

Foundations of Electronics
Circuits and Devices
(Fourth Edition)

电子学基础：
电路和元器件
(第4版)

(美) Russell L. Meade 著
Robert Diffenderfer
蓝江桥 宋 梅 译
宋俊德 李跃华 审校



第1章 电子学基本概念

Page 3

教学大纲

- 1.1 电子学常识
- 1.2 物质的定义、物理状态和化学状态
- 1.3 物质的构成
- 1.4 原子的结构
- 1.5 电子理论基本概念
- 1.6 离子
- 1.7 改变电平衡的能量
- 1.8 导体、半导体和绝缘体
- 1.9 电子系统的实例
- 1.10 静电的基本原理
- 1.11 电动势
- 1.12 运动的电荷
- 1.13 三个重要电气参数
- 1.14 基本电路

教学目标

通过学习本章您应该能够：

- (1) 描述电子技术职员、工艺人员和工程师所从事的工作类型。
- (2) 了解物质的概念，描述物质的物理和化学状态。
- (3) 描述元素和化合物之间的区别。
- (4) 描述原子、分子和离子的特性和结构。
- (5) 详细说明电子、质子和中子的电特性。
- (6) 解释价电子和自由电子的概念。
- (7) 列举导致电失衡的途径。
- (8) 描述半导体、导体和绝缘体的特性。
- (9) 叙述电荷定律。
- (10) 详细说明极性和参考点的概念。
- (11) 详细说明电荷及其测量单位库仑的概念。
- (12) 解释电动势 emf 的概念并说明它的测量单位。
- (13) 解释电流的概念并说明它的测量单位。
- (14) 当电荷运动的数量和速率已知时计算电流。
- (15) 解释电阻的概念并说明它的测量单位。

(16) 列出电子线路中的典型元件。

(17) 描述开路和闭路的区别。

预习指导

本章介绍电子学的一些基本概念和原理，这些概念和原理将成为您学习与思考的工具。这些表面上分散的基本概念和术语在您将来的学习过程中将会以一种有意义的方式结合起来。请认真思考这些术语，它们将在您的学习中起到重要作用。

关键词

安培(ampere)	原子(atom)	电路(circuit)
化合物(compound)	导体(conductor)	库仑(coulomb)
电流(current)	电荷(electrical charge)	电动势(electromotive force)
电子(electron)	元素(element)	能量(energy)
力(force)	自由电子(free electrons)	绝缘体(insulator)
离子(Ion)	负载(load)	物质(matter)
混合物(mixture)	分子(molecule)	中子(neutron)
欧姆(ohm)	极性(polarity)	电势(potential)
质子(proton)	电阻(resistance)	半导体(semiconductor)
电源(source)	价电子(valence electrons)	伏特(volt)

1.1 电子学常识

您即将学习的是一门既有趣又内涵丰富的学科，电子学主要涉及的工作分为三大类：

(1) 技术工人负责安装、调试、查错、修理和维护各种电子设备和系统，如图 1-1 所示。



图 1-1 电子技术工人正在用仪器进行测试

(2) 技术专家辅助进行电子设备和系统的设计、开发以及测试，如图 1-2 所示。



图 1-2 电子技术专家正在进行和仪器设计有关的计算机计算

(3) 工程师设计电子设备和系统。工程师里也包括客户工程师。他们在工业里起到技术服务的角色，并就如何为一些特别的应用选择合适的设备或系统向客户提供技术支持，如图 1-3 所示。



图 1-3 电子工程师和工业用户一起来确定用户的需求

您可以在电子学的众多领域内选择从事一些专业研究的领域，下面是一些专业领域的例子：

- 计算机(例如 CPU、显示器和其他外设)
- 通信(例如无线电、电视和电信)
- 消费电子(例如音响、视频和报警系统)
- 医疗设备(例如 X 光、磁成像和监视设备)
- 航空电子(例如计算、导航和卫星通信)
- 航海电子(例如雷达、声呐、导航和无线电)
- 汽车电子(例如系统控制和用户设备)
- 工业电子(例如过程控制、系统监视、质量控制)

因此，您在电子学方面有着较大的选择余地。

1.2 物质的定义、物理状态和化学状态

1.2.1 物质的定义

我们能看见、触摸或闻到的东西都代表某种形式的物质。如图 1-4 所示，实验桌、测试仪

器和房间里的空气都代表着各种形式的物质。物质已经有各种定义，但是这里将它定义为拥有重量和占据空间的任何东西。我们也可以认为，所有东西都由物质构成，物质可由我们的感觉所感知。



图 1-4 各种物质

原子是构成所有物质的基本组成单元。在本章后面的章节里，我们将详尽地讨论原子，因为原子对于理解电子学具有非常重要的意义。

1.2.2 物质的物理状态

物质存在于三种物理状态：固态(例如椅子)、液态(例如水)和气态(例如氧气)。

当物质处于液态或气态时，它的形状由其承载容器决定。

1.2.3 物质的化学状态

物质的化学形态有元素(element)、化合物(compound)和混合物(mixture)。元素是在化学上不可再分的物质，如图 1-5 所示。事实上，一种元素只包含一种类型的原子。化学元素的实例有金、铁、铜、硅、氧和氢。

化合物由两种或者更多的元素化合而成。换句话说，化合物是由组成为分子的两种或多种原子构成的。一种化合物具有确定的结构和特性(例如同样的重量和原子结构)。图 1-6 示意了两种化合物的例子，其中，水由氢和氧元素构成，糖由碳(黑色、无味固体)、氢(气态)和氧(气态)元素构成。



图 1-5 一些常见的金属元素



图 1-6 一些常用的化合物

混合物也是由一些物质构成，但是其中每一个元素都保持其独立存在时的属性。当元素构成混合物的时候，其化学性质并没有发生变化，这与形成化合物有所不同。如图 1-7 所示，金粉和沙子混合后不会产生一种新的、化学上不同的实体或化合物。这些物质仅仅是混合在一起。



图 1-7 混合物也是由一些物质构成，但是它跟化合物不同，其中每一个元素都保持其独立存在时的属性

1.3 物质的构成

所有物质都是由原子构成的。原子化合构成分子，新合成的化合物跟构成该化合物的每种原元素部不同，如图 1-8 所示。另外，一种特殊物质的分子也与其他类型物质的分子截然不同。

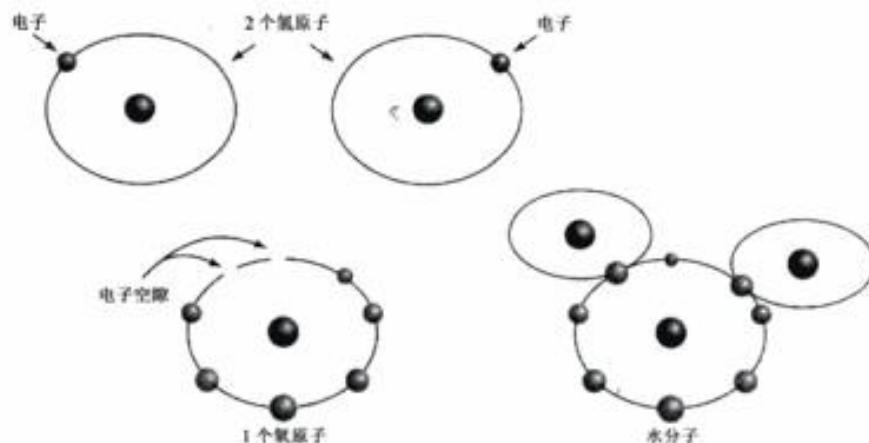


图 1-8 水分子由氢和氧原子构成

总之，所有物质都由原子和分子构成。组成化合物并且仍然保持其物理属性的最小单元是分子。组成元素并且仍然保持其物理属性的最小单元是原子，如图 1-9 所示。

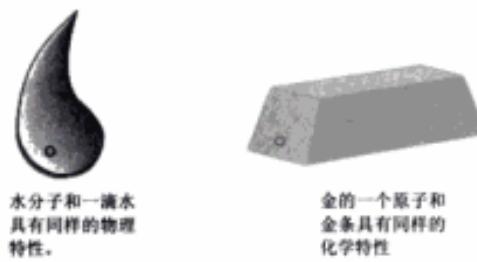


图 1-9 具有和化合物相同特性的最小组成单元是分子。具有和元素相同特性的最小组成单元是原子

1.4 原子的结构

1.4.1 粒子

原子中的粒子有电子(eletrow)、质子(proton)和中子(neutron)。尽管科学已经证实还存在其他粒子，比如介子、正电子和中微子，但是这些粒子对于理解电子学并非必需的。

1.4.2 原子模型

丹麦科学家玻尔(Niels Bohr)提出了一个能解释电子理论的原子结构模型，在他的理论里原子由一个居于原子中央的原子核和围绕原子核旋转的电子构成。原子核由两种粒子组成：带正电荷的质子和不带电荷的中子，环绕的电子带负电荷，如图 1-10 所示。玻尔的这个电子模型跟太阳系的情况类似：电子围绕着原子核旋转恰如行星围绕着太阳运动。

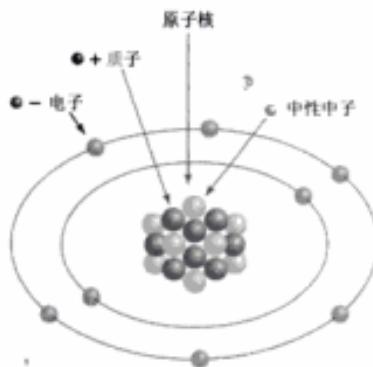


图 1-10 玻尔的原子模型。中央的原子核包含质子和中子，电子围绕原子核

由于环绕的电子所携带的全部负电荷同原子核中的质子所带的全部正电荷相等，因此原子的净电荷为零。同时在一个电平衡的原子里，质子和电子的数目是相等的，如图 1-11 所示。

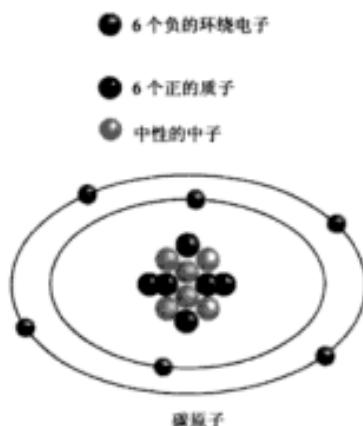


图 1-11 原子通常是电平衡的

图 1-12 列出了这 3 种原子粒子的有趣特性。

电 子	质 子	中 子
负电荷	正电荷	不带电
非常小的质量(9×10^{-28} g)	电子质量的 1836 倍	与质子重量接近
在核外的轨道上运行	位于核的中心	位于核的中心
运动速率(每秒几万亿圈)	与电子数目相同	

图 1-12 一些组成的原子粒子的重要素

1. 电子

- 带有负电荷。
- 质量非常小(9×10^{-28} g)。
- 围绕原子核运动。
- 围绕原子核运动的速度快的惊人(每秒几万亿次)。
- 决定原子的化学性质。

2. 质子

- 带有正电荷。
- 比电子重大约 1800 倍。
- 居于原子的中央。
- 与电子数目相等。

3. 中子

- 不带电荷。
- 与质子质量或重量相当。

- 居于原子的核心。
- 对于特定一元素形成不同的同位素，其种数可能不一样。例如，氢有 3 种同位素：氕、氘、氚。如图 1-13 所示。



图 1-13 这些同位素究竟有什么区别？同位素某一种化学元素的另一种形式，它们具有同样的原子序数并且具有相近的化学性质，但是原子核里的中子数目不同，它们具有不同的原子质量和不同的物理属性

1.4.3 原子序数和质量

尽管确切理解原子序数和质量并非必要，但这里还是有必要提到它们。

一种元素的原子序数由该元素每一个原子包含的质子数决定。例如铜的原子序数是 29，碳的原子序数为 6，如图 1-14 所示。

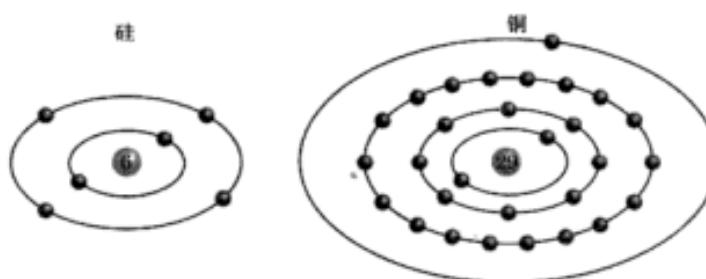


图 1-14 碳和铜的原子

课间测试 1

现在您将接触贯穿本书的训练技巧：课间测试。在这里这些特殊的测验将会确保您真正领悟了学习要点，而不是等全部学完本章再来检查是否错过某些要点。请完成下列填空，如果遇到困难，只需返回有关知识点，强化您的记忆。这些测试的答案可以在附录 B 找到。

1. 任何拥有_____并占据_____的东西都可以称作物质。
2. 物质的三种物理状态是_____、_____和_____。
3. 物质的三种化学状态是_____、_____和_____。
4. 组成化合物并且仍然保持其物理属性的最小单元是_____。
5. 组成元素并且仍然保持其物理属性的最小单元是_____。
6. 组成原子的三种粒子是_____、_____和_____。
7. 原子中具有负电荷的粒子是_____。

8. 原子中具有正电荷的粒子是_____。
9. 原子中不带电荷的粒子是_____。
10. 在原子核里可以发现____和____。
11. 围绕原子核运动的粒子是_____。

1.4.4 原子层的概念

正如前面图示所示，围绕原子核运动的电子并非沿着相同轨迹，也并非距离原子核相同的距离。核外电子按照一种分层的结构排列，如图 1-15 所示。

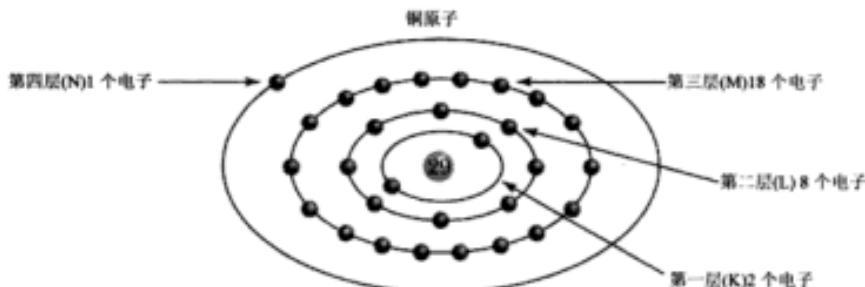


图 1-15 各电子在距离原子核不同的距离处运动

在一个处于稳定状态的原子中，每一层(环)可以容纳的最大电子数是一定的，由公式 $2n^2$ 决定，其中 n 代表第 n 层。例如，离核最近的最内层最多可以容纳 2 个电子，第二层为 8 个，第三层 18 个，第四层最多可以容纳 32 个电子。但是对于任意原子，无论最外层为第几层，最外层电子数不能超过 8 个。

1.5 电子理论基本概念

1.5.1 目的

电子理论有助于我们在研究电子现象的时候能够生动地展示原子和电子的运动，前面有关原子结构的叙述是电子理论的一部分，下面提到的价电子和自由电子解释了电子理论的一些实际应用。

1.5.2 价电子

价电子(valence electron)是指原子最外层的那些电子。原子的价电子数目决定了原子在物理上和化学上是否稳定，如图 1-16 所示。

对于任何原子，当最外层电子数为 8 的时候达到全满。如果一个原子的最外层全部排满电子的话，那么该种物质是稳定的，并且很难和其他原子化合形成化合物。同时，这些电子也不容易脱离该原子。这一类稳定物质的例子有惰性气体，比如氖和氩。

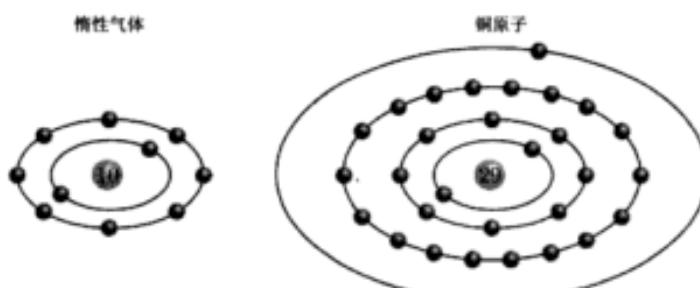


图 1-16 价电子的数目影响着原子的物理和化学稳定性

如果某一物质原子的最外层少于 8 个电子，那么该物质无论在化学上还是在物理上都处于活跃状态。通常此类物质将与其他物质原子进行化学反应生成新的化合物来获得稳定。这些外层电子很容易脱离原来的原子核，成为所谓的自由电子，例如铜、金和银。

另外还存在一些最外层有 4 个电子的物质，它们介于稳定和不稳定之间。锗和硅是两个典型例子。这些材料广泛应用于今天的固态器件即半导体器件中，比如晶体管和集成电路。

总之，电子理论的基本概念都是建立在原子模型的基础上，这些概念有助于我们理解本书将讲述的各种电子现象。

1.6 离子

当一个电子在化学、光、热或者其他形式的能量的作用下脱离了它原来属于的原子后，剩下的原子不再呈现电中性。我们把离子定义为任何由于得到或失去电子后，不处于电平衡或电中性状态的原子。如图 1-17 所示，正离子是一个电子少于质子的原子，负离子中的电子数大于质子数。

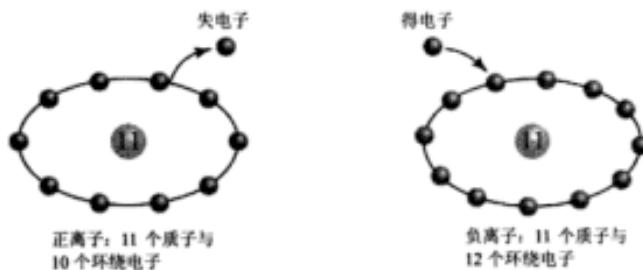


图 1-17 离子是得到或失去电子的原子

当一个电子脱离中性原子时形成一个正离子，反之，当中性原子得到一个电子时形成一个负离子，这样的过程叫做电离。在以后的学习中您将看到电离过程在不同电子器件中的应用。

1.7 改变电平衡的能量

为什么我们总是想改变原子的电平衡，或者说希望控制电子的运动？随着您学习的深入您将发现，对电子运动或电流的控制是整个电子学的基础。

图 1-18 演示了一些常见的促使电子运动以及电荷得失的能源，这些能源有：

- 摩擦力(静电)；
- 化学能(电池)；
- 机械能(发电机或交流发电机)；
- 磁能；
- 光能；
- 热能。

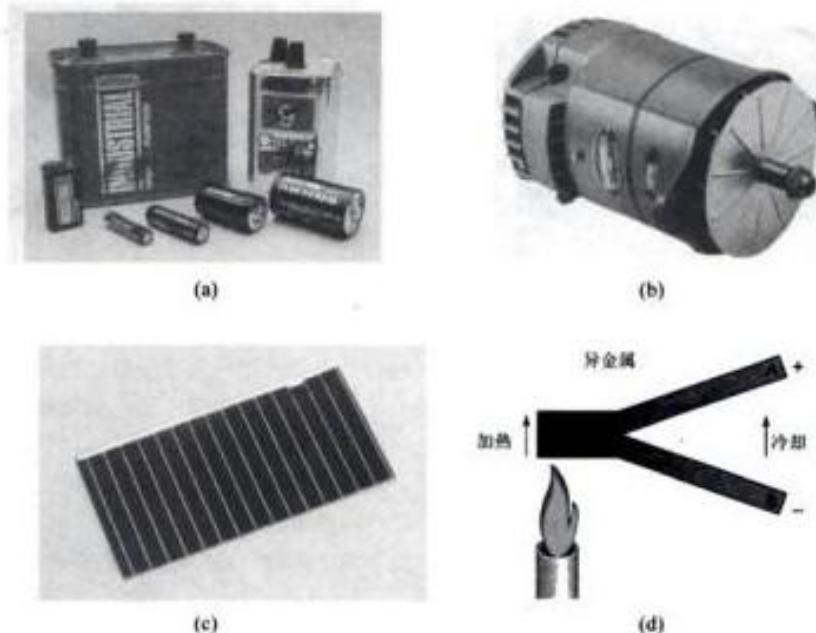


图 1-18 一些常见能源 (a)电池：利用化学能产生电能 (b)发电机：把机械能转化为电能
(c)太阳能电池：把光能转化成电能 (d)热电偶：利用热能产生电能

通过适当利用以上一种或者几种能源，将产生电源。这些电源产生的电动势被用来驱动与之相连的外部电路里的电子进入电源。所谓电路是指出于某种目的用来传送、处理和控制电流的某种闭合路径。本章随后介绍的电子运动和电动势的概念将说明基本概念是学习电子学的基础。

1.8 导体、半导体和绝缘体

导体(Conductor)，例如金、银和铜，具有大量的自由电子。由于最外层的电子和原子核的联系不紧密，因此这些物质导电极为容易。换句话说，它们最外层电子数目为1, 2或3，远远小于8个电子的稳定状态，如图1-19(a)所示。

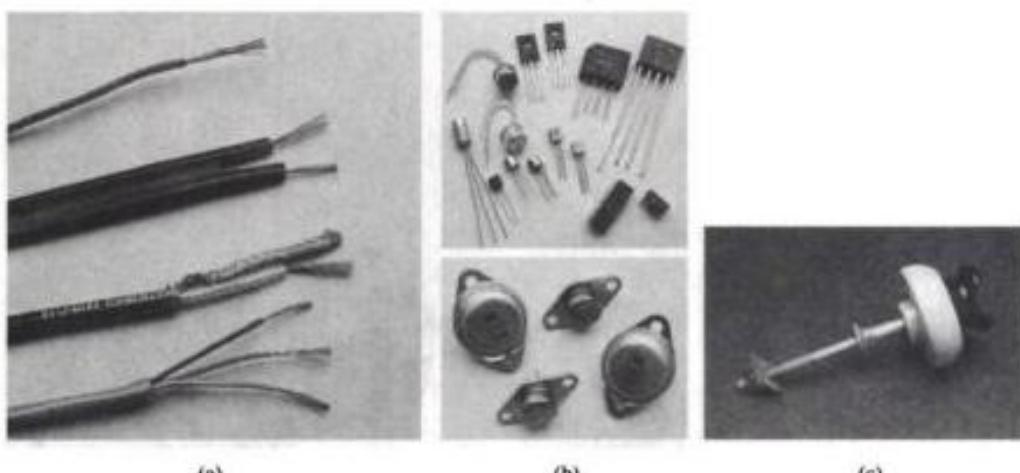


图 1-19 (a) 导体(b) 半导体(c) 绝缘体

半导体(Semiconductor)如图1-19(b)所示，其特性处于最外层具有较少电子的导体和最外层有8个电子的稳定的绝缘体之间。半导体材料最外层有4个电子，图中是一些硅和锗材料构成的半导体器件。

绝缘体如(Insulator Material)图1-19(c)所示，一般很难导电，这是因为其最外层具有5个以上的电子和原子核紧密联系，很少有自由电子。典型的绝缘体有玻璃和陶瓷。

电子和电气线路就是由各种由导体、绝缘体和半导体构成的元件和连接部件组成。

1.9 电子系统的实例

一个典型的电子系统包括一个能够产生电能的电源，一个能够把电能从一点传送到另一点的通路以及一个电负载，如图1-20所示。



图 1-20 基本电子系统装置

电源通过传输装置向负载提供能量，负载的作用是把电能转化成另一种形式的电能，或者热能、光能、动能等形式的能量。

如图 1-21 所示的一个电力照明系统，电源通过导线将电能传输给电灯泡，即负载，负载然后把电能转换成有用的光能。

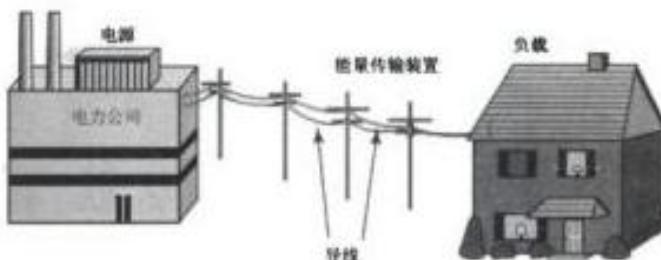


图 1-21 常用电子系统组成

本章剩下的内容将介绍电子学基本的定律和原理，这些知识有助于您理解像照明电路这样电子系统的内在机制，您应该探寻如下问题的答案：电源是如何驱动电流通过导体传输给负载的？电流是如何从一点流到另一点的？电源到负载的电流大小由什么因素决定？

1.10 静电的基本原理

在研究电路中的电子运动之前，我们有必要学习一些电荷和静电的基本原理。

1.10.1 静电的概念

每个人都有过被电击的经历，例如走过一条厚重的地毯之后去触摸门把手或者滑过汽车座椅之后再去触摸门把手都有可能被电击。电是如何产生的？通常情况下这样的电叫做静电，有时候这样的术语可能会引起误解，这是由于“静”意味着不动，然而事实上电子在原子核周围不停地运动。静电一般与非导体或绝缘体有关系。

1.10.2 电荷的基本定律

在很多科学教科书里都提到下面的实验，即用一块皮毛摩擦一个橡胶棒，或者用一块丝绸摩擦一根玻璃棒，如图 1-22 所示。经过这样的实验，纸或者其他轻物体可以被带电体轻易吸引起来。所谓带电体是指该物体携带的电子比其正常情况下要多或者少。在橡胶棒的实验里，橡胶棒从皮毛那里得到电子，皮毛失去电子，因此橡胶棒带负电，因为它具有多余电子；相反，皮毛带正电，因为它失去了电子但质子数目不变。

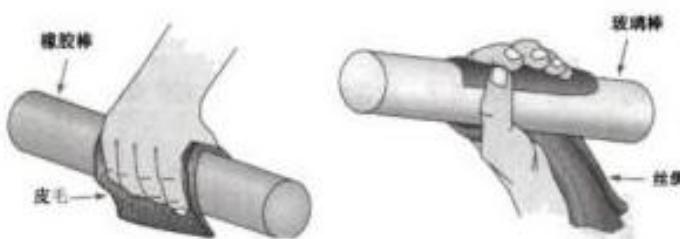


图 1-22 静电与非导电材料的关系

而在玻璃棒和丝绸的实验里，玻璃棒失去电子，带上正电荷。此外进一步实验表明带电的橡胶棒(负电)和带电的玻璃棒(正电)之间存在某种吸引力。这些实验导出了电子学中最基本的定律：异性电荷彼此吸引，同性电荷互相排斥，如图 1-23 所示。

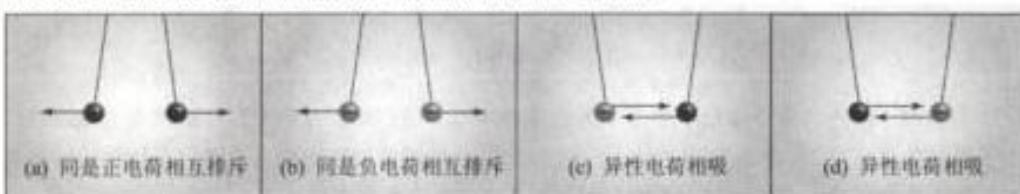


图 1-23 电子学基本定律：同性电荷排斥，异性电荷吸引

1.10.3 极性和参考点

您也许已经注意到，为了区分电荷所带电性，我们常用减号表示负电荷而用加号表示正电荷，在电子学里用加号和减号表示电荷的极性。极性是指电路里某一点相对于另一点的电荷数目多少。如图 1-24 所示，理解“相对于”并不困难。例如我们都听说过“约翰比比尔高”或者“比尔比约翰低”，在前一个表达里，比尔是参考点，在后一个表达里，约翰成了参考点。



图 1-24 手电筒的电池里，A 点相对于 B 点为正，B 相对于 A 点为负

极性和参考点另一个常见的例子是地球的北极和南极，这些术语描述其地理位置。

回顾一些重要的事实：

- (1) 电子是带负电的粒子，质子是带正电的粒子。
- (2) 任何具有多余电子的物体都带负电荷。
- (3) 任何缺少电子的物体都带正电荷。
- (4) 同性电荷相斥，异性电荷相吸。

参考图 1-25(a)、(b) 和(c)回答下列问题：

- (1) 在图 1-25(a)中，哪一个球缺少电子？
- (2) 在图 1-25(b)中，两个球将互相吸引还是排斥？
- (3) 在图 1-25(c)中，如果球 B 的质子数等于电子数，则球 A 相对于 B 的极性是什么？

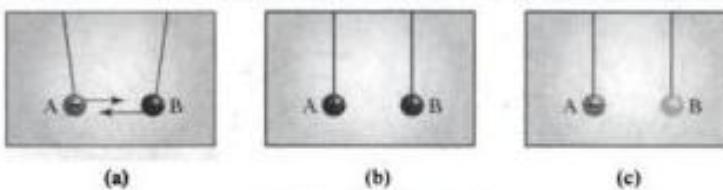


图 1-25 一些电荷的分布

答案是 1: B, 2: 排斥, 3: 负。在第 1 题里，球 B 的正极性说明它缺少电子；在第 2 题里，两个球都带相同极性的电荷，因此它们互相排斥；在第 3 题里，因为球 B 带有相等数目的质子和中子，因此它呈电中性，然而球 A 相对于 B 带负电，在这种情况下，球 A 相对于任何带均衡电荷或者带较少负电荷的物体都呈负极性。

1.10.4 电荷的库仑公式

为了确定带电体之间的吸引和排斥力，法国物理学家库仑(Charles Coulomb)研究发现两个带电体之间的引力和斥力由带电体携带电荷的数量以及两者之间的距离决定，即：

$$\text{作用力} = \frac{\text{带电体1的电荷} \times \text{带电体2的电荷}}{\text{两者之间的距离}} \quad (1-1)$$

$$F = k \frac{Q_1 \times Q_2}{d^2}$$

其中： F 是作用力(牛顿)， k 为常量 9×10^9 (空气或真空)， Q 为电荷(库仑)， d 为带电体间距(米)。

库仑定律表明，两个带电体之间的引力和斥力跟带电体所带电荷的乘积成正比，与其间距的平方成反比。

1.10.5 电荷单位

为了纪念库仑，电荷的单位被命名为“库仑”。许多描述数量和大小的电子学参数都是以进行相关实验的科学家名字命名的。

电子测量单位是我们每天都要用到的有力工具，例如那些要确定液体体积的人，他们每天要用到加仑、夸脱、品脱等计量单位。科学家为每一种电子学参数制定了计量单位，通常每一种参数都有相应的参考点。

例如在计量电荷时采用的单位是库仑，1 库仑代表了 6.25×10^{18} 个电子，或者说 6.25 艾个电子，这就是公式(1-1)中电荷 Q 的单位。

1.10.6 力场

也许您已经熟悉一些“场”，比如重力场和磁场。力场用一些假想虚线条来表示，它形象地描述了场对其中物体受力的影响。图 1-26 表示了异性电荷和同性电荷之间的电场，该图以线条反映了这些电场的性质。图 1-26 并没有表明电荷的强度、力场的强度以及电荷的距离，但是这些线条有助于我们理解电荷之间实际存在的力。

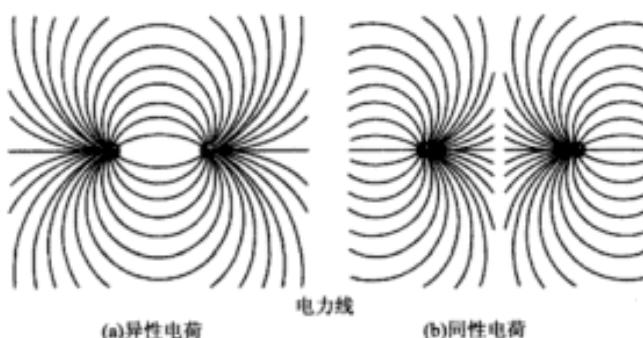


图 1-26 电力线表示的电场

1.11 电势

1.11.1 电势的概念

上面图中对电荷之间实际存在的力的描述对我们的学习非常有帮助，两点之间电荷的差异形成一定电势，这个电势使得在给定合适路径时，某一点的多余电子能够向电子缺乏的方向运动(质子位于原子核中，不能自由移动)某两点之间电荷差异通常用“电势差”(potential difference)来描述。这种能够驱动电子运动的力叫做电动势(electromotive force, emf)。由于这个术语经常用到，请务必牢记。

1.11.2 电势或者电动势的单位

科学家已经为度量电荷定义了单位库仑，而且为度量电势差定义了单位，叫做伏特，用来纪念发明了电池和电容器的科学家伏特(Alessandro Volta)。通常我们把两点之间以伏特度量的电势差称作“电压”。后面将对电压进行深入分析。目前可以认为，电荷和/或两点之间具有相对的正和负(即极性)，这取决于其富余或缺失电子的多和少，由此导致两点之间具有电势差，该电势差产生的电动势驱动电子在两点之间运动。

1.11.3 产生电势的方法

电势差，或者电压完成了将电子从一处移动到另一处的工作，那么电压是如何建立的呢？

在本章的开头我们曾讨论过一些不同形式的能量，这些能量可以产生“电失衡”，即这里提到的电动势或电压。常见的能量有静电、化学能、机械能、磁能、光能和热能。回顾图 1-18，复习一下产生和保持两点之间电势(电压)差的各种方法。

1.12 运动的电荷

如果将图 1-27 的两个球碰撞一下将会发生什么现象？如果您认为球 A 上的多余电子转移到球 B 上，并且改变了球 B 上电子缺乏的情况，那么您的回答就是正确的。事实上，电子将一直从 A 移动到 B 直到二者具有相等电荷，即二者相对于彼此呈电中性。

如果两个球不是直接接触，而是通过一根铜导线连接，如图 1-28 所示，将发生什么现象？如果您认为一些电子通过铜导线移动最终球 A 和 B 达到电平衡，那么您的想法就是对的。

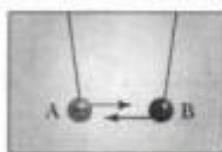


图 1-27 两个异性电荷

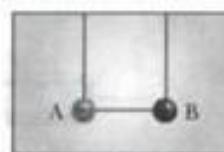


图 1-28 用铜导线连接球 A 和球 B

1.12.1 电流

通过铜导线流入球 B 的电子数目是否等于球 A 失去的电子数？也许并非如此，这是由于铜导线内部有很多自由电子。如果在其两端施加一定的电势差，则将驱使电子从负端向正端运动。这种电子的运动称为电流。

1.12.2 电流的模拟

图 1-29 演示了电子运动，即电流的基本概念，说明了电子如何从负端通过导线向正端运动。橡胶球代表电子，箱子 A 里的橡胶球数目多于箱子 B 里的数目，箱子之间的人代表导线。他们互相传递球，类似于铜导线中有电流产生时电子在原子之间传递的过程。因此橡胶球从箱子 A 传递到箱子 B 的过程模拟了电子从箱子 A 运动到 B 的过程。在导体里，当一个自由电子离开原来的原子进入到临近的原子时，将会有另外一个电子取代它原来的位置。事实上当导体内部产生电流时，这样的过程将重复数百万次。在图 1-28 里，当一个电子由于受到球 B 正电的吸引而离开铜导线的一端时，将有来自球 A 的一个电子替代它的位置。我们也可以用图 1-30 来表示电流的概念。

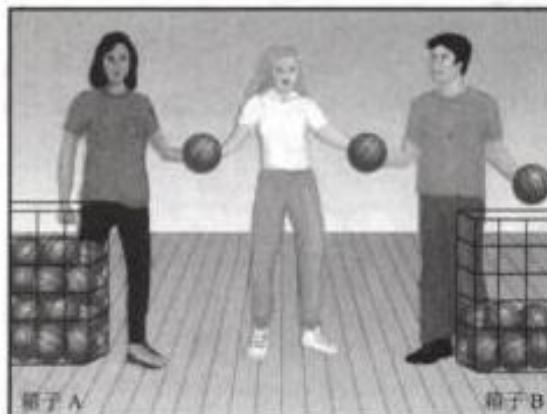


图 1-29 电子运动的模拟



图 1-30 另一种电子运动的模拟

显然这些模拟比起电流的实际物理机制过于简单，但是它可以帮助您理解电流及其特殊的电学现象。

1.12.3 电流的单位

回顾有关电荷和电势差单位的建立，电流的单位同样以类似的方式，以法国数学家和物理学家安培(Andre Ampere)的名字命名。

1 安培的电流定义为单位时间 1 秒内流过 1 库仑的电荷。

1.12.4 描述电流与电荷运动、时间之间关系的公式

下面的公式描述了电流(单位为安培)与电荷和时间(单位为秒)的关系：

$$I = \frac{Q}{T} \quad (1-2)$$

其中， I 表示电流(安培)， Q 表示电荷(库仑)， T 表示时间(秒)。

这个公式用来在给定电荷和时间的情况下计算电流，例如，如果在 2 秒中内有 10C 的电荷在电路中某两点之间流过，则电流为 5A。此外这个公式稍为变形， $Q = I \times T$ ，就可以用来在电流和时间已知时计算电荷 Q 。从公式(1-2)可以看出，电流与运动电荷成正比，与运动时间成反比。也许现在您还不能理解公式如何变形的，但是我们在本书后面将介绍一些变形的技巧。观

察这里的公式和例子，利用您拥有的正比和反比关系的知识来理解这个公式。电流与运动电荷的数量成正比还是反比？电流与电荷运动所需要的时间成正比还是反比？您的回答应该是电流与运动电荷数量成正比，电流的安培数与移动电荷所需要的时间成反比。回顾一下，如果两个量之间成正比关系，则意味着如果一个量增加，那么另一个量也增加；反比关系意味着如果其中一个量增加，那么另一个量减小，反之亦然。

