



智能化融媒体新形态教材

电工电子技术与应用

雷红华 李雪婧 闫 益 主编

北京工业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电工电子技术与应用 / 雷红华, 李雪婧, 闫益主编.
北京: 北京工业大学出版社, 2026. 2. -- ISBN 978-7-5639-8776-4

I . TM; TN

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025JS3686 号

电工电子技术与应用

DIANGONG DIANZI JISHU YU YINGYONG

主 编: 雷红华 李雪婧 闫 益

责任编辑: 李周辉

封面设计: 杨 楠

出版发行: 北京工业大学出版社

(北京市朝阳区平乐园 100 号 邮编: 100124)

010-67391722 (传真) bgdcbs@sina.com

经销单位: 全国各地新华书店

承印单位: 廊坊市广阳区九洲印刷厂

开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张: 16

字 数: 373 千字

版 次: 2026 年 2 月第 1 版

印 次: 2026 年 2 月第 1 次印刷

标准书号: ISBN 978-7-5639-8776-4

定 价: 49.80 元

版权所有 翻印必究

(如发现印装质量问题, 请寄本社发行部调换 010-67391106)

编委会

主 编：雷红华 李雪婧 闫 益

副主编：王军峰 马 洋 朱 佳 廖 鑫

杨庄生 何佳辉 李宏慧 彭业德

樊宸均 万 里 明 亮 王希友

参 编（以姓氏笔画为序）：

王迎鲜 曹 雄





前言

本书严格遵循教育部“电子电气基础课程教学指导分委员会”制定的“电工学课程教学基本要求”，同时充分考量了各院校的教学计划和学时安排。在编写过程中，笔者充分融合了现代电工技术的发展趋势，并汲取了教师们多年积累的教学与科研经验，以期为读者呈现一本既符合教学标准又贴近实践需求的专业教材。全书分为六大项目，共十五个任务。

为进一步推进高等职业教育教学改革，创新教学方法，提高教学质量，本书的编写遵循了以下指导思想：突出电工技术的基本理论和分析方法；突出内容的先进性；注重理论与实践的结合，突出教学内容的实用性；突出对电气及相近专业学生应用能力的培养。

本书有以下特点。

① 精选内容，适当降低深度和难度，以“必需、够用”为原则，力求达到“好用”的效果。用言简意赅的语言重点讲解基本概念、原理，突出重点定理、定律、解题方法，使教材内容简明扼要，强调知识的基础性。

② 在结构上，教材能完整地表达出该课程所要求的基本知识，结构严谨，各部分内容相互衔接，形成一个和谐统一的整体。在内容上，深入浅出，层次分明，条理清楚，不是对知识点进行简单的删减，而是整合系统和逻辑，既有利于教学，又便于学生自学，从而体现出适用性。

③ 基础理论知识的讲授以应用为目的，规避繁杂的理论推导和内部电路分析，注重理论联系实际，突出应用性。如一阶电路特性求解、正弦稳态电路、三相异步电动机机械特性等，减少了冗长的理论分析，将重点放在理论应用及电动机的使用与控制上。

④ 注重学生能力的培养，突出其实践性。如万用表电路图的识读，既培养了学生对色环电阻的识读能力，又培养了学生对电路图纸的识读能力。再如对电容滤波电路，学生很难理解抽象的滤波过程，教师通过采用Multisim 10软件仿真电容充放电的过程演示，能大大提高教学效果，同时提高学生对软件仿真的实践操作能力。

⑤ 精选的例题、习题、思考题强化了对基础题型的覆盖，避免偏题和难题。例题加深学生对所学内容的理解及灵活运用，特别是通过一题多解的方式使学生做到融会贯通，起到提高和引申的作用，强调启发性。习题注重考查和帮助学生理解相关的概念和知识。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正！

编者

2024年10月



目录

项目一 万用表的使用与测量 /001

- 任务一 万用表电路图的识读 003
- 任务二 电工电子仪器仪表的使用与测量 019
- 任务三 直流电路的分析与仿真验证..... 030

项目二 室内照明电路的安装与维修 /051

- 任务四 照明电路的安装..... 053
- 任务五 电度表的安装..... 077
- 任务六 室内照明电路的故障检修 085

项目三 三相异步电动机控制电路的分析与连接 /107

- 任务七 三相异步电动机的检修 109
- 任务八 常用低压电器的选用 126
- 任务九 机床电动机控制电路的连接..... 138

项目四 典型电子电路的焊接与测试 /150

- 任务十 常用电子元件识别与测试 152
- 任务十一 楼道声控灯电路的组装与焊接 165
- 任务十二 红外倒车雷达电路的组装与焊接 186

项目五 直流稳压电源的制作与调试 /205

任务十三 直流稳压电源的设计 207

项目六 抢答器的设计与制作 /220

任务十四 逻辑门电路的认知 222

任务十五 组合逻辑电路的认知 236

参考文献 /246

项目一

万用表的使用与测量



学习目标



知识目标

掌握电路模型与基本物理量；
掌握欧姆定律和基尔霍夫定律；
掌握支路电流法、电源等效变换法；
掌握叠加定理、戴维南定理；
掌握电路中电位的计算。



技能目标

学会识读电路图；
学会使用有关的技术标准、规范、手册；
学会正确使用万用表测量电压值、电流值、电阻值；
学会正确使用兆欧表进行绝缘电阻值的测量；
学会用电路的基本定律对万用表电路进行原理分析；
学会使用 Multisim 软件验证叠加定理。



素质目标

培养良好的电气工程师职业道德；
增强学生查阅资料的能力；
树立安全意识、规范意识、创新意识；
培养精益求精的工匠精神；
增强团队协作能力；
培养劳动精神。



重点难点

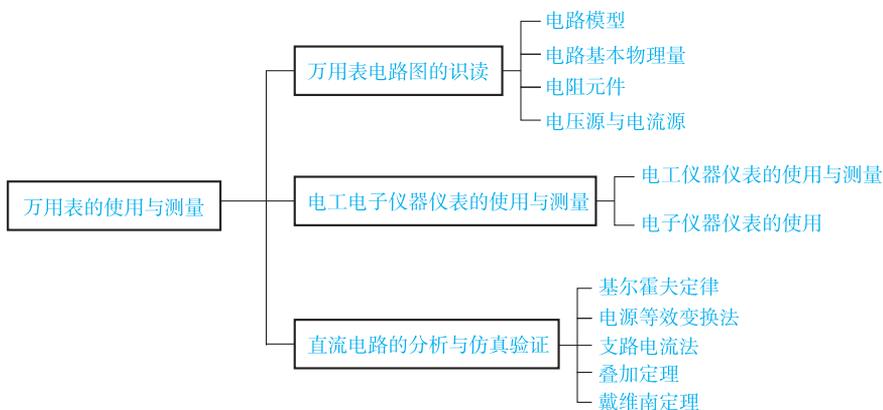
基尔霍夫定律、电源等效变换法、戴维南定理。

学习指导

随着电气化、自动化水平的不断提升，电路测量变得更加重要。要想掌握电路测量技术，首先必须掌握电工电子测量仪器仪表的相关知识。如果熟悉日常生活中各类电器规定的图形和符号表示，以及理解电路模型，就能识读万用表电路图并能熟练使用万用表进行测量。

除了欧姆定律之外，直流电路的基本定律还有基尔霍夫定律。欧姆定律主要应用于简单电路的分析，然而在实际电路中经常会遇到一些复杂的电路。这些电路一般包括多个电源和电阻，其分析和计算需要应用基尔霍夫定律、支路电流法、叠加定理、电源等效变换法、戴维南定理进行简化，从而求得某个电流或电压。

知识导图



课程思政

电工作业人员的上岗证书

电工属于高危工种，在我国受到严格的监管。众多监管部门对电工的资质认证有着细致的区分，这主要体现在电工证书的不同类别上。一般人只知道电工凭证书上岗，却不知道电工证书也因具体工种的划分及颁发部门的不同而有所区别。电工作业人员必须持证才能被准许上岗，才能有机会接触实际的电力行业工作，从中增长知识、丰富技能。



《特种作业
人员安全技术
培训考核
管理规定》



任务一

万用表电路图的识读

本任务包括熟悉日常生活中各类电器规定的图形和符号,理解电路模型,识读常用的万用表电路图,利用万用表正确标出电流、电压的方向,计算电路总电阻的大小,分析提供电能的独立电源,掌握电压源和电流源在理想状态下的特点、符号及相互关系。

必备知识一 电路模型

一、电路的组成与模型

电路,简单地说就是电流流通的路径。它通常由某些电气设备和元件根据某种需要按一定方式组合起来,如图 1-1 所示是手电筒电路,主要由干电池、灯泡、开关三部分组成。将手电筒的开关接通时,灯泡点亮。

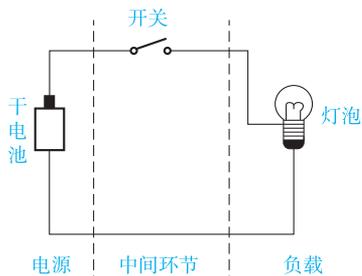


图 1-1 手电筒电路

1. 电路的组成

日常生活中,虽然实际电路种类繁多,但无论是简单电路还是复杂电路,从本质上来说,都是由电源、负载、中间环节三部分组成的。因此,它们被称为组成电路的三要素。

(1) 电源

电源是向电路提供电能的设备,如发电机、电池、信号源等。

(2) 负载

负载是在电路中接收电能的设备,如电灯、电炉、电动机等。

(3) 中间环节

中间环节负责将电源和负载连接起来形成电路,能控制电路的通和断,或者起到保护作用。



2. 电路元件

实际电路由具体的元件组成，常用的元件有电阻器、电容器、电感器、晶体管、集成电路、电动机等。在分析电路时，没有必要把元件的全部物理量特性都加以考虑，否则会导致问题复杂化。在工程中，为了便于对实际电路进行分析和数学表述，常常将实际电路元件理想化(模型化)，即在一定条件下突出主要的电磁性质，忽略次要性质，把它近似地看成理想元件。理想元件又称为实际元件的理想化模型，基本的理想元件有理想电阻元件、理想电容元件、理想电感元件、理想电源等，如图 1-2 所示为基本理想元件的电路图形符号。

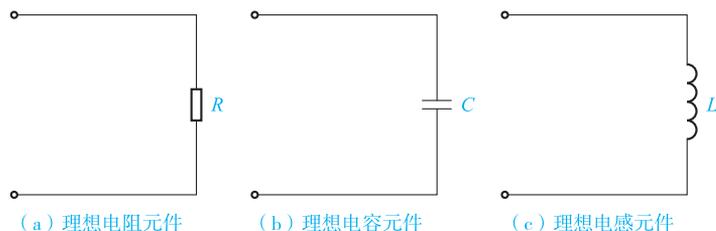


图 1-2 基本理想元件的电路图形符号

(1)理想电阻元件

理想电阻元件只消耗电能，如电阻器、灯泡、电炉等，可以用理想电阻来反映其消耗电能的这一主要特性。

(2)理想电容元件

理想电容元件只储存电场能，如各种电容器，可以用理想电容反映其储存电能的特征。

(3)理想电感元件

理想电感元件只储存磁场能，如各种电感线圈，可以用理想电感反映其储存磁能的特征。

3. 电路模型

用一个或几个理想电路元件构成的模型去模拟一个实际电路，模型中出现的电磁现象与实际电路的电磁现象十分接近，这个由理想电路元件组成的电路称为电路模型。如图 1-3 所示为手电筒电路的电路模型，理想电压源 U_S 表示干电池， R_L 表示灯泡，K 为开关，连接元件的细实线是导线。

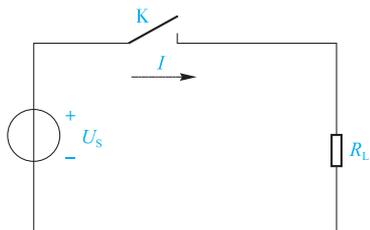


图 1-3 手电筒电路的电路模型

二、电路的状态

电路在不同的工作条件下会处于不同的状态，并具有不同的特点。电路的工作状



态有三种：开路状态、短路状态、负载状态。

1. 开路状态

在如图 1-4 所示的电路中，当开关 K 断开时，电源处于开路状态。开路时，电路中的电流为零，电源不输出能量。电源两端的电压称为开路电压，用 U_{OC} 表示，其值等于电源电动势 U_S ，即 $U_{OC} = U_S$ 。

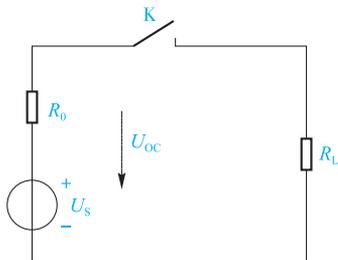


图 1-4 开路状态

2. 短路状态

在如图 1-5 所示的电路中，当电源两端由于某种原因短接在一起时，电源会被短路。短路电流 $I_{SC} = \frac{U_S}{R_0}$ 很大，此时电源所产生的电能全被内阻 R_0 消耗。

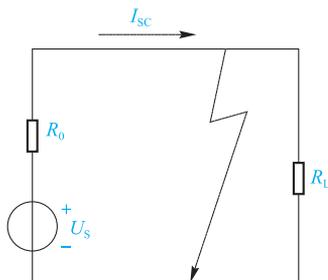


图 1-5 短路状态

短路通常是严重的事故，应尽量避免。为了防止产生短路事故，通常在电路中接入熔断器或断路器，以便在发生短路时能迅速切断故障电路。

3. 负载状态

电源与一定大小的负载接通，称为负载状态。这时，电路中流过的电流称为负载电流，如图 1-6 所示。负载的大小以消耗功率的大小来衡量。当电压一定时，负载的电流越大，则消耗的功率越大，负载也越大。

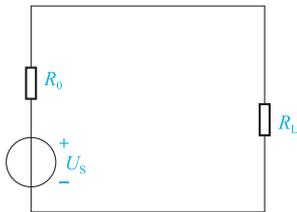


图 1-6 负载状态



为使电气设备安全、可靠、经济地运行,引入了电气设备额定值的概念,就是电气设备在电路正常运行状态下能承受的允许值。常用的额定值有额定电压 U_N 、额定电流 I_N 、额定功率 P_N 。

需要指出,电气设备实际消耗的功率 P 不一定等于额定功率 P_N 。当 $P=P_N$ 时,称为满载运行;当 $P<P_N$ 时,称为轻载运行;当 $P>P_N$ 时,称为过载运行。电气设备应尽量接近额定状态运行。

学习检验

1. 电路元件与实体电路元器件有何不同? 何谓电路模型?
2. 标有“1 W、100 Ω ”的电阻,在使用时,电流和电压不应超过多大值?

