，则可得

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

提　醒

等效变换的注意事项：

(1)“等效”是指“对外”等效(等效互换前、后对外伏安特性一致)，对内不等效；

(2)转换前、后电压和电流的方向；

(3)理想电压源和理想电流源不能等效。

任务三　支路电流法的分析与应用

任务描述

学会利用支路电流法进行电路分析。

任务分析

对于简单电路，可以利用电阻串并联方法进行化简和电源等效变换进行求解，但是对于复杂电路的分析，仅用如上方法是远远不够的，本任务将介绍另外一种电路分析方法——支路电流法。

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：　　$I_1+I_2-I_3=0$　　(2-9)

对节点 b：　　$-I_1-I_2+I_3=0$　　(2-10)

式(2-10)不是独立方程，它是式(2-9)的同解方程。两个节点只能列出 1 个独立的节点电流方程。

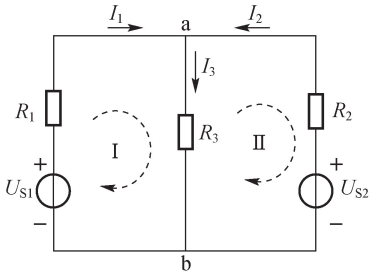


图 2-15　支路电流法

(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，最好选用网孔作为回路。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：　　$R_1I_1+R_3I_3-U_{S1}=0$　　(2-11)

对右边网孔：　　$-R_3I_3-R_2I_2+U_{S2}=0$　　(2-12)

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

(4)联立求解方程式，即可求出各支路电流。

联立求解式(2-9)、式(2-11)和式(2-12)即可求出图 2-15 中各支路电流 I_1，I_2 和 I_3。

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

解：将已知数据代入节点电流式(2-9)及网孔电压式(2-11)和式(2-12)可得

$$I_1+I_2-I_3=0$$

$$I_1+I_3=3$$

$$I_2+I_3=1$$

解得

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

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

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

【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 3 条支路，其中 1 条支路的电流已知为 I_S，求另外 2 条支路电流 I_1 和 I_2，故只需列两个独立方程。

(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

$$R_1I_1+R_2I_2=U_S$$

(4)联立求解得

$$I_1=\frac{U_S+R_2I_S}{R_1+R_2},\qquad I_2=\frac{U_S-R_1I_S}{R_1+R_2}$$

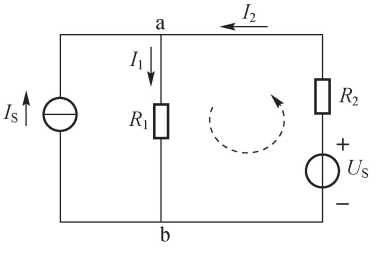


图 2-16　例 2-5 图