课间测试 2

1. 一个电子系统(电路)包括电源、传输电能的通道和_____。
2. 静电通常与_____类型的材料有关。
3. 电子学基本定律是____性电荷相互吸引，____性电荷相互排斥。
4. 加号和减号通常用来描述电的_____。
5. 如果两个量成正比，则其中一个增加，另一个_____。
6. 如果两个量成反比，则其中一个增加，另一个_____。
7. 电荷的单位是_____。
8. 电流的单位是_____。
9. 1A 等于 1 秒钟流过 1____的电荷。
10. 如果两点之间具有不同的电荷，则它们之间具有____差。
11. 伏特是____势或____差的单位。

1.13 3 个重要的电气参数

本章我们已经讨论了电荷的数量，极性(正或负)，两点之间的电荷差以及由此产生能驱动电子运动(电流)的电势差(电动势或电压)。

同时您已经了解到科学家已经为度量电荷数量、电势差以及电流等物理量定义了一些单位，例如，电荷的单位是库仑(6.25×10^{18} 个电子)，电动势(或者电压)的单位是伏特，电流的单位是安培。在以上提到的单位里，最常用的单位是电流和电动势的单位，即安培和伏特。

常用的第 3 个电气参数是电阻。如果您曾经用砂纸打磨过木头，您也许会了解物理上的阻力。

电子在导体里流动的时候会遇到分子的抗力，导体对电流的阻力取决于很多因素。首先电阻与该导体材料有关系，其次与导线的尺寸也有关系，包括导线的横截面积和长度，此外电阻还与温度有关系。电动势或电压驱动电流克服阻力流过导体。

电阻的单位是欧姆(ohm)，是为了纪念科学家欧姆(Georg Simon Ohm)。

电阻的单位有很多种定义方式。一种定义把 1Ω 定义为在温度为 0℃ 时， $1m^2$ 横截面积、长度为 $106.3cm$ 的水银柱。另一种方法把 1Ω 定义为能使 1A 的电流流过导体时产生 0.24 卡的热量时的阻力。最常用的定义是：

当所加电压为 1 伏特(V)时，电阻使得电流限制在 1 安培(A)，这时我们称电阻为 1 欧姆(Ω)。^①

^① 在我国法定计量单位制中，名称为电压、电流和电阻的单位名称分别为伏[特]、安[培]、欧[姆]，单位符号分别为 V、A、 Ω 。

1.14 基本电路

1.14.1 概述

本章前面曾简单介绍了电子电路。一个电子电路有3个基本部分：电源、电能传输方式和负载。在开始讨论基本电路的之前，我们首先讨论闭路和开路。

1.14.2 闭路

当两点之间存在电势差时，如果存在电流路径，那么电子将从多余电子的一端(负极)向缺乏电子的一端(正极)运动。提供电流路径的一种方法是用导线将这两点连接起来，因此提供了电子运动的路径并且建立起电流。闭路是指一个电路具有完整、未断开的路径，每当有外加电压施加在电路时都可以产生电流，如图1-31所示。

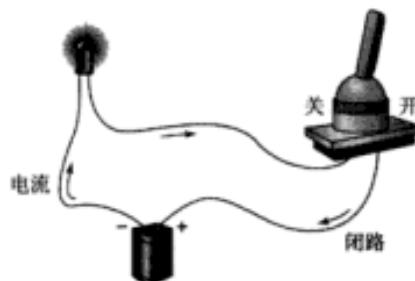


图 1-31 闭路为电流提供非断开的路径

1.14.3 开路

跟电路不断开用于产生电流的闭路不同，开路是指电流路径断开，如图1-32所示。其中断开处可能是有意断开，也可能是无意断开。一般为了人为地使电路处于开路，我们采用开关来实现，就像开灯关灯用的开关。开关是基本电子电路中的第4个基本元素，许多电路都包括这样的开关用于控制。在图1-31和图1-32中开关都是起控制作用。

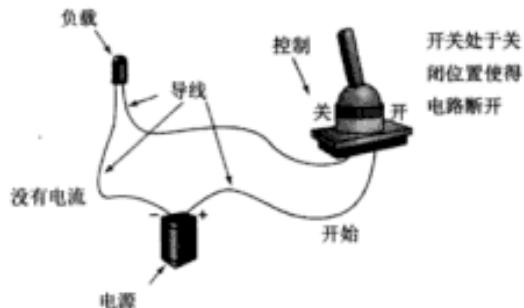


图 1-32 开路在电流路径某处有断开点

1.14.4 基本电子电路总结

基本电路包括(1)电源，(2)传导电流的媒介、(3)负载，有时也包括(4)一个控制器件，比如开关。

为了在电路里形成电流，电路里必须有一个电源和闭合路径或完整的电流通路，如果不慎将导线连接在电源两端而没有任何其他负载的话，此时导线相当于负载。但是由于导线的电阻非常低，根据电源电压和导线电阻的情况，这种低阻(有时也叫短路)情况将使得导线过热甚至熔化，以至断开电路。

当一个闭合电路中施加电压时，电流将从电压源的负极产生并通过导线和负载最终回到电源的正极，如图 1-33 所示。电路的电流大小取决于电路电压和整个电路的电阻大小，如图 1-34 所示。这些要点非常重要，请务必牢记。

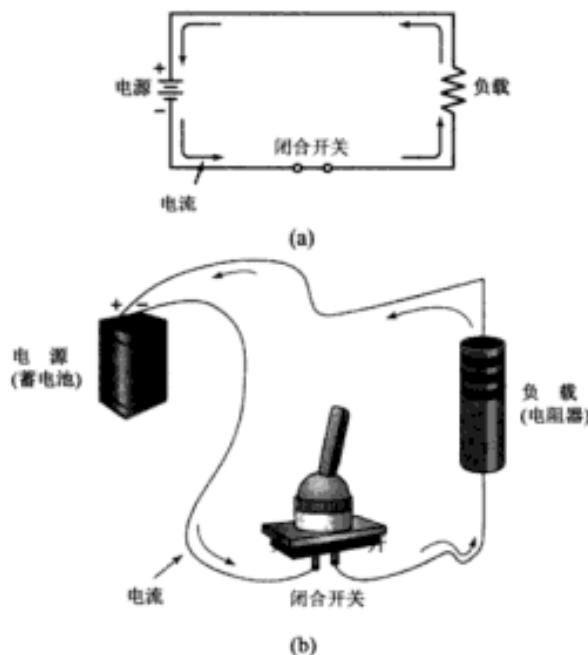


图 1-33 电路里电流方向：(a) 原理图；(b) 实物图

电路元件	实例	重要电气参数
1 电源	发电机	电动势(EMF)伏特(V)
2 传输媒介	导线	电阻 单位：欧姆(Ω)
3 负载	点灯泡	电流 单位：安培(A)
4 (控制器件)	(开关)	

图 1-34 基本电路的要点：电压增加，电流也随之增加；电阻增加，电流随之减小

1.15 知识点汇总

- 物质占据一定空间，具有重量，我们可以用人的五种感觉之一或更多去感知其存在。
- 物质的物理形态包括固态、液态和气态。
- 物质的化学形态包括元素、化合物和混合物。
- 元素只由一种原子构成。但是化合物由不同元素的原子按照特定方式化合而成，并构成新物质。
- 混合物中各组成元素的物理性质和化学性质都不发生变化。
- 构成化合物并且保持其基本特性的最小粒子是分子，元素由原子组成并且保持其固有特性。
- 原子是组成物质的基础，原子经过特定组合后形成的分子是组成化合物的基础。
- 在玻尔的原子模型中，位于原子核心的原子核由质子和中子构成，电子处于原子核周围，类似于行星围绕太阳运动。
- 电子理论有助于理解物质中电子的特性，并且涉及到质子、中子和电子。
- 原子中的质子带有正电荷，而环绕电子携带负电荷，原子核心的原子核呈电中性。
- 质子和中子的质量大约是电子质量的 1800 倍。
- 由于电子和质子数目相等，电荷彼此抵消，因而原子所带的净电荷为零。
- 元素的原子序数指其原子核中包含的质子数目。
- 元素的原子量是指其质量相对于 C-12 原子的比值。
- 电子围绕原子核运动时位于距原子核距离不同的电子层上。最内层最多携带 2 个电子；第 2 层最多可以携带 8 个电子；第 3 层最多携带 18 个电子；第 4 层是 32，最外层所携带的电子称为价电子，排满时为 8 个电子，这些价电子决定了该原子在化学上和物理上的稳定或者活跃。
- 如果最外层拥有 8 个电子，则该原子是稳定的。如果最外层少于 4 个电子，则该物质一般可以用作导体；如果最外层的价电子数目是 4，则该种物质是典型的半导体。
- 最外层只有 1 个电子的物质，例如铜，是良好的导体。这些电子一般叫做自由电子，非常容易在物质的原子之间移动。
- 得到或失去电子的原子称为离子。失去电子的离子是正离子，得到电子的离子是负离子。
- 离子或者物质内部电子的运动由各种外部和内部的能源引起。例如摩擦、化学能、热能和光能等都可以破坏原子的电平衡并驱动电子运动。
- 电荷的基本定律是同性电荷相斥，异性电荷相吸。
- 静电的产生通常与非导电材料有关，一般通过非导电材料相互摩擦产生。
- 极性表明两点或者两个物体之间相对的正和负，例如用减号或加号表明每一点是具有多余电子还是缺乏电子。正如磁极反应了磁体的南北差异，电极性用来指示电路里电流的方向。
- 库仑定律说明两个电荷之间的引力或斥力同其电荷乘积成正比，同其间距平方成反比。
- 电荷的单位是库仑，1 C 代表了 6.25×10^{19} 个电子。
- 电势是引起电子移动的动力，又称作电动势。
- 电势差的测量单位是伏特。
- 能够在两点之间建立并维持电势差的能源包括：化学能、热能、光能、磁能和机械能。

- 有组织的电子运动叫做电流。
- 当电路闭合时，电子运动形成的电流通过与电源连接的外部电路从电压源的负极流向正极。
- 电流的单位是安培，它表示每秒通过 1C 的电荷。
- 反应电流大小跟给定时间内流过电荷的关系的公式是： $I = Q/T$ ，这个公式也可以写成 $Q = I \times T$ 。
- 三个重要的电子测量参数是：
 - (a) 伏特。电势差的单位，即驱动 1A 的电流流经 1Ω 电阻所需要的电势差。
 - (b) 安培，电流的单位，即每秒钟流过 1C 电荷。
 - (c) 欧姆，电阻的单位，即所加电压为 1V 时，使电流限制在 1A 的电阻。
- 基本的电子电路包括电源，电子传输的媒介和使用电能的负载。此外电路里还可能包括开关这样的控制元件。
- 闭路为电流提供闭合路径，电流从电源一极经过电路然后流回电源另一极。
- 开路不能为电流提供闭合路径，由于人为或者偶然的因素，电流路径被断开。开路时的等效电阻为无穷大。
- 短路是不希望发生的低阻情况。如果电源两端不慎短路，将造成难以预料的后果，例如导线熔化或电源损坏。
- 在基本的电子电路中，电压源提供驱动电子运动的电动势，电路里的导线和元件提供一定电阻，同时起到限制电流的作用。各种控制电流达到所希望效果的技术构成了电子学的基础。

公式与计算器输入顺序示例

公式(1-1) $F = k \frac{Q_1 \times Q_2}{d^2}$ 求力的大小。

输入顺序：k 值， Q_1 值， $\boxed{\quad}$ ， Q_2 值， x ， $\boxed{\quad}$ ， $\boxed{\quad}$ ， 距离， x^2 ， $\boxed{\quad}$

公式(1-2) $I = \frac{Q}{T}$ 求电流。

电荷的库仑数， $\boxed{\quad}$ ，时间(秒)， $\boxed{\quad}$

注意

贯穿本书全部内容的“公式与计算器输入顺序示例”部分，采用的是常见的“代数记数法”计算器。也就是说，计算器在执行计算时采用的顺序与代数运算中采用的层次系统是一致的。例如，取倒数、平方和平方根比求幂和求根具有更高的优先级。求幂和求根比乘法和除法具有更高的优先级，乘法和除法比加法和减法具有更高的优先级，等号具有最低的优先级。通过使用这样的代数运算系统，较低优先级的运算将一直等到优先级更高的运算完成后才执行。

某些训练项目可能会需要学生们使用一种采用了通常所说的“逆波兰表示法”的计算器，这种计算器采用的表示系统起源于早期的简单算术表达系统，它被认为由波兰的逻辑学家和科

学家 Lukasiewicz 发明。系统经过发展后与波兰逻辑学家的表示法相反，因此新的表示系统被称为逆波兰表示法，缩写为 RPN。在某些情况下 RPN 类型的计算器仅仅通过少量的几个按键动作就可能完成给定的运算任务。正因为如此，一些导师更愿意他们的学生使用这种型的计算器。

无论在您的训练中使用哪种类型的计算器，我们鼓励您尽可能早地使用计算器。计算器对于工程技术人员来说是一个非常棒的工具。

复习题

1. 试给出物质的定义。
2. 列出三种物质的物理形态，并给出具体例子。
3. 列出三种物质的化学形态，并给出具体例子。
4. 试给出元素的定义，并给出两个例子。
5. 试给出化合物的定义，并给出两个例子。
6. 画出氢原子的示意图，并区分每个粒子。
7. 在您画出的氢原子的示意图里，标出每个粒子带的电荷。
8. a. 电子和质子哪个具有更大的质量。
b. 其中一个大约是另一个质量的多少倍？
9. 什么是自由电子？
10. a. 什么是离子？
b. 什么是正离子？
11. 列出 4 种可以破坏物质中原子的电平衡的能量。
12. 下面各种物质最外层有几个价电子？
 - a. 导体
 - b. 半导体
 - c. 绝缘体
13. 电荷的基本定律是什么？
14. 库仑电荷定律是什么？
15. 如果两电荷之间距离增大 3 倍，电荷强度不变，则它们之间的引力或斥力如何变化？
16. 在一个电路里什么叫做电势差？
17. 用来描述电路里两点之间电动势大小的单位是什么？
18. 在电路里，什么叫做电流？
19. a. 电路里电流的基本单位是什么？
b. 在某点 5 秒钟内流过 20C 的电荷，则该电的电流多大？
20. 用电压和电流的方法来定义电阻。另外，电阻的单位是什么？
21. 闭路和开路有什么区别？
22. 基本电路由什么组成？
23. 电路图里用什么符号表示负极？
24. 在一个闭合电路里，电流从相对而言更____(负/正)的点流向相对而言更____(负/正)的点。

25. 在图 1-35 的电路里, B 点代表电源的正极还是负极?

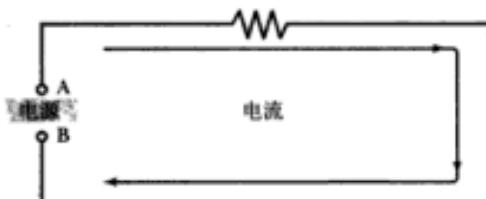


图 1-35 复习题 25 题图

分析题

1. 假设一个电平衡的原子有 30 个质子, 它的前 3 层电子都排满了, 最外层有 4 个电子, 请画出其结构示意图。
2. 在您画的示意图上标注所有的电荷。
3. 您画的示意图上是什么物质?
4. 这种材料是导体、半导体还是绝缘体?
5. 这种物质的原子序数是多少?
6. 说明在电路里什么是极性?
7. 画一张包含电压源、导线和负载的电路图, 并在其中标注电源的极性, 并用箭头表明电流方向(假设是闭合电路)。
8. 参考图 1-33(b), 列出 3 种使之成为开路的办法。
9. 用您自己的话说明什么是短路。
10. 如果不慎发生短路, 可能会有什么结果?

第2章 电气量纲和元件

教学大纲

- 2.1 基本的电气单位和符号
- 2.2 计量单位制
- 2.3 导体及其特性
- 2.4 电阻
- 2.5 电阻色环代码
- 2.6 用万用表测量电压、电流和电阻值
- 2.7 电子元件的图形符号

教学目标

- 1. 列出测量电荷、电势差(emf)、电流、电阻和电导的单位，并给出每一种参数的表示符号和缩写。
- 2. 采用计量单位术语和符号表示基本电气单位的其他倍乘和倍除单位。
- 3. 列出影响导体电阻的因素。
- 4. 记住导体的常见类型。
- 5. 利用导线对照表求给定长度导线的电阻。
- 6. 记住并画出相交且电气连接，以及相交但电气不连接的导体的示意图。
- 7. 定义“超导”。
- 8. 说出几种常见类型电阻器的特性。
- 9. 说明表面贴装“片状”电阻器的特点。
- 10. 使用电阻器色环。
- 11. 使用其他特殊的电阻器色环编码系统。
- 12. 说明如何连接仪表来测量电压、电流和电阻。
- 13. 记住并画出基本电子元件和器件的符号图。
- 14. 根据框图和原理图说明基本事实。
- 15. 列出实验室工作的安全注意事项。

预习指导

通过本章学习您将进一步深入了解有关电气量纲的知识，这对一个工程师来说非常关键，例如，常用计量单位的各种词头同 10 的幂的关系，导体和电阻的基本特性以及类型。此外，本章将介绍电阻色环的知识，这一直以来被认为是一个工程师需要掌握的最基本技能之一。

本章还介绍了如何用仪表测量电压、电流和电阻值。当然，要掌握这些测量知识和技能，必须通过实验室里实际的测量才能实现。

最后您将看到工程师们专用的表示电子电路的图形符号，有方框图和原理图。也许暂时这些知识显得较为零乱缺乏联系，但是在第3章您会很快发现它们将有机地结合起来。

关键词

安培(ampere) (a, mA, μ A)	框图 (block diagrams)	电导 (conductance) (G)
电流 (current) (I)	欧姆 (ohm) (Ω)($k\Omega$)($M\Omega$)	电阻 (resistance) (R)
电阻器 (resistor) (R)	电阻色环代码(resistor color code)	开关 (switch) (S)
原理图 (schematic diagram)	西门子 (siemens) (S; mS)	
伏特 volt (V, mV, μ V)	电压 (voltage) (V)	

2.1 基本的电气单位和符号

2.1.1 电荷

电荷用字母 Q (或 q)表示，其基本单位是库仑，1C 电量相当于 6.25×10^{18} 个电子，库仑的符号是 C。注意，这里是大写的 C 而不是小写的 c，一般对于类似库仑、伏、安培和欧姆这样的以人名命名的电气单位都应该采用大写字母，应养成正确书写符号的习惯。

2.1.2 电位差

电位差或者说电势差的单位是伏，符号为 V，是为了纪念伏特(Alessandro Volta)而命名的，1V 相当于在 1Ω 的电阻上产生 1A 电流需要的电动势。

2.1.3 电流

测量电流的单位是安培，其符号是 A，读者不要对 I 和 A 感到迷惑， I 用来表示电流这个物理量，A 是其单位符号。1A 相当于某点处每秒钟流过 1C 的电荷。

2.1.4 电阻

电阻也是用到两个字母的一个电气参数， R 用来代表电阻，希腊字母 Ω 表示电阻的单位。当一个电阻上电压为 1V 而电流为 1A 时，该电阻阻值为 1Ω 。图 2-1 即为一个可以测量 V、A 和 Ω 的万用表。

$$G = \frac{1}{R} (\text{S})$$



图 2-1 测量电压、电流和电阻的数字万用表

2.1.5 电导

另一个常用的电气参数是电导，它通常用来描述电流流过一个元件或者电路的相对容易的程度。电导的单位名称是西门子，符号是 S，以科学家西门子(Ernst von Siemens)的名字命名，即一般用 G 来表示电导。用 S 作单位的电导定义为用 Ω 为单位的电阻的倒数，即

图 2-2 中这些测量单位和符号非常重要，应该认真学习和记忆。

描述	电气量纲或参数	基本测量单位	单位的符号
电子的数量	电荷(Q)	库仑	C (6.25×10^{18} 个电子)
驱动电子运动的能力	电势差(emf)	伏特 (1V 相当于在 1Ω 的电阻上产生 1A 电流)	V
电子的运动	电流(I)	安培 (每秒在 1Ω 电阻上通过的电子库仑数)	A
阻碍电流运动的能力	电阻(R)	欧姆 (电压为 1V、电流为 1A 时，该电阻阻值为 1Ω)	Ω
电流流过一个元件或者电路的相对容易的程度	电导(G)	西门子 (电阻的倒数，或 $\frac{1}{R}$)	S

图 2-2 重要的电气单位符号

2.2 计量单位制

一些常用的计量单位

我们生活中经常用到各种计量单位，例如米(大约39英寸)、厘米(百分之一米)、毫米(千分之一米)、千米(1000米)。米的词头用来表明倍乘和倍除的关系。换句话说，米是基本单位，词头“厘”表示 $1/100$ ，“毫”表示 $1/1000$ ，“千”表示1000。

这种用词头来表示倍乘和倍除的方法在表示电气单位时同样适用，例如，在电气单位里经常需要表示几千安或者几百万分之一安，以及几千欧的电阻。图2-3里表示了一些常用的词头，尽管这并非全部的词头，但是这些是您会立刻用到的词头，仔细阅读图2-3，请牢牢记住这些计量术语和符号(缩写)。

计量术语	符 号	意 义	举 例
皮(pico)	p	百亿分之一	皮安(pA)
纳(nano)	n	十亿分之一	纳安(nA)
微(micro)	μ	百万分之一	微安(μA) 微安(μV)
毫(milli)	m	千分之一	毫安(mA) 毫安(mV)
千(kilo)	k	千倍	千欧(kΩ) 千伏(kV)
兆(mega)	M	百万倍	兆欧(MΩ)

图2-3 常用计量单位

这里我们还要介绍一些各种词头的数学表述，这些知识对您的实际工作非常有益。这些数学表述之所以对学习电子电路很有帮助是因为简单运算可以用来分析、检验和预测电路行为。

由于图2-3中的各种词头都是基于十进制数制系统的，因此用10的幂来表达非常方便，即：

$$\begin{aligned}10^0 &= 1 \\10^1 &= 10 \\10^2 &= 10 \times 10 = 100 \\10^3 &= 10 \times 10 \times 10 = 1000 \\10^{-1} &= 1/10 = 0.1 \\10^{-2} &= 1/100 = 0.01 \\10^{-3} &= 1/1000 = 0.001\end{aligned}$$

图2-4表示了电气单位和词头与10的幂的关系。

按照图2-4的表示方法，我们可以使用10的幂来简化书写一些非常大和非常小的数。例如， $3.5 \mu A$ 不要写成 $0.0000035A$ 的形式，可以简单地表示成 $3.5 \times 10^{-6}A$ ，它表示当用基本单位A作为单位时，在3.5左边有6位小数，即 $0.0000035A$ ，是1A的百万分之3.5。

又如 $5.5M\Omega$ 可以写成 $5.5 \times 10^6\Omega$ ，这相当于把小数点向右移动6位，即 5500000Ω 。

数值	10 的幂次形式	术语	电子单位的举例
0.00000000001	10^{-12}	皮(pico)	pA
0.000000001	10^{-9}	纳(nano)	nA
0.000001	10^{-6}	微(micro)	μA
0.001	10^{-3}	毫(milli)	mA
1,000	10^3	千(kilo)	kΩ
1,000000	10^6	兆(mega)	MΩ
1,000000000	10^9	吉(giga)	GΩ
1,000000000000	10^{12}	太(tera)	TΩ

图 2-4 10 的幂跟计量电学参数的关系

显然采用这种 10 的幂很适宜表示电气单位里非常大和非常小的数，在第 3 章将有更多的实例。

课间测试 1

1. 电荷用字母_____表示，测量电荷的单位是_____。
2. 电势差的单位是_____，电势差的符号是_____。
3. 电流的缩写是_____，测量电流的单位是_____，其符号是_____。
4. 电阻的缩写是_____，测量电阻的单位是_____，其符号是_____。
5. 电导反应电流流过电子元件或电路的_____，电导的缩写是_____，其测量单位是____，符号是_____。
6. 0.0000022 A 代表多少微安？把它表示成一个数乘以 10 的幂的形式是_____。
7. 表示“千分之一”的单位是什么？用 10 的幂如何表示？
8. 采用计量词头如何表述 10000Ω ？把它表示成一个数乘以 10 的幂的形式是_____。

2.3 导体及其特性

2.3.1 导体的作用

我们已经知道导体的作用是将电能从一点传输到另一点。更确切地说，导体在电子元件或电路之间提供了电流传输的路径。我们的家里、工作场所和学校里有无数的导体。比如传输电能到家里的输电线，把电视信号从天线传送到电视机的导线，还有传输电话信号的电话线等都是导体的例子。此外，汽车里沉重的蓄电池电缆代表了另一种类型的导体。

2.3.2 导体的类型

对于某一种工作来说，所需的导体类型由该工作的性质和所要传输的电能所决定。下面是一些划分导体类型的方法：

- 根据采用金属的类型(银、铜、金、铝)；
- 导线的物理尺寸；

- 金属导体的形式(实心的，绞合的或编织的);
- 封装在一起导体的数量;
- 绝缘特性(非绝缘的，绝缘的和采用的绝缘类型)。

图 2-5 表示了一些实际的导体。

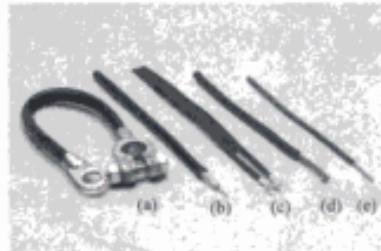


图 2-5 一些实际的导体：

(a)汽车蓄电池电缆; (b)同轴电缆; (c)电视双心平行电缆; (d)绞合线; (e)实心导线

2.3.3 实心导体的电阻

理想情况下导体的电阻值应该为零，这样就不会消耗所传输的电能。事实上所有的导体在常温下都有一定的电阻值。

2.3.4 超导

通常情况下，当工作温度升高时，大多数金属电阻的阻抗都会随之增加。但是在 1911 年的一项实验中发现，当某种导体的温度降低到绝对零度(-273°C)附近时，该种导体对电流的阻抗会突然消失，这意味着电阻接近 0Ω 。这种现象只发生在一些临界的、非常低的温度下。关于这种超低温的研究通常称为低温学。由于只在超低温情况下才出现超导，因此实际应用很困难。最近科学家正在研究一种陶瓷材料，它可以在相对于绝对零度略高的温度下呈现出非常低的电阻。如果在将来，科学家们能够发现可行的材料和方法使得在接近常温的情况下也能实现超导，那么其应用将不可限量。从各种电磁设备(电动机、发电机等)到计算机都将受到其巨大影响。

2.3.5 影响导体电阻的物理因素

一种导体的电阻取决于下列因素：

- (1) 构成导体的材料。该种材料的导电性能越好，在给定物理尺寸的条件下其电阻越小。
- (2) 导体的长度。导体越长，其电阻越大。
- (3) 导体的横截面积。横截面积越大，单位长度材料具有的电阻越小。
- (4) 导体的温度。对于金属材料，通常温度升高时电阻也会增大。

1. 电阻率

所谓电阻率是指在单位长度和横截面积情况下，某种材料在特定温度下的电阻。在国际单位制(SI)里，电阻率用以米为单位的长度和以平方米为单位的横截面积来表述。国际单位制里采用的基本长度单位是米(m)。此外，国际单位制还定义了其他 6 种基本的单位：质量用千克(kg)度量，时间用秒(s)来度量，电流用安培(A)度量，热力学温度的单位是开〔尔文〕(Kelvin)，物

质量用摩〔尔〕(mol)，发光强度用坎〔德拉〕(cd)度量作为基本单位。不同的物体具有其特殊的电阻率，例如在国际单位制里，银的电阻系数是 $16\text{m}\Omega \cdot \text{m}$ ，铜是 $17\text{m}\Omega \cdot \text{m}$ ，金是 $24\text{m}\Omega \cdot \text{m}$ ，铝是 $27\text{m}\Omega \cdot \text{m}$ 。用 $\text{m}\Omega \cdot \text{m}$ 只是为了便于阅读，否则写成 $0.00000016\Omega \cdot \text{m}$ 每米读起来很困难。电阻率的符号是希腊字母 ρ 。

在日常工作，我们经常用密耳(mil，千分之一英寸)、CM(圆密耳)和英尺来分别度量导体的直径、面积和长度。其中 1 圆密耳是指直径为 1 密耳的圆面积。以圆密耳计算的横截面积可以表示为：

$$A = d^2 \quad (2-1)$$

其中 A 是以圆密耳为单位的横截面积； d 是以密耳为单位的直径，如图 2-6 所示。

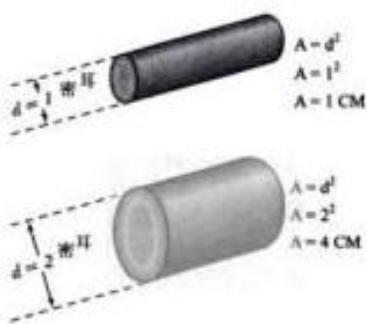


图 2-6 用 CM(圆密耳)表示的导体横截面积

例：设一根导线的直径为 4 密耳(0.004")，则以圆密耳为单位计算的横截面积是多少？

$$\text{解: } A = d^2 = 4^2 = 16\text{CM}$$

练习题 1

如果导线的直径是 2.5 密耳，则以圆密耳为单位计算的横截面积是多少？

由于物体的电阻系数反应了在给定温度下单位长度和横截面积的电阻，因此电阻率 ρ 可以表示为圆密耳·欧姆/英尺(CM · Ω/ft)。

2. 计算导体的电阻

计算导线电阻(在特定温度下)的通用公式是

$$R = \rho l / A \quad (2-2)$$

其中 R 是以 Ω 为单位的电阻； ρ 是以 $(\text{CM} \cdot \Omega/\text{ft})$ 为单位的电阻系数； L 是导线的长度，单位为英尺(ft)； A 是横截面积，单位为 CM

例：求一根长度为 250 英尺，横截面积为 39.75 CM 的铜线的电阻。已知铜的 ρ 值为 $10.4\text{CM} \cdot \Omega/\text{ft}$ 。

解：

$$R = \rho l / A = \frac{(10.4 \text{ CM} \cdot \Omega/\text{ft})(250\text{ft})}{39.75\text{CM}} = 65.4\Omega$$

练习题 2

求一根长度为 300 英尺，横截面积为 39.75CM² 的铜线的电阻。已知铜的 ρ 值为 10.4CM⁻¹·Ω/ft。

3. 总结

导体对电流的电阻与其电阻系数和长度成正比，与其横截面积成反比，即当长度不变时，给定导线的横截面积越大，其电阻越小；当横截面积一定时，给定导体的长度越长，其电阻越大，如图 2-7 所示。



- 相同物质导线
- 相同直径
- 导线 2 比导线 1 长 1 倍
- 导线 2 的电阻是导线 1 电阻的 2 倍
- 相同物质的导线
- 相同长度
- 导线 4 直径是导线 3 直径的 2 倍
- 导线 4 的电阻是导线 3 电阻的 1/4

图 2-7 导线电阻与导线直径、长度的关系

2.3.6 导线尺寸

导线的尺寸有一套标准尺寸，美国导线规格(AWG)标准定义了一些导线规格编号，图 2-8 中是一种工程师用来测量导线的 AWG 尺寸的工具。通过这种工具，工程师们可以很快确定导线的尺寸信息。例如，如果某一种导线被确定为 AWG14 号导线，则可以立刻知道它的 CM 横截面接是 4.107CM²，又如某一种导线是 AWG18 号导线，则它的 CM 横截面积约为 1.624CM²。(注：AWG 的号码越大，相应的导线直径越小，横截面积也越小)有趣的是，导线的 AWG 号码每改变 3 个号码，根据号码移动的方向，CM 面积将增大 1 倍或减小 1/2。例如，11 号导线大约是 14 号导线横截面积的 2 倍，这意味着单位长度的 11 号导线的电阻是 14 号导线的一半。



图 2-8 导线规格工具

2.3.7 导线速查表

导线速查表为获得导体尺寸与其电阻的关系提供了一个非常快捷的方式，如图 2-9 所示，导线速查表中的数据以表格的形式列出了导线的 AWG 号码、导线的横截面积和单位长度的电阻之间的对照表。大多数的导线速查表给出了取单位长度为 1000ft 时的标称电阻值。

AWG 号码	直径(mm)	面积(cm ²)	25°C 时每英尺 长度的电阻(Ω)	电流承受能力 (@700CMA)
—	—	—	—	—
10	0.79	0.088	1.018	14.8
11	0.73	0.074	1.284	11.8
12	0.68	0.060	1.477	9.73
13	0.63	0.048	1.942	7.4
14	0.57	0.040	2.379	5.87
15	0.51	0.033	3.247	4.81
16	0.45	0.028	4.084	3.88
17	0.39	0.024	5.163	3.03
18	0.34	0.020	6.310	2.32
19	0.29	0.016	8.210	1.84
20	0.25	0.012	10.15	1.46
21	0.21	0.009	12.09	1.16
22	0.17	0.006	14.46	0.914
23	0.14	0.004	20.78	0.728
24	0.11	0.003	26.17	0.577
25	0.09	0.002	33.08	0.458
26	0.07	0.001	41.82	0.361
27	0.05	0.001	52.48	0.288
28	0.04	0.001	66.17	0.228
29	0.03	0.001	83.44	0.181
30	0.02	0.001	103.2	0.144
31	0.01	0.001	131.7	0.114
32	0.01	0.001	167.3	0.090

注：电流承受能力根据环境不同有所差异。例如 14 号导线在空气流可以承受 32A 的电流，但是在纤维管中只能承受 17A 的电流。

图 2-9 导线速查表样例

练习题 3

- 参考图 2-9，试求长度为 500ft 的 12 号导线的电阻。
- 什么规格的导线的横截面积大约是 10.380 CM²？
- 问题 2 中的导线长度为 1000ft 的电阻是多少？

根据图 2-9 的导线速查表可以得出这样的结论：导线的尺寸同时决定了导线承受的最大电流，否则就会过热甚至被烧坏。一些导线速查表在给出单位长度电阻数据信息的同时，也会列出给定情况下导线的最大电流能力。对于给定材料的导线，其直径越大，则其携带电流的能力也越大。例如 11 号导线的横截面积是 14 号导线的 2 倍，这意味着 11 号导线能够承受的最大电流是 14 号导线的 2 倍。一般的经验告诉我们，导线尺寸每改变 3 个号码，根据导线号码增加还是减少，该导线的携带电流能力将增大 1 倍或减少 1 倍。

课间测试 2

- 1 给定导体的电阻系数越大，其单位长度的电阻就越____(大/小)。
- 2 导体的圆密尔面积等于它以____为单位的____。
- 3 导体的直径越小，其单位长度的电阻越____(大/小)。
- 4 典型金属导体的工作温度越高，其电阻越____(大/小)。
- 5 导线速查表反应了 AWG 导线____，导线以____为单位的横截面积、单位长度的电阻和以上参数正确的工作____。

2.4 电阻

2.4.1 用途

电阻在电路里起到限制和确定电流的作用。事实上电阻的这种电流控制作用只是电阻的一个作用，电阻还可以起到分压的作用，这两种用途都非常重要。

2.4.2 分类

电路里有各种电压、电流和功率的需求，为了适应不同的工作条件，电阻也具有各种各样的形式。之所以电阻有不同类型，是因为各种电路对电阻值的精确程度的要求以及当温度改变时电阻值的稳定性也具有不同要求。此外，电阻的物理外观通常反映了该种电阻的物理封装方法和电气连接方法。

正是由于需求的多样性，因此存在各种类型的电阻。常用的电阻是如图 2-10(a)所示的碳电阻和如图 2-10(b)所示的用于大功率的导线缠绕电阻。您也许可以分析出来：之所以线绕电阻可以承受大的功率是因为其物理尺寸和散热能力。在以后的训练中有可能经常接触这两种类型的电阻。

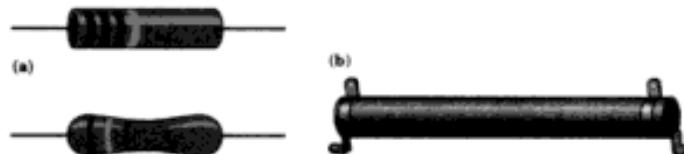


图 2-10 (a)碳膜电阻的物理外观 (b)导线缠绕电阻

图 2-11 中列出了一些电阻的基本特性，图上还有一些其他有用的电阻。在今后的学习中还会了解到有关这些电阻更深入的知识。作为一个工程师，在电路和系统里选择或替换这些电阻时，主要考虑的因素有功耗、电压、精确度、物理尺寸和元件连接封装方法。有时候，电阻的温度特性也至关重要。

碳电阻



关键特征: 电阻值从 1Ω 到几百万欧姆不等, 价钱便宜, 功耗在 $1/10$ 到 $3W$, 铅芯横贯两端。有两种常见形式: 为金属线连接而设计和为印制电路板自动插入设计。



构造: 电阻材料由破碎的碳和绝缘材料用树脂粘合剂连接在一起, 电阻材料和引线连接用绝缘外壳封装起来。

精密薄膜型电阻

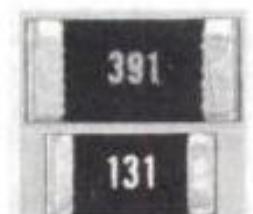


关键特征: 电阻值可以精确控制, 而且对温度不敏感。噪声参数和其他电子参数很好, 比一般的碳电阻稍为贵一些。



构造: 有两种类型的薄膜电阻, 一种在圆柱形陶瓷基底上涂一层碳, 另一种在基底上覆盖一层薄的金属。两种类型的电阻材料都切成管状的螺旋形式。电阻值大小取决于采用的基底和剩余的螺旋电阻材料数量。

表面贴片电阻



关键特征: 体积非常小, 非常适宜小型应用。几乎为零的引线长度带来很多优点。耐用可靠, 温度特性良好。由于尺寸很小, 因此只适合于低功率应用场合($1/8W$ 和 $1/4W$)。