必备知识二 电路基本物理量

一、电流

1. 电流的形成

在电场力的作用下,带电粒子的定向移动形成电流。

2. 电流的大小

电流的大小等于单位时间内通过导体横截面的电荷量。电流的实际方向习惯上指正电荷移动的方向。

电流分为两类:一是大小和方向均不随时间变化的电流,称为恒定电流,简称直流,用 I 表示;二是大小和方向均随时间变化的电流,称为交变电流,简称交流,用 i 表示。

对于直流电流,单位时间内通过导体横截面的电荷量是恒定不变的,其大小为

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

对于交流电流,若在一个无限小的时间间隔 dt 内,通过导体横截面的电荷量为 dq ,则该瞬间的电流为

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

3. 电流的单位

在国际单位制中,电流的单位是安培(A),简称安。电流的常用单位还有毫安(mA)和微安(μA)等。它们的换算关系为

$$1 \text{ A} = 10^3 \text{ mA} = 10^6 \mu\text{A} \quad (1-3)$$

4. 电流的方向

习惯上,正电荷定向移动的方向称为电流的实际方向。在简单电路中,电流的实际方向很容易确定。但当电路比较复杂时,电流的实际方向往往难以确定。为了便于分析计算,引入了电流的参考方向这一概念。

电流的参考方向,是在分析计算电路时,先任意选定某一方向作为待求电流的方



方向,并根据此方向进行分析计算。若计算结果为正,则说明电流的参考方向与实际方向相同;若计算结果为负,则说明电流的参考方向与实际方向相反。如图 1-7 所示为电流的参考方向与实际方向,表明了电流的参考方向(实线)与实际方向(虚线)之间的关系。

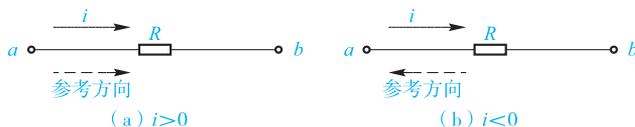


图 1-7 电流的参考方向与实际方向

例 1-1 如图 1-8 所示,电流的参考方向已经标出,已知 $I_1 = -1 \text{ A}$, $I_2 = 1 \text{ A}$ 。试指出电流的实际方向。



图 1-8 例 1-1 图

【解】 $I_1 = -1 \text{ A} (< 0)$, 则 I_1 的实际方向与参考方向相反,应由点 B 流向点 A。
 $I_2 = 1 \text{ A} (> 0)$, 则 I_2 的实际方向与参考方向相同,由点 B 流向点 A。

二、电压

1. 电压的定义

电压是描述电场力对电荷做功大小的物理量。在电路中,电场力将单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功称为 a 与 b 两点间的电压,也称电位差,记为

$$u_{ab} = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-4)$$

如果电压的大小和极性均不随时间变化,这样的电压称为恒定电压或直流电压,用符号 U 表示。如果电压的大小和极性均随时间变化,则称为交变电压或交流电压,用符号 u 表示。

2. 电压的单位

电压的单位为伏特(V),简称伏。电压单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV)。它们的换算关系为

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}, 1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}, 1 \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V} \quad (1-5)$$

3. 电压的方向

电压的实际方向是从高电位指向低电位,即电压降的方向。在进行电路分析时,和电流的参考方向一样,也需要设定电压的参考方向。电压的参考方向也是任意选定的,当参考方向与实际方向相同时,电压值为正;反之,电压值为负。

电压的参考方向可用箭头表示,也可用“+”“−”极性表示,如图 1-9 所示。还可采用双下脚标表示,如 U_{ab} 表示方向由 a 指向 b ,下脚标中,第一个字母 a 表示假设电压参考方向的正极性端,第二个字母 b 表示假设电压参考方向的负极性端。显然 $U_{ab} = -U_{ba}$ 。值得注意的是,电压总是针对两点而言。





图 1-9 电压参考方向的设定

例 1-2 如图 1-10 所示, 电压的参考方向已经标出, 已知 $U_1 = 1 \text{ V}$, $U_2 = -1 \text{ V}$ 。试指出电压的实际方向。



图 1-10 例 1-2 图

【解】 $U_1 = 1 \text{ V} (> 0)$, 则 U_1 的实际方向与参考方向相同, 由 A 指向 B。

$U_2 = -1 \text{ V} (< 0)$, 则 U_2 的实际方向与参考方向相反, 应由 B 指向 A。

4. 电动势

电源力将把单位正电荷由低电位点经电源内部移到高电位点并克服电场力所做的功称为电源的电动势。电动势用 E 或 e 表示

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{W}{Q} \\ e &= \frac{dw}{dq} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

电动势的单位也是伏特(V)。

电动势与电压的实际方向不同。电动势的方向是从低电位指向高电位, 即由“—”(负极)指向“+”(正极); 电压的方向是从高电位指向低电位, 即由“+”(正极)指向“—”(负极)。此外, 电动势只存在于电源的内部。

三、关联参考方向

电路中, 电流和电压的参考方向可以各自独立地任意给定, 但为了方便起见, 常将一段电路中的电压和电流的参考方向选取一致, 即规定电流的参考方向从电压参考方向的负极性的一端流向正极性的一端, 按这种方式规定的电压和电流的参考方向称为关联参考方向; 反之, 称为非关联参考方向, 如图 1-11 所示。

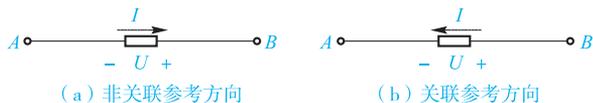


图 1-11 关联参考方向

关于电流和电压的参考方向, 需注意以下三点。

① 电流和电压的实际方向是客观存在的, 而参考方向是人为选定的。当电流和电压的参考方向与实际方向一致时, 电流值和电压值取正号; 反之, 取负号。

② 求解电路时, 必须遵循“先标参考方向, 后计算”的原则, 否则计算得出的电压和电流正负值是没有意义的。虽然参考方向的指定具有任意性, 但一经指定, 在求解过程中不应改变。

③ 一般来说, 同一段电路的电压和电流的参考方向可以各自选定。但为了分析方便, 经常采用关联参考方向。当采用关联参考方向时, 两个参考方向中标出任意一个



即可。

四、电位

1. 电位的定义

电位是电场力把单位正电荷从电路中某点移到参考点所做的功，用大写字母 V 表示。电路中某点的电位即该点与参考点之间的电压，单位为伏特(V)。

参考点又称为零点、零电位点、接地点。为了确定电路中各点的电位，必须在电路选取一个参考点，通常取参考点的电位为 0 V ；而其他各点的电位都和它比较，比它高的为正，比它低的为负。电位参考点的选取在原则上是任意的，但实际上常选取大地为参考点，在电路图中用图形符号“ \perp ”表示。参考点并不是真的与大地相连，许多电子设备中通常把金属机壳作为参考点。

2. 电位与电压的关系

对照电位与电压的定义，不难理解电路中任意一点的电位就是该点与参考点之间的电压，电路中任意两点之间的电压等于这两点电位之差。如果已知 A 与 B 两点的电位分别为 V_A 和 V_B ，则 A 与 B 两点之间的电压为

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1-7)$$

因此，电位的测量实质上是电压的测量，即测量该点与参考点之间的电压。参考点选取不同，电路中各点的电位也不同，因为各点的电位高低是相对于参考点而言的，但任意两点间的电位差不变，即两点间的电压值与参考点的选取无关。

3. 电位的计算

例 1-3 求如图 1-12 所示电路中各点的电位 V_a 、 V_b 、 V_c 、 V_d 。

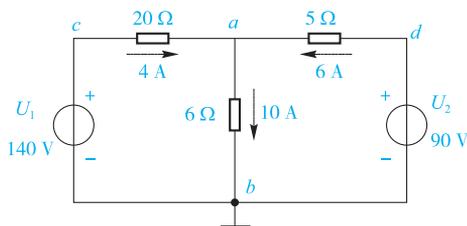


图 1-12 例 1-3 图

【解】 (1) 设 a 点为参考点，即 $V_a = 0\text{ V}$ ，则

$$V_b = U_{ba} = -10 \times 6 = -60\text{ V}$$

$$V_c = U_{ca} = 4 \times 20 = 80\text{ V}$$

$$V_d = U_{da} = 6 \times 5 = 30\text{ V}$$

$$U_{ab} = 10 \times 6 = 60\text{ V}$$

$$U_{cb} = U_1 = U_{ca} + U_{ab} = 80 + 60 = 140\text{ V}$$

$$U_{db} = U_2 = U_{da} + U_{ab} = 30 + 60 = 90\text{ V}$$

(2) 设 b 为参考点，即 $V_b = 0\text{ V}$ ，则

$$V_a = U_{ab} = 10 \times 6 = 60\text{ V}$$

$$V_c = U_{cb} = U_1 = 140\text{ V}$$

$$V_d = U_{db} = U_2 = 90\text{ V}$$



4. 简化画法

在电路分析中,为了绘图方便,通常将图 1-12 采用如图 1-13 所示的简化画法。电源可不用电路图形符号,只标出其极性及电位值。

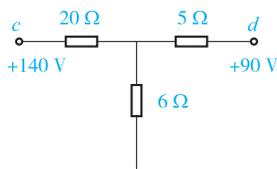


图 1-13 图 1-12 的简化画法

五、功率

1. 功率的定义

在电路分析中,将消耗电能的电气设备及元件统称为负载,将释放电能的电气设备及元件统称为电源,无论是负载还是电源都可以看作电路元件,电路元件在单位时间内吸收或释放的电能称为电功率,简称功率,用 P 或 p 表示

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-8)$$

功率的单位是瓦特(W),简称瓦,常用的单位还有千瓦(kW)、毫瓦(mW)等。通常说的 1 度电就是 1 千瓦·时(kW·h),即

$$1 \text{ 度} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1\,000 \text{ W} \times 3\,600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J} \quad (1-9)$$

2. 功率与电压、电流的关系

若已知元件的电压和电流,则功率的表达式为

$$\left. \begin{aligned} P &= UI \\ p &= ui \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

当元件两端规定的电流和电压为关联参考方向时, $P = UI$; 非关联参考方向时, $P = -UI$ 。若计算结果为正,则说明元器件吸收功率,为耗能元器件,是负载;若计算结果为负,则说明元件发出功率,为供能元器件,是电源。

以上对功率的讨论,同样适用于任何一段电路,而不局限于一个元件。此外,对于一个完整的电路来说,吸收的功率等于发出的功率,称为功率平衡。

例 1-4 (1)如图 1-14 所示,电流均为 2 A, $U_1 = 1 \text{ V}$, $U_2 = -1 \text{ V}$ 。求两个元件消耗或产生的功率。

(2)在图 1-14(b)中,元件产生的功率为 -4 W 。求电流 I 。

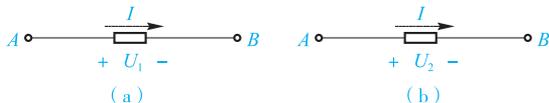


图 1-14 例 1-4 图

【解】 (1)如图 1-14(a)所示,电流和电压为关联参考方向,则元件消耗的功率为

$$P = U_1 I = 1 \times 2 = 2 \text{ W} > 0$$

表明元件吸收功率,为负载。

如图 1-14(b)所示,电流和电压为非关联参考方向,则元件产生的功率为



$$P = -U_2 I = -(-1) \times 2 = 2 \text{ W} > 0$$

表明元件吸收功率，为负载。

(2) 因图 1-14(b) 中的电流和电压为非关联参考方向，且是产生功率，故

$$P = -U_2 I = -4 \text{ W} < 0$$

$$I = \frac{4}{U_2} = \frac{4}{-1} = -4 \text{ A}$$

负号表示电流的实际方向与参考方向相反。

学习检验

1. 在电路中已经定义了电流和电压的实际方向，为什么还引入参考方向呢？
2. 请解释电路中功率平衡的含义。

必备知识三 电阻元件

一、电阻元件与伏安关系

电阻元件是电路中的基本元件之一，它是实际二端电阻器件的理想模型。

1. 电阻元件与电导

电阻元件的定义：若一个二端元件在任意时刻，其端电压 u 与流经它的电流 i 之间的关系(伏安关系)可以用 $u-i$ 平面上的一条曲线描述，则称为电阻元件。若该曲线是通过原点的直线，则称为线性电阻元件，用 R 表示，否则称为非线性电阻元件。

在国际单位制中，电阻的单位为欧姆(Ω)。

为了计算方便，常常将电阻的倒数用电导 G 来表示

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-11)$$

在国际单位制中，电导 G 的单位为西门子(S)。

2. 电阻的伏安特性

对于线性电阻元件，其电路模型如图 1-15 所示。其特性方程为

$$u = Ri \quad (u, i \text{ 关联}) \quad (1-12)$$

$$u = -Ri \quad (u, i \text{ 非关联}) \quad (1-13)$$

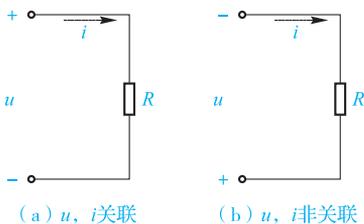


图 1-15 线性电阻元件电路模型

把电阻两端的电压与电流标在坐标平面上，用一条曲线(直线)表示关系，这条曲线(直线)称为电阻的伏安特性曲线。



根据上述公式可知,线性电阻的伏安特性曲线是一条过原点的直线。一般的电阻元件均为线性电阻元件。

如图 1-16 所示为非线性电阻的伏安特性曲线,可以看出它是一条曲线。二极管就是一个典型的非线性电阻元件。

由线性元件组成的电路称为线性电路,由非线性元件组成的电路称为非线性电路。

3. 电阻元件的功率

电阻元件在通电过程中要消耗电能,是一个耗能元件。电阻所吸收的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1-14)$$

则从 t_1 到 t_2 的时间内,电阻元件吸收的能量为 W ,全部转化为热能,即

$$W = \int_{t_1}^{t_2} Ri^2 dt \quad (1-15)$$

在直流电路中

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} \quad (1-16)$$

$$W = PT \quad (1-17)$$

在国际单位制中,电能的单位是焦耳(J)或千瓦·时(kW·h),简称为度。1 千瓦时是指功率为 1 kW 的电源(负载)在 1 h 内所输出(消耗)的电能。

二、电阻的串联与并联

1. 电阻的串联

在电路中,若干个电阻元件依次相连,这种连接方式称为串联。如图 1-17 所示为电阻的串联电路。

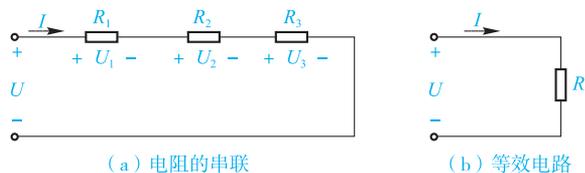


图 1-17 电阻的串联电路

电阻串联时具有以下五个特点:

- ①通过各电阻的电流相等。
- ②总电压等于各电阻上电压之和,即

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (1-18)$$

- ③等效电阻(总电阻)等于各电阻之和,即

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1-19)$$

等效电阻指如果用一个电阻 R 代替串联的所有电阻接到同一电源上,电路中的电流是相同的。

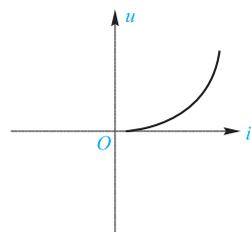


图 1-16 非线性电阻的伏安特性曲线



④分压系数。在直流电路中，常用电阻的串联来达到分压的目的。各串联电阻两端的电压与总电压间的关系为

$$\begin{cases} U_1 = R_1 I = \frac{R_1}{R} U \\ U_2 = R_2 I = \frac{R_2}{R} U \\ U_3 = R_3 I = \frac{R_3}{R} U \end{cases} \quad (1-20)$$

式(1-20)中, $\frac{R_1}{R}$, $\frac{R_2}{R}$, $\frac{R_3}{R}$ 称为分压系数, 由分压系数可直接求得各串联电阻两端的电压。

由式(1-20)可知

$$U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3 \quad (1-21)$$

即电阻串联时, 各电阻两端的电压与电阻的大小成正比。

⑤各电阻消耗的功率与电阻成正比, 即

$$P_1 : P_2 : P_3 = R_1 : R_2 : R_3 \quad (1-22)$$

2. 电阻的并联

在电路中, 若干个电阻一端连在一起, 另一端也连在一起, 使电阻承受的电压相同, 这种连接方式称为电阻的并联。如图 1-18 所示为电阻的并联电路。

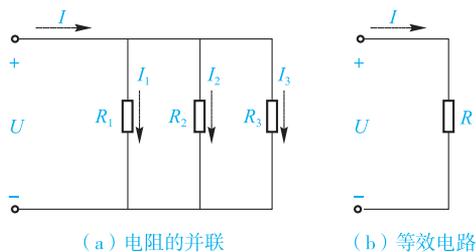


图 1-18 电阻的并联电路

电阻并联时具有以下五个特点:

①各并联电阻两端的电压相等。

②总电流等于各电阻支路的电流之和, 即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (1-23)$$

③等效电阻 R 的倒数等于各并联电阻倒数之和, 即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (1-24)$$

式(1-24)也可写成

$$G = G_1 + G_2 + G_3 \quad (1-25)$$

式(1-25)表明, 并联电路的电导等于各支路电导之和。

对于只有两个电阻 R_1 和 R_2 的并联, 则等效电阻为

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-26)$$

④分流系数。在电路中, 常用电阻的并联来达到分流的目的。各并联电阻支路的



电流与总电流的关系为

$$\begin{cases} I_1 = G_1 U = \frac{G_1}{G} I \\ I_2 = G_2 U = \frac{G_2}{G} I \\ I_3 = G_3 U = \frac{G_3}{G} I \end{cases} \quad (1-27)$$

式(1-27)中, $\frac{G_1}{G}$, $\frac{G_2}{G}$, $\frac{G_3}{G}$ 称为分流系数, 由分流系数可直接求得各并联电阻支路的电流。

由式(1-27)还可知

$$I_1 : I_2 : I_3 = G_1 : G_2 : G_3 \quad (1-28)$$

电阻并联时, 各电阻支路的电流与电导的大小成正比。也就是说电阻越大, 分流作用越小。

当两个电阻并联时

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \quad (1-29)$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \quad (1-30)$$

⑤各电阻消耗的功率与电导成正比, 即

$$P_1 : P_2 : P_3 = G_1 : G_2 : G_3 \quad (1-31)$$

例 1-5 多量程直流电压表是由表头、分压电阻、多位开关连接而成的, 如图 1-19 所示。如果表头满偏电流 $I_g = 100 \mu\text{A}$, 表头电阻 $R_g = 1\,000 \Omega$, 现要制成量程为 10 V、50 V 的二量程电压表, 试确定分压电阻值。

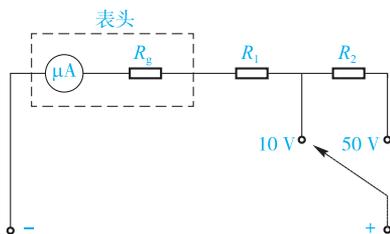


图 1-19 例 1-5 图

【解】 (1) 当 $I_g = 100 \mu\text{A}$ 流过表头时, 表头两端的电压

$$U_g = R_g I_g = 1\,000 \times 100 \times 10^{-6} = 0.1 \text{ V}$$

(2) 当量程 $U_1 = 10 \text{ V}$ 时, 串联电阻为 R_1 , 则

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_g} &= \frac{R_1 + R_g}{R_g} \\ \frac{10}{0.1} &= \frac{R_1 + 1\,000}{1\,000} \end{aligned}$$

得 $R_1 = 99 \text{ k}\Omega$ 。

(3) 当量程 $U_2 = 50 \text{ V}$ 时, 串联电阻为 R_2 , 则

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2 + (R_g + R_1)}{(R_g + R_1)}$$



$$\frac{50}{10} = \frac{R_2 + 100}{100}$$

得 $R_2 = 400 \Omega$ 。

学习检验

1. 当白炽灯的灯丝烧断后再重新搭上，白炽灯反而更亮，为什么？
2. 三个电阻的阻值分别为 30Ω 、 20Ω 、 60Ω ，则并联后的等效电阻是多少？

必备知识四 电压源与电流源

一、电压源

1. 理想电压源

(1) 定义

无论流过多大电流，其两端输出的电压保持恒定或按特定规律变化，它相当于一个只产生电动势而没有内部能量消耗的电源。端电压为常数的称为直流电压源，其电压符号常用 U_S 来表示。如图 1-20 所示为理想电压源的模型及伏安特性曲线。

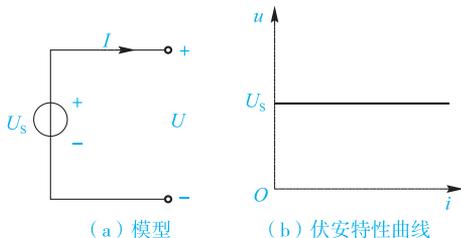


图 1-20 理想电压源的模型及伏安特性曲线

(2) 特点

- ① 电压是一个定值或一定的时间函数，与流过它的电流方向、大小均无关。
- ② 电源两端电压由电源本身决定，与外电路无关；流过它的电流由它与外电路共同决定，或者说它的输出电流随外电路变化。当外电路的电阻 $R = \infty$ 时，电压源处于开路状态， $I = 0$ ；当外电路的电阻 $R = 0$ 时，电压源处于短路状态， $I = \infty$ ，短路电流可能使电源遭受过热损伤或毁坏。因此，理想电压源不允许短路。
- ③ 理想电压源实际上是不存在的。

2. 实际电压源

虽然理想电压源实际上不存在，但如果一个实际电压源的内阻远小于负载电阻，则端电压基本恒定，就可以忽略内阻的影响，近似地认为它是一个理想电压源。通常，稳压电源和新的干电池都可近似地认为是理想电压源。

实际电压源可以用一个理想电压源 U_S 和内阻 r 相串联的模型来表示，如图 1-21 (a) 所示。实际电压源的伏安特性曲线如图 1-21 (b) 所示，可见电源输出的电压随负载电流的增加而下降。



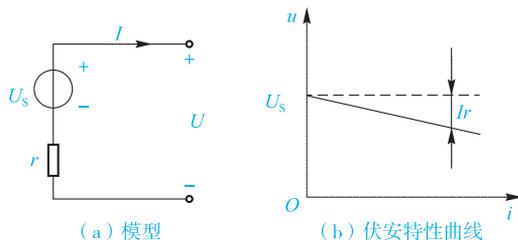


图 1-21 实际电压源的模型及伏安特性曲线

电压源空载时，电源端电压为

$$U = U_s$$

接上负载后，特征方程为

$$U = U_s - Ir \quad (1-32)$$

二、电流源

1. 理想电流源

(1) 定义

在电路中，无论端电压为何值，输出电流保持恒定或按特定规律变化的二端元件称为理想电流源，其模型及伏安特性曲线如图 1-22 所示。

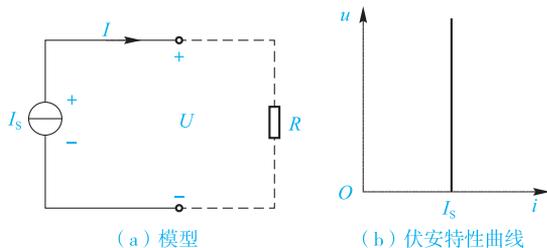


图 1-22 理想电流源的模型及伏安特性曲线

(2) 特点

① 电流源的输出电流由电源本身决定，与外电路无关，与它两端电压方向、大小均无关。

② 电流源两端的电压由电源及外电路共同决定，理想电流源不允许开路。

③ 理想电流源实际上是不存在的。

2. 实际电流源

实际电流源可以用一个理想电流源 I_s 与内电阻 r 并联的模型来表示，如图 1-23 (a) 所示。

其特征方程为

$$I = I_s - \frac{U}{r} \quad (1-33)$$

实际电流源的伏安特性曲线如图 1-23 (b) 所示，可见电源输出的电流随负载电压的增加而减少。当电源内阻远大于负载电阻时， r 支路的分流很小，则认为 $I = I_s$ 。此时，可将此电流源看成理想电流源，实验室中的直流稳流电源就属于这种类型。



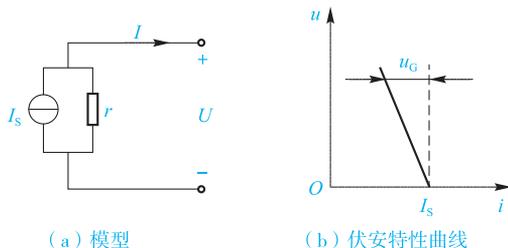


图 1-23 实际电流源的模型及伏安特性曲线

例 1-6 在图 1-21 中, 设 $U_s=20\text{ V}$, $r=1\ \Omega$ 。外接电阻 $R=4\ \Omega$ 。求电阻 R 上的电流 I 。

【解】 根据式(1-32)可知

$$U=U_s-Ir=IR$$

则有

$$I=\frac{U_s}{R+r}=\frac{20}{4+1}=4\text{ A}$$

学习检验

1. 一根额定熔断电流为 5 A 的保险丝, 电阻为 $0.015\ \Omega$ 。其熔断时, 熔丝两端的电压是多少?
2. 理想电源与实际电源的电路模型有何区别?

任务实施 识读万用表的原理图

一、实施器材准备

MF-47 型万用表的原理图、电阻器件若干, 每组 1 套。

二、实训步骤

①识读 MF-47 型万用表的原理图, 并说明其组成。

万用表可以测量直流电流、交流电压、直流电压、电阻等电量, 主要由表头、功能转换器、功能转换开关、刻度盘四个部分组成。如图 1-24 所示为 MF-47 万用表的组成框图。

②找出原理图中组成电路的三要素。

③识读万用表原理图的各器件, 并将万用表组成器件填到表 1-1 中。

④简述万用表的工作原理, 试着找出测量电流、电压、电阻的电路部分。

如图 1-25 所示为 MF-47 型万用表的原理。其中, 表头是一个直流微安表; WH_2 是一个可调电位器, 用于调节表头回路中电流的大小; D_3 与 D_4 两个二极管反向并联后再与电容 C_1 并联, 用于限制表头两端的电压, 起到保护表头的作用, 使表头不会因电流过大而被烧坏。



测电容
是否漏电



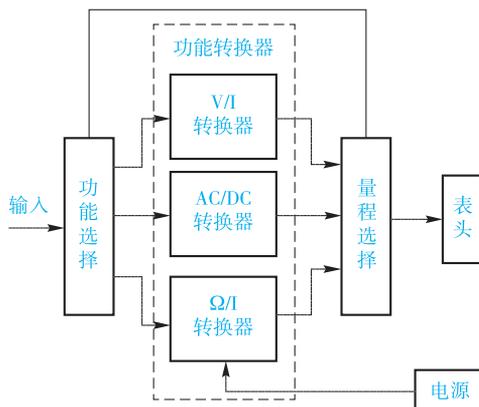


图 1-24 MF-47 型万用表的组成框图

表 1-1 万用表的组成器件

序号	名称	型号	序号	名称	型号
1			4		
2			5		
3			6		

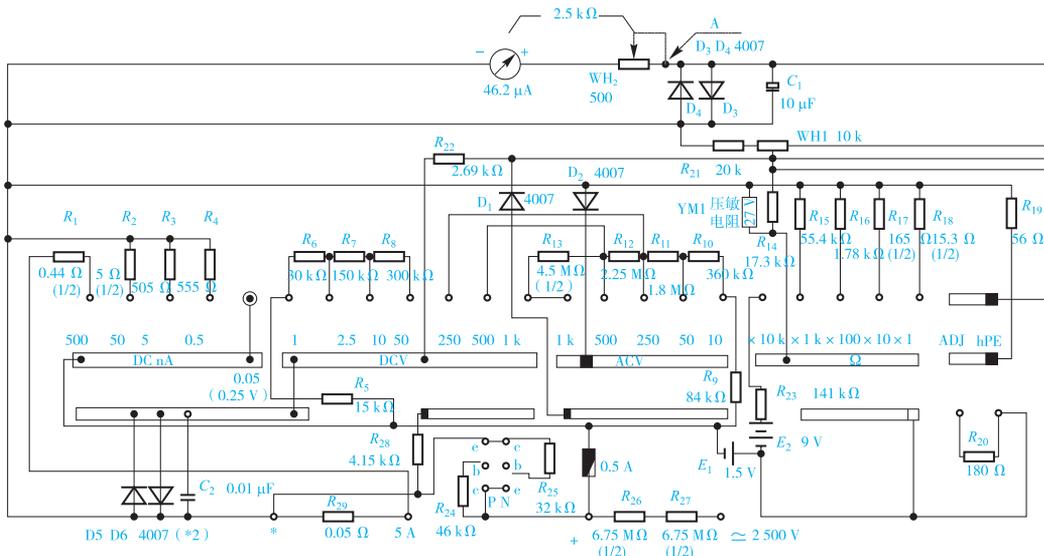


图 1-25 MF-47 型万用表的原理

⑤在实训室器件库中找出相应的电路实物，让学生初步了解电子器件。

三、思考与讨论

- ①如何用色环法识读电阻的阻值？
- ②如何用万用表读取电阻值？



任务二

电工电子仪器仪表的使用与测量

电工仪表是监视与保证各类电气设备及电力线路实现安全经济运行的重要显示装置。在电力的生产、输送与使用过程中，它已成为必不可少的计量器具，许多电气设备的参数都需要仪表来进行测量与反映。因此，电工仪表又被称为电力系统的“眼睛”。要想掌握电路测量技术，必须会用万用表进行数据测量，能熟练地读取电度表读数，掌握兆欧表的测量方法及试电笔的使用方法，认识常用的电子仪器仪表，掌握电子仪表的使用方法。