构造: 在陶瓷基底上覆盖碳层。电阻材料通过一些金属端子引出, 因此具有零长度引线, 实际应用中, 这些端子采用自动焊接技术直接焊接在印制电路板上。

绕线电阻



关键特征: 与其他电阻不同, 绕线电阻具有相对大的体积。由于体积和结构特点可以承受较大功率(5 ~ $100W$)。电阻值具有较好的精确度。温度稳定性好, 一般用于大电流场合。



构造: 螺旋型的陶瓷绝缘体周围围绕一圈特殊的电阻导线, 导线的电阻系数和长度决定其电阻值。

图 2-11 一些常见的定值电阻

2.4.3 其他特殊类型的电阻器

除了如图 2-11 所示的元件以外, 电阻家族还包括其他很多特殊的元件。熔线(又称可熔电阻)便是其中一种。这种电阻在电路电流超过某一特定值时使电路断开(这与家庭里常用的保险

丝类似)。当然,在它们熔断以后可以被替代。电路里主要用这种电路来限流以及一旦电流过高时保护电路。

今天由于机器人技术和自动生产系统的进步,一种“零欧姆”的元件被制造出来。这种类型的元件允许在印制电路板的两点之间根据需要自动插入跳线。这种极低阻值(接近于 0Ω)的元件采用的封装使得自动化机器能够自动在电路板上完成连接,而不是像以前那样由人来用跳线选择两点,然后焊接。

2.4.4 电阻类型和符号

您一直看到的都是定值电阻,实际上电阻还有半定值和可变电阻两种形式。定值电阻是指电阻值不能通过外部改变的电阻,如图2-12(a)所示。半定值电阻是指电阻一端可以沿着电阻材料调节并停留在某个位置,如图2-12(b)。这样其电阻值可以是可移动端和终端之间电阻范围内的任意值。一旦调节好,通常不会再调节可移动端。图2-12(c)所示的可变电阻的移动端可以接触电阻材料的任意点。通常的可变电阻移动端都连接一个杆状物,目的是更方便地设置电阻值。



图 2-12 定值、半定值和可变电阻结构

图2-13表示的各种原理图符号用来表示不同类型的电阻。您将了解到,原理图符号是电气工程师在纸上绘制电子元件和电路的速记符号。

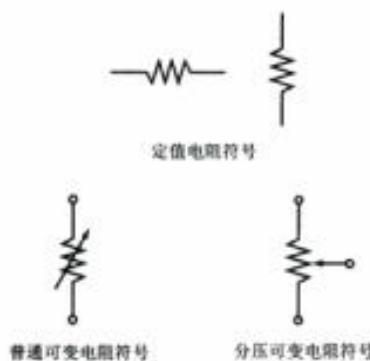


图 2-13 定值电阻和可变电阻的原理图符号

2.4.5 电阻结构比较

回顾一下，碳电阻采用碳材料制成，具有固定电阻值，电阻值由碳和绝缘材料的混和决定，参见图 2-14，注意图上碳电阻的色环，下面就会介绍有关色环的知识。

而另一方面，绕线电阻采用特殊的电阻导线作为材料，如图 2-10(b) 和图 2-11 所示，绕线电阻和定值的碳电阻之间最显著的差异就在于，绕线电阻可以是定值、半定值或可变电阻。

一些可变电阻，或者叫分压器的材料可以是碳，也可以是绕线，从图 2-15 和图 2-16 可以看出，与圆形碳材料或者绕线电阻连接的接触电刷的位置决定了从中心到分压器两端的电阻值。分压器具有重要的电压分配作用，收音机的音量控制、音频放大器和电视机都离不开分压器。



图 2-14 具有色环的碳电阻



图 2-15 分压器的内视图



图 2-16 具有高电流携带能力的线绕可变电阻，这种电阻可以制成两端的可变电阻器和三端的分压器

绕线电阻一般用于需要低电阻值和高电流携带能力的应用场合，图 2-16 所示的是一个大体积的绕线可变电阻器。

2.5 电阻色环代码

电子工程师们都具有熟练解读电阻色环代码的能力。由于很多电阻物理构造非常小，因此很难在电阻上标识出可以阅读的阻值，这样就产生了一套色环代码的识别系统，这种识别代码被电子工业协会(EIA)制定成标准，世界各地的工程师都理解这种代码。

同时存在一些电阻，这些电阻本身可以在电阻上标识电阻值，因此这样的电阻无需采用色环代码。但是对于那些的确需要用色环来表示阻值的电阻，其圆柱形电阻体上往往绘出了 3、4 或 5 道色环。电阻上前 3 条色环用来反应电阻以欧姆为单位的电阻值。有时电阻上绘出第 4 条色环，这条色环用来表示电阻值的误差，即在制造电阻时有可能出现的阻值误差。一般如果没有第 4 条色环，则默认该电阻的误差在 $\pm 20\%$ 。

有一种特殊的电阻具有第 5 条色环用来表示该电阻的可靠性，这个参数反应了 1000 小时内发生故障的百分比。

同样很多高精度电阻(这意味着电阻的误差非常小)都标注了5条色环。在这种情况下,前3条色环表示电阻值的前3位数字,第4位表示十进制的相乘因子,而第5条色环表示电阻误差。在我们的学习过程中,会经常遇到有4条色环的合成碳电阻。

2.5.1 色环代码的含义

如图2-17所示,第一条色环是距离电阻两端之一最近的一条,其余的色环依次排列到电阻的中央。为了通过色环读出电阻值,关键是要理解每一个色环位置代表的意义和每一种颜色代表的意义。



图2-17 电阻色环含义

- A 表示电阻值的第一个有效数字。
- B 表示电阻值的第二个有效数字。
- C 表示电阻值的十进制相乘因子。
- D 表示误差百分比。
- E 表示可靠性(1000小时中的可靠性百分比)。

下面我们以图2-17为例说明如何根据色环读取电阻值。

1. 第一条色环(距离电阻两端之一最近的一条)代表电阻值的第一个有效数字。
2. 第二条色环代表电阻值的第二个有效数字。
3. 第三条色环代表相乘因子,即前两位后0的个数,由此读出电阻的标称值。
4. 第四条色环表示误差百分比信息,这条色环是制造时的规格,反映了电阻值误差的可容许范围。
5. 第五条色环,如果有的话,反映了1000小时内发生的故障百分比,又称作可靠性因子。

2.5.2 颜色的意义

对于大于 10Ω 的电阻,有10种颜色分别用来表示数字0到9,如图2-18所示。黑色代表0,然后随着数字依次增大到9,颜色逐渐变淡,这些颜色分别代表了0~9的值。



图2-18 颜色的意义

2.5.3 阻值误差色环

阻值误差色环一般主要采用金和银两种颜色。金色表示误差值不超过标称值的 $\pm 5\%$,例如一个电阻标称值为 100Ω ,误差为 $\pm 5\%$,则该电阻的实际电阻值范围为 $95\sim 105\Omega$,仍然符合制造商的误差容限之内。

银色代表土10%的误差，如果一个银色色环的电阻标称值为 100Ω ，那么其真实电阻范围为 $90\sim110\Omega$ 之间。

如前面所述，如果没有第四条色环，则默认误差为土20%。

2.5.4 金色和银色作为因子

低阻值的电阻(小于 10Ω)需要特殊的因子作为第三条色环，即从前两条色环读出来的电阻值再乘以0.1或者0.01得到最终的电阻值。金色环代表0.1的因子。例如当前两条色环分别是红色和紫色，电阻值为 27Ω ，如果第三条色环是金色，则实际电阻值是 $0.1 \times 27 = 2.7\Omega$ 。

第三条色环为银色时代表0.01的因子。这意味着如果一个电阻的色环依次是褐、黑、银，则阻值将是 $0.1\Omega(10 \times 0.01 = 0.1)$ 。

图2-19总结了有关电阻色环各种颜色的意义。

颜色	位于第一、二条色环时 代表数字	位于第三条色环 时代表乘性因子	精度 (第四条色环)	可靠性因子 (第五条色环)	精度误差 (第五条色环)
黑	0	1(00 zeros)	—	—	—
褐	1	10(1 zero)	—	1%	±1%
红	2	100(2 zeros)	—	0.1%	±2%
橙	3	1,000(3 zeros)	—	0.01%	—
黄	4	10,000(4 zeros)	—	0.001%	—
绿	5	100,000(5 zeros)	—	—	±0.5%
蓝	6	1,000,000(6 zeros)	—	—	±0.25%
紫	7	10,000,000(7 zeros)	—	—	±0.1%
灰	8	100,000,000(8 zeros)	—	—	—
白	9	1,000,000,000(9 zeros)	—	—	—
金	—	0.1	5%	—	—
银	—	0.01	10%	—	—

图2-19 色环意义归纳表

例：现在让我们看看如何利用色环颜色和位置的信息读出一些电阻的阻值和误差，此外我们也将看一个具有可靠性因子的例子。

如图2-20(a)所示，第一条色环是黄色，代表数字4，第二条紫色的色环代表数字7，第三条橙色的色环表示乘以1000，即在47后面添3个0，因此电阻值为 $47000\Omega(47k\Omega)$ 。第四条色环是银色，说明误差在10%以内，即该电阻标称值为 47000Ω ，但是可能增加或减少 4700Ω ，实际的电阻值在 $47000+4700(51700)$ 和 $47000-4700(42300)$ 之间。

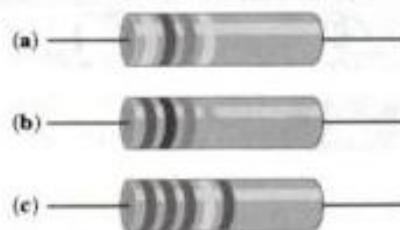


图2-20 (a) $47k\Omega$, 10%误差; (b) $10k\Omega$, 5%误差; (c) $2.2k\Omega$, 10%误差, 1%可靠性

在图 2-20(b)中，色环依次是褐、黑、橙、金，这表示该电阻为 10000Ω , 5%。

在图 2-20(c)中，色环依次是红、红、红、银、褐，这个电阻值为 $2.2\text{ k}\Omega$ ，误差在 10%以内，可靠性因子为 1%。

现在做以下两个练习。

练习题 4

1 说出下面电阻的电阻值和误差。



2 说出下面电阻的电阻值、误差和可靠性参数。



2.5.5 高精度电阻

尽管我们常用的电阻都是按照上述色环规则编码的，但实际上有些高精度电阻的误差可低至 2%，甚至更低，这种电阻采用一种特殊的五道色环识别码。在这种情况下，前 3 条色环代表电阻值，第四条色环代表乘性因子，而第五条色环表示误差参数。高精度的电阻采用如下颜色：褐色代表 $\pm 1\%$ ，红色代表 $\pm 2\%$ ，绿色代表 $\pm 5\%$ ，蓝色代表 $\pm 0.25\%$ ，紫色代表 $\pm 0.1\%$ ，这如图 2-19 所示。

2.5.6 其他色环系统

我们已经提到过有一些电阻并不用色环标识，而是直接把阻值印刷在电阻上。例如一些为表面贴装技术设计的微型电阻经常采用三位编码来说明电阻值信息。这三位数字与碳电阻采用的前 3 位色环类似。例如，贴片电阻上的第一位是电阻值的第一个数字，第二位是电阻值的第二个数字，第三位是乘性因子，用来表明电阻值后面要加多少个 0。如果一个贴片电阻编码为 103，则它的值是 1，然后是 0，最后添加 3 个 0，即 $10000\Omega(10\text{k}\Omega)$ 。

此外，还有一种电阻采用隐含的数码表示系统来标识电阻值。对于小于 100Ω 的电阻，字母 R 表示小数点的位置。例如一个电阻标有 2R7，则其电阻值是 2.7Ω 。字母还可以表示误差参数，如 F 代表 $\pm 1\%$ ，G 代表 $\pm 2\%$ ，J 代表 $\pm 5\%$ ，K 代表 $\pm 10\%$ ，M 代表 $\pm 20\%$ 。因此一个标有 2R7K 的电阻其阻值为 2.7Ω ，误差在 $\pm 10\%$ 以内。

有些电阻需要3个数字和一个乘性因子表示。这时采用3个数字加第四个乘性因子的形式，第四位表示前面数字后面需要添加的0。例如4702K，则电阻值为47000Ω，误差在±10%以内。

2.6 用万用表测量电压、电流和电阻值

2.6.1 测量的重要性

作为一个工程师，您将经常在电子电路中测量电压、电流和电阻。这些测量有时是为了正常工作建立或调整电路环境，而测量通常是为了检查电路是否工作正常或者为了调试电路使之正常工作。掌握正确的测量方法非常重要，这里您将了解大多数与测量电压、电流和电阻有关的概念，这些知识有助于您的实际测量。

2.6.2 仪表种类

一般测量 V 、 I 和 R ，常用的仪表有两类：模拟仪表和数字仪表，如图 2-21 所示。随着学习的进展您会进一步了解模拟和数字代表的意义。注：在电子学里，模拟器件被认为是那些电压和电流可以连续变化的器件，而数字器件的电压和电流参数只能以离散的值的形式变化（在数字计算机里只有两种离散电平，低电平和高电平，分别代表 0 和 1，即开和关）。现在您只需明白数字仪表的读数是可以直接读取的，通过仪表上显示部分能够直接得到数字。但是对于模拟仪表，读数时需要根据指针在刻度盘上停留的位置来解释实际的参数值。尽管今天工业上大都采用数字仪表，但是掌握模拟仪表仍有必要，因为实际中您有可能碰到包括数字和模拟仪表在内的各种各样的仪表。



图 2-21 (a)数字仪表; (b)模拟仪表

2.6.3 仪表符号

图 2-22 表示了本书用来表示模拟和数字仪表的图示符号以及电路图符号，有安培(电流)表、mA 表、电压表和用来测电阻的欧姆表。

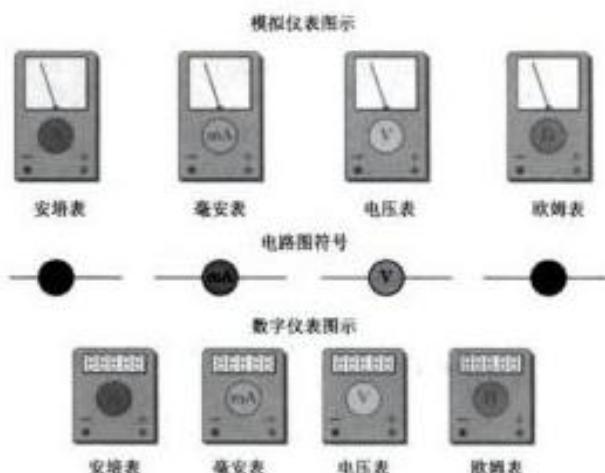


图 2-22 数字仪表的图示和电路图符号

2.6.4 用电压表测量电压

为了测量两点之间的电压，只需把电压表的两个表笔跨接(并联)在所测两点，如图 2-23 所示。值得注意的是，当测量直流电压时应该把负的测试表笔连接在电路里电压较低的点，而把正的测试表笔连接到电路里电压较高的点。在图 2-23 里您可以看到电压表正在测量元件 2 两端的电压。

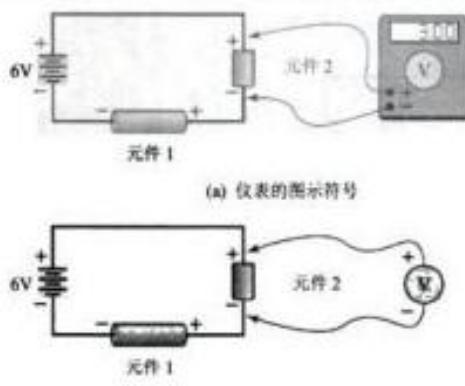


图 2-23 测量元件两端电压

建议

当您准备用电子仪表做测试之前，在连接仪表测试表笔和电路测试点时务必关闭电源。

2.6.5 用安培表测试电流

图 2-24 演示了用安培表或 mA 表测试电路里电流时如何连接表笔。这里应该把电路断开。

把仪表串联在电路里才能完成测试。同时在直流电路里，安培表与电路的连接必须使得电流从仪表的负测试表笔流入，流过安培表然后从正的测试表笔流出。

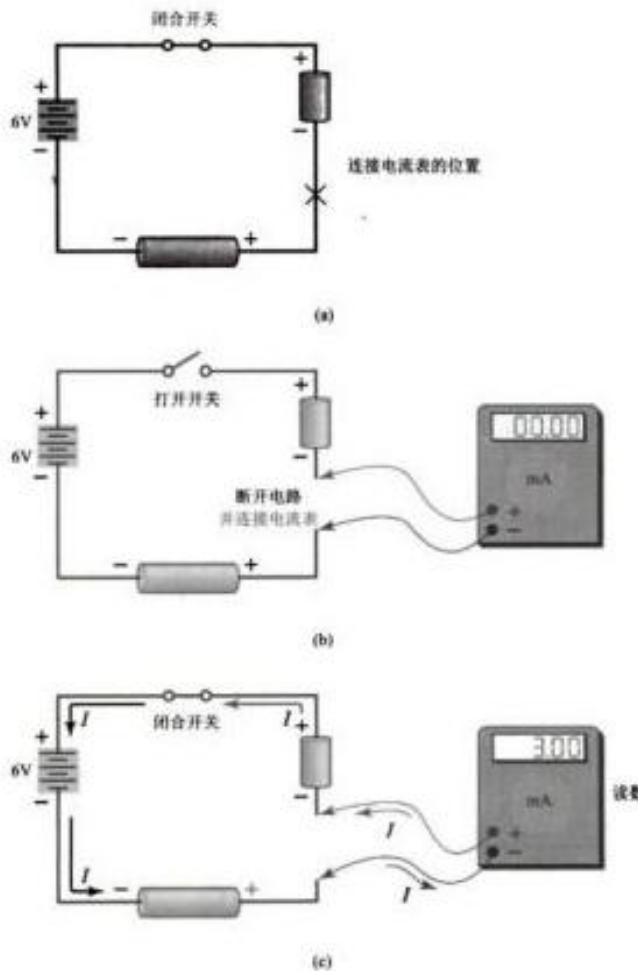


图 2-24 测量电流

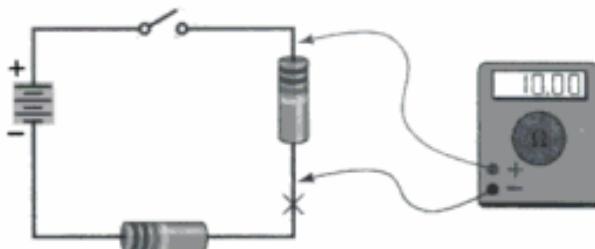
建议

当测试电压或电流的范围未知时，如果仪表不能自动调节量程，应该把仪表设置在最高量程，以免损坏仪表，然后逐渐降低量程。

2.6.6 用欧姆表测试电阻

使用欧姆表时很关键的一点是必须保证电源与电路断开，被测试元件与电路其余部分断开。下面以图 2-25 为例说明这些注意事项。

- (1) 打开开关，关闭电路电源连接。
- (2) 断开电阻与电路连接的一端。
- (3) 把欧姆表并联在电阻两端并读数。



首先断开电源，被测试元件应与电路其余部分断开

图 2-25 欧姆表测量电阻

2.6.7 使用仪表的注意事项

正如前面提到，通过实际的测量才能掌握仪表的正确使用。在此过程中，应注意所有的安全事项以保证人身和测试仪表的安全。

- (1) 测量电压时，把电压表的两个测试表笔连接在您希望测试电势差的两点，即并联在元件或测试点的两端。
- (2) 测量电流时，首先断开电路，然后用电流表测试表笔串联您希望测试的电流路径。
- (3) 如果测试直流电压或电流，注意观察电流方向并正确连接正负测试表笔。
- (4) 测量电阻时，务必断开电源、断开电阻与电路其余部分的连接，然后方可测量电阻值。

安全提示

- (1) 连接仪表表笔时务必关闭电源。
- (2) 正确连接测试表笔，测量直流电压或电流时分清极性。
- (3) 确保仪表处于正确模式(交流、直流、V、A、Ω)。
- (4) 确保所选量程高于被测量范围。
- (5) a. 测量电压或电流时打开电源读数。
b. 测量电阻时关闭电源读数。
- (6) 先关闭电源，然后再移开测试表笔。
- (7) 测量电流时需正确重新连接电路。

课间测试 3

1. 如图 2-26 所示，如果要测试元件 1 两端的直流电压，则确定如何分别连接电压表的正、负表笔。

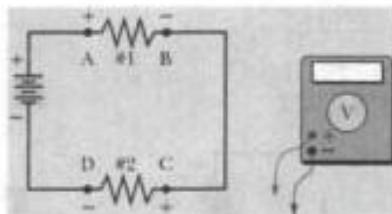


图 2-26 谈问测试题 1 电路图

正表笔连接点____。

负表笔连接点____。

2. 如图 2-27 所示, 如果要在标记 X 的位置断开电路, 测试该电路的直流电流, 则安培表的正和负表笔如何连接。

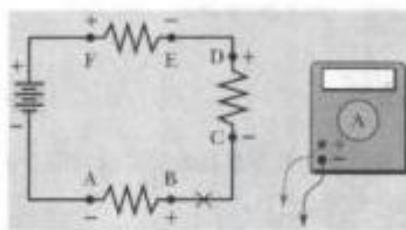


图 2-27 谈问测试题 2 电路图

正表笔连接点____。

负表笔连接点____。

3. 如图 2-28 所示, 如果要测量电阻值, 则在连接被测电阻两端之前首先要做什么?

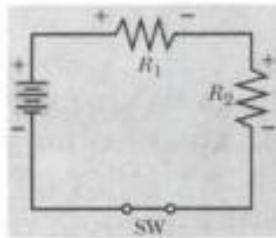


图 2-28 谈问测试题 3 电路图

2.7 电子元件的图形符号

2.7.1 图的种类

在电子学里有很多种图, 包括框图(block diagram)、原理图(schematic diagram)和底板布局图等, 这里我们只讨论最常用的框图和原理图。

2.7.2 一些基本符号

电子电路一般用框图或者原理图来表示，为了便于理解和使用原理图，必须首先认识一些常用的电子元件符号。由于图形可以以简洁的形式来表示各种各样的电路，因此它成了电子工程师们常用的“速记符”。

这里我们将介绍一些常用的电路原理图符号，在后文还会随时介绍一些新的符号。请认真熟记这些符号，有关这些元件的工作原理和应用将在以后慢慢介绍。

图 2-29 给出了一些重要的电路符号。

元件类型	图形	原理图符号
导体(相连)	+	++
导体(不相连)	+	++
电池	■	+
蓄电池	■	
单刀单掷开关	○	—○—
单刀双掷开关	○○	—○—
双刀单掷开关	○○	—○—
双刀双掷开关	○○	—○—
旋转开关	○	○○○
按键式开关(平时打开)	○	—○— NO PB
按键式开关(平时闭合)	○	—○— NC PB
定值电阻	—	—
可变电阻	—	—

图 2-29 各种元件及其符号

元件类型	图形	原理图符号
电压表		-V-
安培(mA、μA)表		●●●
欧姆表		●●
保险丝		—∞— 或 —○—
断路器		—○○—
定值电感		空心 铁心
可变电感		↑↓
定值电容		↑↑
可变电容		↑↓

图 2-29 (续)

2.7.3 框图

框图非常简单实用，并且可以非常明白地表示出各个子框图之间的关系。我们在第1章介绍一个简单电子系统时就示意了一个框图。

看一下图2-30，您是否能理解框图所反应的概念。本质上框图是用来分析一个系统的：首先把整个框图分解成有意义的子系统，事实上子系统也是由单独的框图构成；然后按照某种方式把各个子系统连接起来，反映出子系统之间的流程和相互作用。

框图能够很快地揭示出系统功能，即此系统的功能是将电能从电源传递到负载。同时，它以图形化的方式表示了电能在各子模块之间的传递关系。它还非常直观地表示了各模块的功能：电源模块提供电能，传输部分负责控制和分配电能到许多不同负载，负载消耗得到的电能。

现在看看您能否说明我们多数人都已经熟悉的系统。

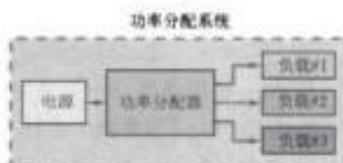


图 2-30 简单框图

练习题 5

观察图 2-31，回答下列问题

1. 该系统的功能是什么？
2. 电视信号的传递方向是从左到右还是从右到左？
3. 哪一个子系统从天线接收信号？
4. 电视接收电路的输出是哪两种类型的信号？



图 2-31 电视接收系统框图

2.7.4 原理图

您已经了解了框图的用途，现在开始介绍原理图，这时要应用原理图符号了。由于采用了标准化的符号，因此其他工程师很方便地就可以理解最初画原理图的工程师想表达的意图。原理图表达的信息简洁而且实用，可以准确地反应有关元件类型和标称值以及电气连接等重要信息。

观察图 2-32，注意示意图和原理图的区别。

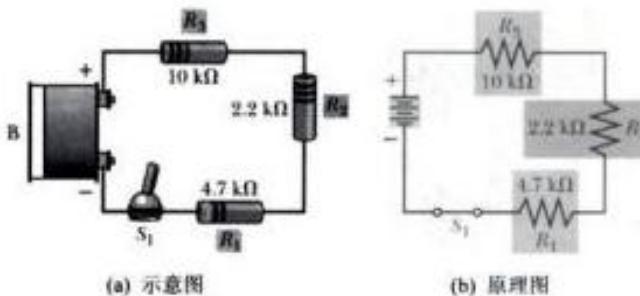


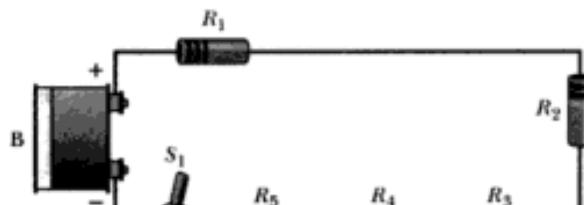
图 2-32 电路的示意图和原理图表示

- 每一个元件有唯一的标注，例如一个电阻标为 R_1 ，下一个电阻标为 R_2 ，依次类推。开关标为 S_1 ，如果还有别的开关，按照顺序标为 S_2 等。
 - 在示意图里，您可以看见电阻色环，本图中电阻值已经标出。如果还有其他元件具有重要参数，在图里也会标出相应的值。
 - 在示意图和原理图中，电池都被标注了正负极，在每个元件上都可以这样标注，然而由于第 3 章将介绍更多有关极性的知识，因此暂时把这样的标注留到下一章。
 - 最后包括示意图、原理图和其他连线图都具有一个共同特点，即图上反映了所有电路内部连接，这有助于帮助读者理解电路中每一元件和电路中其他元件的关系。
- 此外，在很多原理图上标注出一些电气参数，如电压、电流和电阻值，这些标注对于工程师调试电路非常有帮助。

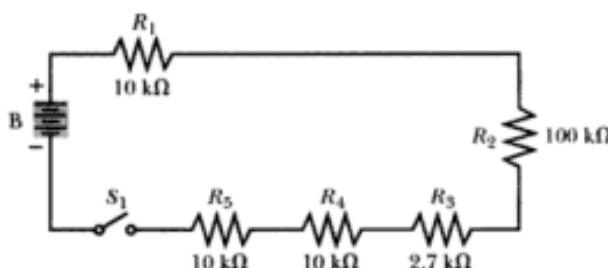
练习题 6

观察图 2-33，回答下列问题

- 电路中有多少种不同类型的元件，都是什么？
- 电阻值最高的是多少？
- 采用什么开关？单刀单掷还是单刀双掷？
- 采用电池还是蓄电池？



(a) 示意图



(b) 原理图

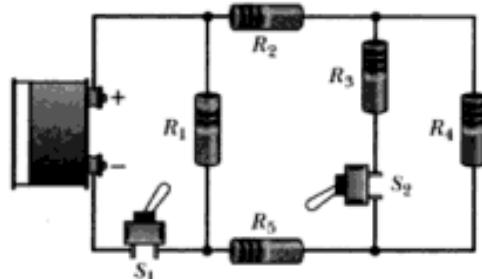
图 2-33 练习题 6 的电路图

练习题 7

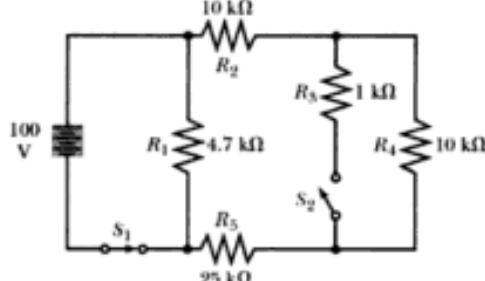
观察图 2-34，回答下列问题

1. 电路中有多少个电阻？
2. 哪个电阻值最低？是多少？
3. 电路里有多少开关？
4. 电路中供电电压值是多少？
5. 分别指出打开和闭合的开关。

原理图在一个很小的面积上提供了很多有用信息，随着您学习的深入您将能够更深刻地理解原理图的意义。



(a) 示意图



(b) 原理图

图 2-34 练习题 7 的电路图

2.7.5 安全提示

也许您已经了解一些有关电子电气的安全注意事项，尽管如此，在这里还是有必要介绍一些有关安全的常识。

1. 背景知识

当您的身体在具有电势差的两点之间建立电流通路时，将会发生电击。通常一个人受到电击后受伤的程度取决于所受电流的大小，一般症状有轻微不适、严重肌肉收缩、严重烧伤、心室颤动，严重时会致死。很多时候由于无意识的肌肉收缩或者痉挛导致的伤害超过电击本身。有时即使是很小的电流，如果它恰好从您身上特殊的地方流过也会导致非常致命的影响。因此，无论您所打交道的电压或电流值是多少，都应该多加小心。

高压在电路里产生很大的电流，电阻越大，电流越小。因此，任何可以降低电路电压和增大电流路径电阻的措施都是有益的。

2. 一些常用安全常识

- (1) 在接触电路之前先关闭电源。
- (2) 如果必须在带电时接触电路，则任何时候只用一只手。这可以避免同时接触电路中两点，否则会从而给电流提供路径，使电流从一只手流入，穿过身体从另一只手流出。例如，当您一只手接触电路中某一点时，您的另一只手应该触摸电路的底板、地面或者其他不会引起电击的地方。
- (3) 应该使您的身体和地绝缘，这样不会在电路和您身体之间建立电流通路。
- (4) 使用带绝缘柄的工具。
- (5) 知道离您最近的开关或者断路器在什么地方，紧急时可以立刻关闭供电电源。同时，您身边的人也应该知道这一点。
- (6) 除去金属首饰。佩戴首饰不但会引起电接触，而且如果您在旋转电机附近工作，还有可能把您缠进去。
- (7) 当电路里有电容时，即使关掉电源也会有剩余电荷存储在电容里，因此，在开始工作之前应首先给电容放电。
- (8) 所有规定接地设备一律应该接地，包括仪器底板和机箱等。

3. 用电烙铁焊接时应注意的事项

- (1) 应该把热的电烙铁放置妥当，以免无意中烧伤自己的手臂、手和其他物体。
- (2) 焊接时带上安全眼镜。
- (3) 从烙铁上擦去热的焊锡时要小心，热的焊锡很容易溅开来造成烧伤。

2.8 知识点汇总

- 电荷的测量单位是库仑，库仑简写为 C，此外常用的电荷单位是微库，用 μC 表示，即 1C 的百万分之一。
- 电势差或电压用字母 V 表示，其测量单位是伏特，符号为 V，电压的常见单位还有 mV、 μV 和 kV。
- 电流的测量单位是安培，符号 A。电流的常见单位还有 mA、 μA 和 pA。
- 电导用 G 表示，其测量单位是西门子，符号为 G，电导的单位还有 mS 和 μS 。
- 字母 R 表示电阻，其测量单位为 Ω ，常用的单位有 $\text{k}\Omega$ 和 $\text{M}\Omega$ 。
- 电路里常用的元件有电阻、开关、电池(或电压源)和导线。请记住其标准符号。
- 常用的小单位词头有“皮”，表示万亿分之一；还有“纳”，表示十亿分之一；“微”表示百万分之一；“毫”表示千分之一。
- 以上的前缀也可以用 10 的幂来表示，例如“皮”相当于 10^{-12} ，“纳”相当于 10^{-9} ，“毫”相当于 10^{-3} 。

- 常用的大单位词头有“千”和“兆”，分别代表 1000 和 100 万倍。
- 上述词头的符号分别表示为：p(皮)，n(纳)，μ(微)，m(毫)，k(千)和 M(兆)。
- 导体可以按照构成材料、物理尺寸、长度和整体封装分成很多种类。实心和绕线是两种最常见的导体，不同导体之间的其他差别在于其封装和所用的绝缘材料。
- 导线有一个标准规格体系称为美国标准导线规格，简称为 AWG，导线号码越小，导线越粗。
- 导线的横截面积是以圆密耳(CM)为单位计算的，1 个密耳相当于千分之一英寸，1 CM 的导线的直径是 1 密耳。
- 导体的尺寸(直径和横截面积)越大，导体的电阻越小，其携带电流的能力越强。某条导线越长，其两端的电阻就越大。
- 给定类型的导体的电阻系数描述了该导体给定长度和横截面积时的电阻，电阻的公式是 $R = \rho l / A$ 。
- 导线速查表为获得导体尺寸与其电阻的关系提供了一个很方便的途径，同时也可以提供有关电流携带能力的信息。
- 电阻在电路里起到限流和分压等重要作用。
- 电阻有碳或复合电阻、膜电阻、表贴电阻和绕线电阻。此外，还可以把电阻分为定值电阻、半定值电阻和可变电阻。
- 碳或复合电阻一般的功耗为(1/4)W 到 2W，绕线电阻的功耗可以达到 5~100W。
- 两种常用的电阻是高精度电阻(通常是膜电阻)和表贴电阻。由于表贴电阻尺寸非常小，其额定功率介于(1/8)到(1/4)W 之间，但是其电阻值却可以覆盖从低于 1Ω 一直到 $1M\Omega$ 的范围。
- 由于碳电阻通常很小，因此专门有一套色环代码系统来标识其电阻值。
- 框图用来表示一个系统或电路的主要组成模块，还可以反应内部信号的流程和功率等信息。一般框图的信号流向都是从左到右。
- 原理图提供比框图更多的信息，包括电路里所用的元件及其标称值、元件之间的连接关系和相关的电子参数。
- 框图反应了系统的总体结构，而原理图用来进行电路分析、修改或维护以及电路调节。
- 在调试电子电路，使用热的电烙铁和旋转电机时应该遵守有关的安全规程。

公式与计算器输入顺序示例

公式(2-1)

$A = d^2$ 求一个导体以圆密尔为单位的面积

输入顺序：直径值(单位为密尔)，

公式(2-2)

$R = \rho l / A$

求导体的电阻

输入顺序：电阻率(CM · Ω/ft)，，长度(ft)，，面积(CM)，

复习题

1. 3 mV 相当于多少 V。
2. 假定一个电流值是 $12 \mu\text{A}$ ，若以 A 为单位，可以写成 12 乘以 10 的几次方？如果写成十进制如何表示？
3. 单位词头“毫”是“微”的多少倍？
4. $1\text{M}\Omega$ 等于多少 $\text{k}\Omega$ ？
5. 画一张原理图，要求包括电压源(电池)、两个电阻和一个单刀单掷的开关，第一个电阻应连接电源的负极，第二个电阻连接电源的正极，开关位于两个电阻之间。
6.  图示的符号代表定值_____。
7.  图示的符号代表可变_____。
8.  图示的符号代表_____。
9.  图示的符号代表_____。
10. 进行单位转换
 - a. 15mA 转换成 A。
 - b. 15mA 转换成 15 乘以 10 的 n 次方的形式。
 - c. 5000V 转换成 KV。
 - d. 5000V 转换成 5.0 乘以 10 的 n 次方的形式。
 - e. $0.5\text{ M}\Omega$ 转换成 Ω 。
 - f. $100,000\Omega$ 转换成 $\text{M}\Omega$ 。
 - g. 0.5A 转换成 mA。
11. 举出两种类型的电阻并说明其物理结构。
12. 试说明下列电阻的电阻值和误差参数。
 - a. 黄、紫、黄、银
 - b. 红、红、绿、银
 - c. 橙、橙、黑、金
 - d. 白、褐、褐、金
 - e. 褐、红、金、金
13. 至少说出 3 种电路里选择电阻时需要考虑的参数。
14. 如果一个高精度电阻有第四道色环，则其意义是什么？
15. 如果一个高精度膜电阻的色环为：红、红、红、红、红，则此电阻的电阻值和误差参数分别是多少？
16. 如果一个碳电阻只有 3 道色环，则该电阻的误差参数是多少？
17. 如果在电路里您必须替换一个功率参数为 25W 的电阻，那么您将选择什么类型的电阻？

18. 表面贴片电阻如果标记为 443，则其电阻为多少？
19. 如果一个电阻上有色环表示可靠性，则哪一道色环具有这样的意义？如果该道色环的颜色是橙色，则 1000 小时内出现故障的百分比是多少？
20. 当您将要进行电路工作时，您应该注意那些安全事项以避免电击。
21. 列出两种您进行大功率电子电路操作时可以最大程度减小电击的身体保护措施。
22. 当电路里有带电电容元件时需要额外注意哪些预防措施？
23. 当使用旋转电机时，如果带有金属首饰有可能发生哪些后果？至少列出两种。
24. 列出 3 种使用热的电烙铁时需注意的事项。
25. 导致某人被电击的条件是什么？