必备知识一 电工仪器仪表的使用与测量

一、万用表

作为电工测量仪器，万用表的应用较为广泛，可以测量直流电流、直流电压、交流电流、交流电压、电阻、电容、晶体管直流放大系数等物理量。根据测量原理及测量结果显示方式的不同，万用表可分为指针式万用表(图 1-26)和数字式万用表(图 1-27)。



图 1-26 指针式万用表



图 1-27 数字式万用表

1. 指针式万用表

以 MF-47 型指针式万用表为例，它是一款多量程、多用途、便携式的测量仪表，读数采用指针指示的方式。MF-47 型指针式万用表具有 26 个基本量程，还有测量电平、电容、电感、晶体管直流参数等 7 个附加参考量程，是一种量限多、分挡细、灵敏度高、体形轻巧、性能稳定、过载保护可靠、读数清晰、使用方便的通用型万用表。



(1) 测量方法

测量方法为：插孔选择→机械调零→物理量选择→量程选择→物理量的测量→读数。

①插孔选择。红表笔插入标有“+”的插孔，黑表笔插入标有“-”的插孔。

②机械调零。将万用表水平放置，短接红表笔与黑表笔，调节表盘上的机械调零旋钮，使表针指准零位。

③物理量选择。物理量选择就是根据不同的被测物理量将转换开关旋至相应的位置。

④量程选择。预估被测量参数的大小，选择合适的量程。量程的选择标准：测量电流和电压时，应使表针偏转至满刻度的 $1/2$ 或 $2/3$ 以上；测量电阻时，应使表针偏转至中心刻度值的 $1/10 \sim 10$ 倍。

⑤各种物理量的测量如下：

a. 电压测量。将万用表与被测电路并联测量；测量直流电压时，应将红表笔接高电位、黑表笔接低电位。如果无法区分高低电位，则应先将一支表笔接稳一端，另一支表笔触碰另一端，若表针反偏，则说明表笔接反。

b. 电流测量。将万用表串联在被测回路中；测量直流电流时，应使电流由红表笔流入万用表，由黑表笔流出万用表。测量中不允许带电换挡，测量较大电流时应断开电源后再撤表笔。

c. 电阻测量。应先进行电气调零，即将两表笔短接，同时调节面板上的“欧姆调零旋钮”，使表针指在电阻刻度的零点上。若调不到零点，则说明万用表内电池电量不足，需要更换电池。测量过程中，每变换一次量程挡位，就应重新进行欧姆调零；表笔应与被测电阻接触良好，手不得触及表笔的金属部分，以减小测量误差；被测电阻不能有并联支路。

d. 电感和电容的测量。先将量程选择开关旋至交流 10 V 位置，将被测电容或电感串接于任一测试棒，然后跨接于 10 V 交流电压电路中进行测量。

⑥读数。读数时，应根据不同的测量物理量及量程，在相应的刻度尺上读出指针指示的数值。此外，读数时应尽量使视线与表面垂直，以减小视线偏差所引起的使用误差。

(2) 实战技巧

实战技巧包括“舍近求远”和“联合作战”。

①“舍近求远”。转动万用表的拨盘时，一定要顺时针旋转。例如，原来的挡位是“ $R \times 100$ ”，若要扭转到“ $R \times 1k$ ”挡，则需要旋转一大圈。这样能有效地保护万用表的多刀多掷开关，使之不易损坏。

②“联合作战”。用万用表测量发光二极管时，尽量使用“ $R \times 1$ ”和“ $R \times 10$ ”低挡位，以减少电池的消耗。若表内没有 9 V 电池，只能用“ $R \times 1k$ ”挡。但此时不易测量出发光二极管的正反向电阻，因为此时表内的电池只有 1.5 V ，不能将 PN 结导通。若采用两块万用表串联的方式，则将甲表的红表笔插入乙表的黑表笔插孔中，用甲表的黑表笔和乙表的红表笔来测量发光二极管。若仍用“ $R \times 1k$ ”挡，则能明显看出正反向电阻的差别；若用“ $R \times 10$ ”挡，则在正向导通时可使发光二极管发光。

2. 数字式万用表

数字式万用表结构精密、性能稳定、可靠性高、使用方便，由测量线路及相关元



器件、液晶显示器、插孔、转换开关组成。

(1) 电压的测量

将黑表笔插入“COM”插孔，红表笔插入“V/ Ω ”插孔；将功能开关(转换开关)置于交流电压或直流电压范围的合适量程；表笔与被测电路并联，红表笔接被测电路高电位端，黑表笔接被测电路低电位端。测量交流电压时，红表笔与黑表笔不分极性。

(2) 电流的测量

将黑表笔插入“COM”插孔，测量最大值不超过 200 mA 的电流时，红表笔应插“mA”或“A”插孔；测 200 mA~20 A 范围的电流时，红表笔应插“20 A”插孔；将转换开关置于交流电流或直流电流范围的合适量程；将该仪表串入被测电路且红表笔接高电位端，黑表笔接低电位端。测量交流时，红表笔与黑表笔不分极性。

(3) 电阻的测量

将黑表笔插入“COM”插孔，红表笔插入“V/ Ω ”插孔；将功能开关(转换开关)置于电阻范围的合适量程；表笔与被测电路并联。

注意：表中读数为阻值，不需要乘倍率。测大于 1 M Ω 的电阻时，需要几秒的稳定时间。严禁被测电阻带电。

(4) 二极管的测量

将量程开关拨至二极管挡，红表笔插入“ Ω ”插孔并接二极管正极，黑表笔插入“COM”插孔并接二极管负极。若二极管正常，则测锗管时应显示 0.15~0.3 V，测硅管时应显示 0.55~0.7 V，此为正向测量；反向测量时，将二极管反接，若管子正常将显示“1”，若管子不正常将显示“000”。

(5) hFE 值测量

根据被测管的类型选择量程开关的“PNP”挡或“NPN”挡，将被测管的三个管脚 E, B, C 插入相应的插孔，显示屏上将显示出 hFE 值的大小。

(6) 电路通断的检查

将红表笔插入“ Ω ”插孔，量程开关旋至蜂鸣器挡，让表笔触及被测电路。若蜂鸣器发出叫声，则说明电路是通的；反之，则不通。

二、验电器

验电器是验明设备是否带电的一种工具，分为高压验电器和低压验电器。高压验电器是变电站必备的工具，主要用来检验电力输送网络中的高电压。低压验电器又称验电笔，是一种用来检验对地电压 250 V 以下的低压电源及电气设备是否带电的工具，如图 1-28 所示。验电笔分为氖管式验电笔和数字式验电笔。按外形分类，氖管式验电笔可分为螺钉旋具式和钢笔式。目前市场上出售的验电笔以旋具式较为常见，如图 1-29 所示。



图 1-28 验电笔



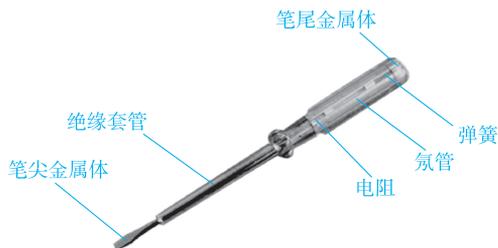


图 1-29 旋具式验电笔

三、绝缘电阻表

绝缘电阻表又称兆欧表或摇表，是一种测量高电阻的仪表，一般用于测量电气设备与电气线路的绝缘电阻。绝缘电阻表主要由一个手摇直流发电机、一个磁电式流比计测量机构、一个电流回路、一个电压回路组成。绝缘电阻表如图 1-30 所示。



图 1-30 绝缘电阻表

绝缘电阻有三个接线柱，分别标有“线(L)”“地(E)”“屏(G)”。在进行一般测量时，将被测对象接在“线”和“地”之间即可。

绝缘电阻表的测量方法如下：

①将绝缘电阻表水平放置，检查偏转情况。先使“线”与“地”开路，使手摇发电机达到额定转速，指针应指到“∞”；再将“线”与“地”短接，指针应指到“0”。

②接线及测量。将被测对象接在“线”和“地”之间，摇动手柄，速度由慢到快，最终稳定在 120 r/min，大约持续 1 min，待指针稳定后读数。

四、钳形电流表

钳形电流表又称卡表，是一种电流测量仪表，如图 1-31 所示。钳形电流表的测量精度不高，通常为 2.5~5 级。钳形电流表由电流互感器和电流表组合而成。在捏紧扳手时，电流互感器的铁芯可以张开；被测电流所通过的导线可以不必切断就能穿过铁芯张开的缺口，当放开扳手后铁芯闭合。

钳形电流表的测量方法如下：

①选择合适的挡位。估计被测电流的大小，选择合适的量程。未知被测电流大小时，可先用大量程挡测量，然后逐渐减小，直到合适为止。

②测量及读数。张开钳口，将被测导线放在钳口中央区域，闭合钳口，按下锁定按钮，读数。





图 1-31 钳形电流表

五、电度表

电度表是用于测量负载在一定时间内所耗电能的仪表，一般可分为单相电度表和三相电度表。根据额定电流的大小，其规格有 2 A、4 A、5 A、10 A、20 A。单相电度表的外形如图 1-32 所示。

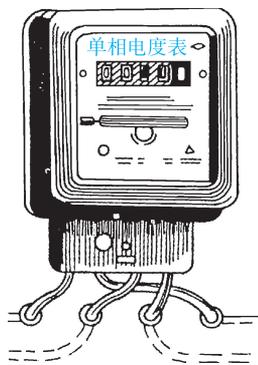


图 1-32 单相电度表的外形

1. 电度表的读数

在电度表面板上有一个长方形的窗口，窗口内装有机械式计数器，从左到右依次为千位、百位、十位、个位、十分位，两次读数之差为所用电的度数，如图 1-33 所示。

0	0	0	8	·	6	—— 第一次抄表
0	0	3	6	·	2	—— 第二次抄表

图 1-33 电度表的读数

2. 电度表的接线

电度表有四个接线桩，从左到右依次编号为 1，2，3，4。一般来说，编号 1 与 3 接进线(1 接相线，3 接零线)，2 与 4 接出线(2 接相线，4 接零线)。



学习检验

1. 请问如何用数字式万用表测量晶体管的放大倍数?
2. 指针式万用表是如何读取测量的电压值的?

必备知识二 电子仪器仪表的使用

电子电路一般用来进行信号分析,如输入输出波形、计算放大倍数等,其中,主要进行测量与分析的仪器仪表有双踪示波器、晶体管毫伏表、低频信号发生器等。

一、双踪示波器

双踪示波器能直观地查看电信号波形,便于后续对电信号进行分析和研究。它是一种可以测量多种电量的电器设备,除了测量电压、电流外,还能测量振幅、相位差、时间、频率等,还可以进行非电量的测量。双踪示波器不仅能将两个电信号叠加后的波形显示出来,而且具有单波示波器的功能。双踪示波器的面板如图 1-34 所示。

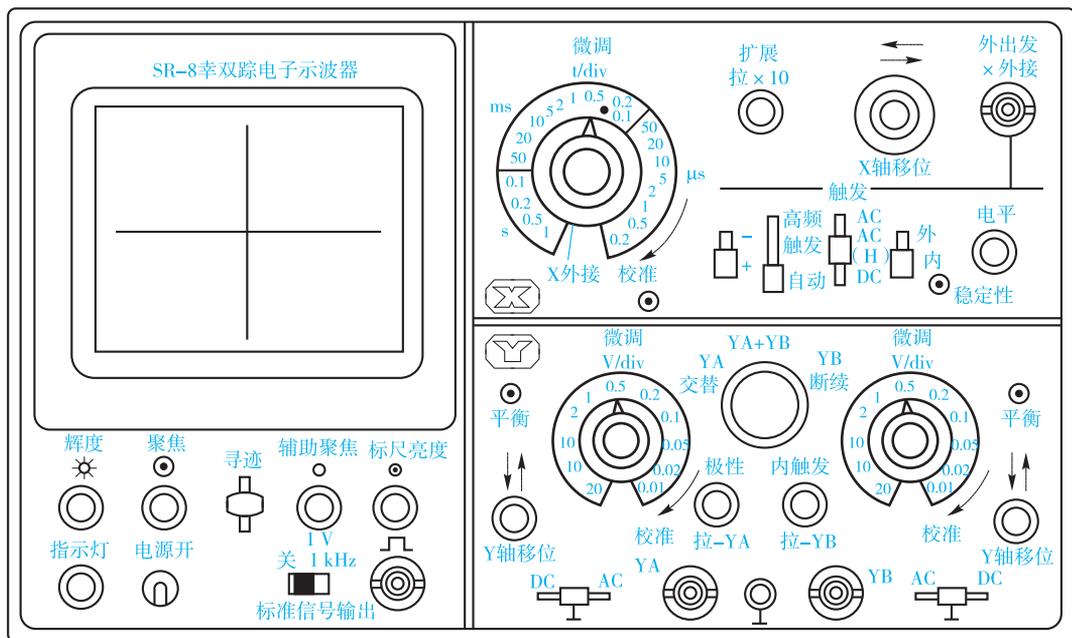


图 1-34 双踪示波器的面板

双踪示波器的使用方法如下:

① 双踪示波器初次使用前或久藏复用时,有必要进行一次能否工作的简单检查和进行扫描电路稳定性、垂直放大电路直流平衡的调整。双踪示波器在进行电压和时间的定量测试时,还必须进行垂直放大电路增益和水平扫描速度的校准。