分析题

1. 用自己的话说明电阻色环的重要性。
2. 如果一个给定导体的工作环境的温度增加，则将对下列参数有何影响？
 - a. 导体电阻值。
 - b. 导体电流携带能力。
3. 用您自己的话说说电阻的可靠性的意义。
4. 用您自己的话说明执行下列测量时的步骤和注意事项。
 - a. 在具有多个元件的电路里测量某个元件两端的电压。
 - b. 测量电流。
 - c. 在具有多个元件的电路里测量某个元件的电阻值。
5. 画一个简单功率分配的框图，至少具有 3 个模块并标出每个模块代表的意义。
6. 用两个电阻、一个仪表、两个开关和一个电池画一个原理图，并标记各元件。
7. 写出下列电阻的色环。
 - a. 1 100Ω, 10% 误差。
 - b. 27kΩ, 20% 误差。
 - c. 1MΩ, 10% 误差。
 - d. 10Ω, 5% 误差。
8. 列出至少 4 种连接仪表和被测电路时应注意的常用安全事项。
9. 参考图 2-26，当您在电路里添加一个定值电阻时需要连接几个点？
10. 参考图 2-26，当您在电路里添加一个可变电阻时需要连接几个点？

能力设计实验索引表

实验手册中建议的与本章内容有关的能力设计实验包括

章节标题	能力设计实验题目	实验编号
2.6.4 用电压表测量电压	伏特表(仪表的使用和注意事项)	1
2.6.5 用安培表测量电流	安培表(仪表的使用和注意事项)	2
2.6.6 用欧姆表测量电阻值	欧姆表(仪表的使用和注意事项)	3
2.5 电阻色环代码	电子色环代码(欧姆定律)	4

注：我们建议在做完以上实验后，学生应该被要求回答实验手册中该实验最后 Summary 部分的问题。

第 II 部分

基础电路分析

欧姆定律

串联电路

并联电路

串联-并联电路

基本网络定理

网络分析技术

第3章 欧 姆 定 律

教学大纲

- 3.1 欧姆定律以及电子量之间关系
- 3.2 欧姆定律方程的3种形式
- 3.3 公制前缀和10的幂的应用举例
- 3.4 电流方向
- 3.5 极性和电压
- 3.6 直流源和交流源的电流方向
- 3.7 功、能量和功率
- 3.8 测量电能消耗
- 3.9 欧姆定律和功率公式常用形式

教学目标

通过学习本章您应该能够：

- 1 说明电流、电压和电阻之间的关系。
- 2 利用欧姆定律求解电路中未知的参数。
- 3 在原理图上表示电流的方向和电压的极性。
- 4 利用公制前缀和10的幂求解欧姆定律有关习题。
- 5 利用计算器求解电路问题。
- 6 利用计算机的电子数据表格软件求解电路问题。
- 7 说明功耗(power dissipation)的概念。
- 8 采用正确的公式计算功率值。

预习指导

本章介绍欧姆定律，欧姆定律是一个工程师应该掌握的最基本的知识，它是各种电子电气电路里最基础的计算公式。这里您将学习如何把已经学过的知识和新的实用电路分析方法融会贯通。例如利用学过的公式、10的幂的表示法和科学计算器来进行实际的训练。

关键词

习惯用电流(conventional current)	能量(energy)	欧姆定律(ohm's law)
极性(polarity)	功率(power)	功耗(power dissipation)
瓦特(watt) (W)	瓦时(watthour) (Wh)	瓦秒(wattsecond) (Ws)
功(work)		

3.1 欧姆定律以及电子量之间关系

电阻的测量单位以欧姆(Georg Simon Ohm)命名，这是因为欧姆发现了基本电子量之间的关系。他证明了电路里电压与电阻成正比，电流与电阻成反比。实际上当我们定义一些电子量的时候，欧姆定律已经暗含在其中了，例如， 1Ω 就定义为当两端电压为 1V 而电流为 1A 的时候的电阻。

3.1.1 电阻为常量时电压和电流的关系

电压和电流的这种关系可以用欧姆定律表示，即

$$I = \frac{V}{R} (1A = 1 \frac{V}{\Omega}) \quad (3-1)$$

例：设电路中电压为 10V，而电阻值为 5Ω ，求电流是多少安培？

解：如图 3-1 所示

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

您可以从这个公式里看到，如果电压 V 增大而电阻不变，则电阻 R 将承受更大的电压，因此电路中电流将增大。即电阻值给定时，电压增大，电流也随之增大，而且电流的增加与电压增加成比例。比较图 3-1(a)和图 3-1(b)中的电流，您会看到，当电压从 10 V 增大到 15 V 时，由于电阻保持不变，因此电流从 2 A 增大到 3 A，电流增量与电压增量成正比，这成立吗？当电压增大 1.5 倍后，电流也相应地增大到原来的 1.5 倍。

另一方面，如果电压下降而电阻保持不变，电流的下降与电压的变化量成正比。比较一下图 3-1(a)和图 3-1(c)中的电流，可以看出成正比关系。图 3-1(c)中电流是图 3-1(a)中 2 A 电流的一半，这是因为图 3-1(c)中的电压 5 V 是图 3-1(a)中电压的一半。这样的关系被称为“线性比例”。

因此我们得出结论：当电阻值保持不变时，电路里的电流只与电压有关系。如果电压增加，那么电流的增量与电压增量成比例；如果电压减小，那么电流的减小与电压减小成比例。

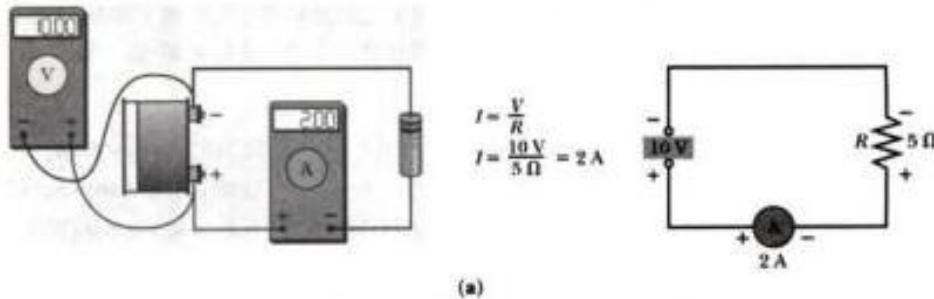


图 3-1 欧姆定律 电阻不变时电压和电流的关系

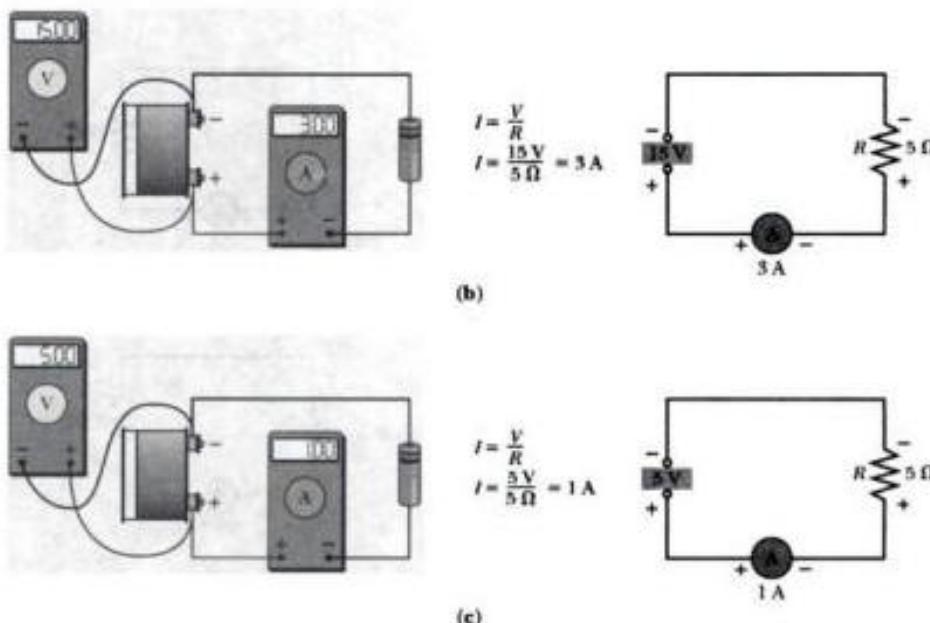


图 3-1 (续)

3.1.2 电压为常量时电流和电阻的关系

在图 3-2(a)里, 电压为 10V, 电阻值为 10Ω , 因此电流为 1A。

在图 3-1(a)里, 电阻值为 5Ω , 电压为 10V, 电流为 2A。即电压保持在 10V 时, 电阻值增大到 10Ω , 电流减小到 1A。换句话说, 当电压不变而电阻增加时, 电流按比例下降, 表明电流和电阻之间有反比关系。电流与电阻成反比关系。

在图 3-2(b)中, 您可以看到电压仍然是 10V, 但是电阻减少到 5Ω , 电流成比例地增加。同理在图 3-2(c)中, 显然电阻值增加了, 在电压不变时, 电流相应地减小。

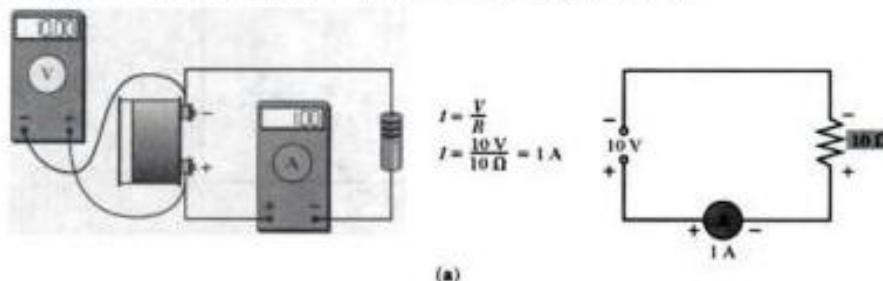


图 3-2 欧姆定律 电压不变时电流和电阻的关系

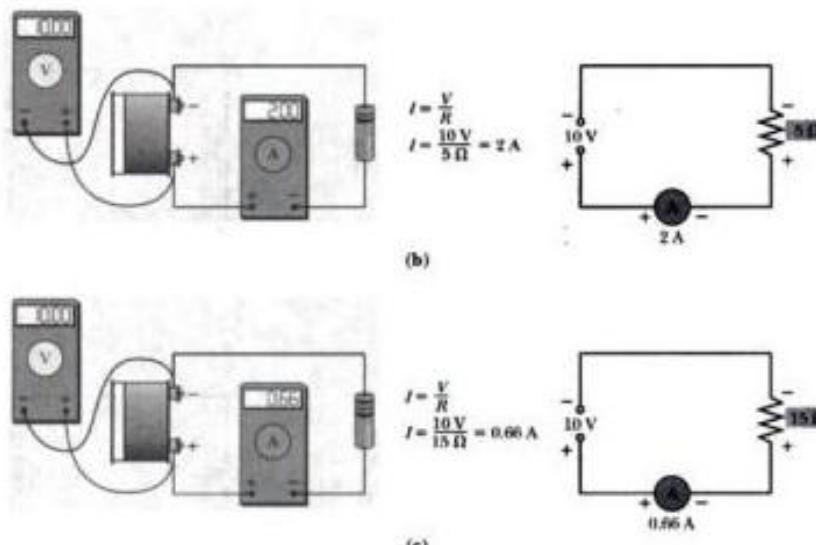


图 3-2 (续)

电压和电流之间的正比关系和电流与电阻之间的反比关系可以用图 3-3 演示的欧姆定律公式来反应。

如果 $\frac{V}{R} \uparrow$	那么 $I \uparrow$	I 与 V 成正比。如果 R 不变， V 加倍， I 加倍。
如果 $\frac{V}{R} \downarrow$	那么 $I \downarrow$	I 与 V 成正比。如果 R 不变， V 减半， I 减半

(a)

如果 $\frac{I}{R} \uparrow$	那么 $V \uparrow$	I 与 R 成反比。如果 I 不变， R 加倍， V 减半
如果 $\frac{I}{R} \downarrow$	那么 $V \downarrow$	I 与 R 成反比。如果 I 不变， R 减半， V 加倍

(b)

图 3-3 电压、电流和电阻之间的正比和反比关系

现在您已经理解这些例子，您可以利用欧姆定律来做以下练习题。

练习题 1

- 已知电路里电压为 150V，电阻是 10Ω，确定电流是多少？(注：解题时先写出欧姆定律公式，然后代入适当的值进行计算)。

2. 如果在题1中电压减小到75V，而电阻仍然保持在10Ω，此时的电流是多少？
3. 假设题1中的电压和电阻都增大1倍，则(a)电路中电流将如何变化？增大、减小还是不变？(b)应用欧姆定律求得电流值。

建议

解题时应该养成先写下正确公式，然后把参数代入公式，最后求得结果的习惯。此外，如果题目里没有给出参考图，只是用文字描述，应该首先根据描述画出简图，这样对思考大有帮助。

3.2 欧姆定律方程式的三种形式

如何利用公式 $I=V/R$ 来求解 V 和 R 呢？

例：利用欧姆定律的方程求解 V 和 R 。

因为 $I=V/R$ 为了单独得到 V 在等式两边同时乘以电阻 R ，消去分母，有：

$$I \times R = \frac{V}{R} \times R = V$$

$$V = I \times R \quad (1V = 1A \times 1\Omega) \quad (3-2)$$

为了得到 R ，在上式两端同时除以 I ，得到

$$R = \frac{U}{I} \quad (1\Omega = 1\frac{V}{A}) \quad (3-3)$$

图3-4给出了一种记忆上述公式的技巧。

观察所求的参数量(I 、 V 或 R)，并考虑它与另外两个量的关系，记住公式的以下几种正确的形式：



图3-4 欧姆定律的辅助记忆图

总结一下欧姆定律的各种变形如下：

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

$$V = I \times R \text{ 或 } 1V = 1A \times 1\Omega$$

$$R = \frac{U}{I} \text{ 或 } 1\Omega = 1\frac{\text{V}}{\text{A}}$$

这样如果知道了三者之中任何两个量，可以运用适当的公式得到第三个未知量的值，这是最基本的能力。

在实际的电子领域，您通常不会只遇到 V、A 或 Ω 这样基本的单位，您将经常与 mV、mA、μA、kΩ 和 MΩ 这样的单位打交道。观察图 3-5，再复习一下有关十进制数、10 的幂和各种电子前缀术语之间的关系。在前面一章我们介绍过，采用前缀是为了更方便地表述各种非常小或者非常大的电子量。本章我们希望您能够正确使用 10 的幂这样的数学工具来解决实际的电路问题。

数 值	10 的 幂	术 语	举 例
0.000000000001	10^{-12}	皮	pA ($1 \times 10^{-12} \text{ A}$)
0.000000001	10^{-9}	纳	nA ($1 \times 10^{-9} \text{ A}$)
0.000001	10^{-6}	微毫	μA ($1 \times 10^{-6} \text{ A}$)
0.001	10^{-3}	千	mA ($1 \times 10^{-3} \text{ A}$)
1,000	10^3	千	kΩ ($1 \times 10^3 \text{ Ω}$)
1,000,000	10^6	兆	MΩ ($1 \times 10^6 \text{ Ω}$)
1,000,000,000	10^9	吉	GHz ($1 \times 10^9 \text{ Hz}$)
1,000,000,000,000	10^{12}	太	THz ($1 \times 10^{12} \text{ Hz}$)

图 3-5 10 的幂与各种电子术语

例：十进制数 250 可以用 10 的幂表示成下面形式：

$$250 \times 10^0,$$

$$25 \times 10^1,$$

$$2.5 \times 10^2,$$

$$0.25 \times 10^3, \text{ 等等。}$$

练习题 2

用 10 的幂的形式表示下列十进制数字

1. 25,000 等于 25×10 的几次幂？
2. 12,335 等于 1.2335×10 的几次幂？
3. 0.100 等于 1.0×10 的几次幂？
4. 0.0015 等于 1.5×10 的几次幂？

把下列数字转化成十进制数字

- | | |
|----------------------|------------------------|
| 5. 235×10^2 | 6. 0.001×10^6 |
| 7. 10×10^3 | 8. 15×10^{-3} |

使用 **EE** 或 **EXP** 键

现在我们介绍在科学计算器上如何用 **EE** 或 **EXP** 键输入 10 的幂，如图 3-6 所示。



图 3-6 一个常见科学计算器的照片

1. 在计算器的键盘上输入数字。
2. 按下 **EE** 或 **EXP** 键。
3. 您想输入 10 的几次方，就输入对应的数字。
4. 现在按下 **=** 键。

然后您可以看到相应的十进制数形式。

例：求 235×10^3 和 235×10^{-2} 的值。

1. 输入 235，按下 **EE** 或 **EXP**，然后输入 3，**=**。计算器显示出 235×10^3 等于 235000。

如果您要输入 10 的负数次幂，只需在输入 10 的幂之前先按一下负号即可。

2. 输入 235，按下 **EE** 或 **EXP**，加/减键 **+/-** 或 **±**，输入 2，**=**。

结果显示 235×10^{-2} 等于 2.35。现在您继续做以下练习。

练习题 3

用计算器和 **EE** 或 **EXP** 键求出下列数的十进制值。

1. 1.456 乘以 10 的 6 次幂。
2. 333 乘以 10 的 4 次幂。
3. 1 500 000 乘以 10 的 -6 次幂。
4. 10 乘以 10 的 5 次幂。

3.3 公制前缀和 10 的幂的应用举例

假设电路里电阻值为 $10\,000\Omega$ ，外接电压为 150V，则电流是多少？

$$I = \frac{V}{R} = \frac{150V}{10000\Omega} (\text{或 } \frac{150V}{10k\Omega}) = 0.015 (\text{或 } 15mA)$$

上式说明当以 V 为单位的电压除以以 $k\Omega$ 为单位的电阻时，得到的电流是以 mA 为单位的。这个概念很容易记忆而且以后将常常用到。

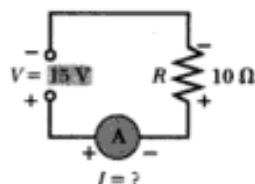
然而，如果我们采用 10 的幂进行计算将会怎样呢？

$$I = \frac{V}{R} = \frac{150V}{10 \times 10^3 \Omega} = 15 \times 10^{-3} A = 15 \text{ mA}$$

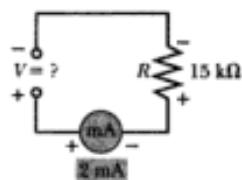
现在做些练习，看看您是否能正确运用欧姆定律、公制前缀和 10 的幂。

课间测试 1

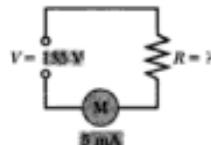
1. 参考下面电路，确定电流 = ____ A，或 ____ mA。



2. 参考下面电路，确定电路的供电电压 ____ V。



3. 参考下面电路，确定电阻 = ____ Ω，或 ____ kΩ。



4. a. 在题 1 里如果 R 增加而 V 不变，那么 I 是增加、减少还是不变？
 b. 在题 2 里如果 I 增加而 R 不变，那么电压是升高、降低还是不变？
 c. 如果在题 3 里 I 加倍而 V 不变，那么 R 发生了什么变化？

3.4 电流方向

3.4.1 电子流动方向

在第 1 章里我们曾简要介绍过在电路中，带负电荷的电子总是向着电势为正极性的点的方向运动。当给定电路框图时，通常会在电路图上用箭头表明电路里电流的方向。如图 3-7 所示的电路里，箭头的方向用来表示电子运动的方向。这与电流由电子运动形成的概念是一致的，由于电子带负电荷，它们被电路里相对负的点排斥，被电路里相对正的点吸引。因此电子的流动总是从负到正，经过元件或者外部电路，最终到达电压源。

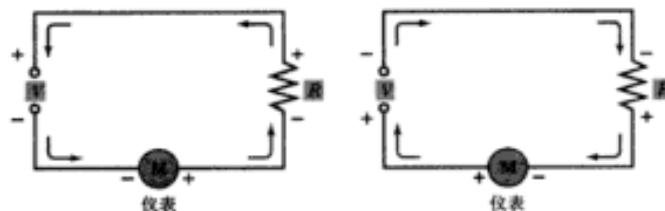


图 3-7 用箭头表示电流运动方向

3.4.2 习用电流方向

在电子学的最初发展阶段，人们还未用电子运动来解释电流，有一种理论认为电流是由电路里的正电荷形成的，显然这种理论认为电流从正到负的方向流动。这种方法表示出的电流方向与电子运动表示的电流方向不同，是一种习惯上的表示法，称为习用电流方向。图 3-8 表示电路里如何表示这种电流方向。

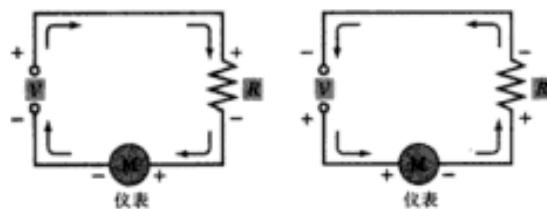


图 3-8 箭头表示习用电流

由于许多工程上的公式和思维方式都已经在电子理论被接受之前就已经产生了，因此各种电子学著作都采用这种习用电流方向来表示电流方向，这种方式也被用来创建各种电子元件的符号，因此，希望您能了解什么是“习用电流”。您应该知道无论电路分析中采用电子流动方向还是习用电流方向，都可以得到相同的结果。但是这本书将采用如图 3-7 所示的电子流动方向作为电流方向。

3.5 极性和电压

本书前面已经提到极性(polarity)的概念，即电路或元件上某一点相对于其他点更正或更负。相对负的点用负号标记，相对正的点用正号标记，这种标记表明在这两点之间存在一定的电势差或者电压。

为了在电路图的元件两端标记其电压的极性，可以首先观察电流的方向，然后将电流流入的一端标为负极，则另一端为正极。这种方法对电路里除了电压源以外的任何一个元件都适用。对于电压源，它的负极是电子流出的源，它的正极是电子经过电路最终返回的地方，如图 3-9 所示。

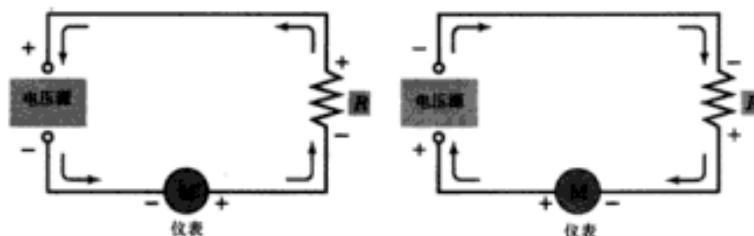


图 3-9 电压极性

3.6 直流电源和交流电源的电流方向

到目前为止我们只介绍了直流电源和与直流电源连接的电路中的电流方向，现在我们开始介绍另一种类型的电压和电流：交流。交流意味着方向交替的电流。我们家庭里从电力公司得到的供电就是交流电。交流电源提供的电压是周期性变化的，其输出波形称为正弦波，如图 3-10(a)所示。每当波形开始重复时就形成正弦波的一个周期。例如在图 3-10(a)中，电压从 0 开始，经过最大值又返回到 0，然后电压源的输出电压极性改变方向，输出电压逐渐达到负的最大点，然后返回到 0。从这点开始重复进行以上过程，即开始第二个周期，如图 3-10(b)所示。

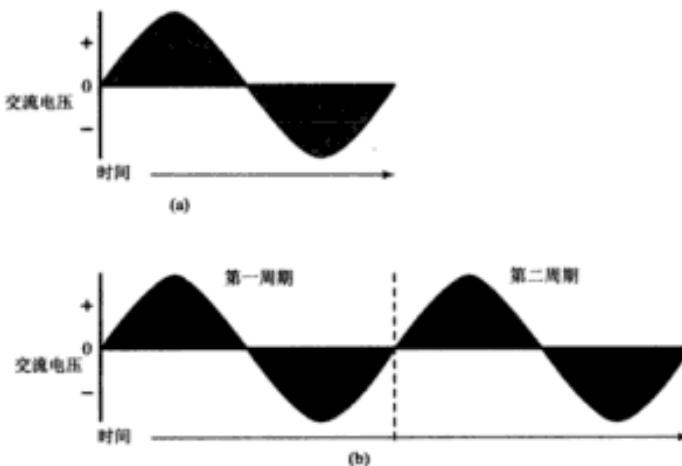


图 3-10 交流正弦波的表示

整个周期内的一半波形叫做“半周”，因此在图 3-10(a)所示的交流波形里有两个半周，如图 3-10(a)所示，一个周期由一个正半周和一个负半周构成。在下面的内容里您会继续深入学习交流波形，现在您只需要了解直流和交流的差别即可。

图 3-11 比较了直流和交流电压的不同。直流电压一直维持在一个极性上，即电路里的电流方向始终不变，如图 3-11(a)所示。在交流电路里，您将看到在交流波形的一个半周里，电路里电流方向保持不变，如图 3-11(b)所示。(同时从电源的负极出发流经整个外部电路最后回到电

源的正极，这和直流电路是一样的。)显然，当电源改变极性时(即进入另一个半周)，电子运动方向将改变，但是电子仍然从电源的负极出发流经外部电路返回电源的正极，见图 3-11(c)。这意味着外加交流电源的电压极性决定了电路里电子运动的方向。每当电源极性发生改变时电路里的电流方向也随之改变，如图 3-11(b)和图 3-11(c)所示。

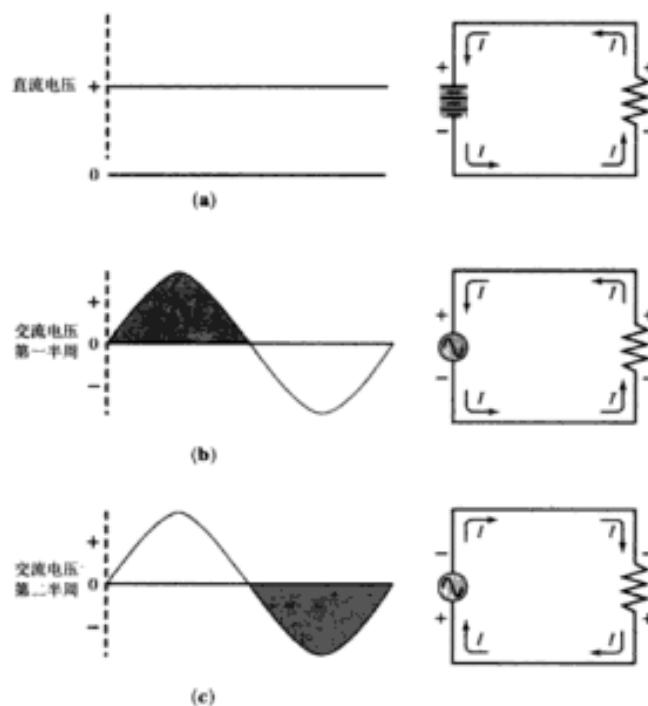


图 3-11 直流与交流的电压、电流比较

3.7 功、能量和功率

功(work)是能量的消耗，能量(energy)是做功的前提条件，功率(power)反应能量利用的效率。下面是一个计算机械功的公式：

$$(功\text{英尺磅力}) = \text{力(磅力)} \times \text{距离(英尺)} \quad (3-4)$$

机械功的基本单位是英尺磅达，在海平面上，32.16 英尺磅达等于 1 英尺磅力。机械功率是做功的效率，例如 1 马力相当于 550 英尺磅力/秒。

电能可以用来做电功。电能的基本单位是焦耳(J)，对于电子应用，1J 定义为在具有 1V 的电势差的两点之间移动 1C 的电荷所消耗的能量。

电功率表示电功的效率。电功采用瓦特作为单位，这是为了纪念科学家瓦特(James Watt)而命名的，瓦特的缩写是 W。1W 的电功率定义为每秒钟消耗 1J 的能量。由于焦耳与能量有关，

而能量又与力和距离的乘积有关系，因此经过换算可以得出 1 马力的机械功相当于 746W。我们已经说过，以 W 为单位的电功代表了消耗电能做电功的时间比率，例如驱使电流流过电阻需要做电功。功率和电能之间具有下面关系：

$$\text{功率}(W) = \frac{\text{能量}(J)}{\text{时间}(S)} \quad (3-5)$$

例：如果 10 秒钟内消耗了 100J 的能量，则功率是多少？

$$P = \frac{100J}{10S} = 10W$$

练习题 4

1. 如果电路里 2s 内消耗了 25J 的能量，则功率是多少 w?
2. 如果电路里 100s 内消耗了 1J 的能量，则功率是多少 mw?

3.8 测量电能消耗

知道了在一段时间消耗的功率，我们可以确定所消耗的全部电能。我们已经知道功和能量的符号都是 W，此外，SI 为两者规定的单位都是焦耳(J)(注意：功或能量的表示符号都是 W，功率的单位瓦特的缩写也是 W，注意不要混淆)。

电力公司按照一段时间内您家里消耗的电能进行收费，一般情况下他们根据您家里每月使用电能的千瓦数收取相应费用。如果您使用了 1kW 电，则说明您在 1 个小时内使用了 1000W。如果您连续 1 个小时使用 10 个 100W 的灯泡，则一共消耗电能为 1kW，如果您连续两个小时使用 1 个 500W 的灯泡，也同样消耗 1kW 的电能，等等。

$$\text{能量}(Wh) = \text{功率}(W) \times \text{时间}(h) \quad (3-6)$$

其中时间可以用秒或小时来计算，当采用秒来计算时间时，能量消耗的单位用瓦特秒(Ws)表示；当时间用小时计算时，采用单位瓦特时(Wh)计算能量。一般为了方便表示大额电量(例如电力公司)都采用千瓦时(kWh)。

例：

1. 功耗为 200W，工作 3 小时，则消耗电能 600 Wh。

$$W = P \times T = 200 \times 3 = 600 \text{ Wh} = 0.6 \text{ kWh}$$

2. 如果功率为 450W，连续使用 9 个小时，则耗电多少？

$$W = P \times T = 450 \times 9 = 4050 \text{ Wh} = 4.05 \text{ kWh}$$

练习题 5

一个 250W 的电灯泡如果连续亮 8 个小时耗电多少 KW?

3.8.1 基本功率公式

我们已经知道：

1J 的能量相当于在具有 1V 的电势差的两点之间移动 1C 的电荷所消耗的能量。

1A 电流相当于每秒钟移动 1C 的电子。

1W 相当于每秒钟做 1J 的功。

因此，1J 的能量相当于 1A 乘以 1V，即

$$\text{功率(瓦特)} = \text{电压(伏特)} \times \text{电流(安培)}$$

$$P = V \times I \quad (3-7)$$

例：如果电路里电流为 50mA，电压源为 10V，则电路的功耗是多少？利用功率的基本公式有：

$$P = V \times I = 10 \text{ V} \times 50 \text{ mA} = 10 \times 50 \times 10^{-3} \text{ W} = 500 \times 10^{-3} \text{ W} \text{ 或 } 500 \text{ mW}$$

练习题 6

1. 如果电路的供电电压为 150V，电路电阻将电流限制在 10mA，则电路的功耗是多少？
2. 如果题 1 里的电路电压不变，但是电阻加倍，则(a)电流如何变化？(b)功耗如何变化？

课间测试 2

1. 电流开始于电源的____(正、负)极，流过外部电路，最后回到电源的____(正、负)极。
2. 习用电流开始于电源的____(正、负)极，流过外部电路，最后回到电源的____(正、负)极。
3. 本书采用____(电子、习用)电流方向。
4. 直流和交流的区别在于：直流电路的电流流动方向____，而交流电路里电流会随着交流波形的正负半周交替而____方向。
5. 功是能量的____，能量是做____的前提条件，或者能量被消耗用来做____。功率反应能量利用的____。
7. 能量=功率×时间，电力公司对用户收费一般采用____作为度量单位。

3.8.2 基本功率公式的变形

正如欧姆定律可以被变形，功率的公式 $P = V \times I$ 也一样，我们可以把它变为 $V = P/I$ ，或者 $I = P/V$ 并且可以用图 3-12 来辅助记忆。



通过提供参数，可以得到正确的公式。
例如，如果知道了 V 和 I 的值，功率的值等于 V 乘以 I 。如果知道了功率和电流， P 除以 I 就可以得到电压 V 。

图 3-12 功率公式辅助记忆图

通过欧姆定律和基本功率公式可以得到更多的功率公式。例如由欧姆定律 $V=I \times R$, 和 $P=V \times I$, 可以得到 $P=I^2 \times R$ 或 $I^2 R$ 。

$$P=I^2 R \quad (3-8)$$

按照同样方法, 可以得到下面的公式

$$\begin{aligned} P &= V^2 / R, \quad P=VI, \quad P=V \times \left(\frac{V}{R}\right) \\ P &= V^2 / R \end{aligned} \quad (3-9)$$

上面这个公式只需要把欧姆定律里的 I 代入功率公式 $P=V \times I$ 里即可。为了得到需要的电子量, 上面的功率公式都可以采用移项或消去技巧来进行适当变形。

$$\begin{aligned} P &= VI, \quad I=P/V, \quad V=P/I \\ P &= I^2 R, \quad I=\sqrt{\frac{P}{R}}, \quad R=P/I^2 \\ P &= V^2 / R, \quad V=\sqrt{PR}, \quad R=V^2 / P \end{aligned}$$

3.9 欧姆定律和功率公式常用形式

最重要的几个公式是

欧姆定律: $I=V/R$, $V=IR$, $R=V/I$

功率公式: $P=VI$, $P=I^2 R$, $P=V^2 / R$

通过理解熟悉这些公式和在解决实际问题的过程中不断运用这些公式, 您会很快成为一个好的工程师。

下面我们不仅仅停留在阅读这些公式, 还希望您能利用这些公式来解决实际问题。按照下面例题所示的方法和步骤来解决问题, 您将能在今后的学习中独立解决困难。

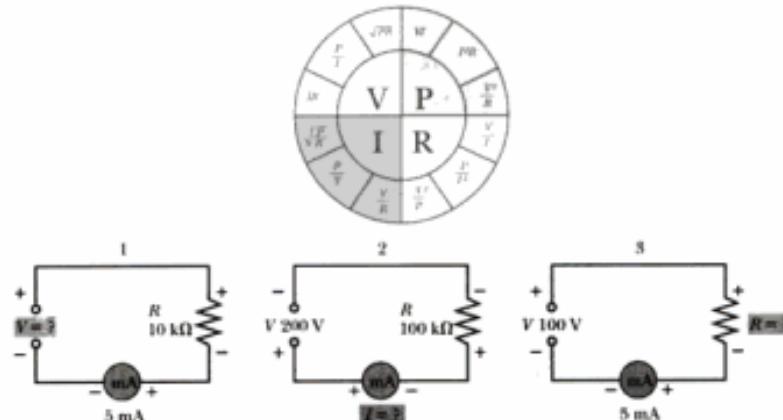


图 3-13 欧姆定律例题

例：参考图 3-13，

1. 图 3-13 中电路 1 的电压为多少？

根据欧姆定律有 $V=I \times R$ ，代入电流和电压值，得到

$$V = 5 \times 10^{-3} \text{ A} \times 10 \times 10^3 \Omega = 50 \text{ V}$$

记住：当 10 的幂相乘的时候，其指数可以相加，因此 10^{-3} 和 10^3 相乘得到 10^0 ，等于 1。

此外，前缀毫(m)和前缀千(k)相乘得到基本单位，例如 $\text{mA} \times \text{k}\Omega = \text{V}$

2. 求图 3-13 中电路 2 中的电流值。

根据欧姆定律有 $I = V/R$ ，代入电压和电阻值有

$$I = \frac{200\text{V}}{100\text{k}\Omega} = \frac{200 \times 10^0 \text{V}}{100 \times 10^3 \Omega} = 2 \times 10^{-3} \text{A} = 2 \text{ mA}$$

注意：

当除以 10 的幂时，只需要减去其指数即可。电压实际上可以写成 200×10^0 ，因此 10^0 除以 10^3 得到 10^{-3} 。此外，基本单位除以 k 前缀单位得到前缀为 m 的单位，在本例里，V/KΩ 结果是 mA.

3. 求图 3-13 中电路 3 中 R 的电阻值。

根据欧姆定律有 $R = V/I$ ，代入 V 和 I 的值，有

$$R = \frac{100\text{V}}{5\text{mA}} = \frac{100\text{V}}{5 \times 10^{-3} \text{A}} = 20\text{k}\Omega$$

练习题 7

1. 求图 3-14 电路 1 中的电压。
2. 求图 3-14 电路 2 中的电流。
3. 求图 3-14 电路 3 中的电阻。

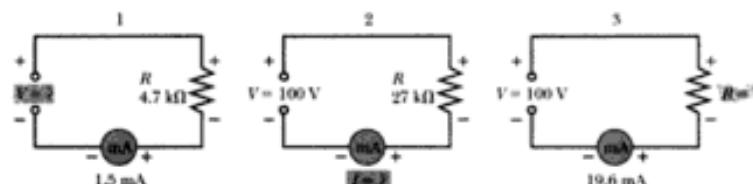


图 3-14 欧姆定律的实际问题

因此，当采用欧姆定律和功率公式解决问题时应该按照下面步骤：

1. 观察电路确定已知量和未知量。
2. 选择并写出适当的公式。
3. 在公式里代入已知量。
4. 采用公制单位来代替大单位和小单位。
5. 记住欧姆定律的各种变形。

用欧姆定律和功率公式解题

工程师们经常需要把欧姆定律和功率公式结合起来共同使用以求得感兴趣的电子量，下面的例子为解决此类问题提供了方法。

例：参考图 3-15，求出未知值。

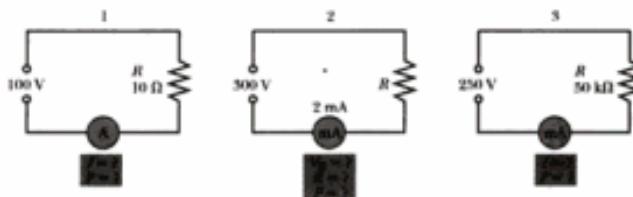


图 3-15 用欧姆定律和功率公式解决问题

1. 在图 3-15 的电路 1 里，采用哪一个公式最方便？由于已经知道 V 和 R ，则

$$I = V/R = 100 \text{ V}/10 \Omega = 10 \text{ A}$$

知道了电流，现在可以求剩下的未知量。

$$P = V \times I = 100 \text{ V} \times 10 \text{ A} = 1000 \text{ W 或 } 1 \text{ kW}$$

同时，由于 V 、 I 和 R 都已知，您也可以采用其他功率公式。

2. 在图 3-15 的电路 2 中，首先用哪一个公式呢？在这里电压和电流是已知量，但是电阻值未知。假设电流表并没有分担很可观的电压降，可以假设所有的电压都加在电阻两端，先求功率。在很多问题里，您可以从不止一点开始，在这里我们从功率公式开始解决问题。

$$P = V \times I = 300 \text{ V} \times 2 \times 10^{-3} \text{ A} = 600 \times 10^{-3} \text{ W 或 } 600 \text{ mW}$$

现在可以求解电阻值 R ，由于电阻上电压为 300V，则

$$R = \frac{V}{I} = \frac{300 \text{ V}}{2 \times 10^{-3} \text{ A}} = 150 \times 10^3 \Omega \text{ 或 } 150 \text{ k}\Omega$$

3. 在图 3-15 的电路 3 里，因为已知 V 和 R ，最好先从电流 I 入手，

$$I = \frac{V}{R} = \frac{250 \text{ V}}{50 \text{ k}\Omega} = \frac{250 \text{ V}}{50 \times 10^3 \Omega} = 5 \times 10^{-3} \text{ A 或 } 5 \text{ mA}$$

现在电压和电流都已经知道，则功率

$$P = V \times I = 250 \text{ V} \times 5 \times 10^{-3} \text{ A} = 1.25 \text{ W}$$

总结一下，现在您应该知道：

1. 在给定电路图上知道什么是未知量。
2. 当可以从多方面入手时，最好从选择最简单的公式开始。
3. 如何共同使用欧姆定律和功率公式。

练习题 8

试着运用有关公式解决图 3-16 中的问题，不要看前面的内容。如果遇到困难，请花几分钟时间复习一些本章前面的内容，查阅需要的公式和指导。

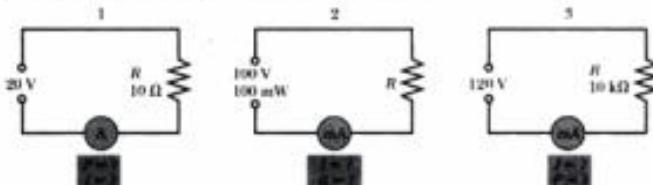


图 3-16 练习题 8 的电路图

3.10 知识点汇总

- 电流与电压成正比，与电阻成反比，用欧姆定律可以表示为 $I=V/R$ 。
- 如果公式里其他参数已知，采用移项技巧可以将公式变形来求得未知量。例如欧姆定律也可以变形为 $V=I \times R$ 和 $R=V/I$ 。
- 当公式里有很大或很小的数时，采用 10 的幂表示非常方便，这时有关指数的运算规则同样适用。
- 科学计算器可以简化电子问题的运算，使用计算器的，EE 和 EXP 键非常有用。
- 解决电子电路问题时的两个好习惯是：(1) 如果题中没有给出电路图，则自己画出电路框图。(2) 写出可能会用到的有关公式，然后代入有关值求解。
- 在电压源以外的电路里，电子的运动方向是从电源的负极出发，经过电路最后返回电源正极。一般在电路图上用箭头表明电流方向。在这本书里我们把电子运动的方向作为标准。
- 一些工程书里采用习用电流，习用电流从电源的正极流出，经过电路回到电源的负极。
- 当在电路里的元件两端标注电压极性时，电子流入的方向标为负极，电子流出的方向是正极。
- 电功率是利用电能完成电功的效率。电路或元件的功率一般以热的形式消耗。1W 的功率相当于每秒消耗 1J 的电能。
- 1J 的能量定义为具有 1V 的电势差的两点之间移动 1C 的电荷所消耗的能量。
- 计算功率或功耗的常用公式有： $P=V \times I$, $P=I^2 R$, $P=V^2/R$ 。
- 电能的使用量计算是用功率乘以使用时间， $W=P \times T$ 。计算电量的单位有瓦特秒(Ws)、瓦特时(Wh)，对于较多的电量用千瓦时(kWh)来度量。

公式与计算器输入顺序示例

公式(3-1)

$$I = \frac{V}{R} \quad (\text{利用欧姆定律求电流})$$

输入顺序：电压值，[÷]，电阻值，[=]

公式(3-2)

$$V = I \times R \quad (\text{利用欧姆定律求电压})$$

输入顺序：电流值，[×]，电阻值，[=]

公式(3-3) $R = V / I$ (利用欧姆定律求电阻值)

输入顺序: 电压值, \boxed{A} , 电流值, \boxed{B}

公式(3-4) 功(in p) = 力(p)×距离(in)(求功, 单位为 in p)
力, \boxed{A} , 距离, \boxed{B}

公式(3-5) 功率(瓦特)= $\frac{\text{能量}(J)}{\text{时间}(s)}$ (求功, 率单位为 W)

输入顺序: 能量, \boxed{A} , 时间, \boxed{B}

公式(3-6) 能量(瓦时)=功率(W)×时间(h)(求消耗能量的 Wh)

输入顺序: 功率, \boxed{A} , 时间, \boxed{B}

公式(3-7) $P=V \times I$ (求功率, 单位为 W)

公式(3-8) $P=I^2 R$ (单位为 W)

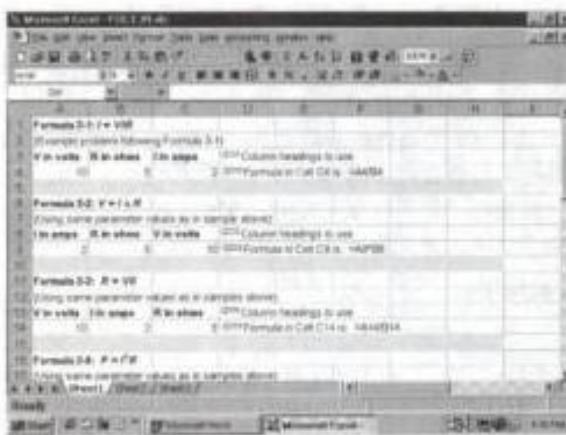
输入顺序: 电压, \boxed{A} , 电流, \boxed{B}

公式(3-9) $P=V^2 / R$ (求功率, 单位为 W)

输入顺序: 电压, \boxed{A} , 电流, \boxed{B}

使用 Excel

欧姆定律和功率的公式(参考 Excel 文件: FOE03_01.xls)。



Formula 3-1: $I = V/R$	Using same parameters as in examples above.
Voltage (V) = 120	Current (I) = 10
Power (P) = 1200	Resistance (R) = 12
Resistance (R) = 12	Power (P) = 1200
Current (I) = 10	Voltage (V) = 120

FOE3_01.xls

警告

一旦在表格里输入公式，无需重复输入。解决新问题时只需采用该公式输入新的参数数据。

参考图 3-1(a), (b) 和(c)，利用公式(3-1)的电子数据表格来计算每种情况下的电流 I ，并与表 FOE3_01.xls 中的结果比较。

参考图 3-16 的电路 1，利用公式(3-1)的电子数据表格来计算电流 I ，然后利用公式(3-9)的电子数据表格来计算功率 P ，并把结果与答案附录中练习题 8 的答案比较。

复习题

1. 写出以下方程的 3 种形式。
 - a. 欧姆定律方程
 - b. 电功率方程
2. 把下面的数字写成 1 到 10 之间的数字乘以 10 的幂的形式。
 - a. 33456
 - b. 25
 - c. 1,055000
 - d. 10
3. 把下面的数字写成适当数字乘以 10 的 3 次幂的形式
 - a. 5100
 - b. 47000
 - c. 0.001
 - d. 39
4. 给出功的定义。
5. 给出能量的定义。
6. 给出功率定义。
7. 功用什么单位度量？
8. 能量用什么单位度量？
9. 功率用什么单位度量？
10. 用您自己的话说说下面电子参数之间的关系。
 - a. 功率和电流(给定电阻值)
 - b. 电压和电流(给定电阻值)
 - c. 能量和功率(给定时间)

思考题

1. 如果电路里电压加倍，而电阻减半，则新电流和原来电流有什么关系？

2. 如果电路里电流变为原来的 3 倍，而电阻不变，则电路的功耗有什么变化？
3. a. 画一个电路原理图，要求包括电压源、安培表和电阻。
b. 假设电压源为 30 V，安培表示数为 2 mA，计算电路的电阻和电路功耗。
c. 标出所有的电子参数，标出电阻和电压源两端的极性以及电路中电流方向。

参考图 3-17，回答 4~21 题

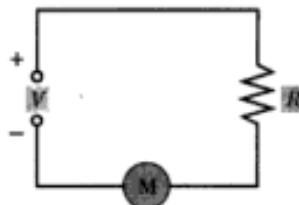


图 3-17 思考题 3-17 电路图

4. 在图 3-17 中，设电压为 50V，电阻值为 $33\text{k}\Omega$ ，则仪表 M 的示数是多少？
5. 如果图 3-17 里的电流表示数是 3mA，电阻值是 $12\text{k}\Omega$ ，则外加电压是多少？
6. 如果题 5 中的电压源增加 1 倍，则下列量是增加、减小还是不变？
 - a. V 将 ____。
 - b. R 将 ____。
 - c. I 将 ____。
7. 如果图 3-17 里的电流是 50mA，而电压是 41V，则电阻值是多少？
8. 在图 3-17 中，如果电路功耗为 100 mW，而电流是 12.5 mA，则电源电压是多少？
9. 在图 3-17 中，如果 10Ω 的电阻上消耗的功耗为 100 W，则电流是多少？
10. 在图 3-17 中，如果电流增加原来的 $1/3$ ，而且原来的功耗是 180 W，则新的功耗是多少？
11. 假设图 3-17 中的电压是 100 V，需要多大的电阻才能使电路电流为 8.5 mA。
12. 在图 3-17 中，假设原来的电压是 100V，电阻值为 $25\text{k}\Omega$ ，如果电压增大一倍电阻增大三倍则电流如何变化？
13. 如果图 3-17 中的电压和电阻都增大一倍，则电路功耗如何变化？增大、减小还是不变？
14. 在图 3-17 的电路中如果电压为 150 V，电阻为 $8\text{k}\Omega$ ，则电流是多少？
15. 题 14 里的功耗是多少？
16. 对于题 14 里的电路，工作 3 个小时消耗多少 W 电量？
17. 参考图 3-17，如果电压为 250 V，电阻为 $12\text{k}\Omega$ ，则电流是多少？
18. 题 17 里的功耗是多少？
19. 题 17 里的电路工作 6.5 个小时消耗多少 W 的能量？
20. 在图 3-17 里，如果电压为 100 V，功耗是 50 mW，电阻值是多少？
21. 在图 3-17 里，假设功耗是 100 mW，电阻 R 为 $10\text{k}\Omega$ ，则外加电压是多少？
22. 画一个包括一个电源、一个电阻和一个安培表的电路图。设功耗为 1000W，电阻值 10Ω ，则利用公式 $P=I^2 R$ 来求电流 I 的大小。
23. 计算题 22 里的电压。
24. 在题 22 的图中标出所有的参数并标明电流方向和每一个元件上电压极性。

25. 利用 10 的幂改写下列值。

- $\frac{10^7 \times 10^{-4}}{10^5 \times 10^2 \times 10^{-2}}$ 等于多少?
- $10^3 \times 10^5 \times 10^6 \times 10^{-2}$ 等于 10 的几次方?
- 计算 $(7.53 \times 10^4) + (8.15 \times 10^3) + (225 \times 10^1)$
- 计算 $(6.25 \times 10^3) - (0.836 \times 10^2)$

分析题

- 当您想在科学计算器上输入一个数乘以 10 的幂的时候, **EE** 或 **EXP** 键有什么用?
- 如果按照 222, **EE** (或 **EXP**), 4 的顺序使用计算器, 则结果是什么?
- 试说明采用直流电源和交流电源时电流有什么区别?
- 用极性解释直流电压和交流电压的区别。
- 与“电子流”不同, “习惯电流”被认为是____(正、负)电荷在电路里流动的方向。
- 3.5 马力相当于多少电功率?
- 给定一个电路, 如果功耗变为原来的 8 倍, 而电阻变为原来的一半, 则电路的供电电压发生了怎样的变化?

建议

不要把电烙铁放在您手臂容易碰到的地方。

建议

当进行电子工作, 使用旋转电机或电动工具时不要佩戴首饰。

能力设计实验索引表

实验手册中建议的与本章内容有关的能力设计实验包括:

章节标题	能力设计实验题目	实验编号
3.1.1 电阻为常量时电压和电流的关系	R 为常数时 I 和 V 的关系 (欧姆定律)	5
3.1.2 电压为常量时电流和电阻的关系	V 为常数时 I 和 R 的关系 (欧姆定律)	6
3.8.1 基本功率公式	R 为常数时 P 和 V 的关系 (欧姆定律)	7
3.8.2 基本功率公式的变形	R 为常数时 P 和 I 的关系 (欧姆定律)	8

注: 我们建议在做完以上实验后, 学生应该被要求回答实验手册中该实验后面 Summary 部分的问题。

第4章 串联电路

教学大纲

- 4.1 串联电路(series circuit)的定义和特性
- 4.2 串联电路的电阻
- 4.3 串联电路的电压
- 4.4 基尔霍夫电压定律
- 4.5 串联电路的功率
- 4.6 串联电路开路的效应以及故障调试提示
- 4.7 串联电路短路的效应以及故障调试提示
- 4.8 按照规范设计串联电路
- 4.9 特殊应用
- 4.10 逻辑思考以及 SIMPLER 故障调试流程
- 4.11 故障调试技术入门
- 4.12 SIMPLER 故障调试流程
- 4.13 故障调试分级
- 4.14 故障调试的“系统”方法
- 4.15 使用 SIMPLER 流程(元件级故障调试): 单个元件级调试举例

教学目标

通过学习本章您应该能够:

- 1. 定义什么是串联电路。
- 2. 列出串联电路的主要特性。
- 3. 采用两种不同方法计算串联电路的总电阻。
- 4. 计算并解释串联电路的电压分配特点。
- 5. 描述和使用基尔霍夫定律。
- 6. 计算串联电路的功率。
- 7. 描述串联电路中开路的现象。
- 8. 描述串联电路中短路的现象。
- 9. 列出串联电路的故障调试技术。
- 10. 按照给定参数设计串联电路。
- 11. 把电压源串联得到需要的电压。
- 12. 在有参考点时分析电压分配器。

13. 计算所需串联降压电阻的大小。
14. 利用计算机求解电路问题。
15. 利用 SIMPLER 故障调试流程解决具有挑战性的电路问题。

预习指导

在很多系统和子系统中都用到串联电路，常见的有家庭的电灯开关电路和汽车点火开关电路。学习串联电路的特性非常重要，这些知识将有助于分析各种串联电路，无论是单独的电路还是构成复杂电路的一部分。

在学习串联电路时，您将运用欧姆定律和功率公式。此外，基尔霍夫的电压公式将被用来分析串联电路。本章将讨论串联电路开路或短路时的现象，您还会看到电压源在串联电路中如何使用。本章将介绍电压分配器以及参考点的概念。本章最后一部分将介绍一些有用的故障调试技术，这些技术对您的学习以至于以后的工作都具有重要的价值。

本章将介绍一种特殊的故障调试步骤，称为 SIMPLER 步骤。通过解决一些称为“挑战性故障调试”的故障问题，您将掌握 SIMPLER 步骤，这里详细说明如何执行这些步骤以及解决每一个挑战性故障调试。对于每一个挑战性故障调试，在这一章内容的最后都给出了一个解决举例，您可以把自己的思路和这些例子比较一下。

关键词

蓄电池(battery)	基尔霍夫电压定律(kirchhoff's voltage law)
串联分压电阻 (series-dropping resistor)	开路(open circuit)
电池(Cell)串联电路(series circuit)	短路(short circuit)
电压分配(voltage-divider action)	
模块级故障调试方法(block-level troubleshooting approach)	
SIMPLER 故障调试步骤(sIMPLER troubleshooting sequence)	
元件级故障调试方法(component-level troubleshooting approach)。	

4.1 串联电路的定义和特性

所谓串联电路是指任何只有一条电流路径的电路。换句话说，两个或更多的电子元件以及单元依次连接起来使得流过所有连接的元件的电流大小相同。

如图 4-1 所示，电路中电源以外的所有元件都是端与端连接的这种情况被称为二元件串联电路。同时注意到电流只存在一条电流路径，从电源的负极流出，通过外部电路然后返回到电源的正极。

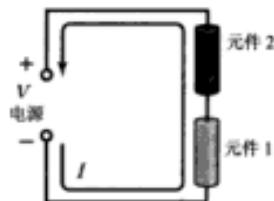


图 4-1 二元件串联电路中元件端与端连接

关键特性

不包含电源，图 4-2 中有多少个元件？答案是 4 个。图 4-3 是一个由 6 个元件构成的串联电路。在所有这些情况下，我们需要记住两个重要特性，即电路中只有一条电流路径并且流过串联电路所有元件的电流相同。作为一个工程师，您会经常用到这一知识。

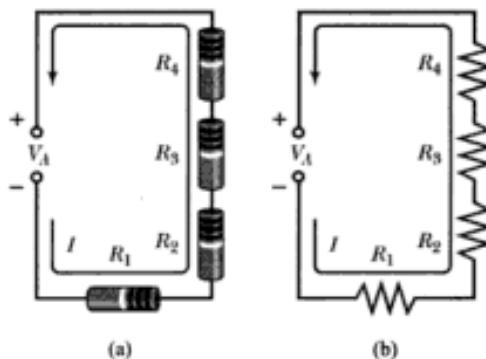


图 4-2 四电阻串联电路

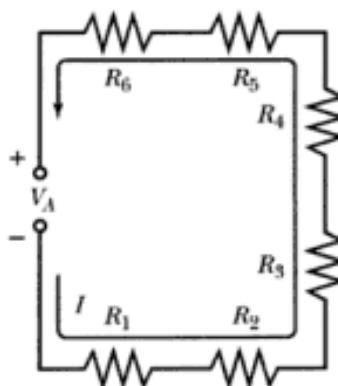


图 4-3 六电阻串联电路

4.2 串联电路的电阻

了解串联电路的关键特性有助于分析这些电路的重要电子量或参数。

首先从串联电路的电阻开始分析串联电路，在前面的内容里介绍过只包含一个电阻的电路，电路的电阻是显而易见的。现在我们在电路中串联两个或多个电阻器，这样对电路的电阻有什么影响呢？

4.2.1 串联电路总电阻公式

由于只有一条电流路径，因此电路的电流必须顺序流过所有的电阻器，于是电路对电流的总电阻等于所有串联电阻的和。也就是说，在串联电路中，总电阻(R_T)等于各串联电阻的和。

$$R_T = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (4-1)$$

R_n 表示最后一个电阻器的电阻值。

例：参考图 4-4，运用上面公式。图中计算了电路的总电阻，即把所有的电阻值相加。

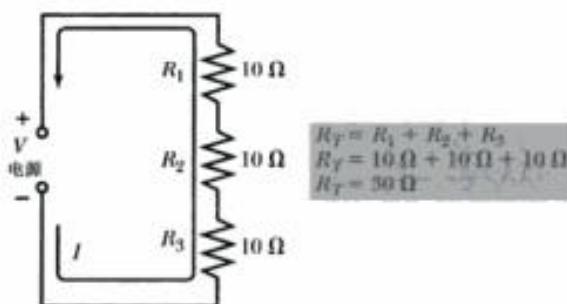


图 4-4 串联电路总电阻公式应用

练习题 1

- 参考图 4-2，如果 R_1 和 R_2 等于 $10 \text{ k}\Omega$, R_3 和 R_4 等于 $27 \text{ k}\Omega$ ，电路的总电阻等于多少？
- 图 4-4 中的电阻值变化为 $R_1=2.7 \text{ k}\Omega$, $R_2=5.1 \text{ k}\Omega$, $R_3=8.2 \text{ k}\Omega$, 电路新的总电阻值是多少？

4.2.2 欧姆定律方法

采用欧姆定律方法也可以求任何电路(包含串联电路)的总电阻。用欧姆定律求电阻的公式是 $R = V/I$ ，为了求总电阻可以把公式写为下面形式：

$$R_T = \frac{V_T}{I_T} \quad (4-2)$$

如果能够得到串联电路的总供电电压值和总电流(在串联电路中电流处处相同)，那么就可以采用欧姆定律 $R_T = V_T/I_T$ 来计算总电阻。

例：如图 4-5 所示，利用欧姆定律求总电阻。答案应该是 30Ω ，这是因为 $60V$ 除以 $2A$ 等于 30Ω 。通过这个答案能否知道每个电阻器的电阻呢？当然不能，这只是反映了电路的总电阻。

例：参考图 4-6，这里也可以利用欧姆定律来计算电路的总电阻，总电阻等于电路的总电压除以总电流：

$$R_T = \frac{V_T}{I_T} = \frac{70V}{2A} = 35\Omega$$

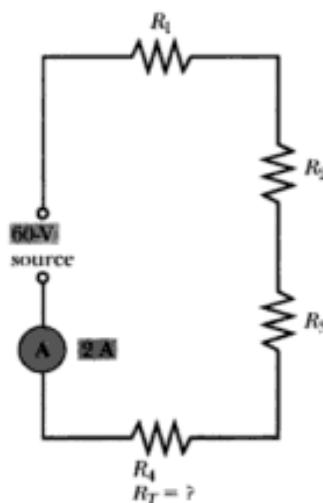
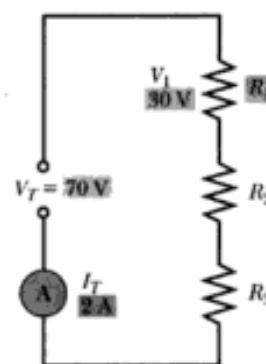
图 4-5 利用欧姆定律求 R_T 

图 4-6 利用欧姆定律求一个电阻值

由于我们已知电阻器 R_1 上的压降并且知道流过串联电路各个元件的电流是一样的，因此我们确定 R_1 的大小。在这里 R_1 等于它两端的电压除以流过它的电流 $2A$ ，即 $30V/2A$ ，因此 $R_1=15\Omega$ 。

练习题 2

1. 如图 4-6 所示，如果 $V_T=100V$, $I_T=1A$, $V_1=47V$, R_1 则等于多少? R_T 又等于多少?
2. 设图 4-6 中电路的参数变为 $V_T=42V$, $I_T=4mA$, 则 R_T 等于多少?
3. 设 V_T 和 I_T 与题 2 中一样，并且 R_2 和 R_3 大小相同， $R_1=2.7k\Omega$ ，求 R_2 等于多少?

我们已经讨论并说明了串联电路的两个重要事实，首先流过串联电路所有元件的电流相同，其次电路总电阻等于所有串联电阻的和，这说明总电阻一定大于任何一个电阻。我们下面要学习串联电路的第三个重要的电气参数：电压。

4.3 串联电路的电压

为了有助于您理解串联电路中的电压分布，请参考图 4-7。

4.3.1 单个元件的电压

由于只有一条电流路径，电流相同，因此每个电阻器(R_1 、 R_2 和 R_3)上的电流必须相同，如图4-7所示。根据欧姆定律我们知道电阻器 R_1 上的压降等于 R_1 乘以电流 I ，即

$$V_1 = I_{R_1} \times R_1 \quad (4-3)$$

例：在这里电流为2mA， R_1 等于100kΩ，因此 $V_1=200V$ ，如图4-7(a)所示。(毫乘以千得到基本单位)。 R_2 上的压降等于2mA乘以27kΩ等于54V，如图4-7(b)所示。由于 $2mA \times 10k\Omega = 20V$ ，因此测量 R_3 的电压表读数应该为20V，如图4-7(c)所示。

练习题3

- 在如图4-7(c)的电路中，如果电压表的示数是30V，则 V_A 、 I_T 、 V_{R_1} 、 V_{R_2} 等于多少？
- 在如图4-7(c)的电路中，如果电压表的示数是25V，则 V_A 、 I_T 、 V_{R_1} 、 V_{R_2} 等于多少？

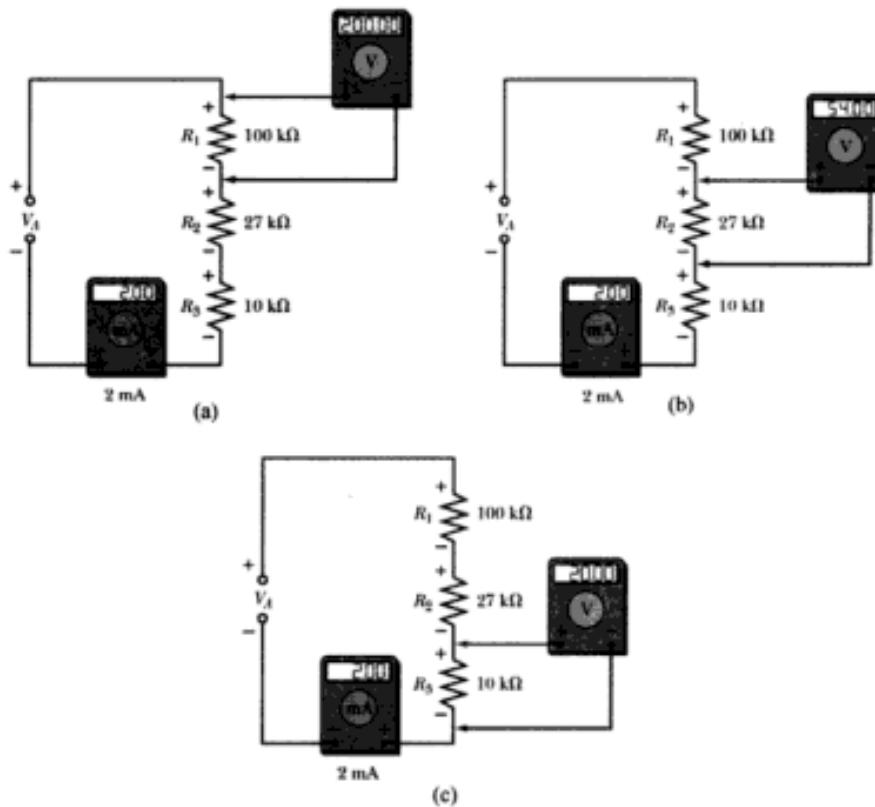


图4-7 串联电路的电压分配

经验提示

可以观测到下列现象：

1. 串联电路中最大的电阻分担的压降最大，最小的电阻分担的压降最小。之所以这样是由于串联电路中处处电流相同，电阻器上的电压等于电流乘以电阻值 R 。
2. 由于流过所有元件的电流相等，所以给定元件上电压所占总电压的百分比等于它的电阻值和电路总电阻的比值。
3. 根据上面的概念，当比较某两个元件的压降时，它们的电压比等于它们电阻值的比值。

根据图 4-7 中电路得到的结果，最大阻值的电阻器上是否分担最大的电压？答案是肯定的， R_1 上电压为 200 V， R_2 上电压为 54 V， R_3 上电压为 20 V。此外，电阻器上电压的比值是否等于它们电阻值的比值呢？这也是符合的， R_1 是 R_3 的 10 倍， V_1 也是 V_3 的 10 倍，同时注意到 R_2 上电压是 R_3 上电压的 2.7 倍，这也是它们电阻的比值。

电压比等于电阻比这一概念可以被用来比较串联电路中任意两个元件上的电压，例如如果 R 的大小和供电电压已知，那么利用比例方法我们可以有可能得到串联电路中每一个元件上的电压。当然也可以首先求电路的总电阻，然后求总电流(V_T / R_T)，最后利用 $I \times R$ 得到每一个元件上的电压，即 $I \times R_1$ 得到 V_1 ， $I \times R_2$ 得到 V_2 。

4.3.2 电压分配规则

您已经了解，在串联电路中某一电阻器两端的电压与它的电阻值和电路中其他电阻器的电阻的相对大小有关。电压分配规则表明在串联电路中，任一给定电阻器两端的电压与它的电阻值和电路的总电阻的比值有关。根据这一规则，您可以无需知道电路的电流就可以得到某一串联电阻器两端的电压，只要我们知道供电电压和电路的总电阻即可。下面就是这一简单公式：

$$V_x = \frac{R_x}{R_T} \times V_T \quad (4-4)$$

其中， V_x =所选电阻器两端的电压。

R_x =所选电阻器的电阻值。

R_T =电路的总电阻值。

V_T =电路的供电电压。

经验提示

利用计算器做这种类型的计算非常方便，您应该养成利用计算器进行大部分计算的习惯(如果在您的目前的学习中提倡这一方法的话)。有些情况下，对于特定的电压和电阻值，您甚至可以通过心算得到结果。事实上这具有启发性。在解决任何问题时，最好学着首先通过心算估算一下大致结果，再利用计算器检验一下。估计是一种有效的学习和实践方法。它经常能使您从令人困惑的结果中摆脱出来，如果不幸得到一个错误的结果，那么估计结果可以告诉您这个结果是不合理的。然后您可以再重现检查一遍并且迅速找到错误。

例：如图 4-8 所示，如何替换上面公式中有关数据得到 R_2 两端的电压(在这里 R_2 即是公式中的 R_x)， R_T 可以按照下面公式计算， $R_T = R_1 + R_2 + R_3 = 2.7 \text{ k}\Omega + 4.7 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega = 17.4 \text{ k}\Omega$ ，因此：

$$V_{R2} = \frac{R_2}{R_T} \times V_T = \frac{4.7\text{k}\Omega}{17.4\text{k}\Omega} \times 50\text{V} = 0.27 \times 50\text{V} = 13.5\text{V}$$

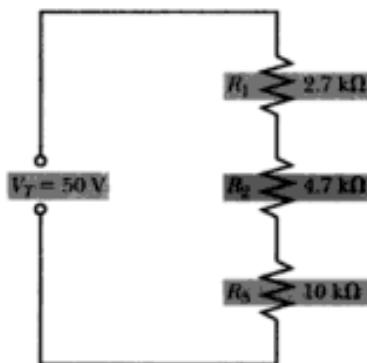


图 4-8 电压分配规则电路举例

练习题 4

现在用电压分配公式求下列问题的答案。

1. 如图 4-8 所示, R_1 两端的压降是多少?
2. 如图 4-8 所示, R_3 两端的压降是多少?
3. 把 R_1 , R_2 和 R_3 两端的电压加起来, 看看是否接近供电电压 50V。

我们可以看出电压分配规则用起来非常方便, 在以后的学习过程中您将经常用到这一知识。

4.3.3 求供电电压

再参考一下图 4-7, 让我们看看有哪些方法可以求电路总的供电电压。其中一种方法是采用欧姆定律, 表示式为 $V_T = I_T \times R_T$, 在这一电路中, 总电压(或供电电压)等于 2mA 乘以 R_T , 可以很容易地得到总电阻等于 $100\text{k}\Omega + 27\text{k}\Omega + 10\text{k}\Omega = 137\text{k}\Omega$, 因此电路的总电压等于 $2\text{mA} \times 137\text{k}\Omega = 274\text{V}$ 。

另外还可以通过求电路中各元件的电压之和的方法求总电压, 就像把所有的电阻加起来得到总电阻一样。这样, $200\text{V} + 54\text{V} + 20\text{V} = 274\text{V}$, 与上面结果相同。这种方法包含了一个重要的概念: 基尔霍夫电压定律。

4.4 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律表明一个单一闭合电路(从电源一端到另一端的任一完全闭合路径)中所有电压的算术和等于供电电压(V_A)。它也表明环路中所有电压, 包括电源或供电电压的代数和一定等于零。也就是说如果观察电路元件的极性、压降大小和电压源的极性、压降大小, 然后

把整个环路的电压代数相加，结果将等于零。出于我们的考虑，一般采用求算术和的方法。采用这种方法可以说明如何用基尔霍夫电压定律来求解未知的电路参数，学习下面内容的时候参考图 4-9。

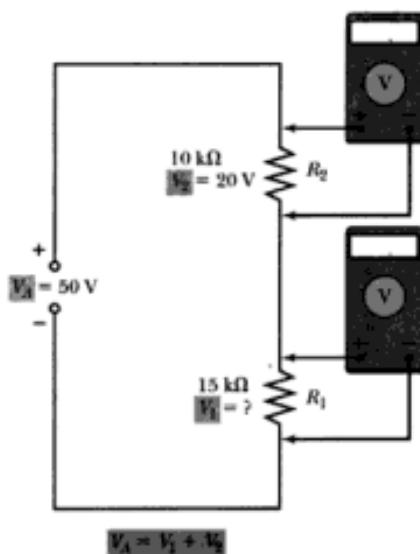


图 4-9 利用基尔霍夫电压定律，其中 $V_A = V_1 + V_2$

例：如果 V_A 为 50 V， V_2 为 20 V，则用基尔霍夫电压定律求电压 V_1 。由于电压的和(不包括电压源)必须等于供电电压，因此：

$$V_A = V_1 + V_2$$

由于我们已知 V_A 和 V_2 ，对公式变换一下可以得到 V_1 ：

$$V_1 = V_A - V_2 = 50V - 20V = 30V$$

如果各元件的压降已知而供电电压未知，那么把各个电压相加可以得到供电电压。在本例中有 $30V + 20V = 50V$ 。这与基尔霍夫电压定律表明的各电压的算术和等于供电电压是一致的。基尔霍夫电压定律能够用来求得串联电路中的未知电压，根据具体情况采用加法或减法。如果电路中有更多的元件：

$$V_T = V_1 + V_2 + \cdots + V_n \quad (4-5)$$

其中 V_n 表示最后一个电压值。

在图 4-10 中，注意闭合电路中的电压极性。为了表示基尔霍夫电压定律中的电压极性，从电源的正极(A 点)开始，经过电阻器再回到电源的负极(B 点)，如果首先遇到的是某一电压的+点，那么就认为该电压是正电压，反之就认为是负电压。在本例中，首先经过的是电压+20V，下一个电压是+30V，然后到电源的负极是-50V，对以上电压相加得到：

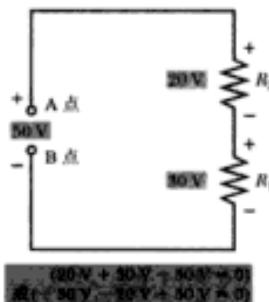


图 4-10 基尔霍夫的代数和举例

$$(20) + (30) + (-50) = 0; \text{ 或 } 20 + 30 - 50 = 0$$

对上面的电路如果按相反的方向考虑，则有

$$(-30) + (-20) + (+50) = 0; \text{ 或 } -30 + -20 + 50 = 0$$

在任何一种情况下，所有压降和整个闭合电路两端的电压的代数和等于零。

同理，给定环路的全部压降等于供电电压的值，与环路的方向无关。

练习题 5

再次参考图 4-10，利用压降极性的概念和基尔霍夫定律求当 V_1 等于 45V 时 V_2 和 V_A 的值。

课间测试 1

- 串联电路的最基本的特点是整个电路的_____相同。
- 串联电路中的总电阻大于电路中的任一_____。
- 在串联电路中，最高的压降由电阻值_____的电阻器分担，最低的压降由电阻值_____的电阻器分担。
- 在有两个电阻器的串联电路中，如果供电电压为 210V，其中一个电阻器上的压降为 110V，则另一个电阻器两端的压降应该等于多少？_____V
- 用“增加”、“减小”或“不变”回答问题。
在 3 个电阻器构成的串联电路中，如果其中一个电阻器的电阻增加，则电路的总电阻如何变化？_____总电流如何变化？_____相邻电阻器上的压降如何变化？_____
- 在 4 个电阻器构成的串联电路中，电阻器上的压降分别是 40V，60V，20V 和 10V，则供电电压等于多少？_____

快速回顾

在串联电路中电流处处相同，总电阻等于所有串联元件的电阻和，由于每个元件上电流是一样的，元件上的压降等于电流乘以其电阻，因此串联电路中的电压分布与电阻分布成正比。基尔霍夫定律表明压降的算术和等于电路的供电电压，或者所有压降和电源电压的代数和等于零。

经验提示

由于您还会遇到更多的电子电路问题，因此最好记住下面的知识

- 基本单位除以千为毫，在求电流时经常用到这一点， $I=V/R$ ，其中 $V/k\Omega=mA$ 。
- 基本单位除以毫为千(k)，在求电阻时经常用到这一点， $R=V/I$ ，其中 $V/mA=k\Omega$ 。
- 毫乘以千为基本单位，在求电压时经常用到这一点， $V=R\times I$ ，其中 $mA\times k\Omega=V$ 。

4.5 串联电路的功率

我们要讨论的最后一个与串联电路有关的电气参量是串联电路的功率。一个元件或电路消耗的(或者由电源提供的)功率可以通过公式 $P=V\times I$, $P=I^2R$, $P=V^2/R$ 计算得到。您已经了解到在串联电路中通过所有元件的电流相同，因此公式 $P=I^2R$ 中的因子 I^2 对于每一个串联元件也一样， R 最大的电阻器消耗最多的功率，相反， R 最小的元件消耗最少的功率，如图 4-11 所示。