② 选择 Y 轴耦合方式。选择“AC—地—DC”开关,根据被测信号频率的高低,将 Y 轴输入耦合方式置于 AC 或 DC。



③选择Y轴灵敏度。根据被测信号的大约峰—峰值(如果采用衰减探头,则应除以衰减倍数;在耦合方式取DC挡时,还要考虑叠加的直流电压值),将Y轴灵敏度V/div开关(或Y轴衰减开关)置于适当挡级。在实际使用中,如不需要读测电压值,则可适当调节Y轴灵敏度微调(或Y轴增益)旋钮,使屏幕上显现所需要高度的波形。

④选择触发(或同步)信号来源与极性。通常将触发(或同步)信号极性开关置于“+”挡或“-”挡。

⑤选择扫描速度。根据被测信号周期(或频率)的大约值,将X轴扫描速度微调t/div(或扫描范围)开关置于适当挡级。在实际使用中,如不需要读测时间值,则可适当调节扫速微调t/div(或扫描微调)旋钮,使屏幕上显示测试所需周期数的波形。如需要观察的是信号的边沿部分,则扫速t/div开关应置于最快扫速挡。

⑥输入被测信号。被测信号由探头衰减后(或由同轴电缆不衰减直接输入,但此时的输入阻抗降低、输入电容增大),通过Y轴输入端输入示波器。

⑦根据实训任务要求,观察输入输出波形,完成相应的测量与计算。

二、晶体管毫伏表

晶体管毫伏表是一种专门用来测量正弦交流电压有效值的交流电压表,如图1-35所示。



图 1-35 晶体管毫伏表

晶体管毫伏表测量交流电有效值的使用方法如下:

①开机前,将通道输入端测试探头上的红鳄鱼夹、黑鳄鱼夹短接。

②将量程开关置于最高量程(300 V)。

③接通220 V电源,按下电源开关,电源指示灯亮,仪器立刻工作。为了保证仪器稳定性,需要预热5 min后使用。开机5 min内,指针无规则摆动属于正常现象。

④将输入测试探头上的红鳄鱼夹、黑鳄鱼夹断开后与被测电路并联(红鳄鱼夹接被测电路的正端,黑鳄鱼夹接地端),观察表头指针在刻度盘上所指的位置,若指针在起始点位置基本没动,则说明被测电路中的电压甚小,且毫伏表量程选取过高。

⑤用递减法由高量程向低量程变换,直到表头指针指到满刻度的2/3左右即可。

⑥准确读数。第一条刻度和第二条刻度为测量交流电压有效值的专用刻度。当量



任务实施 万用表与兆欧表的使用与测量

一、实施器材准备

指针式万用表、数字式万用表、绝缘电阻表、三相异步电动机、二极管若干、电阻若干、干电池若干，每组 1 套。

二、实训步骤

1. 指针式万用表的使用与测量

(1) 测量电阻值

第一步，将万用表水平放置，进行“机械调零”。

第二步，将量程选择开关拨至适当挡位。

第三步，将红表笔与黑表笔短接，进行“欧姆调零”。需要注意的是，若“调零”旋钮已调到极限位置，但指针仍不到“0 Ω ”位置，则说明万用表内部电池电压已不足，应更换新电池后再测量。

第四步，将被测电阻和其他元器件或电源脱离，单手持表笔并跨接在电阻两端。

第五步，待指针偏转稳定后，读取测量值。

(2) 测量直流电压

第一步，将量程选择开关拨到“直(V—)0~2.5 V”挡位。

第二步，将万用表并联在被测电路的两端，红表笔接电池正极，黑表笔接电池负极。

第三步，待指针偏转稳定后，读取测量值。

2. 数字式万用表的使用与测量

(1) 测量三相交流电压

第一步，将红表笔与黑表笔插入插孔。

第二步，选择挡位。

第三步，将红表笔、黑表笔分别跨接在三相电源端子上。

第四步，读数。

(2) 测量二极管

第一步，将红表笔与黑表笔插入插孔。

第二步，选择挡位。

第三步，将红表笔、黑表笔跨接在二极管的两个管脚上。

第四步，听声、读数。

3. 绝缘电阻表的使用与测量

测量交流电动机绕组的实施步骤如下：

第一步，断开表线探头，摇动绝缘电阻表的手柄，保持 120 r/min 的速度，检验表的开路状态。

第二步，短接表线探头，摇动绝缘电阻表的手柄，保持 120 r/min 的速度，检验表的短路状态。

第三步，将 L 表线探头触及电动机绕组的出线端，E 表线探头触及电动机壳体。



常用电工
工具



摇动绝缘电阻表的手柄，保持 120 r/min 的速度，待指针稳定后读取测量值。

第四步，将 L 表线探头触及电动机任意两相绕组的出线端，摇动绝缘电阻表的手柄，保持 120 r/min 的速度，待指针稳定后读取测量值。

4. Multisim 软件的仿真测量

Multisim 的仿真步骤如下：

第一步，建立如图 1-37 所示的 Multisim 仿真电路。

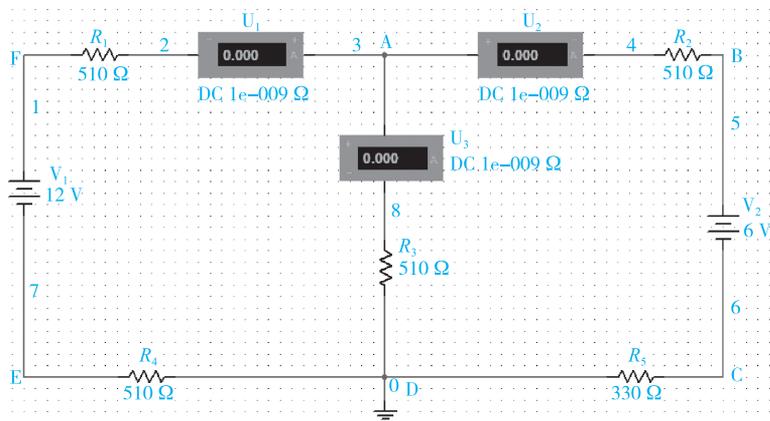


图 1-37 Multisim 仿真电路

第二步，断开开关 K，开启仿真开关，用万用表测量 CD 与 AB 之间的电阻值。

第三步，合上开关 K，读取电流表上的读数，即各支路的电流值，记录到表 1-2 中。

表 1-2 各支路的电流值

I_1/mA	I_2/mA	I_3/mA

第四步，调出仿真软件中的万用表，分别测量表 1-3 中的电路各电压值。

表 1-3 电路各电压值

U_{AB}/V	U_{BC}/V	U_{CD}/V	U_{DA}/V	U_{DE}/V	U_{EF}/V	U_{FA}/V

第五步，调出仿真软件中的万用表，分别测量表 1-4 中电路各点的电位值。

表 1-4 电路各点的电位值

U_A/V	U_B/V	U_C/V	U_D/V	U_E/V	U_F/V



三、思考与讨论

- ①Multisim 软件的仿真测量中，第三步中的三个电流代数和为零吗？
- ②Multisim 软件的仿真测量中，第四步中的各电压值与第五步中的电位之间有何关系？



任务三

直流电路的分析与仿真验证

基尔霍夫定律是由德国物理学家基尔霍夫于 1845 年发现的。对一些具有多个电源的复杂电路来说,通过电源的等效变换法可起到简化电路的作用;支路电流法可以对含有两个或两个以上电源的复杂电路进行分析与计算;对于复杂电路的分析,还可以应用叠加定理来简化分析过程;但是只需要计算电路中某一支路的电压或电流时,为了避免引出一些不必要的电压或电流,可以采用戴维南定理进行电路分析。

必备知识一 基尔霍夫定律

前面已经介绍了电阻、电感、电容、电压源和电流源的基本规律,即元件对其电压、电流等形成的约束,如电阻的欧姆定律。然而,电路是由各类元器件通过导线连接而成的,作为整体还应有其相互约束的规律,基尔霍夫定律就是研究这一规律的。基尔霍夫定律包含两条定律:基尔霍夫电流定律(KCL)和基尔霍夫电压定律(KVL)。

一、相关概念

支路、节点、回路、网孔的概念如图 1-38 所示。

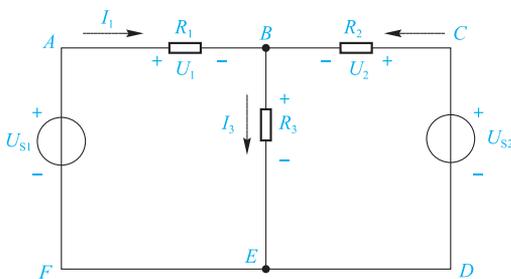


图 1-38 支路、节点、回路、网孔

1. 支路

一段没有分支的电路称为支路。如图 1-38 所示, $BAFE$, BE , $BCDE$ 都是支路, ABC 不是支路。支路 $BAFE$ 和 $BCDE$ 中含有电源,称为含源支路;支路 BE 中不含电源,称为无源支路。

2. 节点

三条或三条以上支路的连接点称为节点。如图 1-38 所示, B 和 E 都是节点, A ,



C, D, F 不是节点。

3. 回路

电路中的任意闭合路径称为回路。如图 1-38 所示, ABEFA、BCDEB、ABCDEFA 都是回路。

4. 网孔

不含交叉支路的回路称为网孔。如图 1-38 所示, ABEFA 和 BCDEB 是网孔, ABCDEFA 不是网孔。

二、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律是确定电路中任意节点处各支路电流之间关系的定律, 又称为节点电流定律。基尔霍夫电流定律表明: 在任一瞬时, 流向某一节点的电流之和恒等于由该节点流出的电流之和

$$\sum i_{e(t)in} = \sum i_{e(t)out} \quad (1-34)$$

在直流的情况下, 则

$$\sum I_{in} = \sum I_{out} \quad (1-35)$$

通常把式(1-34)、式(1-35)称为节点电流方程或 KCL 方程。

基尔霍夫电流定律还有另外一种表述: 在任一瞬时, 流经任一节点所有支路电流的代数和恒等于零

$$\sum i(t) = 0 \quad (1-36)$$

在列写节点电流方程时, 各电流变量前的正号、负号取决于各电流的参考方向与该节点之间的关系, 是“流入”还是“流出”; 各电流值的正号、负号反映了该电流的实际方向与参考方向之间的关系, 是相同还是相反。通常规定, 流入节点的电流取正号, 流出节点的电流取负号。

如图 1-39 所示, 某电路中有一个节点 a , 连接在节点 a 的支路共有 5 条, 在所选定的参考方向下有

$$I_1 + I_4 = I_2 + I_3 + I_5 \quad \text{或} \quad I_1 - I_2 - I_3 + I_4 - I_5 = 0$$

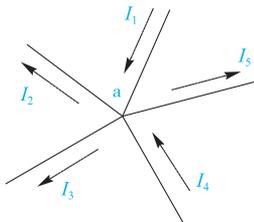


图 1-39 基尔霍夫电流定律的应用

KCL 不仅适用于电路中的节点, 还可以推广应用于电路中的任一假设的封闭面: 在任一瞬时, 通过电路中任一假设封闭面的电流代数和为零。如图 1-40 所示, 现有某电路中的一部分, 选择封闭面如图中虚线所示, 在所选定的参考方向下有

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

即



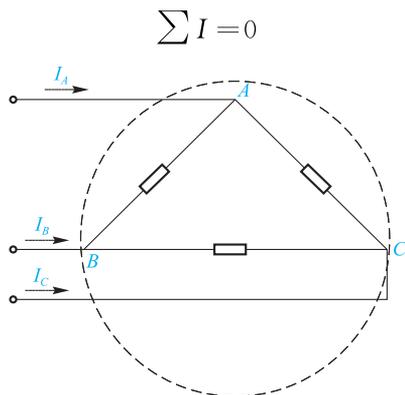


图 1-40 基尔霍夫电流定律的推广

例 1-7 如图 1-41 所示, 电路中电流的参考方向已经标明。已知 $I_1 = 2 \text{ A}$, $I_2 = -4 \text{ A}$, $I_3 = -8 \text{ A}$ 。试求 I_4 。

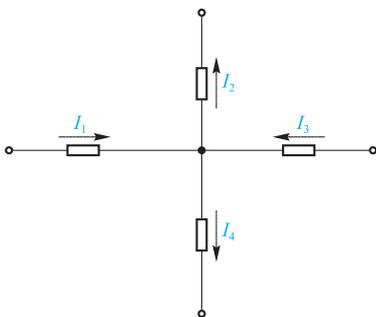


图 1-41 例 1-7 图

【解】 根据 KCL 可得

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

则

$$I_4 = I_1 - I_2 + I_3 = 2 - (-4) + (-8) = -2 \text{ A}$$

例 1-8 已知 $I_1 = 5 \text{ A}$, $I_6 = 3 \text{ A}$, $I_7 = -8 \text{ A}$, $I_5 = 9 \text{ A}$, 如图 1-42 所示。试计算电路中的电流 I_8 。

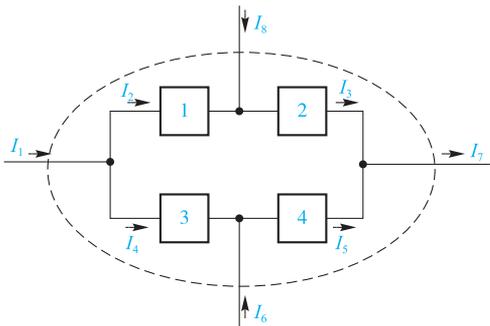


图 1-42 例 1-8 图

【解】 在电路中选择一个封闭面, 如图中虚线所示, 根据 KCL 可知



$$I_1 + I_6 + I_8 = I_7$$

则

$$I_8 = I_7 - I_1 - I_6 = -8 - 5 - 3 = -16 \text{ A}$$

三、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律是确定电路中任意回路内各电压之间关系的定律，又称为回路电压定律。基尔霍夫电压定律表明：在任一瞬时，沿电路中的任一回路绕行一周，在该回路上，电动势之和恒等于各电阻上的电压降之和

$$\sum E = \sum IR \quad (1-37)$$

在直流回路中，则

$$\sum U_{\text{电压升}} = \sum U_{\text{电压降}} \quad (1-38)$$

通常把式(1-37)、式(1-38)称为回路电压方程或 KVL 方程。

基尔霍夫电压定律还有另外一种表述：在任一瞬时，沿任意闭合回路的所有支路电压的代数和恒等于零

$$\sum u = 0 \quad (1-39)$$

回路的“绕行方向”是任意选定的，一般用虚线表示。在列回路电压方程时通常规定：当电压或电流的参考方向与回路“绕行方向”相同时，取正号；参考方向与回路“绕行方向”相反时，取负号。