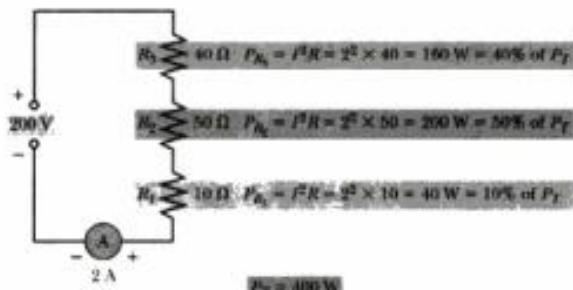


图 4-11 最大的 R 消耗最多功率，最小 R 消耗最少功率

建议

尝试用一下计算器的各种模式，这将对各种电路的计算非常有益。

4.5.1 单个元件的功率计算

如果已知给定元件 3 个电气参数中的两个，可以通过计算得到单个元件的功耗。例如如果已知元件的电阻和流过的电流大小，可以采用公式 $P=I^2R$ 。如果已知元件的压降和电流，可以采用公式 $P=V\times I$ 。如果已知电阻值和压降则可以采用公式 $P=V^2/R$ 进行计算。

从前面的分析可以看出，串联电路中单个元件的功耗与每个元件的电阻成正比，这类似于每个元件的电压分布和电阻值成正比一样。某一给定电阻器的功耗占电路总功耗的百分比等于该电阻值占电路总电阻(R_T)的比值。例如如果某一电阻器的电阻是电路总电阻的 $1/10$ ，那么它消耗的功率也是电路总功率的 $1/10$ 。如果它的电阻是 R_T 的一半，那么它消耗总功率的 50% 等等，如图 4-11 所示。

4.5.2 总功率计算

当每个元件上功耗已知时，总的功耗(或者由电源提供给电路的功率)等于所有单个元件功耗的和，参见公式(4-6)。

$$P_T = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (4-6)$$

例：参考图 4-11，利用公式(4-6)可以得到：

$$P_T = P_{R1} + P_{R2} + P_{R3} = 40 \text{ W} + 200 \text{ W} + 160 \text{ W} = 400 \text{ W}$$

练习题 6

参考图 4-12，求下列值。

$$P_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W } V_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V.}$$

$$P_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W } V_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V.}$$

$$P_3 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W } V_3 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V.}$$

$$P_T = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W } R_3 = R_T \text{ 的 } \underline{\hspace{2cm}} \%.$$

$$I_T = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A } P_3 = P_T \text{ 的 } \underline{\hspace{2cm}} \%.$$

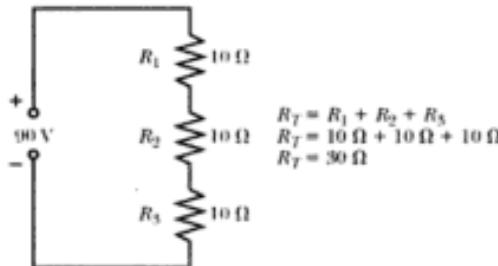


图 4-12 练习题 6 的图

4.6 串联电路开路的效应以及故障调试提示

开路

到目前为止，您已经学过了如何分析串联电路中的电流、电阻、电压和功率。现在我们介绍一下异常串联电路中有可能发生的情况，两种极端的情况是开路和短路。

首先当串联电路发生开路时将会出现什么情况？当串联电路的电流路径的某一点处断开时就构成开路。由于电流只有一条路径，因此在串联电路中任何位置发生开路，电流就停止。事实上，电路的电阻变成无穷大，电路的电流 I_T 减小到零。

既然开路使得电路的电阻增大到无穷大，同时使得电路电流减小到零，这对电路电压和功耗有什么影响呢？

例：在图 4-13 中，设电阻器 R_3 在物理上断成两部分，使得电流路径断开。由于电流不再有完整的路径，电流表的读数将是多少？答案是 0 mA。

如果没有电流，那么电阻器 R_1 上压降 $I \times R$ 等于多少？由于 0 乘以任何 R 值等于 0，因此答案是 0V。同理电阻器 R_2 上的电压也是 0V，这说明好的电阻器(R_1 和 R_2)上的电势差也是 0，即 R_1 的压降为 0， R_2 的压降也为 0。实际上，从电源的正极到电路的 A 点，到处都等效于电源的电势正极，同样从电源的负极到电路的 B 点上每一点都等效于电源的电势负极。

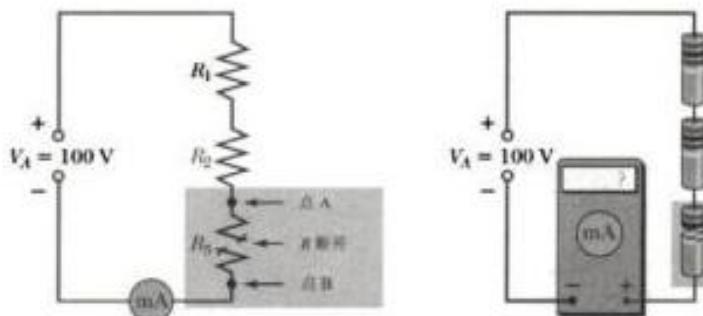


图 4-13 串联电路中的开路

那么断开点或开路点之间的电势差是多少？如果您的答案是 100 V(或 V_d)，那么您答对了。这表明电路中好的电阻器两端将不存在 $I \times R$ 的压降，并且无论电路中何处发生开路，开路部分两端的电压等于供电电压。

家里的电源开关电路是一个人为的开路电路的例子。当您打开电灯时，与电灯串联的开关电路上的断开触点被闭合；当您关闭电灯时，与电灯串联的开关触点被断开。因此电流的路径被断开，使得全部供电电压都出现在开关的触点两端，而电灯两端的电压为 0V。如果电灯熄灭的时候测量开关两端的电压，结果将等于电源电压或供电电压。警告：不要做这个实验。120/220V 的照明电路具有危险性。

故障调试提示

当您怀疑串联电路中有开路发生时，您可以测量每一个元件上的电压，如果在某一个元件或一部分电路两端测得电压等于供电电压，则开路就发生在这一元件或这部分电路。警告：测量电压时，电路必须接通电源，一定采取所有必要的安全措施。

除了这种带电测量方法以外，还可以采用不带电的电阻测量方法。如果在电路中两点之间测得的电阻等于无穷大(当电路完全与电源断开的情况下)，那么这两点之间就发生了开路。好电阻的测量电阻值应该等于它们的参数值。

练习题 7

1. 串联电路的供电电压为 100 V，包括 4 个 $27\text{ k}\Omega$ 的电阻器，如果其中一个电阻器开路，

那么下列参数将增加、减小还是不变。

- 总电阻将_____。
- 总电流将_____。
- 未开路电阻器两端的电压将_____。
- 开路电阻器两端的电压将_____。
- 总的电路功耗将_____。

2. 题 1 中的情况是否对于任一电阻器开路都成立？

4.7 串联电路短路的效应以及故障调试提示

4.7.1 短路

串联电路中短路时将会发生什么结果？首先我们先要定义什么是短路。短路是指某一电路中出现了不希望发生的电阻值非常低的现象。例如在与电源输出端连接的两根导体上放置一个金属物体，在这种情况下所有与电源输出端连接的电路都被短路，同时为电流提供了一条非常低阻的路径，新电流将沿着这条路径流过。

短路可能出现在一个元件、几个元件甚至整个电路(例如刚才举的金属导体的例子)。无论如何都可以把短路看作一条能够影响电路正常工作的低阻电流路径。

例：观察图 4-14，其中不希望出现的短路路径由一条裸导线跨接在电阻器 R_1 两端形成，该裸导线的电阻几乎为 0Ω 。如果不发生这个短路，电路的总电阻应该等于 $20k\Omega(R_1 + R_2)$ ，因此当供电电压为 $20V$ 时，电流为 $1mA(20V/20k\Omega)$ 。发生短路时，由于 R_1 短路，A 点和 B 点之间的电阻接近于 0Ω ，对电源来说，它只“看到了” R_2 的 $10k\Omega$ 电阻并作为整个电路的总电阻，因此电流等于 $20V/10k\Omega$ ，或者 $2mA$ (是没有发生短路时的两倍)，短路使得 R_T 减小一半，由于电压不变，因此电流增大一倍。

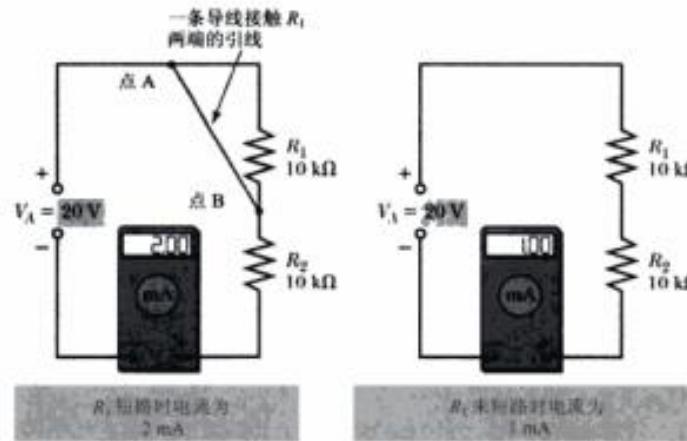


图 4-14 串联电路中的短路效应

上述电路分析指出了一些重要的基本原则：(1)如果串联电路(或其他类型的电路)任一部分发生短路(或仅仅是电阻减小)，则总的电路电阻减小；(2)假设电路的供电电压不变，则电路的总电流增加。

在串联电路中短路(或者电阻减小)对其他电路参数有什么影响呢？我们通过图 4-14 的例子来分析这些情况。

1. R_1 变为 0Ω 。
2. R_T 减小，使得电路电流(I_T)增加。

3. 由于 I 增加而 R_2 不变, R_2 两端的电压增加, 在本例中由于没有其他电阻器分压, 因此 R_2 的电压增加到供电电压 V(20V)。
4. 由于 I 乘以任何值都等于 0 V, 因此 V_1 (R_1 两端的电压)减小到 0V。
5. 由于电路的电流增大而电源电压不变, 因此电路的总功耗增加($P = V \times I$)。
6. 由于 R_2 的电阻值不变而流过的电流加倍, 因此好的电阻器(R_2)上的功耗增加。
7. 显然 R_1 上的功耗减小为 0, 因为没有电流流过它。

如果是整个电路被短路, 而不是其中一部分被短路, 则情况如何? 这意味着 R_1 和 R_2 都被从电源两端短路, 电源看到的电阻为 0Ω , 电源将试图提供无穷大的电流, 但在实际情况中不可能这样, 有可能发生电源保险丝熔化和/或电源、电路的导线/导体被损坏等情况。然而部分短路电路中的一般原则在这时也成立, 即电路电阻减小, 总电流增大(直到保险丝被熔化或者电源烧坏), 电路发生短路的部分电压减小到 0V。

练习题 8

1. 如果串联电路的电源为 200V, 电路由 $10\text{k}\Omega$ 、 $27\text{k}\Omega$ 、 $47\text{k}\Omega$ 和 $100\text{k}\Omega$ 的电阻器组成, 其中 $47\text{k}\Omega$ 的电阻器被短路, 则以上每个电阻器两端的电压将是多少? (记住画草图的方法可以在您分析时有所帮助)
2. 由于 $47\text{k}\Omega$ 的电阻器被短路, 则其他电阻器上电压是增加、减小还是不变?

故障调试提示

如果电路的保险丝烧断, 元件过热或者冒烟, 则很可能就是因为元件、电路或者电路的某一部分发生了短路, 同样测量电阻值有助于找到问题的所在, 这时需要断开被测电路的电源。最好是将电源从被测电路中移开, 直到故障被排除。因此这需要测量时有一定的技巧。给这种类型的电路施加电压时经常会造成员件或电路被损坏, 这是因为过量的电流将流过来短路的元件和电路。

当电路的电源被移开时, 我们有可能利用欧姆表测量单个元件或选定电路部分的阻值, 如果我们知道正常情况下的值, 则那些电阻值很低的元件或部分就发生了短路。通常元件或导线过热时会呈现一些可观测的现象, 这些线索表明了何处由于短路而电流过大。

有些特殊情况下, 如果采用电压测量, 好元件两端的电压值将会大于正常情况的电压(由于电流增大), 短路的元件或电路部分的电压几乎接近于 0V。

如果电路中有电流表或者灯泡, 则仪表的读数将高于正常值, 没有被短路的电灯泡将比正常情况下明亮许多。

4.7.2 特殊的故障调试提示

针对具有顺序串联的元件或子电路的电路, 一种简单而有效的电路调试技巧被称为“分治”(Divide and Conquer)方法或者分解技术。对于那些顺序相连的很多元件或子电路中有某一个出现故障的串联电路情况, 这种技巧可以节省很多步骤。

采用这种技巧时, 首先测试电路的中间, 测试结果可以告诉工程师电路的哪半边存在故障。例如图 4-15 表示了一个由 12 个灯泡串联构成的圣诞树电路, 其中有一个灯泡开路了。根据前面, 如果其中一个灯泡开路的话, 由于电流路径被破坏, 所有的灯泡都不会亮。注意在图 4-15

中，第一次测试在导线的一端和中点之间进行，在本题中，中点位于灯泡 6 和 7 之间。如果测试时电源打开，测试仪表读数为供电电压 V ，这说明开路的灯泡位于 1 到 6 之间，如果读数为 0，则说明问题出在电路的另一半，即开路位于灯泡 7 到 12 之间。通过一次测试，可以把电路的一半区域排除在故障区以外。

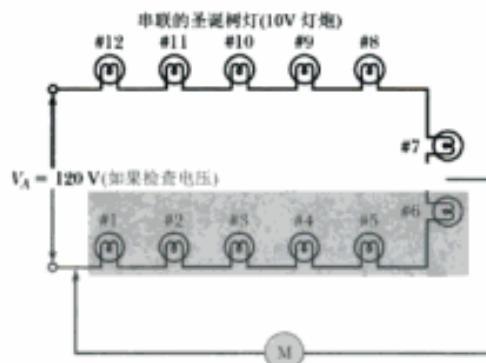


图 4-15 分解故障调试技巧一第 1 步(注：仪表“M”在电源加载被测电路时表示电压表，在电路与电源断开时表示欧姆表)

建议

如果您或者附近的人正在焊接或使用旋转电机或电源工具，请一定带上安全眼镜。

同样在采用断电的电阻测试方法时也可以利用这种技巧。电路与电源断开，如果第一次测量 R 得到灯泡 1~6 之间的读数为无穷大，则说明问题出现在这半边电路。如果读数比较小，则说明问题出现在另外半边电路，即灯泡 7 到 12 之中。

在对工作异常的电路的可疑区域分为两部分并从中点开始第一次测试之后，下一步是把剩下的电路可疑区域再次分为两半，在可疑区域的一端与其中点之间进行第二次测试，这一把电路中可能存在问题的区域进一步缩小为 $1/4$ ，如图 4-16 所示。这种分解技巧可以一直重复，直到最后只剩下两个元件或子电路。然后采用适当方法检查这两个元件就找到了故障元件。

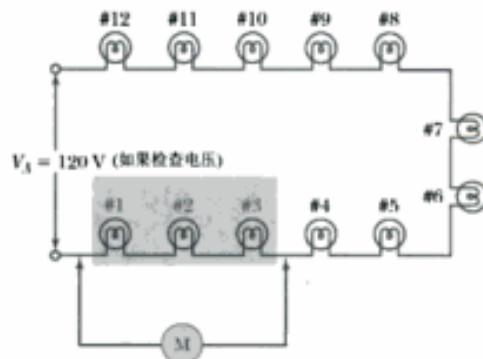


图 4-16 分解故障调试技巧一第 2 步(注：仪表“M”在电源加载被测电路时表示电压表，在电路与电源断开时表示欧姆表)

这一“分治”方法可以用于任何电流、功率、流体或信号必须从一个元件或子电路顺序流到下一个元件或子电路的串联(线性)元件或电路系统，同时这一技巧对于各种电子、电气、水力以及其他具有串联情况的系统都非常有用。

经验提示

作为复习，解决电路问题应该遵循下面步骤：

1. 收集所有已知的电气参数。
2. 如果没有给出电路框图，首先画一个框图并且在图上标出已知量。
3. 首先从已知的、容易求解的或者已有充分信息来求得未知量的地方入手先解决问题的第一部分，然后再采用适当方法解决问题的剩余部分。

4.8 按照规范设计串联电路

现在我们在一个设计问题的例子中使用上面经验提示中描述的技巧，您可以检验一下自己是否已经掌握了这种分析过程。

例：设计由 3 个电阻器构成的串联电路，要求其中两个电阻为 $10 \text{ k}\Omega$ ，电路的总电流为 2 mA ，供电电压等于 94 V 。

第一步是收集题目中给出的已知信息，下一步是画出电路图并标出已知参数，如图 4-17 所示。第三步是找到一个入手点，有充分的已知信息可以用来求解未知量。

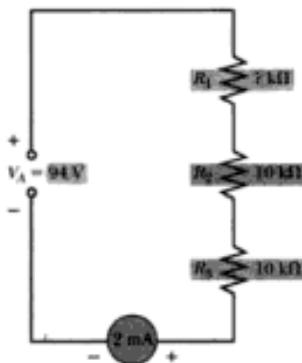


图 4-17

为了进行第三步，首先观察我们画出的电路，由于我们已知 R_2 和 R_3 的的电阻和电流 I ，这时求它们的压降非常容易。

$$V_2 = I \times R_2 = 2 \text{ mA} \times 10 \text{ k}\Omega = 20 \text{ V}$$

$$V_3 = I \times R_3 = 2 \text{ mA} \times 10 \text{ k}\Omega = 20 \text{ V}$$

未知量是 R_1 ，求得 R_1 就完成了电路的设计。

如果能知道 R_1 上的压降，它的电阻值就很容易得到，这是由于电流等于 2 mA，电阻值等于它的电压除以 2 mA，采用基尔霍夫电压定律可以很方便地得到 V_1 。根据基尔霍夫电压定律， V_A 必须等于 $V_1 + V_2 + V_3$ 。因此对公式变换一下可以求得未知的 V_1 。

$$V_1 = V_A - (V_2 + V_3) = 94V - (20V + 20V) = 54V$$

$$R_1 = \frac{54 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 27 \text{ k}\Omega$$

另外一种求 R_1 的方法是首先求 R_T ， $R_T = V_T/I_T$ ，所以 $R_T = 94V/2mA = 47k\Omega$ ，由于在串联电路中总电阻等于各单个电阻的和，并且已知 R_2 加 R_3 等于 20 kΩ，因此为了得到总电阻 47 kΩ， R_1 一定等于 27 kΩ。正式一点的做法是先写出 R_T 的公式，然后变换得到 R_1 。

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_1 = R_T - (R_2 + R_3) = 47 \text{ k}\Omega - (10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega) = 27 \text{ k}\Omega$$

我们的设计是否满足规范？是的，它的确是由 3 个电阻器构成，其中两个电阻为 10 kΩ，电路的总电流为 2 mA，供电电压等于 94 V。

练习题 9

试着自己做下面的设计问题，在单独的纸上完成。

问题：设计一个三电阻器构成的串联电路，其中 R_1 为 20 kΩ，分担供电电压的 2/5， R_2 上的压降是供电电压的 3/10， R_3 上电压等于 R_2 的电压，设供电电压为 50V，画出电路图并标出所有的 V ， R ， P 和 I 参数值。

4.9 特殊应用

4.9.1 串联电压源

电压源可以被串联起来提供比一个电压源更高或更低的总(合成)电压，两个以上的电压源串联时合成的电压由每一个电压源的大小以及电压源的连接方式有关，包括串联叠加和串联抵消两种情况。图 4-18(a)表示串联叠加类型的连接方式，图 4-18(b)表示串联抵消类型的连接方式。

在图 4-18 中，我们可以看到电池和蓄电池，电池是一种单独的电压器件，能够把化学能转换成电能，图中 1.5V 的电源符号是单个电池的常用符合。这种电池的一个常见例子是手电筒里的电池，通常它们是 1.5 V 的电池。

蓄电池是两个或更多的电池互相连接并封装在一起，在图中蓄电池的符号用 6.0V 电源表示，蓄电池的常见例子是 12V 的汽车蓄电池，它由 6 个 2V 的电池构成，互相连接并封装在一个蓄电池盒子里。

注意在图 4-18(a)中，串联叠加的电压源给电路提供的合成电压等于两个电源的和，在这里 $6.0 \text{ V} + 1.5 \text{ V} = 7.5 \text{ V}$ ，通过电阻器的电流等于 7.5A

$$I = V/R = 7.5V/1\Omega = 7.5A$$

判断电压源串联叠加的方法是：(1)一个电源的负极与相邻电源的正极连接；(2)电路中所有电源提供的电流方向相同。

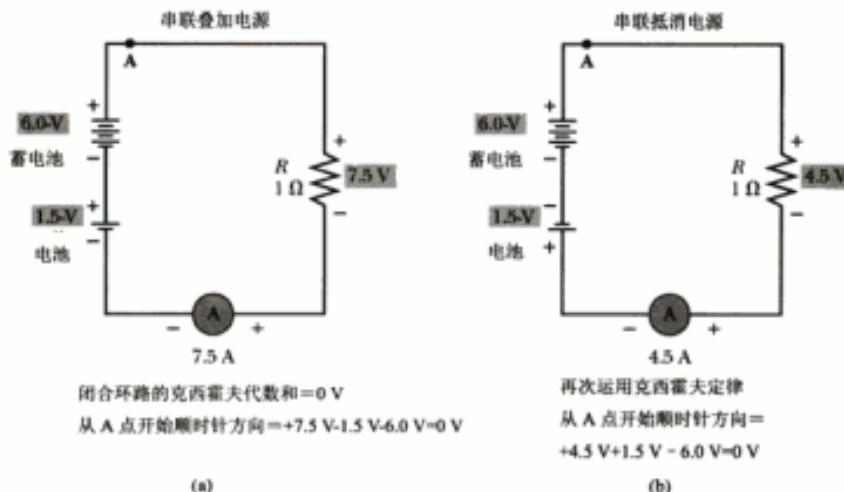


图 4-18 串联电压源

在图 4-19 中电路的供电电压等于多少？电流是多少？正确答案是合成电压为 27V，电流是 0.5mA。

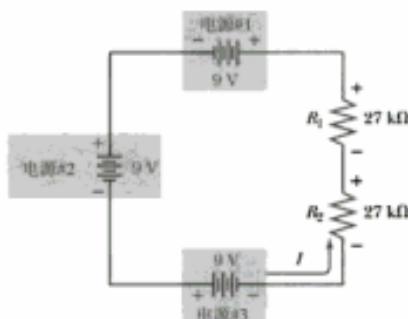


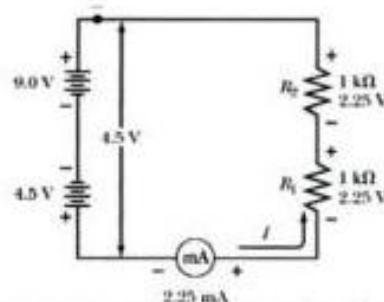
图 4-19 串联叠加的电源具有下列特点：(1)电源是串联的；(2)每一个电源的负极连接到下一个电源的正极；(3)所有 3 个电源试图在电路中建立相同的电流方向；(4)可以用基尔霍夫定律证明

在图 4-20 中我们可以看出采用串联抵消方式连接的电压源具有下列特点:(1)一个电源的负极与相邻电源的负极相连,或者正极和正极相连;(2)电源在电路中试图产生的电流方向相反。

为了求串联抵消电源的合成电压或有效电压，用较大的电压减去较小的电压值。

例：在图 4-20 中，串联抵消电源提供给电路的电压等于 9.0V 减去 4.5V ，等于 4.5V 。

关于串联叠加和串联抵消电压源的最后一点概念是压降可以串联叠加或串联抵消。正如电压源可以串联叠加或串联抵消。如果压降的串联极性是一到十，或者十到一，并且流过串联元件的电流是同样的方向，则它们是串联叠加的压降，例如在图 4-20 上 V_{R_1} 和 V_{R_2} 是串联叠加。反之，如果串联元件上压降的极性是一到一或十到十，那么它们是串联抵消的压降。



$$Pt. A \text{ (clockwise)} = +2.25V + 2.25V + 4.5V - 9.0V = 0V$$

图 4-20 串联抵消的电源具有下列特点：(1)电源是串联的；(2)一个电源的负极连接到下一个电源的负极；(3)两个电源试图在电路中建立相反的电流方向；(4)可以用基尔霍夫定律证明。

练习题 10

- 参考图 4-19，如果电源#1 的极性相反(在电路中反过来)，则 V_{R_1} 等于多少？
- 参考图 4-20，如果其中的 4.5 V 蓄电池被一个 6 V 的蓄电池替换(电路中极性连接方向不变)，则 V_{R_1} 等于多少？

4.9.2 简单电压分配和参考点

电压分配

您已经了解，在串联电路中由于流过所有元件的电流相同，因此压降与电阻分布成正比例，您可以选择参与串联的电阻值以实现不同的电压分配或分布方式。结合这一概念和串联叠加压降的概念，我们可以利用串联电路实现简单的电压分配作用，如图 4-21 所示。注意图中标出各点之间的压降极性以及电势差。

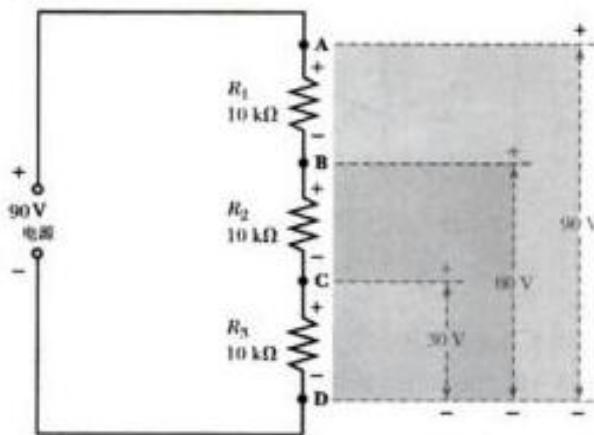


图 4-21 电压分配作用举例

R_1 、 R_2 和 R_3 采用相同的电阻值，因此电压源的电压被 3 个电阻器平均分配，此外由于压降是串联叠加的，因此各个点上的电压是积累的。

练习题 11

参考图 4-21，假设电路参数变为以下：电源电压为 188V， $R_1 = 20\text{ k}\Omega$ ， $R_2 = 27\text{ k}\Omega$ ， $R_3 = 47\text{ k}\Omega$ 。标出下列点之间的电压：D 到 C，C 到 B，B 到 A，D 到 B。

4.9.3 电压分配应用举例**1. 音量控制**

在前面的章节里我们曾介绍过电位计经常用作电压分配器件。在图 4-22 中可以看出，如果电位计的电刷位于 A 点，那么来自放大器或收音机前一级电路的全部电压都能传送到下一级，如果电刷位于电阻体的中间位置，那么只有一半电压能被传送到下一级，等等。收音机、电视机以及其他音频放大器中经常采用这种技术来控制人耳从系统扬声器中听到的音量。显然传送到下一级(音频放大)的分配电压越大，人耳听到的声音也越大。

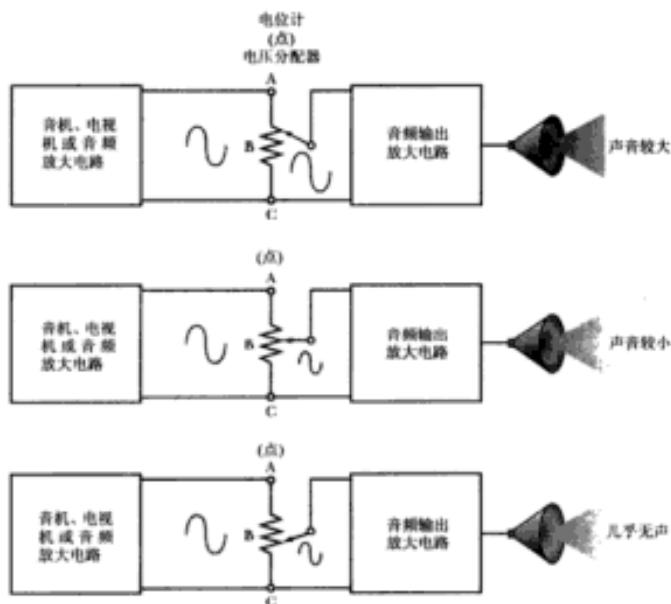


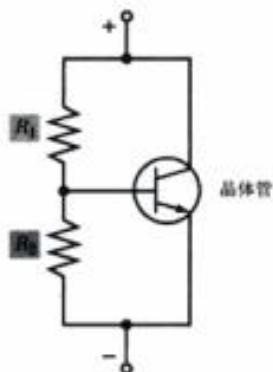
图 4-22 电位计用作电压分配器/音量控制

2. 晶体管偏置电路

在后面的学习中您将学习欧共晶体管放大器的有关细节，现在您只需要看一个实际中常用的具体应用，在这里电压分配器为晶体管的各个部分提供适当的电压，如图 4-23 所示。

3. 参考点

在前面的章节里我们曾讨论过某一个“相对于”另一个，或者以另一个为“参考”的概念，采用“约翰比比尔高”或“比尔比约翰低”这样的例子。

图 4-23 晶体管各部分分配到的电压与供电电压的大小和电压分配电阻器 R_1 和 R_2 的比值

在电子电路中经常以电路中某一公共参考点为基础来描述电气参数，例如电压。大多数电子电路都有一个共同的“回归”路径或者连接点，在这一点上连接有系统中大部分电路。这一点就被作为电路的公共参考点。当电路被安装在金属底盘里时，底盘通常被作为公共连接点路径。当电路被安装在环氧树脂或玻璃的基底时，例如在印刷电路板中采用的那样，一条环绕印刷电路板的铜导线路径成为公共连接点，或者回路。在底盘或印刷电路板上的公共连接点通常被叫做“底盘地”，它的电原理图符号是 $\text{/\!}\text{/}$ 。

在许多书籍和框图中一般不采用底盘地的符号，而是采用“地球地”的符号 --- 来表示电路中的公共参考点。底盘地或者公共的电路路径可能与实际的地球地相连，也可能不连，例如家庭里的供电线路。在本书中，在需要表示公共地参考的电路中，我们采用更为常用的地符号 --- 来表示电路中的公共参考点。

在图 4-24 中，点 C 连接到参考地。利用这一参考点如何来描述电压分配器上的电压呢？相对于这一参考点，电路中的电压可以描述为：

D 点相对于地参考= -30V

C 点相对于地参考= 0V

B 点相对于地参考= +30V

A 点相对于地参考= +60V

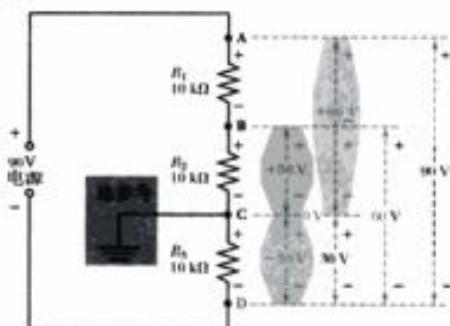


图 4-24 C 点的地作为参考点。30 V, 60 V 和 90 V 表示累计的压降，-30 V, +30 V 和 +60 V 表示相对于连接到地参考点的 C 点的电压

假设地参考点从 C 点移到 B 点，如图 4-25，则相对于这一点各个电压如何描述？

D 点相对于地参考 = -60V

C 点相对于地参考 = -30V

B 点相对于地参考 = 0V

A 点相对于地参考 = +30V

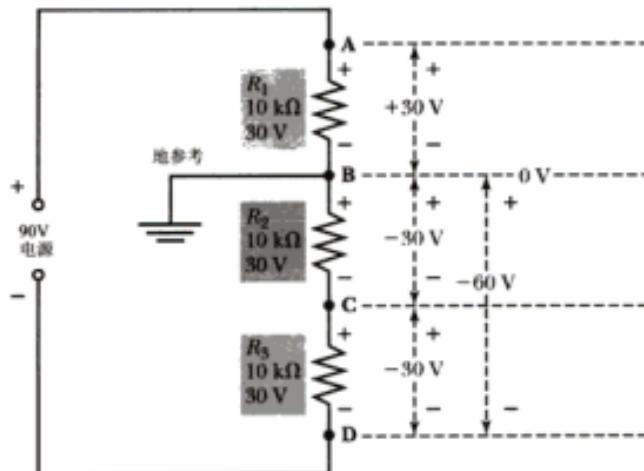
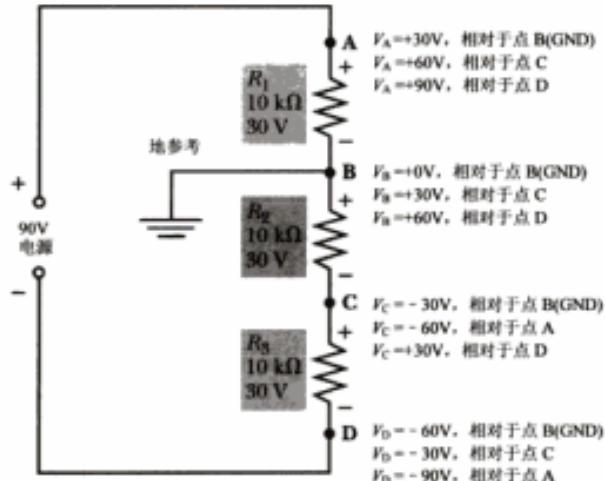


图 4-25 将 B 点地作为参考点

4.9.4 极性

讨论电压的极性和大小时也应当说明是相对于给定参考点的极性和大小。在图 4-24 中，C 点相对于 D 点的电压是 +30V，与此相反，D 点相对于 C 点的电压是 -30V(注：在两种情况下电流的大小和方向都相同)。

在第6章将对各种类型的电压分配器做更深入的研究，刚才介绍的参考点的概念，在您的整个学习过程和职业生涯里都会用到。

练习题 12

假设图4-25中的电路元件和参数变为： V_A 等于50V， R_1 等于 $12\text{k}\Omega$ ， R_2 等于 $33\text{k}\Omega$ ， R_3 等于 $15\text{k}\Omega$ ，同时地参考点仍然是点B，电源的极性仍和图4-25中一样。利用电压分配的规则以及刚学的有关参考点的概念，求下面参数：(提示：重画一遍电路图以便于分析，如果可能，使用计算器。)

1. R_2 两端的电压是多少？
2. R_2 上面一点相对于点C的电压是多少？
3. R_1 两端的电压是多少？
4. 点C相对于点A的电压是多少？

4.9.5 降压电阻器

串联降压电阻器是与串联电路的特殊应用有关的又一个例子。

通常我们需要以一定的电流向某一电气负载提供一定的电压，如果定值电压源所能提供的电压超过了希望的电压值，则使用降压电阻器可以分担一部分电压，使得能够提供所需的电压值，如图4-26所示。

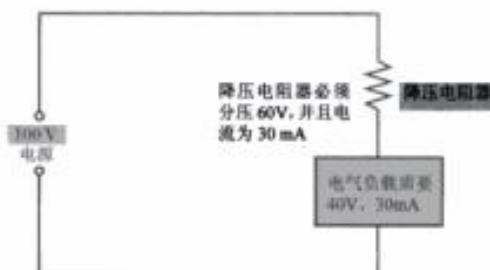


图4-26 串联降压电阻器

例：由于电气负载和降压电阻器是串联的，因此流过的电流必须相同。为了计算降压电阻器的大小，它必须分担的电压大小以及负载需要的电流大小提供了解题的信息。在本题中，降压电阻器应当分担60V的电压，负载需求30mA的电流，因此当降压电阻器的电压为60V时它必须提供30mA的电流。根据欧姆定律采用公式 $R = V/I$ 可以求得压降电阻值 $= 60\text{V}/30\text{mA} = 2\text{k}\Omega$ 。自然对于各种降压电阻器的应用，在选择电阻值时可以采用这种计算技巧，这也是串联电路众多特殊应用的又一个例子。

练习题 13

1. 图4-26中降压电阻器的最小额定功率是多少？
2. 如果供电电压变为150V，负载需要的电压为40V，电流为30mA，则降压电阻器应该为多大？它的最小额定功率是多少？

经验提示

降压电阻器的最小额定功率应该大于它消耗的功率，通常情况下选择至少是实际功耗两倍作为额定功率。

这里应该指出，压降是指两点之间的电压的差，电压差是由于电流流过对其有阻碍作用的元件时损失了电压(或 emf)所导致，例如电阻器两端压降造成的电势差。

4.10 逻辑思考以及 SIMPLER 故障调试流程

一个工程师最宝贵的财富是能够批判性地和逻辑性地进行思考，从普遍原理或一般情况想到特殊情况(演绎)的能力是有很大价值的。与此类似，从特殊情况想到可能的一般情况也非常重要(归纳)。

在本书余下的内容里，我们将帮助您开发和增强您的逻辑推理能力，作为开始，下面的内容叫做“故障调试技术入门”。

4.11 故障调试技术入门

从某种程度上来说工程和技术人员在整个职业生涯中都从事着故障调试的工作，无论是在设计、安装、测试还是维修电子电路和系统时，最重要的都是要通过有条理地缩小问题过程找到电路或系统中的问题区域。

为了提高您的故障调试能力，我们将介绍一种易于掌握的故障调试基本步骤，当您学完本书时，您将在潜移默化中掌握 SIMPLER 流程，您的技巧将得到加强，使得您成为一个更有价值的工程师。