在图 1-38 中，对于回路 ABCDEFA，若按顺时针绕行方向，则根据 KVL 可得

$$U_1 - U_2 + U_{S2} - U_{S1} = 0$$

如图 1-43 所示，根据 KVL 可得

$$IR_1 + U_{S2} + IR_2 - U_{S1} = 0$$

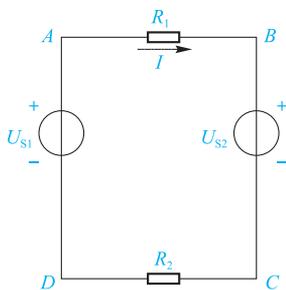


图 1-43 基尔霍夫电压定律应用电路

KVL 不仅适用于电路中的具体回路，还可以推广应用于电路中的任一假想回路：在任一瞬时，沿回路绕行方向，电路中假想的回路各段电压的代数和为零。

如图 1-44 所示，现有某电路中的一部分，路径 a 、 f 、 c 、 b 并未构成回路。选定如图 1-44 所示的回路“绕行方向”，对假象的回路 $afcba$ 列写 KVL 方程

$$-u_4 + u_5 - u_{ab} = 0$$

则

$$u_{ab} = u_5 - u_4$$



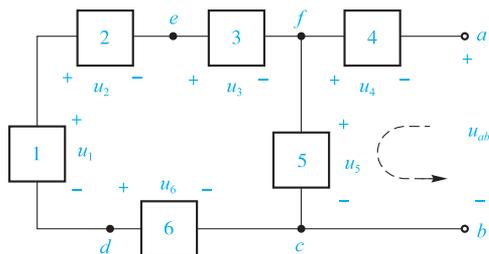


图 1-44 基尔霍夫电压定律的推广

由此可见，电路中 a 与 b 两点的电压 u_{ab} 等于以 a 为原点、以 b 为终点且沿任一路径绕行方向上各段电压的代数和。其中， a 与 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。

例 1-9 如图 1-45 所示，根据电路中标出的电流参考方向，用基尔霍夫电压定律列出回路电压方程。

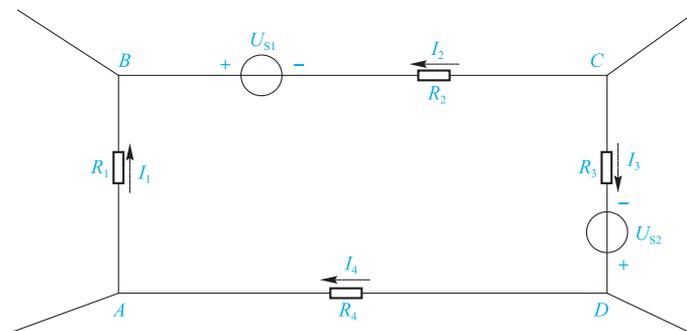


图 1-45 例 1-9 图

【解】 先确定回路的绕行方向，选择电路中任意一点为起点，绕行一周，列出 KVL 方程，注意正负号的确定。

假设绕行方向为顺时针方向，以 A 点为起点，绕行一周，根据 KVL 可得

$$R_1 I_1 + U_{S1} - R_2 I_2 + R_3 I_3 - U_{S2} + R_4 I_4 = 0$$

例 1-10 如图 1-46 所示，已知电路中的电压 $U_{S1} = 10 \text{ V}$ ， $U_{S2} = 5 \text{ V}$ ，电阻 $R_1 = 5 \Omega$ ， $R_2 = 10 \Omega$ ，电容 $C = 0.1 \text{ F}$ ，电感 $L = 0.1 \text{ H}$ 。求电压 U_1 和 U_2 。

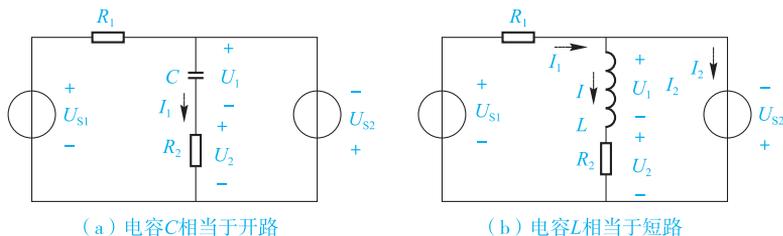


图 1-46 例 1-10 图

【解】 (1) 在图 1-46(a) 中，电容 C 相当于开路， $I_1 = 0$ 。则

$$U_2 = I_1 R_2 = 0 \text{ V}$$



由 KVL 可得

$$U_1 = -U_{S2} - U_2 = -5 \text{ V}$$

(2) 在图 1-46(b) 中, 电感 L 相当于短路, $U_1 = 0 \text{ V}$ 。由 KVL 可得

$$U_2 = -U_1 - U_{S2} = -0 - 5 = -5 \text{ V}$$

学习检验

1. 回路和网孔有什么不同?
2. 电路断开了还可以用 KVL 列回路方程吗?
3. KVL 和 KCL 只能适用于线性电路吗?

必备知识二 电源等效变换法

前面已经介绍了两类理想电源, 即电压源和电流源。然而, 任何一个实际电源本身都有内阻, 将理想电源与其内阻组合便构成了实际电压源模型和实际电流源模型。实际电源的这两种电路模型对外电路是等效的, 因此可以进行等效变换。

一、二端网络的等效概念

具有两个端钮的部分电路称为二端网络, 如图 1-47 所示。

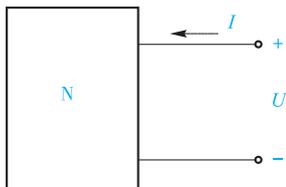


图 1-47 二端网络

如果电路结构、元件参数完全不同的两个二端网络具有相同的电压、电流关系, 即相同的伏安关系, 则这两个二端网络称为等效网络。等效网络在电路中可以相互代换。

内部有独立电源(电压源的电压或电流源的电流不受外电路控制而独立存在的电源叫独立电源)的二端网络, 称为有源二端网络; 内部没有独立电源的二端网络, 称为无源二端网络。无源二端网络可用一个电阻元件与之等效。这个电阻元件的电阻值称为该网络的等效电阻或输入电阻, 也称为总电阻, 用 R_i 表示。

二、电源的等效变换

实际电源可用两种电路模型表示, 一为电压源和一个电阻(内阻 R_i) 的串联模型, 二为电流源和电阻(内阻 R_i) 的并联模型, 如图 1-48 所示。

要使这两个实际电源模型等效, 需要有相同的电压和电流关系, 对于图 1-48 (a), 由 KVL 可得



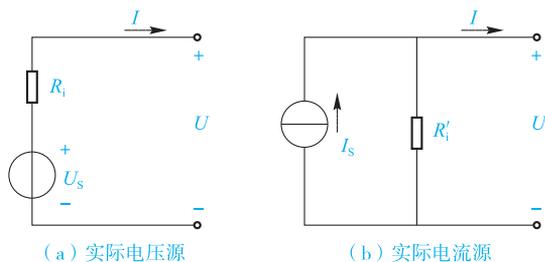


图 1-48 实际电源模型

$$U = U_s - IR_i \quad (1-40)$$

对于图 1-48(b), 由 KCL 可得

$$I = I_s - \frac{1}{R_i}U \quad (1-41)$$

将式(1-41)整理后可得

$$U = I_s R_i' - IR_i' \quad (1-42)$$

由此可见, 实际电压源和实际电流源若要等效变换, 则其伏安特性方程必须相同, 即电路参数必须满足以下条件

$$R_i = R_i' \quad (1-43)$$

$$U_s = I_s R_i' \quad (1-44)$$

实际电源的等效变换只能保证其外部电路的电压、电流、功率相同, 但其内部电路并无等效可言。通俗地讲, 当电路中某一部分用其等效电路替代后, 未被替代部分的电压、电流应保持不变。

应用电源的等效变换分析电路时应注意以下四点:

①电源的等效变换是电路等效变换的一种方法。这种等效是对电源输出电流、端电压的等效。

②在进行等效互换时, 必须注意电压极性与电流方向之间的关系, 即两者的参考方向要求一致, 也就是说电压源的正极对应电流源电流的流出端。

③有内阻的实际电源, 其电压源模型与电流源模型之间可以等效互换。理想电压源与理想电流源之间不能等效互换。

④电源等效互换的方法可以推广运用。如果理想电压源与外接电阻串联, 可将外接电阻看作其内阻, 则可转换为电流源形式; 如果理想电流源与外接电阻并联, 可将外接电阻看作其内阻, 则可转换为电压源形式。

例 1-11 如图 1-49 所示, 已知 $U_{S1} = 4 \text{ V}$, $I_{S2} = 2 \text{ A}$, $R_2 = 12 \Omega$ 。试化简图 1-49 (a) 的电路。

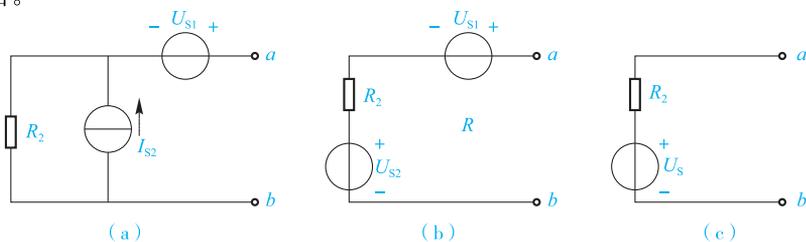


图 1-49 例 1-11 图



【解】 在图 1-49(a) 中, 先把电流源 I_{S2} 与电阻 R_2 的并联变换为电压源 U_{S2} 与电阻 R_2 的串联(注意: 电压源的正极对应电流源电流的流出端), 如图 1-49(b) 所示, 其中

$$U_{S2} = R_2 I_{S2} = 12 \times 2 = 24 \text{ V}$$

在图 1-49(b) 中, 再将电压源 U_{S2} 与电压源 U_{S1} 的串联变换为电压源 U_S , 如图 1-49(c) 所示, 其中

$$U_S = U_{S2} + U_{S1} = 24 + 4 = 28 \text{ V}$$

学习检验

1. 理想电压源和理想电流源之间能否等效变换?
2. 实际电源的两种电路模型之间等效变换的条件是什么?

必备知识三 支路电流法

对于一个复杂电路, 当需要求解支路电流时, 可应用 KCL 和 KVL 对节点和回路分别列出方程, 通过解方程组来求解。这种分析复杂电路的方法称为支路电流法。

支路电流法是最基本的分析方法。它以支路电流为求解对象, 先应用 KCL 和 KVL 分别对节点和回路列出所需要的方程组, 然后解出各未知的支路电流。对于具有 b 条支路、 n 个节点的电路, 可列出 $(n-1)$ 个独立的电流方程和 $b-(n-1)$ 个独立的电压方程。

支路电流法求解电路的步骤如下:

- ① 标出支路电流参考方向和回路绕行方向。
- ② 根据 KCL 列写节点的电流方程式。
- ③ 根据 KVL 列写回路的电压方程式。
- ④ 解联立方程组, 求取未知量。

例 1-12 如图 1-50 所示, 电路为两台发电机并联运行, 共同向负载 R_L 供电。已知 $E_1 = 130 \text{ V}$, $E_2 = 117 \text{ V}$, $R_1 = 1 \Omega$, $R_2 = 0.6 \Omega$, $R_L = 24 \Omega$ 。求各支路的电流及发电机两端的电压。

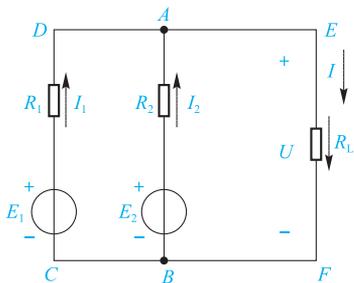


图 1-50 例 1-12 图



【解】 (1) 选取各支路的电流参考方向如图 1-50 所示, 回路绕行方向均为顺时针方向。

(2) 列写 KCL 方程。

节点 A:

$$I_1 + I_2 = I$$

(3) 列写 KVL 方程。

$$ABCD \text{ 回路: } E_1 - E_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2$$

$$AEFBA \text{ 回路: } E_2 = R_2 I_2 + R_L I$$

其基尔霍夫定律方程组为

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I \\ E_1 - E_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2 \\ E_2 = R_2 I_2 + R_L I \end{cases}$$

将数据代入各式后可得

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I \\ 130 - 117 = I_1 - 0.6 I_2 \\ 117 = 0.3 I_2 + 24 I \end{cases}$$

解此联立方程可得

$$I_1 = 10 \text{ A}, I_2 = -5 \text{ A}, I = 5 \text{ A}$$

则发电机两端电压 U 为

$$U = R_L I = 24 \times 5 = 120 \text{ V}$$

例 1-13 求图 1-51 所示电路中的 U_2 , I_2 , R_1 , R_2 , U_S 。

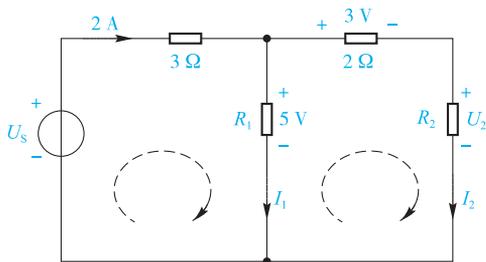


图 1-51 例 1-13 图

【解】 假设各支路电流的参考方向和网孔绕行方向如图 1-51 所示。

$$I_2 = \frac{3}{2} = 1.5 \text{ A}$$

由 KVL 可得

$$U_2 - 5 + 3 = 0$$

$$U_2 = 2 \text{ V}$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{2}{1.5} = 1.33 \Omega$$

由 KCL 可得

$$I_1 + I_2 = 2$$

$$I_1 = 2 - 1.5 = 0.5 \text{ V}$$



$$R_1 = \frac{5}{0.5} = 10 \Omega$$

对于左边的网孔, 由 KVL 可得

$$3 \times 2 + 5 - U_S = 0$$

$$U_S = 11 \text{ V}$$

学习检验

1. 假如有 3 个节点, 那么可以列 3 个独立的电流方程吗?
2. 3 条支路、2 个节点可以列几个独立的网孔电压方程?

必备知识四 叠加定理

一、叠加定理的内容

叠加定理指出: 在线性电路中, 当有多个电源作用时, 电路中任何一条支路的电流(或电压)是电路中各个电源单独作用时在该支路上产生的电流(或电压)的代数和。

当某独立电源单独作用于电路时, 其他独立电源应该除去, 称为“除源”。对于理想电压源来说, 令其输出电压为零, 相当于短路; 对于理想电流源来说, 令其输出电流为零, 相当于断路。

注意: 不作用的理想电压源短接, 不作用的理想电流源断开, 电阻却仍保留在电路中, 功率不能叠加。

二、叠加定理的应用

应用叠加定理分析复杂电路时, 可以将复杂电路简化为几个简单电路的和。

例 1-14 如图 1-52(a) 所示, 已知电路中 $E_1 = 27 \text{ V}$, $E_2 = 13.5 \text{ V}$, $R_1 = 1 \Omega$, $R_2 = 3 \Omega$, $R_3 = 6 \Omega$ 。请用叠加定理求各支路电流。

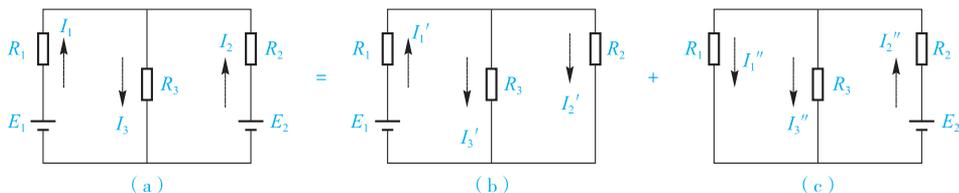


图 1-52 例 1-14 图

【解】 用叠加定理进行计算。先求各电源单独作用时各支路的电流, 电路如图 1-52(b) 和图 1-52(c) 所示。

(1) E_1 单独作用时, E_2 短路, 求 I_1' , I_2' , I_3' 。电路如图 1-56(b) 所示, 将电压源 E_2 短接, 则

$$R_{\text{总}} = R_1 + (R_2 // R_3) = 3 \Omega$$

$$I_1' = \frac{E_1}{R_{\text{总}}} = \frac{27}{3} = 9 \text{ A}$$



$$I_2' = \frac{R_3}{R_2 + R_3} I_1' = 6 \text{ A}$$

$$I_3' = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I_1' = 3 \text{ A}$$

(2) E_2 单独作用时, E_1 短路, 求 I_1'' , I_2'' , I_3'' 。电路如图 1-52(c) 所示, 将电压源 E_1 短接, 则

$$R_{\text{总}} = R_2 + (R_1 // R_3) = \frac{27}{7} \Omega$$

$$I_2'' = \frac{E_2}{R_{\text{总}}} = \frac{13.5}{\frac{27}{7}} = 3.5 \text{ A}$$

$$I_1'' = \frac{R_3}{R_1 + R_3} I_2'' = 3 \text{ A}$$

$$I_3'' = \frac{R_1}{R_1 + R_3} I_2'' = 0.5 \text{ A}$$

(3) 求原电路中各支路的电流 I_1 , I_2 , I_3 (注意电流的方向), 即

$$I_1 = I_1' - I_1'' = 9 - 3 = 6 \text{ A}$$

$$I_2 = I_2'' - I_2' = 3.5 - 6 = -2.5 \text{ A}$$

$$I_3 = I_3' + I_3'' = 3 + 0.5 = 3.5 \text{ A}$$

例 1-15 如图 1-53(a) 所示, 试用叠加定理计算电路中的电压 U 。

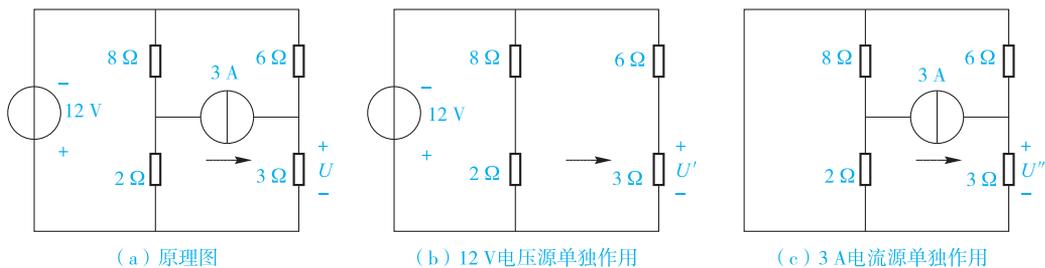


图 1-53 例 1-15 图

【解】 (1) 计算 12 V 电压源单独作用于电路时产生的电压 U' , 电流源开路, 如图 1-53(b) 所示。

$$U' = -\frac{12}{6+3} \times 3 = -4 \text{ V}$$

(2) 计算 3 A 电流源单独作用于电路时产生的电压 U'' , 电压源短路, 如图 1-53(c) 所示。

$$U'' = 3 \times \frac{6}{6+3} \times 3 = 6 \text{ V}$$

(3) 计算 12 V 电压源和 3 A 电流源共同作用于电路时产生的电压 U 。

$$U = U' + U'' = -4 + 6 = 2 \text{ V}$$



学习检验

1. 叙述叠加定理的适用范围。
2. 功率是否也可以进行叠加计算？

必备知识五 戴维南定理

一、戴维南定理的内容

戴维南定理指出：任何一个线性有源二端网络，对于外电路而言，可以用一个电压源和一个内电阻相串联的电路模型来代替，如图 1-54 所示。理想电压源的电压就是有源二端网络的开路电压 U_{OC} ，即将负载断开后 a 、 b 两端之间的电压。内电阻等于有源二端网络中所有电压源短路(其电压为零)、电流源开路(其电流为零)时的等效电阻 R_i 。

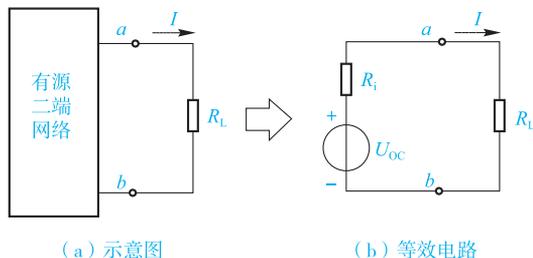


图 1-54 戴维南等效电路

因此，对于一个复杂的线性有源二端网络的计算，关键是求戴维南等效电路。求戴维南等效电路的步骤如下：

- ① 求出有源二端网络的开路电压 U_{OC} 。
- ② 将有源二端网络的电压源短路、电流源开路，求出无源二端网络的等效电阻 R_i 。
- ③ 画出戴维南等效电路图。

例 1-16 求如图 1-55 所示电路的戴维南等效电路。

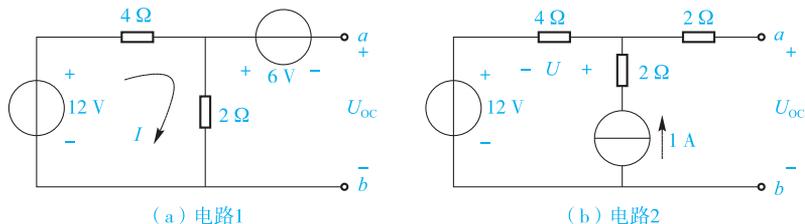


图 1-55 例 1-16 图

【解】 (1) 对图 1-55(a)：

- ① 求有源二端网络的开路电压 U_{OC} 。设回路绕行方向是顺时针方向，则



$$I = \frac{12}{4+2} = 2 \text{ A}$$

4 Ω 电阻上的电压 U 为

$$U = RI = 4 \times 2 = 8 \text{ V}$$

$$U_{\text{OC}} = U_{ab} = (-6) + (-8) + 12 = -2 \text{ V}$$

②求内电阻 R_i ，将电压源短路，得到如图 1-56 所示的电路。

$$R_i = \frac{4 \times 2}{4+2} = 1.33 \Omega$$

图 1-55(a) 的戴维南等效电路如图 1-57 所示，注意电压源的方向。

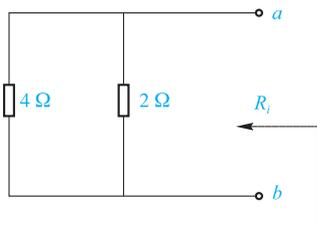


图 1-56 图 1-55(a) 的等效电阻

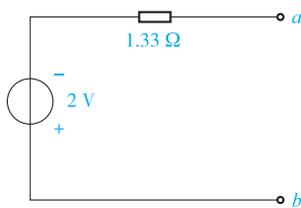


图 1-57 图 1-55(a) 的戴维南等效电路

(2) 对图 1-55(b)：

①求有源二端网络的开路电压 U_{OC} 。

由于回路中含有电流源，因此回路的电流为 1 A，方向为逆时针方向。

4 Ω 电阻的电压为

$$U = RI = 4 \times 1 = 4 \text{ V}$$

开路电压 U_{OC} 为

$$U_{\text{OC}} = 4 + 12 = 16 \text{ V}$$

②求内电阻 R_i ，将电压源短路、电流源开路，得到如图 1-58 所示的电路。

由电阻的串联公式得

$$R_i = 2 + 4 = 6 \Omega$$

图 1-55(b) 的戴维南等效电路如图 1-59 所示。

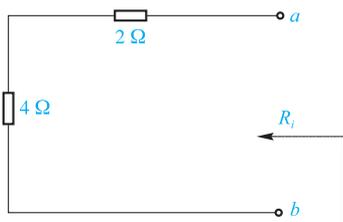


图 1-58 图 1-55(b) 的等效电阻

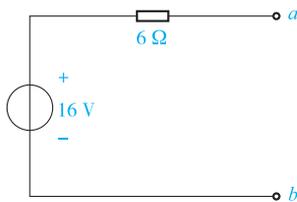


图 1-59 图 1-55(b) 的戴维南等效电路

例 1-17 如图 1-60(a) 所示，已知电路中 $E_1 = 12 \text{ V}$ ， $E_2 = 15 \text{ V}$ ， $R_1 = 6 \Omega$ ， $R_2 = 3 \Omega$ ， $R_3 = 2 \Omega$ 。试用戴维南定理求通过电阻 R_3 的电流 I 。

【解】 (1) 求开路电压，如图 1-60(b) 所示。

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{-3}{9} = -\frac{1}{3} \text{ A}$$



$$U_{OC} = IR_2 + E_2 = 14 \text{ V}$$

(2) 求等效电阻 R_1 ，如图 1-60(c) 所示。

$$R_1 = R_1 // R_2 = 2 \Omega$$

(3) 将原电路简化为戴维南等效电路，根据欧姆定律求 I 。

$$I = \frac{U_{OC}}{R_1 + R_3} = 3.5 \text{ A}$$

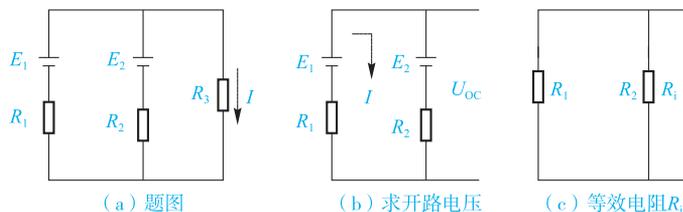


图 1-60 例 1-17 图

二、负载获得最大功率的条件

前面已经介绍了多种分析直流电路的方法，了解到电路的功能主要是为负载供电。在电源输出功率不变的情况下，负载获得的功率越大，电能的利用率就越高。那么负载获得最大功率的条件是什么呢？接下来将利用所学知识讨论负载获得最大功率的条件。

当一个线性有源二端网络化为戴维南等效电路后，在其端口接上可变电阻 R ，如图 1-61 所示。若 E 与 r 已知，那么当 R 为多少时才能获得最大功率？获得的最大功率又为多少？

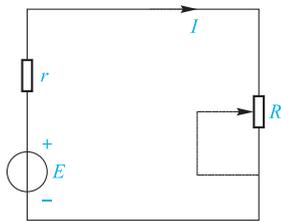


图 1-61 带可变负载的电路

下面从负载功率的计算式来推导负载获得最大功率的条件。

由功率公式可知，电阻 R 的功率为

$$P = I^2 R$$

由全电路欧姆定律可得

$$I = \frac{E}{R + r}$$

则有

$$\begin{aligned} P &= I^2 R = \left(\frac{E}{R + r} \right)^2 R = \frac{E^2 R}{(R + r)^2} = \frac{E^2 R}{R^2 + 2Rr + r^2} = \frac{E^2 R}{R^2 - 2Rr + r^2 + 4Rr} \\ &= \frac{E^2 R}{(R - r)^2 + 4Rr} = \frac{E^2}{\frac{(R - r)^2}{R} + 4r} \end{aligned}$$

对于一定的电源， E 和 r 都可以看作恒量。只有当分母最小，即 $R = r$ 时， P 才能达到最大值。因此，当 $R = r$ 时，负载获得最大功率。负载电阻等于电源电阻是负载获得最大功率的条件。由于负载获得最大功率就是电源输出最大功率，因此这一条件也是电源输出最大功率的条件。



则负载获得的最大功率为

$$P_{\max} = \frac{E^2}{4r} = \frac{E^2}{4R} \quad (1-45)$$

由此可见, 电源与负载匹配时, 电源内阻消耗的功率等于负载功率, 故此时电路的效率只有 50%。在强电(如电力配电线路)方面, 通常不考虑电源与负载匹配的问题(效率太低); 在弱电(如通信系统、控制线路)方面, 会更多地关注如何使电源与负载匹配的问题。

例 1-18 如图 1-62 所示, $R_1=2\ \Omega$, 电源电动势 $E=10\ \text{V}$, 内阻 $r=0.5\ \Omega$, R_2 为可变电阻。可变电阻的阻值为多少时才可能获得最大功率, R_2 消耗的最大功率为多少?

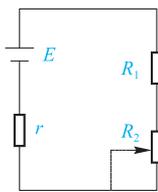


图 1-62 例 1-18 图

【解】 要使可变电阻 R_2 获得最大功率, 可将 (R_1+r) 视为电源内阻, 利用负载获得最大功率的条件可以求出

$$R_2 = R_1 + r = 2 + 0.5 = 2.5\ \Omega$$

当 $R_2=2.5\ \Omega$ 时, 消耗的最大功率为

$$P_{\max} = \frac{E^2}{4r} = \frac{(10)^2}{4 \times 2.5} = 10\ \text{W}$$

学习检验

1. 戴维南定理适用于哪些电路的分析与计算?
2. 应用戴维南定理求解电路的过程中, 电压源、电流源应该如何处理?