4.12 SIMPLER 故障调试流程

症状(SYMPTOMS): 收集、检验和分析有关症状信息。

判断(IDENTIFY): 确定故障可能发生的最初可疑区域。

决定(MAKE): 作出决定“应该做哪些测试工作”，“在哪里做测试”。

执行(PERFORM): 执行有关测试。

定位(LOCATE): 定位和确定新的需要继续调试的区域。

检查(EXAMINE): 检查已有的信息，再次决定“应该做哪些测试工作”，“在哪里做测试”。

重复(REPEAT): 重复前面的分析和测试步骤，直到故障被发现。

SIMPLER 调试流程的步骤明细

1. 从很多种渠道都可以提供或收集到有关的症状，例如：
 - (a) 电路或系统的使用者的叙述。

- (b) 人的5种感觉经常能够得出有关故障的强烈线索，视觉和听觉可以用来对电路或系统的输出指示作出判断，例如正常和异常的图像、正常和异常的声音、系统仪表读数、指示灯和信号情况。视觉还能明显地帮助人看到电路中过热/烧坏的元件。嗅觉能帮助您发现过热或烧坏的元件(如果您曾经闻到过某种元件过热或被烧坏，那种气味您一定不会忘记)。触觉也可以使用，但是千万要小心，如果触摸的一个工作元件非常热，将会造成烧伤(有些元件工作时非常烫手，而有些并非如此)。此外接触正在工作的电路，还有可能造成危险的电击。
- (c) 利用一些方便检查的指示标志。例如一个电视机有声音但是没有图像，一个收音机有嗡嗡声，但是无法调谐到无线电台。大多数系统中都有容易找到的开关和控制，这可以在深入调试之前首先确定可能发生故障的区域。例如电视机具有频率选择器，收音机有调谐和开关控制，并且电子电路中通常有开关和可变电阻器。
- (d) 通过比较实际情况和正常情况与规范，规范是指信号、电压和电力等正常工作时的特性，一般通过经验或者与被测电路、系统有关的参考框图和文档获得。这说明作为一个工程师应该掌握阅读和深入理解框图和原理图的能力(在某些情况下，您也不得不按照实际的电路自己动手画图)。

2. 确定最初可疑区域，可以通过：

- (a) 分析所有的症状数据。
- (b) 通过分析所有的症状数据，确定电路和系统中所有有可能造成或有助于发生故障的部分。
- (c) 圈出或者采用其他标记方式标记出最初可疑区域。

3. 作出决定“应该做哪些测试工作”“在哪里做测试”，可以通过：

- (a) 观察最初的可疑区域，确定在哪里做测试能够最有效地缩小可疑区域的范围，并且确定应该采取什么样的测试最合适。(注：在很多时候测试的区域能够说明应该进行的测试类型，但是在别的时候，最容易做的测试，并且能够得到最有用的信息，决定了测试的区域和类型。)
- (b) 通常从一般的测试开始，例如观察指示器，操作开关和控制器以及其他类似的测试。当您缩小了可疑区域之后，可以进行更精确的测试，例如电压、电流和电阻的测试。最后用一个已知的好的元件替代电路中怀疑损坏的元件，以此来检验分析是否正确。(在某些情况下，并非一定要更换元件，有时通过焊接、消除短路、移动导线的方法就能够解决问题。)

4. 根据前面分析得到的结论(例如在哪里做什么测试)。做第一个测试，然后您可以得到新的信息和启发，这有助于进一步缩小范围并发现问题。

5. 根据获得的信息确定并把电路和系统中新的缩小的问题区域括起来，同样您需要用圆圈或者括号标出新的小区域，这样分析时无需测试这一逻辑区域以外的部分。

6. 检查收集到的症状信息，测试结果以及其他数据。现在考虑下一个测试，这将进一步提供有用信息。

7. 根据情况需要，重复进行分析、测试和缩小问题区域的过程多次，直到最后找到电路或系统中的故障，这时您已经成功地执行了SIMPLER 测试流程。

4.13 故障调试分级

工程师可以执行两种基本的故障调试级别：一种称为模块级，另一种是单个的元件级。

进行模块级故障调试时需要了解整个系统中每一个模块的输入和输出，这些输入和/或输出有可能是音频或视频信号、确定的电压电平、确定的电流等。

为了进行模块级的故障调试，我们将介绍输入/输出理论，其中输入是指模块的输入，输出是指模块的输出。如果检查输入(信号、电压等)时一切正常，而输出异常，则问题有可能出现在该模块。

另一方面，如果输入的参数异常，那么您应该沿着输入信号进入的路径查找，直到找到发生异常的地方。在有些情况下，异常可能由被测模块的输入电路造成，而并非来自那些反馈到本模块的模块，我们的任务就是将发生故障的模块隔离，然后替换。如图 4-27 所示的“模块级故障调试举例”。

进行单个元件的故障调试需要了解系统中每一个模块正常的电路工作参数，通过隔离和缩小区域(利用 SIMPLER 测试流程)等措施，最后将把问题集中在模块中出问题的元件上。替换该元件就可以解决问题。如图 4-28 所示的“元件级故障调试举例”，研究这两个例子，然后继续学习下面的内容。

SIMPLER 故障调试流程和分级

在模块级和元件级的故障调试时都可以采用 SIMPLER 流程，在本书列出的故障调试挑战性问题中，您将有机会尝试两种级别的故障调试。

在学习了图 4-27 和图 4-28 的例子以及其他基本知识之后，本章最后列出第一个故障调试挑战问题，您将有机会实践有关内容。



图 4-27 故障调试流程

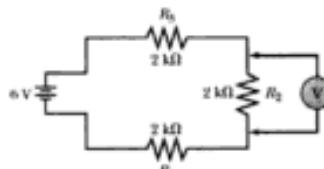


图 4-28 电路信息

1. 模块级故障调试举例

观察图 4-27，如果发现即使某人在对着话筒讲话，而扬声器却没有声音，模块级故障调试将遵循下列步骤：

症状 扬声器没有声音。

判断 首先怀疑系统中任何一个地方，问题可能出现在扬声器、放大器或者话筒模块。

决定 有关测试的决定(测试类型，测试区域)。可以从系统的中间(放大器的输入)开始入手，这样通过第一次测试可以把系统中可能发生问题的区域分割开来(回顾一下图 4-16 中描述的分解技巧)。

执行 执行测试，从框图中可以看出，放大器的输入信号正常(本模块的输入正常)。

定位 确定新的较小可疑区域。第一个测试排除了话筒作为问题区域的可能性，剩下可疑区域包括放大级和扬声器。

检查 根据已有的信息决定下一个测试。现在来看看放大器的输出是否正常，测试类型是信号测试，测试区域位于放大器的输出。

重复 重复测试和分析流程。检查放大器的输出时发现没有信号，(输出异常)如果放大器的输入没有问题而输出异常，则问题有可能出现在放大器模块，以上是模块级的故障调试。如果我们深入到元件内部去检查造成故障的元件，这时进入元件级的故障调试。

建议

当进行模块级的故障调试时，如果模块的输出异常，在认为此模块出问题之前应该检查模块所有的输入工作情况。

2. 元件级故障调试举例

如果我们已知图 4-28 中的信息，并且被告知电压源的检测正常，那么可以按照下列步骤进行元件级的故障调试。

症状 电路的输入电压正常，但是电阻器 R_2 两端没有电压。

判断 判断最初的怀疑区域，由于症状表明 R_2 可能被短路，或者电路的其他地方开路，因此任何一个电阻器或者电路的导线都有可能发生问题。

决定 有关测试的决定(测试类型，测试区域)。由于电压测试非常容易，并且可以获得尽可能多的信息，因此测试类型选择电压测试，又由于已知电压源是好的，那么首先测试一下剩下两个电阻器上的电压，看看电路中是否还有电流存在。

执行 执行测试。首先决定测试电阻器 R_1 两端的电压，测得电压 V_{R1} 为 6V，在这里是异常的情况。

检查 根据已有的信息决定下一个测试。下一个合理的测试方案是断开电压源，然后用欧姆表检查 R_1 呈现的电阻值，测试类型是电阻测试，测试区域在 R_1 两端。

重复 测试和分析流程。用欧姆表测试电阻器 R_1 时，发现电阻值为无穷大，或“开路”，即 R_1 出现故障。

验证 验证时将 R_1 替换，给电路通电。完成这些后，每一个电阻器两端测得的电压都等于 2V，元件级的故障调试完成。

4.14 故障调试的“系统”方法

4.14.1 系统的本质

几乎所有用来实现某一功能或者产生某一事物的系统都可以简化成功能模块图。图 4-29 中

的框图反应了任何一个系统的绝对本质，从图中可以看出，任何类型的系统都需要一个输入，需要一个处理单元，在框图中一般用系统或子系统模块表示，系统的这些处理单元能够处理、变换输入以及对输入执行有关任务。最后处理完成之后，如果系统中各单元工作正常的话，将产生有意义的输出。

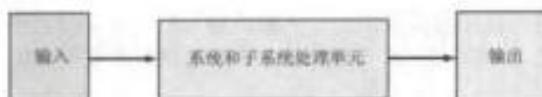


图 4-29 简化的系统框图

4.14.2 子系统

当然，上面反应了系统本质的系统框图只是系统概念的简单表述，对于实际的框图，每一个主系统或子系统通常分解为更多更具体的框图。这些都为子系统的功能、它们的输入和输出以及系统流程增添了更多的细节。在您的故障调试和思考过程中，正是这些更为详细的功能框图提供所需的帮助。图 4-30 表示了一个电视系统中系统流程的简单框图。

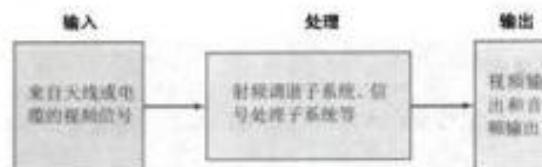


图 4-30 简化的电视系统

对于专业的故障调试，即使这样的框图也显得过于简单。图 4-31 表示了一个更为具体的电视系统的框图，但是对于这样复杂程度的系统，在故障调试时应该采用包括 10、20 甚至 30 个模块的框图，每一个模块都有助于示意与输入信号(在这里是电视机的信号)处理有关的关键步骤，目的是为了得到所需的输出信号。注意在框图里并不显示这一框图的电路中实际用到的几百个(有时可能几千个)单个的元件或零件。这种功能性的框图仅仅表示系统中为获得所需的输出而采用的关键步骤以及处理流程。



图 4-31 简化的电视系统框图

从概念上讲，所有这些框图都反应了任何系统中“输入-处理-输出”流程顺序的重要性。

4.14.3 系统的故障调试概念

系统风格的故障调试方法通常采用模块流的框图方法，这与孤立、逐项的“元件级”故障调试方法不同。通常情况下，采用系统风格的故障调试方法时，主要目的是找到有问题的模块或子系统并替代它，而不是深入到每一个处理模块当中去寻找出问题的一个或多个元件。在发生故障的子系统模块被替代并且系统能够正常工作之后，您也许会根据具体情况或者进行元件级的故障调试来维修故障模块，以便以后继续使用，或者把模块送到维修厂，或者扔掉损耗的模块。

1. 典型系统方法概述

出现的症状能够告诉人们系统工作出现异常。一般情况下，由于系统具有一个或多个“输出指示器”，因此当系统出现故障时，这些指示器能够指示系统的输出异常。

学习下面内容的时候参考图 4-31，例如电视机可能有声音没图像，或者可能的情况是电视机有图像，但是不正常，或者电视机有声音但是声音失真，这些都是输出指示，表明有问题存在。不仅如此，这些输出症状的信息还能告诉我们一些线索，例如可能涉及到系统中哪些子系统。

一旦能够清楚地确定并描述症状信息以后，您可以考虑哪些子系统有可能导致这些特殊的症状，或者与这些症状有关。这将能够确定系统中应该括起来的有问题区域以及进行故障调试的区域。同时当您确定可疑区域之后，与这些症状无关的单元、模块和子系统就无需进行故障调试工作。在电视机的例子中，如果画面良好而没有声音，您将不会去调试视频(与图像有关)子系统模块，而且您应该去调试与音频处理有关的模块。

在确定有可能导致故障的系统或子系统模块之后，检查表示这些子系统的各个模块的输入和输出，这可以分离出特别的故障区域。

为了定位问题区域，实际电路中有一些与各种模块的输入和输出有关的测试点，在这些测试点上测量并观察有关参数以及这些参数的值，目的是和正常工作的系统的正常值进行比较。然后根据测试的结果来判断系统的单元是如何以及/或者为什么会产生这样的异常结果。在这时由于系统的功能模块框图演示了系统的工作原理，因此可以利用这些框图来帮助您定位实际电路中的问题区域。这种方法使得故障调试更具有逻辑性，而不是杂乱无章地去测试每一个测试点，甚至是每一个子系统。这时您已经有条理地缩小了可能的故障区域。

一旦您确定了工作异常的模块，就可以选择或者替换该模块，或者进一步进行调试，直到找到模块中失效的电路和/或元件。前面已经提过，不但要替换失效的模块、电路和元件，而且应该找到它发生故障的原因，以防止再次发生这样的故障。在通常情况下您应该更换该模块或元件来维修系统，但是在这之间您应该检查一下系统中是否存在其他因素使得该单元被损坏，在替换模块工作之前必须进行这一附加的测试，直到您确定系统的区域中造成故障的唯一因素正是您已经定位的模块，然后才可以替换该模块。完成上述工作之后，您应该验证一下系统或子系统是否能够正常工作。注：通常(但不总是)，在替换元件或模块时，您需要做一些校正工作再次校正系统，或使得系统能够完成所期望的操作。这些校正工作能够补偿替换元件或模块有可能带给系统的微小差异。

2. 通用系统方法的总结

1. 分析已有的故障症状(通常有一些故障指示器)。
2. 把有可能导致上面症状的系统流程框图用括号括起来。
3. 检查括号中间问题区域中的每一个子框图的输入和输出。
4. 采用“输入/输出”的检查顺序，缩小可能故障的区域。
5. 在确保替换安全的前提下，替换损坏的模块。
6. 由于新旧元件/模块之间存在微小的差异，因此进行适当校正。
7. 替换和校正之后验证系统工作是否正常。

4.14.4 其他常见系统的例子

限于篇幅，这里无法详细演示各种系统的例子，我们只是帮助您思考一些与您可能熟悉的系统有关的输入、处理和输出的类型。您应该清楚，对于每一种列出的系统，实际上有更多的子系统构成，而且每一个子系统都有专门的输入和处理单元以便得到希望的输出。例如，在列出的汽车例子中，燃料子系统可能包括油箱、燃油泵、燃油滤清器和燃料喷射器系统。

汽车系统

- a. 输入包括燃料、空气、汽油、冷冻剂和电能。
- b. 处理模块包括引擎、动力传送器、轮胎和驱动器。
- c. 输出是指以希望的速度向希望的方向运动。

万用表系统

- a. 输入是待测的电子量(电压、电流、电阻等)，通过万用表的测试表笔输入到万用表。
- b. 处理模块可能包括对被测电子量的电磁作用或者数字处理。
- c. 输出是采用模拟表盘或者数字显示的读数。

这里对故障调试的系统方法的概述只介绍了一些背景基础，下面我们将进一步介绍SIMPLER 故障调试流程。在本书余下的内容里，您将有机会利用 SIMPLER 故障调试流程解决各种挑战性的问题，既可以采用系统模块级的方法，也可以采用更详细一些的元件级故障调试技巧。

4.15 使用 SIMPLER 流程：(元件级故障调试)单个元件级调试

举例

已知的基本信息有：

一个由电压源、导线、一个开关和一个灯泡(以及插座)构成的基本电路。已经知道电压源和导线被测试过，是好的。

听到的问题(这反应了症状信息)是：即使开关拨到开的位置，电灯也不亮。

(1) 收集到的症状信息是灯泡不亮！您可以通过连接电路验证这一点。在分析症状信息时

可以在脑子里想象一下电路，或者也可以在纸上画出电路图。显然可以看出，由于电压源和导线是好的，那么最初的怀疑区域应该是开关、灯泡和插座。

(2) 现在您可以在脑子里(或纸上)判断由开关、灯泡和插座构成的电路区域(圈起来或者用括号括起)，如图 4-32 所示，其中的区域构成了定位故障的最初可疑区域。

(3) 您可以决定做什么测试以及在哪里做测试。一些选择包括 a) 用电压表在灯泡插座两端测量电压。b) 把开关拨到“断开”的位置，换一个已知是好的灯泡，然后把开关拨到“闭合”位置，看看替换的灯泡能否正常发光。c) 断开电源，把灯泡旋下来，用欧姆表测试可疑的灯泡，看它是否是连续的。d) 分别在开关闭合和断开的情况下测试开关两端的电压，观察电压是否变化。e) 断开电源，分别在开关闭合和断开的情况下用欧姆表测试开关，看看它是否能正常工作。由于更换灯泡很简单，而且灯泡的确经常出问题，因此这里首先决定对灯泡进行测试，如图 4-33 所示。

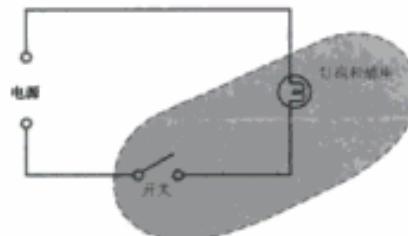


图 4-32 最初的可疑区域

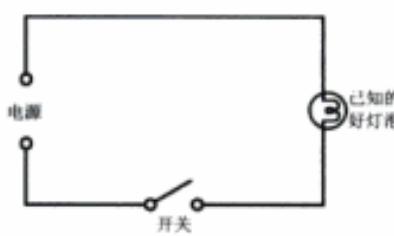


图 4-33 首先检查灯泡

(4) 当您做完测试后发现替换的好灯泡同样不能发光，即使电源连接到电路并且开关拨到“闭合”的位置。或者您用欧姆表检查可疑的灯泡，如图 4-34 所示，但结果表明灯泡是好的。

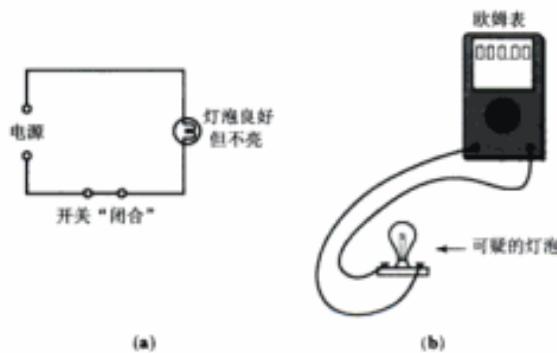


图 4-34 测试结果：(a) 灯泡良好但是不亮；(b) 可疑灯泡是否连续

(5) 现在您可以缩小可疑的区域，包括插座和开关，如图 4-35 所示。

(6) 当您检查了上述信息之后，在插座和开关之中最有可能出问题的是开关，因为它是一种机械器件，并且经常容易损坏。检查开关有 3 种可能的方法：a) 从电路断开电源，分别在开关闭合和断开的情况下用欧姆表检查开关的连续性，b) 测量灯泡插座的电压，看看当开关闭合时是否有电压。c) 分别在开关闭合和断开的情况下测量开关的电压，检查是否开关断开时开关

两端有电压而开关闭合时开关两端电压为 0V。经过检查这一信息，您决定测试的类型和区域选择测量灯泡插座上的电压，因为这很容易检查，如图 4-36 所示。

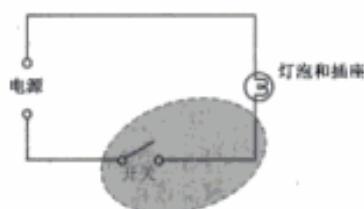


图 4-35 缩小的可疑区域

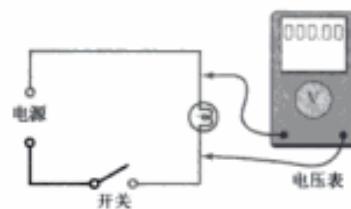


图 4-36 测量灯泡插座的电压

(7) 重复以上的分析和测试流程，当开关闭合的时候测试灯泡插座的电压，如图 4-37 所示，插座两端有电压，这说明开关是好的。根据这一分析，剩下的可疑区域只有插座了，接下来检查插座(在电源断开情况下用欧姆表测试连续性或者用一个好的插座来代替)，您发现插座的确坏了。您已经找到了问题的所在，解决办法很显然，更换插座。更换插座以后，通过测试电路可以验证故障调试的正确性。您的奖励就是电路又能正常工作了，如图 4-38 所示。

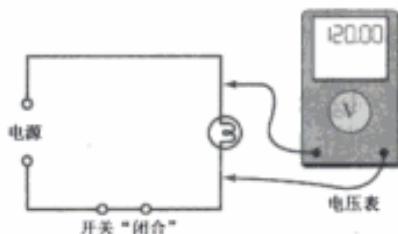


图 4-37 插座两端的电压

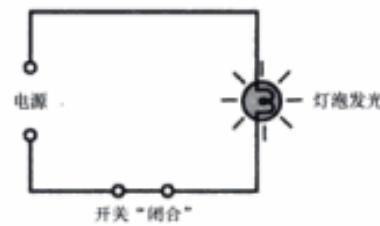


图 4-38 电路恢复正常

尽管这里假设的情况非常简单，但是它的确说明了 SIMPLER 故障调试流程的概念。在实践中应该采用这种流程，因为它能使您的故障调试思路清晰。

4.16 知识点汇总

- 串联电路的定义和特性表明电路中所有元件的连接方式使得只存在一条电流路径，因此在串联电路中流过所有元件的电流相同。
- 串联电路中的电流可以采用欧姆定律计算，用总电压除以总电阻：

$$I = \frac{V_T}{R_T}$$

或其中一个元件两端的电压除以它的电阻值，例如：

$$I = \frac{V_i}{R_i}$$

- 串联电路的总电阻等于所有电阻的和($R_T = R_1 + R_2 + \dots + R_n$)，同时当总电压 V_T 和 I 已知时，可以采用下面公式计算：

$$R_T = \frac{V_T}{I_T}$$

- 由于流过所有串联元件的电流相同，因此每一个元件上的压降与其电阻值和总电阻值的比值成正比，电阻值最大的电阻器分担最大百分比的供电电压，电阻值最小的电阻器分担总电压的最小比例。
- 在串联电路中如果供电电压和总电阻已知时，求单个电阻器上的电压采用电压分配规则非常方便，即：

$$V_x = \frac{R_x}{R_T} \times V_T$$

- 计算器对于很多电路计算非常有用，同时计算器有很多种工作模式，一种是简单地输入数值，另一种方法输入 10 的幂的时候能够充分发挥科学计算器的优势。工程模式主要处理一个数乘以 10 的幂，而且指数是 3 的整数倍。科学表示模式把每个数字写成一个 1 到 10 之间的数乘以 10 的幂的形式，工程模式是最常用的模式。
- 供电电压必须等于闭合回路中所有压降的和，即如果有 3 个元件串联起来，那么供电电压应该等于 3 个元件上电压的和，如果有 4 个元件串联，那么供电电压必须等于 4 个元件上电压的和。
- 基尔霍夫电压定律表明一个电路环路的所有电压的算术和等于供电电压。此外，基尔霍夫电压定律还可以表述为：包括电源在内所有环路电压的代数和必须等于 0。在使用基尔霍夫定律时必须注意电压的极性。
- 串联电路中的功率分配与串联电阻的分配成正比，例如，如果一个元件的 R 等于总电阻的 25%，则它消耗的功率占电源提供总功率的 25%。
- 串联电路(或其他任何类型的电路)消耗的总功率等于各元件功耗的和，总功率可以采用公式 $P = V_T \times I_T$ ，或者采用公式 $P_T = P_1 + P_2 + \dots + P_n$ 计算。
- 串联电路的电流路径中任何一处断开或开路都会使得 R_T 增加到无穷大， I_T 减小为 0，未开路的元件或电路部分的压降也减小到 0V，电路的开路部分两端的电压等于供电电压，由于 I 等于 0，因此 P_T 也等于 0。
- 串联电路中某一元件或电路一部分两端短路(或者低阻路径)使得 R_T 减小， I_T 增加，电路正常部分的压降增大，被短路的电路部分电压几乎减小到 0V，短路还会使得 P_T 增加，电路中未短路的元件的功耗增大。
- 当设计电路或者求解电路的未知量时，最好 1) 收集所有已知信息，2) 画出框图标出已知量，3) 利用任何足够的信息来求解未知量(注：通常在解题时可以采用欧姆定律和/或基尔霍夫定律)。
- 当调试串联电路中的开路情况时，测量好元件(或电路一部分)两端的压降将得到 0V，开路点两端的电压为供电电压。只有在电路和电源断开的情况下才能进行电阻测量，正常的元件读数正常，开路的元件或电路部分的示数将为无穷大。

- 当调试串联电路中的短路情况时，在电路和电源断开时进行电阻测量。正常的元件(或电路一部分)测得正常的电阻值，而被短路的元件(或电路一部分)的测量电阻将非常低，或者等于 0Ω 。
- 串联电路在许多特殊应用中非常有用，例如串联叠加和串联抵消的电压源，简单电压分配器，用来把已有电压降到某一电平的降压电阻器。

公式与计算器输入顺序示例

公式(4-1) $R_T = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ (求串联电阻器的总电阻)
输入顺序： R_1 的值， $\boxed{+}$ ， R_2 的值， $\boxed{+}$ ， \dots ， $\boxed{+}$

公式(4-2) $R_T = \frac{V_T}{I_T}$ (利用欧姆定律求总电阻)
输入顺序：总的电压值， $\boxed{=}$ ，总的电流值， $\boxed{=}$

公式(4-3) $V_i = I_{Ri} \times R_i$ (求给定电阻器两端的电压)
输入顺序：电流值， $\boxed{\times}$ ，电阻器的阻值， $\boxed{=}$

公式(4-4) $V_x = \frac{R_x}{R_T} \times V_T$ (利用电压分配规则求给定电阻器两端的电压)
输入顺序： R_x 的值， $\boxed{=}$ ， R_T 的值， $\boxed{=}$ ， V_T 的值， $\boxed{=}$

公式 4-5 $V_T = V_1 + V_2 + \dots + V_n$ (求串联电路的总电压)
输入顺序： V_1 的值， $\boxed{+}$ ， V_2 的值， $\boxed{+}$ ， \dots ， $\boxed{+}$

公式 4-6 $P_T = P_1 + P_2 + \dots + P_n$ (求串联电路的总功率)
输入顺序： P_1 的值， $\boxed{+}$ ， P_2 的值， $\boxed{+}$ ， \dots ， $\boxed{+}$

使用 Excel

串联电路公式(参考 Excel 文件：FOE04_01.xls)

警告

一旦在表格里输入公式，无需重复输入。解决新问题时只需采用该公式输入新的参数数据。

参考图 4-8，令 R_2 等于公式中的 R_X ，利用公式(4-4)的电子数据表格来计算 R_2 两端的电压，并与课本中的例题比较。

再次参考图 4-8，令 R_1 等于公式中的 R_X ，利用公式(4-4)的电子数据表格来计算 R_1 两端的电压，并与附录中练习题 4 第 1 题的答案比较。

FOE04_01.xls

复习题

1. 试说明串联电路中最特别的电气特性是什么，并证明对于串联电路这一特性成立。
2. 串联电路的总电阻
 - a. 大于电路中最大的电阻值。
 - b. 小于电路中最大的电阻值。
 - c. 等于电路中最大的电阻值。
3. 试解释选择第2题答案的原因。
4. 在串联电路中，最大的压降出现在
 - a. 电阻最小的电阻器两端。
 - b. 电阻最大的电阻器两端。
 - c. 既非电阻最大也非电阻最小的电阻器两端。
5. 在串联电路中，供电电压等于
 - a. 电路中最小的压降和最大压降的差。
 - b. 电路中所有元件的压降的和。
 - c. 电路中最小的压降和最大压降的乘积。
6. 基尔霍夫电压定律表明整个电路环路中所有压降的算术和等于
 - a. 0。
 - b. V_A 。
 - c. $V_1 + V_2$ 。
 - d. 以上都不是。
7. 串联电路中的功率分布：
 - a. 与串联电路中的电阻分布成正比。
 - b. 与串联电路中的电阻分布成反比
 - c. 与串联电路中的电阻分布无关。
8. 如果串联电路某处断开，则：
 - a. R_T 减小到0Ω

- b. R_T 增加为无限大
 - c. 以上都不是
9. 如果串联电路某处短路，则：
- a. R_T 减小到 0Ω 。
 - b. R_T 不变。
 - c. R_T 减小。
 - d. R_T 增大。
10. 在串联电路故障调试时，如果遇到短路，应该采取哪种类型的措施：
- a. 带电时测量电阻。
 - b. 断电时测量电阻。
 - c. 断电时测量电压。
 - d. 以上都不是。

思考题

注意：

当解决下面的问题时，不要忘了根据情况画草图并标注，应当养成这样的好习惯。

1. 如果串联电路中两个相等的电阻器从 $10V$ 的电压源得到 $5A$ 的电流，则每一个电阻器的大小是多少？
2. 设一个串联电路由一个 $10k\Omega$ 、一个 $20k\Omega$ 和一个 $30k\Omega$ 的电阻器组成，当供电电压为 $40V$ 时，求流过串联电路的电流。
3. 设一个串联电路的电阻分别为 50Ω 、 40Ω 、 30Ω 和 20Ω ，画出此电路的框图，标记 50Ω 的电阻器为 R_1 ， 40Ω 的电阻器为 R_2 ，等等。求下列参数并适当在图上标注。
 - a. R_T 等于多少？
 - b. 如果电流 I 等于 $2A$ ，则供电电压等于多少？
 - c. 每个电阻器上的压降等于多少？
 - d. P_T 等于多少？
 - e. R_2 和 R_4 消耗的功率分别是多少？
 - f. R_4 上的压降占 V_T 的比例是多少？
 - g. 如果 R_3 的电阻值增大而其他电阻器的大小不变，则下列参数将增大、减小还是不变？
 - (1) 总电阻 (2) 总电流 (3) V_1 、 V_2 和 V_4 (4) P_T
 - h. 如果 R_2 被短路，则下列参数将增大、减小还是不变？
 - (1) 总电阻 (2) 总电流 (3) V_1 、 V_3 和 V_4
4. 根据基尔霍夫电压定律，如果串联电路中的压降分别是 $10V$ 、 $20V$ 、 $30V$ 和 $50V$ ，则供电电压等于多少？包括电源电压在内，整个闭合环路的电压的代数和等于多少？
5. 如果 3 个电源分别等于 $100V$ 、 $40V$ 和 $120V$ ，试用这 3 个电源构成 $60V$ 的供电电压，并画图表示。
6. a. 计算图 4-39 中所示电路的 P_T 和 P_1 。
b. V_T 等于多少？

- c. R_T 等于多少?
 d. P_4 是 P_1 的多少倍?
 e. 如果被短路，则 P_T 和 P_1 将是多少?

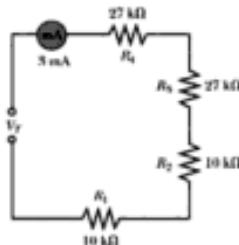


图 4-39 思考题 6 中的电路图

7. a. 求图 4-40 串联电路中 V_A 等于多少?
 b. 设 R_3 等于 R_4 ，则 R_3 等于多少?
 c. R_2 等于多少?

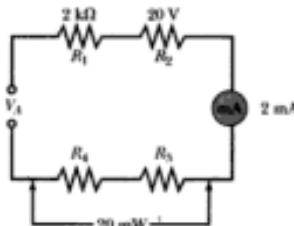


图 4-40 思考题 7 中的电路图

8. 画一个简单的三电阻器构成的电压分配器，要求对 180V 的供电电压平均分配并且电流为 2 mA。

参考图 4-41，计算并回答 9 到 16 题。

9. 电压表的读数为多少?
10. 毫安表的电流读数为多少?
11. R_2 两端的电压等于多少?
12. R_3 两端的电压等于多少?
13. R_4 两端的电压等于多少?
14. 如果 R_3 被短路，电压表的读数将是多少?
15. 图 4-41 中电路中哪一个电阻器消耗的功率最大? 哪一个最小?
16. 如果图 4-41 电路中的 V_A 变为原来的两倍，则 R_3 上的电压百分比将增加、减小还是不变?
17. 在 3 个电阻器构成的电路中，如果供电电压为 300V， V_1 等于 40V， V_2 等于 90V，则 V_3 等于多少?
18. 在 3 个电阻器构成的电路中，如果 V_1 等于 25V， V_2 等于 50V， V_3 是 V_1 的两倍，则供电电压等于多少?

19. 设电路如图 4-42 所示，则：

- R_1 的调节值等于多少？
- I_T 等于多少？
- R_1 消耗的功率是总功率的百分之多少？
- 如果 R_1 被设置到电阻量程的中间，则 I_T 等于多少？
- 如果 R_1 被设置成最小值，则电路中电压表的读数将是多少？

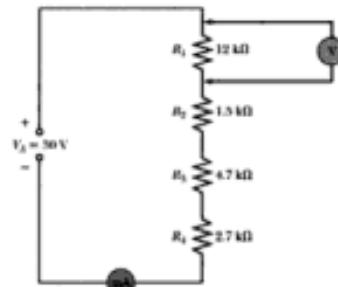


图 4-41 思考题 8 的电路图

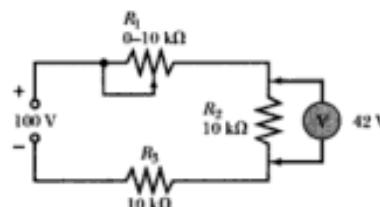


图 4-42 思考题 19 的电路图

20. a. 求图 4-43 中电路中的 R_T 和 V_T 。

- 仪表 M_1 的示数是多少？
- 仪表 M_2 的示数是多少？
- 电路中的 I_T 等于多少？
- 如果 R 不变，但是 P_T 增大一倍，则新的 V_T 和 I_T 将等于多少？

21. 参考图 4-43，如果所有的电阻值如图所示，并且 P_{T5} 等于 $45mW$ ，则

- P_{R2} 等于多少？
- P_T 等于多少？
- I_T 等于多少？

22. 画一个串联电路的电路图，其中 V_3 是 V_1 的 3 倍， V_2 是 V_1 的两倍，设供电电压为 $60V$ ， R_T 为 $120k\Omega$ ，计算：

- R_1 的值
- V_1 、 V_2 和 V_3 的值
- I 和 P_T 的值

23. 已知电压源为 $100V$ ，为了给负载以 $5 mA$ 的电流提供 $50 V$ 的电压，求需要多大的串联降压电阻器？画出电路框图并标注所有的电路元件和参数。

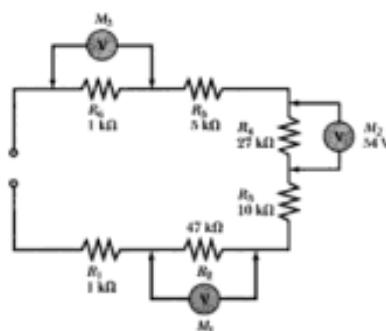


图 4-43 思考题 23 的电路图

参考图 4-43，回答 24~28 题。

24. 如果采用一根跳线将 R_5 短路，则 R_1 两端的电压将增大、减小还是不变？
25. 如果由于老化， R_2 的值增加，仪表 M_3 的示数将增大、减小还是不变？
26. 如果 R_4 被短路，则电路的供电电压将增大、减小还是不变？
27. 设电路参数如图 4-43 所示，求供电电压的大小。
28. 设所有其他参数不变，如果 R_3 消耗的功率增大为原来的 4 倍，则电路的供电电压和电流将如何变化？(写出详细步骤)

分析题

1. 用您自己的话说明计算器的科学模式表示法和工程模式表示法之间有什么区别。
2. 列出简单电压分配器除了本章介绍的应用之外的至少两种可能应用。
3. 用您自己的话解释一下本章中“分治”规则的关键步骤。
4. 采用 SIMPLER 故障调试流程时，第 1 步与收集和分析症状信息有关，请列出至少 3 种能够辅助进行这一步的工具和技巧。
5. 采用 SIMPLER 故障调试流程时，如何确定最初的可疑区域？
6. 采用 SIMPLER 故障调试流程时，在进行下一步故障调试流程之前必须首先作出哪两个决定？
7. 用您自己的话说明在采用 SIMPLER 故障调试流程中所谓的“括起来”具体的意思。
8. 分治技巧最适用于什么样的电路或系统情况？
9. 当您开始解决任意一种电路的故障时，您认为哪一种文档将最有帮助？
10. 当调试发生故障的串联电路时，对于怀疑短路的区域，应该采取怎样的防护措施？简要的解释一下为什么应该采取这样的措施。
11. 如果串联电路的电流突然减小到 0A，则电路有可能出现什么问题？
12. 对于图 4-40 所示的电路，如果某一元件过热，电路的电流增大，电阻器 R_2 和 R_3 两端的电压急剧下降，下面哪一种情况可能发生？
 - a. 整个电路被短路。
 - b. 整个电路开路。
 - c. R_1 被短路。
 - d. R^2 和 R_3 被短路。
 - e. 以上都不是。
13. 如果串联电路由很多个串联的元件构成，则发生故障时一般采取什么基本的技巧？

串联电路的 MultiSIM 练习

1. 利用 MultiSIM 编程实现图 4-24 所示的电路，并解决下列问题。
2. 测量并记录以下参数的大小和极性(注：当利用 MultiSIM 进行测量时把万用表的负表笔连接到地参考点)
 - a. 测量并记录从 C 点到 D 点的电压。
 - b. 测量并记录从 C 点到 A 点的电压。
 - c. 测量并记录从 C 点到 B 点的电压。
3. 得到的结果是否与图 4-24 中标出的参数一致？

能力设计实验索引表

实验手册中建议的与本章内容有关的能力设计实验包括：

章节标题	能力设计实验题目	实验编号
4.2 串联电路的电阻	串联电路的总电阻	9
4.1 串联电路的定义和特性	串联电路中的电流	10
4.3 串联电路的电压	串联电路中的电压分布	11
4.5 串联电路的功率	串联电路中的功率分布	12
4.6 串联电路开路的效应以及故障调试提示	串联电路开路的效应	13
4.7 串联电路短路的效应以及故障调试提示	串联电路短路的效应	14