任务实施 简易电路的叠加分析与仿真验证

一、实施器材准备

计算机(Windows XP 系统及以上)、电路仿真软件 Multisim 10、任务工单, 每组 1 套。

二、实训步骤

1. 叠加定理的仿真验证

仿真实施步骤如下:

- ①建立如图 1-63 所示的叠加定理的仿真验证电路。



Multisim 10
仿真软件
使用



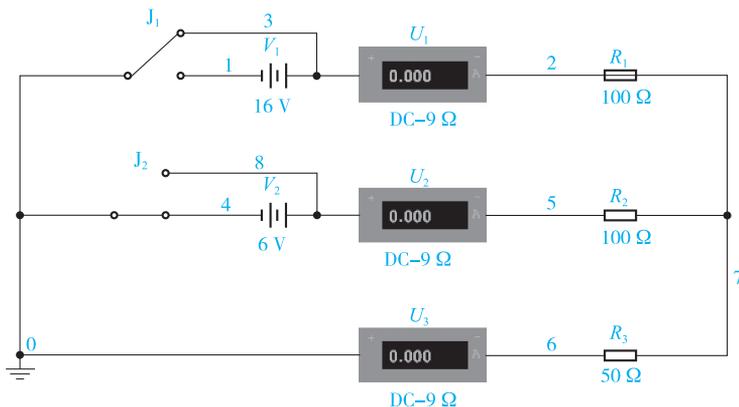


图 1-63 叠加定理的仿真验证电路

②让 V_1 单独作用，开启仿真开关，将开关 J_1 拨至下端，开关 J_2 拨至上端，分别读取各电流表的读数，即各支路的电流 I_1 ， I_2 ， I_3 ，并将数据填到表 1-5 中。

表 1-5 各支路的电流值

	V_1/V	V_2/V	I_1/mA	I_2/mA	I_3/mA
V_1 单独作用					
V_2 单独作用					
V_1 与 V_2 共同作用					

③让 V_2 单独作用，将开关 J_1 拨至上端，开关 J_2 拨至下端，分别读取各电流表的读数，并将数据填到表 1-5 中。

④让 V_1 与 V_2 共同作用，将开关 J_1 拨至下端，开关 J_2 拨至下端，读取各电流表的读数，并将数据填到表 1-5 中。

⑤根据表中的数据，验证叠加定理的正确性。

2. 戴维南定理的仿真验证

仿真实施步骤如下：

①建立如图 1-64 所示的戴维南定理的仿真验证电路。

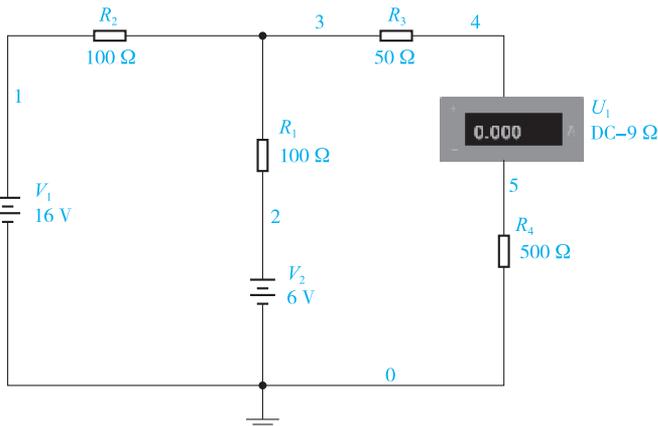


图 1-64 戴维南定理的仿真验证电路



②开启仿真开关, 读取电流表的读数, 即负载 R_4 上的电流 I_L , 并将数据填到表 1-6 中。

表 1-6 戴维南定理的数据

被测值	I_L/mA	U_{oc}/V	R_0/Ω	I_L'/mA
测量值				

③测开路电压 U_{oc} 。将负载开路, 如图 1-65 所示。开启仿真开关, 用电压表测量开路电压 U_{oc} , 并将读数记到表 1-6 中。

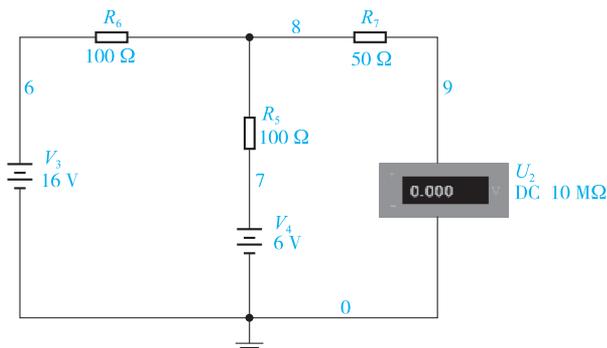


图 1-65 测开路电压的仿真电路

④测戴维南等效电阻 R_0 。将两组电压源短路, 如图 1-66 所示。开启仿真开关, 用万用表测出戴维南等效电路的电阻 R_0 , 并将数据记到表 1-6 中。

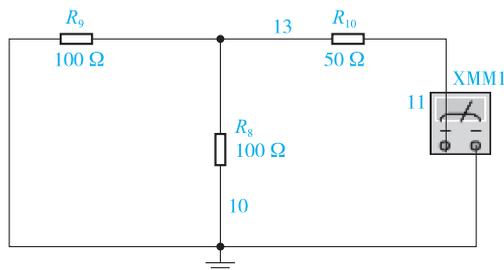


图 1-66 测戴维南等效电阻的仿真电路

⑤用等效电路求负载电流 I_L' 。根据表 1-6 中所测数据可得到有源二端网络的戴维南等效电路, 如图 1-67 所示。读取电流表读数, 即负载电流 I_L' , 并记到表 1-6 中。

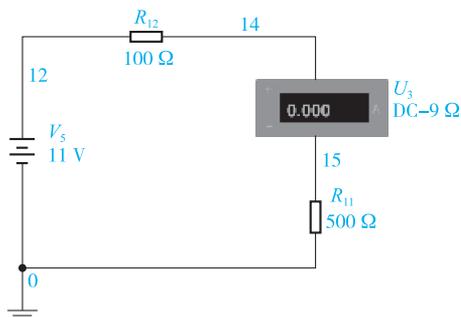


图 1-67 有源二端网络的戴维南等效电路



⑥根据表 1-6 中的数据, 对比负载电流 I_L 与 I_L' 是否一致, 验证戴维南定理的正确性。

三、思考与讨论

- ①在应用 Multisim 10 软件进行电路仿真的过程中需要注意哪些问题?
- ②电流和电压可以用叠加定理进行分析和计算, 为什么功率不行?

项目检测

1. 一只 110 V、8 W 的指示灯, 接在 380 V 的电源上。要让它正常发光, 请问需要串联一个多大的电阻? 电阻的功率有多大?
2. 在 220 V 的电源上, 接一个电加热器, 已知通过电加热器的电流是 3.5 A。请问 4h 内, 该电加热器用了多少度电?
3. 求如图 1-68 所示电路中 A 端与 B 端的总电阻 R_{AB} 。

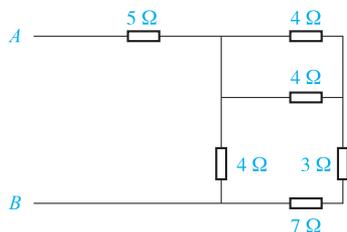


图 1-68 题 3 图

4. 求如图 1-69 所示电路中电压源产生的功率。

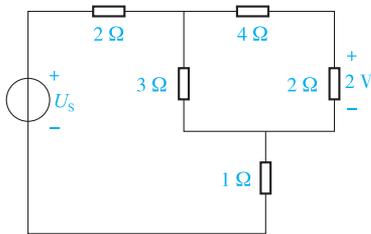


图 1-69 题 4 图

5. 如图 1-70 所示, 已知电路中 $U_1=10\text{ V}$, $U_2=5\text{ V}$, $U_3=8\text{ V}$, $U_4=-23\text{ V}$, 分别选取 B 点与 C 点为参考点。试求电路中各点的电位。

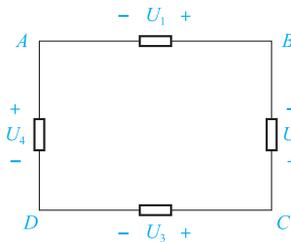


图 1-70 题 5 图



在线测试



6. 万用表有什么用途？它通常分为哪两大类？
7. 兆欧表的用途是什么？使用时应注意哪些事项？
8. 已知表头的内阻为 $1\text{ k}\Omega$ ，满偏电流为 50 mA 。若要将该电流表的量程扩大为 5 A ，请问应该如何操作？
9. 电工测量仪表是如何分类的？
10. 电流表和电压表在测量时应如何正确接线？
11. 简述电工测量仪表的使用注意事项。
12. 简述钳形电流表的使用方法。
13. 简述指针式万用表测量电阻时的步骤。
14. 某待测电流约为 80 mA ，现有 0.5 级量程为 $0\sim 500\text{ mA}$ 和 1.5 级量程为 $0\sim 100\text{ mA}$ 的两个电流表。请问用哪一个电流表测量较好？为什么？
15. 如图 1-71 所示，试计算电路中的电流 I_1 和 I_2 。

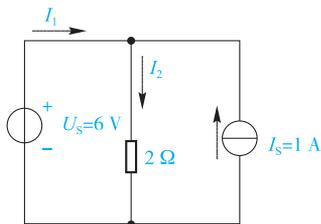


图 1-71 题 15 图

16. 如图 1-72 所示，电路中 $E_1=60\text{ V}$ ， $E_2=90\text{ V}$ ， $R_1=12\ \Omega$ ， $R_2=6\ \Omega$ ， $R_3=36\ \Omega$ 。试用支路电流法求电流 I_3 和 R_3 两端的电压。

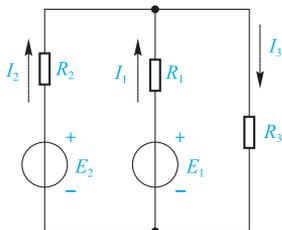


图 1-72 题 16 图

17. 如图 1-73 所示，电路中 $E_1=15\text{ V}$ ， $E_2=65\text{ V}$ ， $R_1=5\ \Omega$ ， $R_2=R_3=10\ \Omega$ 。试用支路电流法分别求 R_1 ， R_2 ， R_3 两端的电压。

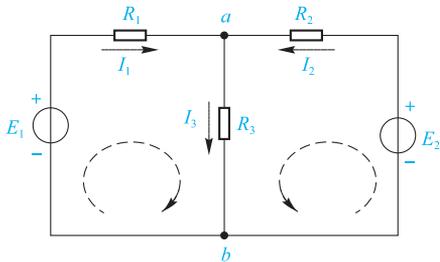


图 1-73 题 17 图



18. 请用电源等效变换法求如图 1-74 所示电路中流经 $4\ \Omega$ 电阻的电流 I 。

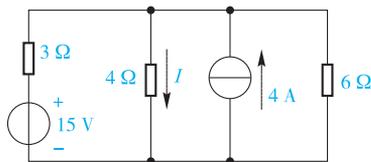


图 1-74 题 18 图

19. 如图 1-75 所示，已知电路中 $U_{S1}=10\text{ V}$ ， $I_{S1}=15\text{ A}$ ， $I_{S2}=5\text{ A}$ ， $R=30\ \Omega$ ， $R_2=20\ \Omega$ 。求电流 I 。

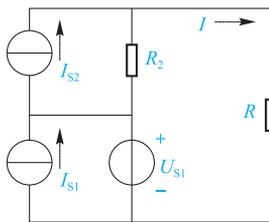


图 1-75 题 19 图

20. 如图 1-76 所示，已知电路中 $U_1=9\text{ V}$ ， $U_2=12\text{ V}$ ， $R_1=R_2=R_3=3\ \Omega$ 。求各支路电流 I_1 ， I_2 ， I_3 。

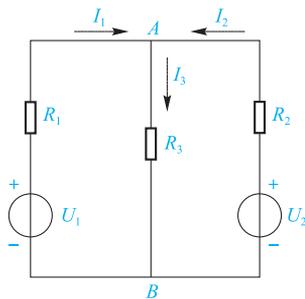


图 1-76 题 20 图

21. 如图 1-77 所示，试应用叠加原理求电路中的电流 I_1 ， I_2 ，以及 $36\ \Omega$ 电阻消耗的电功率 P 。

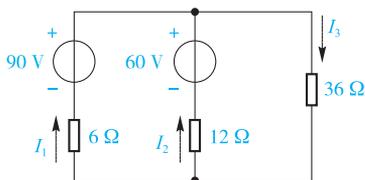


图 1-77 题 21 图



22. 如图 1-78 所示, 试用叠加定理求电路中流过 $4\ \Omega$ 电阻的电流 I 。

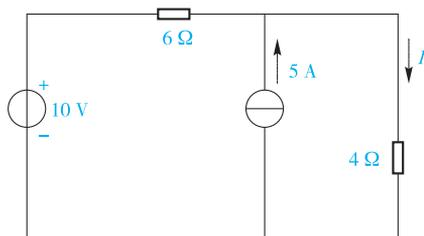


图 1-78 题 22 图

23. 如图 1-79 所示, 试用戴维南定理求电路中流经 $9\ \Omega$ 电阻的电流 I 。

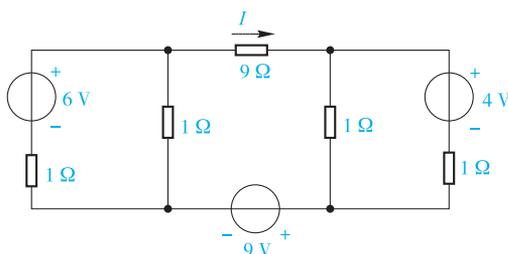


图 1-79 题 23 图

24. 试分别画出如图 1-80 所示电路的戴维南定理等效电路。

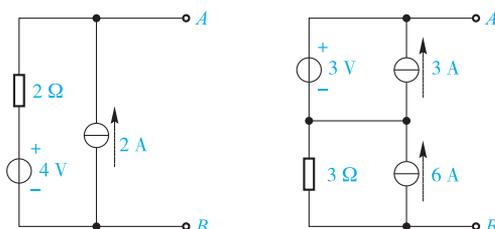


图 1-80 题 24 图

25. 如图 1-81 所示, 电路中 $R_1=1\ \Omega$, 电源电动势 $E=20\ \text{V}$, 内阻 $r=4\ \Omega$, R_2 为可变电阻。可变电阻的阻值为多少时才可能获得最大功率, R_2 消耗的最大功率为多少? 此时电源的输出功率是多少?

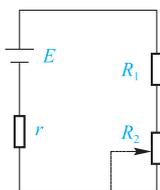


图 1-81 题 25 图

26. 如图 1-81 所示, 若电路中电源电动势 $E=20\ \text{V}$, 内阻 $r=4\ \Omega$, $R_1=1\ \Omega$, R_2 为变阻器。请问 R_2 的阻值为多少时, 电源提供的功率最大? 最大功率是多少?