故障调试挑战性电路 1

请遵照 SIMPLER 故障调试流程，如图 4-44 所示。

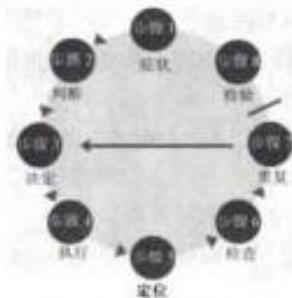


图 4-44 SIMPLER 故障调试流程

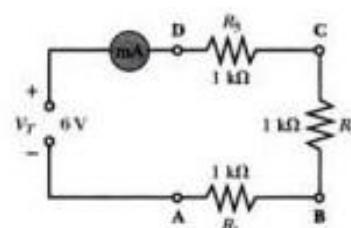


图 4-45 挑战电路 1

开始点信息

1. 电路图，如图 4-45 所示。
2. $V_T = 6V$ 。
3. 测量出的 I_T 是 1.5 mA，其他值参见表 4-1 所示：

表 4-1 测量值表

测 量 值	附录 C 中的结果
V_{A-B}	(5)
V_{B-C}	(86)
V_{C-D}	(42)
R_1 的电阻值	(16)
R_2 的电阻值	(62)
R_3 的电阻值	(3)
R_4	(36)

步骤 1

症状。对于所给的供电电压来说总电流有点过小，这表明总电阻一定增大了，说明某一个或更多的电阻器阻值变化了。如图 4-46 所示。

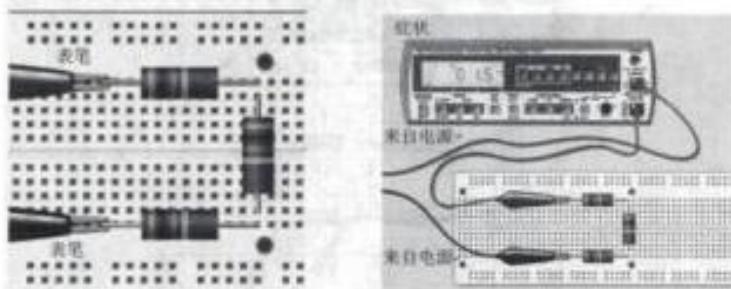


图 4-46 挑战电路 1

步骤 2

判断。最初的可疑区域是： R_1 、 R_2 和 R_3 (即整个电路)。

步骤 3

决定。测试任务是：测量 R_2 两端的电压(电路的中间部分)。

步骤 4

执行。第 1 步测试：观察测试结果。 V_{B-C} 等于 1.5V。如图 4-47 所示。

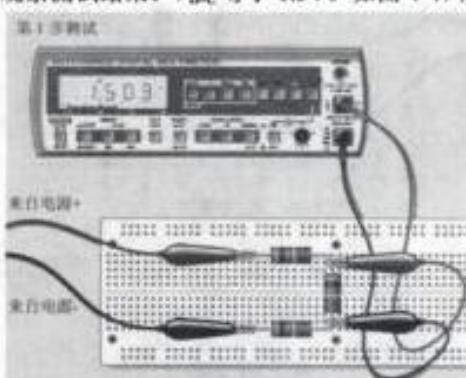


图 4-47 观察结果

步骤 5

定位。新的可疑区域是： R_1 和 R_3 。注：如果 R_2 的值增加而其他电阻器阻值不变，则 V_{B-C} 应该大于 2V。

步骤 6

检查(已有的数据)。

步骤 7

重复(上面的分析和测试)。

第2步测试：检查 R_1 两端的电压， $V_{A-B}=1.5V$ 。如图4-48所示。

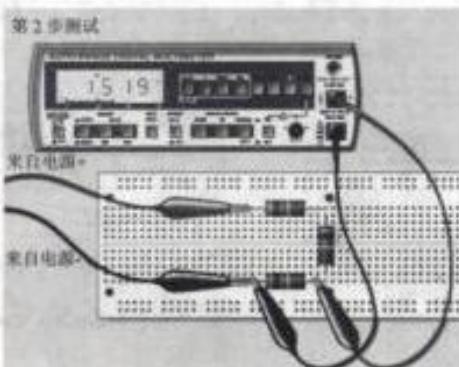


图 4-48 R_1 两端的电压

第3步测试：检查 R_3 两端的电压， $V_{C-D}=3V$ 。如图4-49所示。

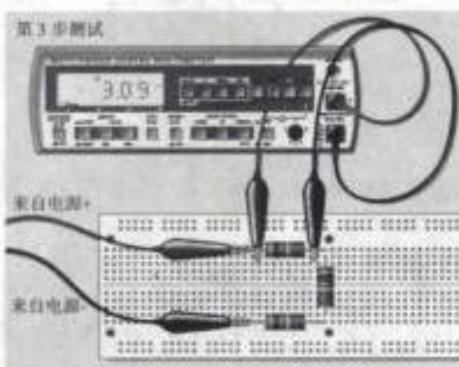


图 4-49 R_3 两端的电压

第4步测试：断开电源并检查 R_3 的电阻值，结果表明 R_3 等于 $2k\Omega$ ，异常。如图4-50所示。

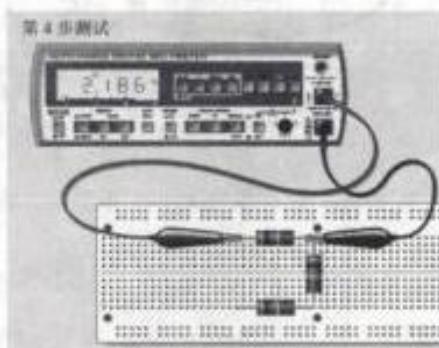


图 4-50 R_3 的电阻值

步骤 8

验证。第 5 步测试：用一个好的 $1\text{ k}\Omega$ 的电阻器替换 R_3 ，并注意观察电流，当这些完成后，电路恢复正常工作情况，每一个电阻器分压 2 V ，电流测量值为 2 mA 。如图 4-51 所示。

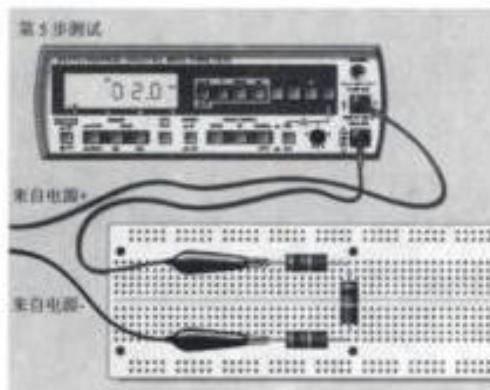


图 4-51 电流测量值

故障调试挑战性电路 2(串联电路框图)

请遵照 SIMPLER 故障调试流程，如图 4-52 所示。

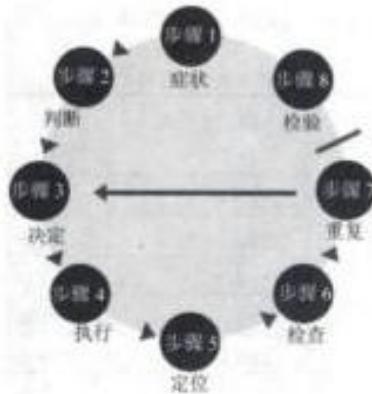


图 4-52 SIMPLER 故障调试流程

电路图如图 4-53 所示。测量值参见表 4-2 所示。

通用测试标识符

测量假定：	可能的测试以及结果
I 在测试点(TP)	电流(低, 高, 正常)
V 从测试点(TP)到地	电压(低, 高, 正常)
R 从测试点(TP)到地 (当电源从电路断开时)	电阻值(低, 高, 正常)

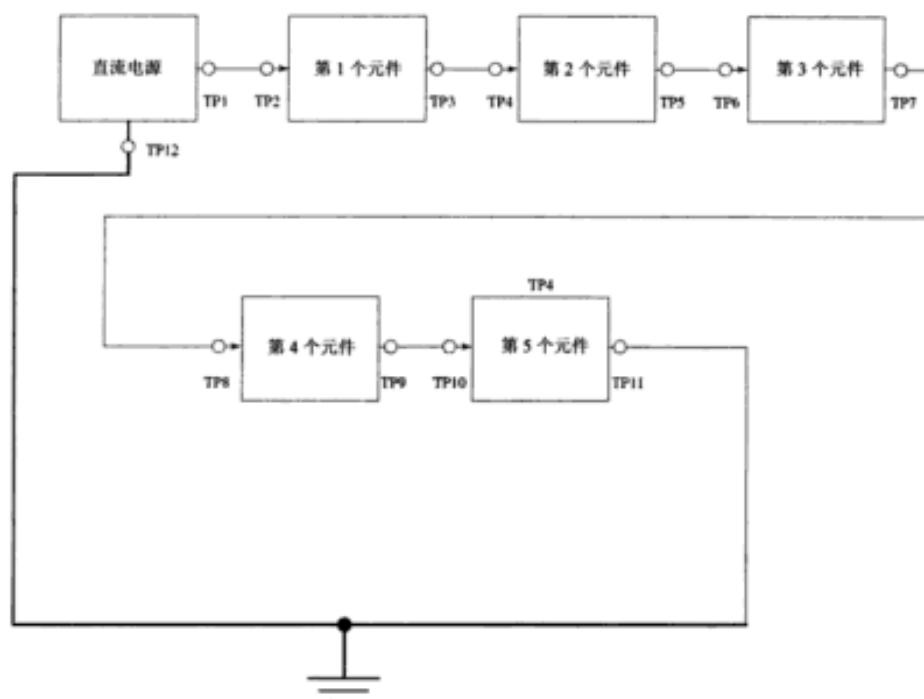


图 4-53 串联电路框图

表 4-2 测量值表

开始点信息	测 试 点	在附录 C 中的结果			
		V	I	R	信号
在 TP1 V 正常 I 低 R 高	TP2	127	128	129	NA
	TP3	130	131	132	NA
	TP4	133	134	135	NA
	TP5	136	137	138	NA
	TP6	139	140	141	NA
	TP7	142	143	144	NA
	TP8	145	146	147	NA
	TP9	148	149	150	NA
	TP10	151	152	153	NA
	TP11	154	155	156	NA
	TP12	157	158	159	NA

步骤 1

症状。在测试点 1, 电压正常, 电流低于正常值, 当断开电源时, 测量得到的电阻值高于正常值。

步骤 2

判断。最初的可疑区域：由于是串联电路，电路的症状可能是由于任意一个元件框内对电流的阻碍作用增强，因此，所有 5 个元件框都被包含在最初的可疑区域内。

步骤 3

决定。根据上述症状信息，决定测试任务。由于图中表示的是串联电路的情况，我们知道在整个电路中电流都偏低。因此，首先从适当的测试点开始进行电压测量。我们测量测试点 TP4 到地的电压。

步骤 4

执行。第 1 步测试：从 TP4 到地的电压稍微有些高。

步骤 5

定位(新的可疑区域)。为了使得 TP4 的电压较高，由于已知电流低于正常值，这表明 TP4 和地之间的电阻一定大于正常值。(但是是哪一个元件呢？)可能是元件 2、3、4 和 5。

步骤 6

检查(已有的数据)。

步骤 7

重复(上面的分析和测试)。

第 2 步测试：测量 TP6 的电压。

TP6 的电压读数稍微有些高。

第 3 步测试：测量 TP8 的电压。

TP6 的电压读数低于正常值，表明问题可能发生在第 3 个元件框内。

步骤 8

验证。第 4 步测试：用一个新的满足所需参数的模块替换第 3 个元件框，结果使得电路的电流增加到原来的正常情况。

第5章 并 联 电 路

教学大纲

- 5.1 并联电路的定义和特征
- 5.2 并联电路的电压
- 5.3 并联电路的电流
- 5.4 基尔霍夫电流定律
- 5.5 并联电路的电阻
- 5.6 计算总电阻(R_T)的方法
- 5.7 并联电路的功率
- 5.8 并联电路开路的效应以及故障调试提示
- 5.9 并联电路短路的效应以及故障调试提示
- 5.10 串联电路和并联电路的异同
- 5.11 按照要求来设计并联电路
- 5.12 并联电源
- 5.13 分流器

教学目标

在学习完此章节以后，您应该能够：

- 1. 说出并联电路的定义。
- 2. 列举出并联电路的特性。
- 3. 确定并联电路的电压。
- 4. 计算并联电路的总电流和支路电流。
- 5. 至少学会使用 3 种方法来计算并联电路中的总电阻和支路电阻。
- 6. 确定并联电路中的电导。
- 7. 计算并联电路的功率值。
- 8. 列出开路对并联电路的影响。
- 9. 列出短路对并联电路的影响。
- 10. 描述对并联电路进行故障排除时所用到的技巧。
- 11. 使用电流分配公式。
- 12. 使用计算器求解电路问题。
- 13. 利用 SIMPLER 故障调试流程解决具有挑战性的电路问题。

预习指导

对于大多数电子电路而言，无论它是简单的还是复杂的电路，都包含可以通过并联电路分析方法来进行检查的部分。当然，有的电路只包含并联部分。比如说，家庭中使用的电灯或者

插座都是通过并联方式进行连接的，如图 5-1 所示。很多汽车零部件(加热器和收音机)都是通过并联方式接在电池上的，如图 5-2 所示。

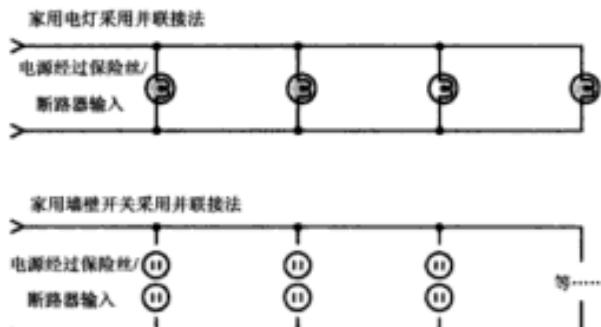


图 5-1 并联电路在家庭中非常常见

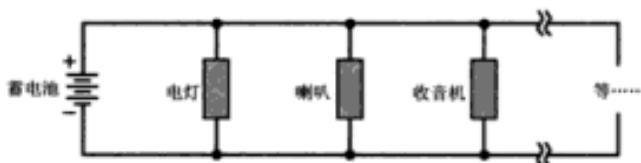


图 5-2 汽车零部件一般都是以并联方式来进行连接的。注意，电路中没有画出串联开关

在本章中，您将再次用到欧姆定律和功率公式。还将学习基尔霍夫电流定律和串并联电路之间一些重要的区别。您将学会几种计算并联电路总电阻的方法。最后介绍了对电路进行故障调试的技术。

关键词

假定电压法(assumed voltage method)

分流器(current dividers)

等效电路电阻(equivalent circuit resistance)

基尔霍夫电流定律(kirchhoff's current law)

并联支路(parallel branch)

并联电流(parallel circuit)

积除以和的方法(product-over-the-sum method)

5.1 并联电路的定义和特征

通过上一章的学习，我们知道，串联电路的一个重要特性就是电流只存在于一条回路中。因此，所有元件上的电流值都是相同的。正因为此，电路中各个元件上的电压值将正比于元件的电阻值(也就是说，电阻 R 越大，则其上的电压值则越大)。

与串联电路相比，并联电路最大的不同之处在于：

(1) 所有并联元件上的电压值是相同的，如图 5-3 所示。

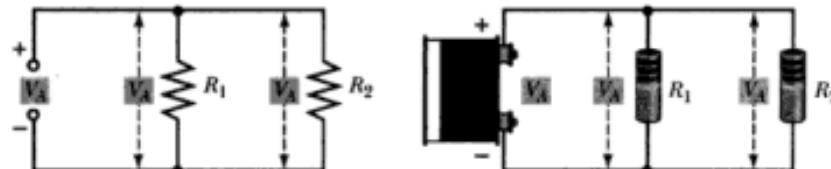


图 5-3 在并联电路中，各个组件上的电压值都是相同的，此处： $V_{R1} = V_A$ ，并且 $V_{R2} = V_{R1} = V_A$

(2) 有两条以上的电流支路，如图 5-4 所示。因为每条并联支路(parallel branch)上的电压值都是相同的，所以每个支路上的电流就与支路的电阻值有关。每条支路上的电流值反比于支路上的电阻值，这也就是说，支路上的电阻值越大，此支路上的电流就越小，如图 5-5 所示。

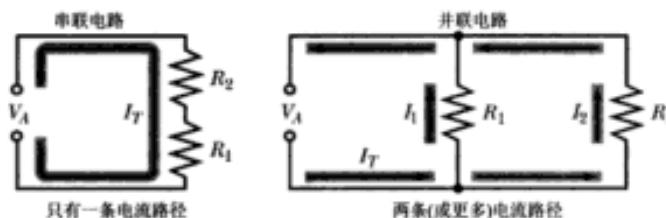


图 5-4 串联电路和并联电路的一个主要区别

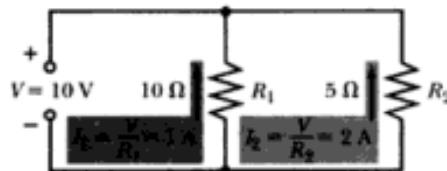


图 5-5 在并联电路中，每个支路上的电流是反比于此支路电阻值的

在此，需要重申一下并联电路的特点，并联电路具有两个或者两个以上的支路，并且各个支路上的电压值相等。

5.2 并联电路中的电压值

如果已知并联电路上的电压值或者任一支路上的电压值，就可以判断出所有并联支路上的电压值。这个电压值和所有并联支路上的电压值都是相同的，如图5-3所示。

练习题 1

如图5-3所示，如果 R_2 为 $27\text{ k}\Omega$ ，并且 R_2 上的电流值为 2 mA ，那么 V_{R1} 的值是多少？ V_A 的值是多少？

5.3 并联电路中的电流

支路电流和总电流

请参考图 5-6, 以下几点都满足基尔霍夫电流定律:

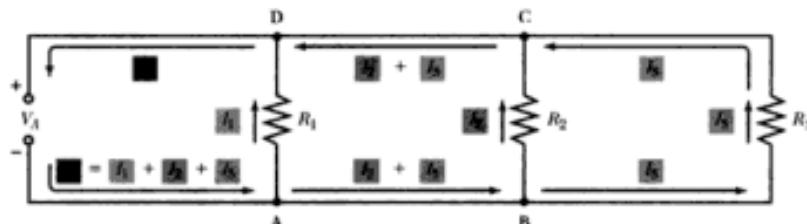


图 5-6 基尔霍夫电流定律说明, 流入某点的电流值应该等于流出此点的电流值。

- 总电流从电源的负极流出, 经过导线后流到 A 点。
- 在 A 点, 总电流中的一部分通过 R_1 (电流回路 I_1)流回电源正极。剩下的电流将流到 B 点。
- 在 B 点, 电流继续分为两部分, 一部分通过 R_2 (电流回路 I_2)流回电源正极, 另外一部分通过 R_3 (电流回路 I_3)流回电源正极。
- 在 C 点, 电流 I_2 和 I_3 重新合并, 并流到 D 点。因此, C 点到 D 点之间的电流值等于 $I_2 + I_3$ 。
- 在 D 点, 电流 $I_2 + I_3$ 和 I_1 合并在一起, 这个总电流将回到电源正极。注意事项: 总电流等于各个支路电流的总和。这一点是非常重要的, 必须牢记。

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (5-1)$$

练习题 2

假设有一个 5 支路的并联电路。关于 I_T 的公式如何表述? 哪个电阻上的电流值最大? 哪个电阻上的电流值最小?

5.4 基尔霍夫电流定律

以上的内容已经对基尔霍夫电流定律进行了说明。简单说来, 此定律的内容就是: 流入某点的电流值应该等于流出此点的电流值。

在并联电路中, 因为每个支路上的电压值都是相同的, 所以每个支路上的电流将反比于此支路上的电阻值。也就是说, 支路上的电阻值越大, 支路电流越小; 支路上的电阻值越小, 支路电流越大。

例: 如图5-7所示, 在使用欧姆定律来计算支路电流的时候, 显然有支路上的电流反比于此支路上的电阻值。图5-8表示了在并联电路中, 各个支路上的电流分配关系。可以看出, 如果支路1的电阻值是支路2电阻值的2倍, 那么支路1的电流值是支路2电流值的一半。也就是说, 支路2的电流值是支路1电流值的2倍。如果支路1的电阻值是支路2电阻值的1/4, 那么支路1的电流值是支路2电流值的4倍, 依此类推。

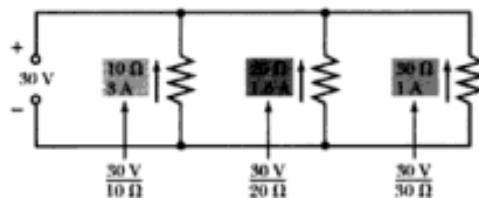
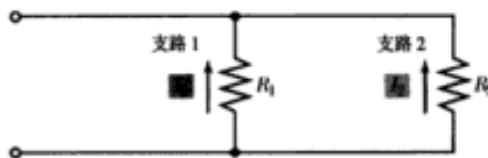
图 5-7 支路电流和支路电阻值 R 成反比

图 5-8 各个支路上的电流比例关系：如果 R_1 的值为 R_2 值的 2 倍，那么 I_1 为 I_2 的一半。
如果 R_1 的值为 R_2 值的 $1/4$ ，那么 I_1 为 I_2 的 4 倍

我们已经知道，每个并联支路上的电压值都是相同的，流入某点的电流和流出此点的电流相等，并联支路上的电流值反比于此支路的电阻值，总电流等于各个支路电流的总和。如果可以灵活运用欧姆定律和基尔霍夫定律，那么就可以解决很多实际问题。

练习题 3

在不看上文的前提下，判断出图 5-9 中 V_2 、 V_1 、 V_A 、 I_1 和 I_T 的值各为多少。然后阅读以下说明文字。

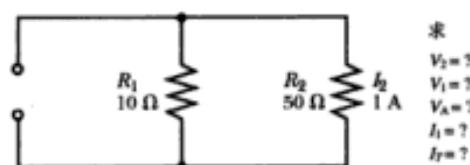


图 5-9 练习题 3 电路图

为了确定 V_2 的值，需要使用欧姆定律，此处 $V_2 = I_2 + R_2 = 1 A + 50\Omega = 50 V$ 。因为所有并联支路上的电压值必须是相同的，所有 V_1 和 V_A 都应该等于 $50V$ 。既然已经知道了 V_1 和 R_1 ，那么就可以再次使用欧姆定律来计算 I_1 。也就是说， I_1 等于 V_1/R_1 ，也就是 $5A$ 。 I_T 等于各个支路电流的总和，也就是 $1 A + 5 A = 6 A$ 。

在使用欧姆定律的时候，电路中总的电阻值 R_T 等于多少？结论就是：

$$R_T = V_1/I_T = 8.33\Omega$$

有趣的是，电路中总的电阻值小于任何一个支路上的电阻值。相对于电源而言，如果两个支路上的电阻分别为 10Ω 和 50Ω ，那么就可以使用一个 8.33Ω 的电阻来代替两个支路电阻，并且可以保证电路中总电流和总功率不变。在此章节的后续部分中，将陆续介绍求解并联电路中总电阻的几种方法。然而在此处，需要记住的是：并联电路的总电阻是小于任何一个支路电阻的。

练习题 4

参考图5-10，运用你已经掌握的关于并联电路的知识。求出所有的未知量，在给出结果之前请不要想着作弊。

参考图5-10，假定以下参数变化为： $V_s = 125\text{ V}$, $I_2 = 10.64\text{ mA}$, $I_1 = 4.63\text{ mA}$, $R_2 = 56\text{ k}\Omega$ 。计算 A_1 , A_2 , I_2 , A_2 和 R_2 的值。

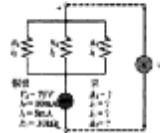


图 5-10

5.5 并联电路的电阻

再次重申，串联电路中的总电阻等于任一支路电阻的和。在本节我们将对这一结论做出解释，并探讨并联电路电阻的几和奇妙的性质。

因为每个支路上都要有电流通过，所以并联电路中的总电流大于任何一个支路上的电流。电源的电压 V 是恒定不变的，若总电流大于任何一个支路上的电流，根据欧姆定律 $I = V/R$ ，我们就可以得出以下结论：随着并联电路中支路数量的增加，总电阻的总电阻或者等效电阻是逐渐减小的。

例如，如果有两条导线是由一个支路构成，那么该路的总电阻等于此支路上的电阻 R ，假定在此并联电路中增加一条支路，支路电阻可以为任意值。那么在此支路上必然有电流通过。因此，电路中总电流就会增加，而电路的电压保持不变，所以支路中的总电阻或者等效电阻就会下降。顺着这条思路，下面来介绍几种计算并联电路总电阻的方法。

5.6 计算总电阻(R_t)的方法

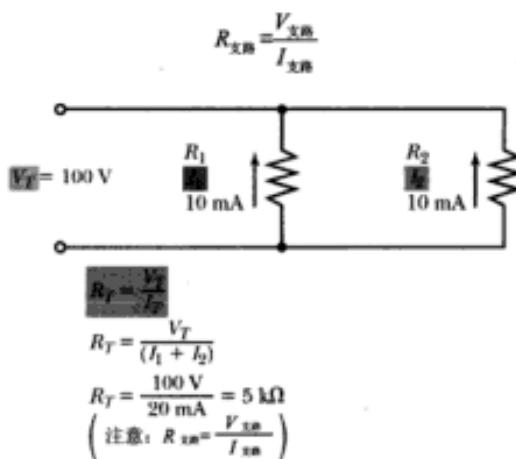
5.6.1 欧姆定律方法

使用公式 $R_t = V/I_t$ 来计算总电阻。

例：如图5-11所示，根据欧姆定律，总电阻为：

$$R_t = 100V / 10mA = 10\text{ k}\Omega$$

在已知支路电压和支路电流的情况下，欧姆定律也可以用来计算各个支路上的电阻值。公式如下：

图 5-11 计算总电阻 R_T 时可使用欧姆定律

请再次参看图5-11。既然我们已知各个支路上的电压是相同的，并且等于电源电压，那么：

$$R_1 = 100 \text{ V} / 10 \text{ mA} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 100 \text{ V} / 10 \text{ mA} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_T = 100 \text{ V} / 20 \text{ mA} = 5 \text{ k}\Omega$$

需要指出的是，此处计算出来的结果为 $R_T = 5 \text{ k}\Omega$ ，此结果符合之前提出的并联电路总电阻小于任一支路电阻的结论。在图5-11中，各个参数变化为： $V_T = 50 \text{ V}$, $I_1 = 1.06 \text{ mA}$, $I_2 = 1.85 \text{ mA}$ 。可以通过欧姆定律来计算总电阻。(注意：计算结果保留两位有效数字，结果虽然不是非常精确，但是已经非常接近于真实值了。)

$$R_T = V_T / I_T = 50 \text{ V} / (1.06 \text{ mA} + 1.85 \text{ mA}) = 50 \text{ V} / 2.91 \text{ mA} = 17.18 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = V_1 / I_1 = 50 \text{ V} / 1.06 \text{ mA} = 47 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = V_2 / I_2 = 50 \text{ V} / 1.85 \text{ mA} = 27 \text{ k}\Omega$$

练习题 5

1. 请再次参看图 5-11 并应用欧姆定律。假设 $I_1 = 15 \text{ mA}$ ，并且 $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$ ，计算出 V_R 和 R_T 的值。

2. 如果 $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, R_T 的值应该为多少？

5.6.2 电导方法

电阻是对电流的阻碍作用，而电导反应了电流流过电路或元件的容易程度。为了计算电导，我们可使用电阻的倒数。也就是 $G = 1/R$ ，此处 G 表示电导，单位是西门子 (S)， R 表示电阻，单位是欧姆 (Ω)。

在并联电路中，总电流等于各个支路电流的总和。因为各个支路上的电压都是相同的，因此我们可以得到一种计算电路总电导(G_T 或者 $1/R_T$)的方法，如下文所述。

因为 $I_T = I_1 + I_2 + \dots + I_n$, 并且各个支路上的电压 V 都是相同的, 而且根据欧姆定律 $I_T = V/R_T$, 可以得到如下公式:

$$\frac{V}{R_T} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \dots + \frac{V}{R_n}$$

R_n 代表第 n 个支路上的电阻值。因为并联电路中各支路的电压 V 是相同的, 我们可以将上述公式中的各项都除以 V , 并得到关于电导 ($1/R_T$) 的公式。

$$(G_T) \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (5-2)$$

一旦确定了电路总的电导, 那么就可以很容易确定电路的总电阻, 因为它们相互为倒数关系。

在下面的例题中, 使用倒数公式可以很容易地计算出电路中总的电导, 只需要将各个支路上的电阻的倒数相加就可以得到总的电导。一旦确定了总的电导, 那么就只需要计算出此数值的倒数, 就得到了电路的总电阻。请参看例题以加深对计算过程的理解。

例题: 假设有一个由 4 条支路组成的并联电路, 各个支路上的电阻值分别为 22Ω 、 39Ω 、 56Ω 和 82Ω , 那么就可以使用计算器, 并按照以下的步骤来计算得到电路的总电阻。

第1步: 按下计算器上的“AC/ON”键以将计算器清零。显示读数为 0。

第2步: 输入 22, 然后按下“ $1/x$ ”键, 然后按下“ \oplus ”键, 显示读数为 0.04545。

第3步: 输入 39, 然后按下“ $1/x$ ”键, 然后按下“ \oplus ”键, 显示读数为 0.07109。

第4步: 输入 56, 然后按下“ $1/x$ ”键, 然后按下“ \oplus ”键, 显示读数为 0.0889。

第5步: 输入 82, 然后按下“ $1/x$ ”键, 然后按下“ \oplus ”键, 显示读数为 0.1011。此数值就是 $1/R_T$ 的取值, 或者说是 G_T (总的电导) 的取值。

第6步: 按下“ $1/x$ ”键, 然后按下“ \ominus ”键。 $R_T = 9.886\Omega$ (保留小数点以后两位有效数字, $R_T = 9.89\Omega$, 或者近似取值为 10Ω)。

(此计算结果是否小于任何支路电阻? 答案是肯定的, 通过心算就可以估算出此结果是合理的。) 再次强调, 电路的等效电阻小于任何支路电阻。

以下公式可以概括出上述的 6 步计算过程。

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (5-3)$$

经验提示

正如您在此例题中所看到的那样, 可以方便地通过计算器来使用此方法。除非您有某些其他的计算习惯, 在一般情况下请使用这种计算方法。在绝大多数情况下, 此种方法是最简便的。

练习题 6

- 假设并联电路上各个支路电阻分别为 $10\text{ k}\Omega$ 、 $27\text{ k}\Omega$ 和 $20\text{ k}\Omega$ 。使用电导方法来计算 R_T 。
- 假设并联电路上各个支路电阻分别为 $1.5\text{ k}\Omega$ 、 $3.9\text{ k}\Omega$ 和 $4.7\text{ k}\Omega$ 。再次使用电导方法来计算 R_T 。

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3 \quad (5-4)$$

换句话说， $1/R_T(G_T) = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$

练习题 7

1. 使用电导方法，并验证图 5-12 中的计算结果。

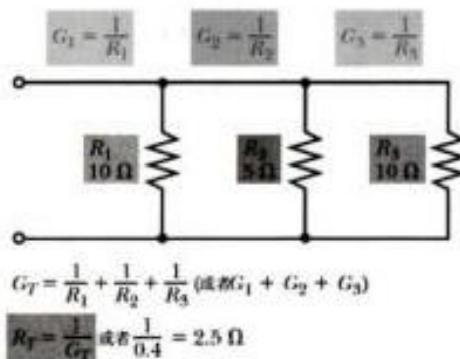


图 5-12 采用电导方法确定总电阻 R_T

2. 请参考图 5-13，并使用电导方法来计算电路总电阻。

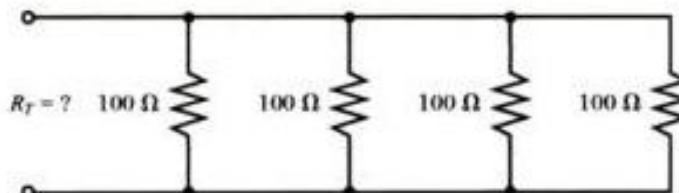


图 5-13 求电路总电阻

5.6.3 积除以和的方法

积除以和的方法是另外一种常用的计算并联电路总电阻的方法。这种方法仅限于用来解决只有两条电路支路的情形，对于电路中支路数量大于两条的情形，可以先计算两条支路的电阻。此种方法是从以下基本公式演变而来的：

$$G_T = 1/R_T = 1/R_1 + 1/R_2$$

因为电阻是电导的倒数，所以此公式又可以表示为：

$$R_T = 1/G_T, \quad R_T = 1/(1/R_1 + 1/R_2)$$

根据这个公式，可以得到以下公式：

$$R_T = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \quad (5-5)$$

例：图5-14中是一个由两电阻组成的并联电路，它说明了此公式的使用方法。

如果 $R_1 = 100\Omega$ ，而 $R_2 = 50\Omega$ ，那么电路的总电阻是多少？

在这种情况下，积为 $100 \times 50 = 5000$ ，和为 $100 + 50 = 150$ 。因此， $R_T = 5000/150\Omega$ ，总电阻为 33.33Ω 。积除以和方法只适用于两条支路的情形。

例：在图5-14中，假设一个电阻值为 $3.9\text{ k}\Omega$ ，而另外一个电阻值为 $6.8\text{ k}\Omega$ ，那么总电阻为：

$$R_T = (R_1 \times R_2) / (R_1 + R_2) = (3.9 \times 10^3 \times 6.8 \times 10^3) / (3.9 \times 10^3 + 6.8 \times 10^3)\Omega = 26.52 \times 10^3 / 10.7 \times 10^3\Omega$$

$$R_T = 2.48 \times 10^3\Omega \text{ 或者 } 2.48\text{ k}\Omega$$

可以使用心算的方法来近似计算： $4 \times 7 = 28$ ， $28/(4+7)$ 的结果近似为 2.5 。计算结果和近似值相差无几。现在还有两个练习题可做。

练习题 8

- 假设图5-14中两个电阻的阻值分别为 30Ω 和 20Ω ，请使用积除以和的方法来计算 R_T 。
- 假设图5-14中两个电阻的阻值分别为 30Ω 和 20Ω ，请使用积除以和的方法来计算 R_T (或者 R_e)。

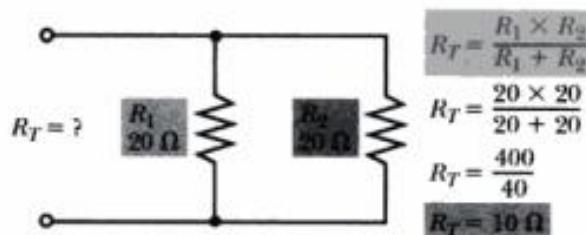


图5-14 使用积除以和的方法来计算 R_T

此方法对于两支路的并联电路非常有效。那么对于3支路的并联电路，有没有类似的方法可以使用呢？答案很简单：先对两条支路使用一次此公式，然后将计算结果作为一条支路上的电阻，并将计算结果和第3条支路上的电阻再次带入到公式中去。当然，您还可以使用前文中所推荐使用的倒数公式或者电导方法来计算总电阻。

$$1/R_T = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 \quad \text{或者} \quad R_T = 1/(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3)$$

下面的例题说明了如何使用积除以和的方法来计算3支路并联电路的总电阻。

例：在图5-15中的并联电路中有3条支路。每条支路上的电阻为 3Ω ，电路的总电阻应该是多少？先对其中的支路1和支路2使用积除以和的方法，

$$(R_1 \times R_2) / (R_1 + R_2) = 1.5\Omega$$

可以得到这两条支路的等效电阻为 1.5Ω 。然而，在电路中还有一条支路3，等效电阻 1.5Ω 和支路3上的电阻 $R_3(3\Omega)$ 是并联关系。再次使用积除以和的方法来计算电路的总电阻

$$(R_e \times R_3) / (R_e + R_3) = 1\Omega$$

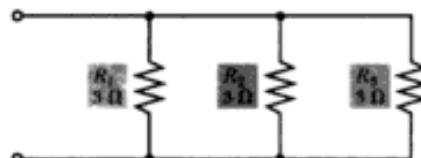
需要指出的是，在使用倒数公式也可以得到相同的计算结果：

$$1/R_T = 1/3 + 1/3 + 1/3 = 1\Omega; \text{ 或 } 1/G_T = 1\Omega$$

练习题 9

如果在图5-15中，各个电阻分别为 47Ω 、 100Ω 和 180Ω ，那么 R_T 的值应该是多少？请使用积除以和的方法来进行计算。

如果电路中有4条支路，那又该怎么办？为确定两条支路的等效电阻，可使用积除以和的方法。然后再次使用积除以和的方法来求出另外两条支路的等效电阻，然后对这两个等效电阻使用积除以和公式以确定电路最终的总电阻。



$$\frac{R_1 \times R_2}{(R_1 + R_2)} = \frac{9}{6} = 1.5 \Omega$$

$$\frac{R_3 \times R_T}{(R_3 + R_T)} = \frac{4.5}{4.5} = 1 \Omega R_T$$

图 5-15 当电路中的支路数量大于两条的时候，也可以使用积除以和公式来计算总电阻

5.6.4 一种有效的简化方法

您可能已经注意到了，在图5-14中，两条支路上的电阻都是 20Ω ，而总电阻是 10Ω 。总电阻是一条支路电阻的一半。假设现在有一个由3条支路构成的并联电路，而各条支路上的电阻均为 30Ω ，那么您认为总电阻将是多少呢？如果说答案还是 10Ω ，那么您就对了。如果两个相同的电阻构成了一个两支路的电阻，那么等效电阻将是任一支路电阻的一半，如果3个相同的电阻构成了一个两支路的电阻，那么等效电阻将是任一支路电阻的 $1/3$ ，依此类推。如果各个支路电阻相同，那么就可以心算出等效电阻。这种方法可以降低计算的复杂程度。

如图5-16所示。首先计算出 R_2 和 R_4 的等效电阻为 10Ω ，然后将此结果和另外两条电阻为 10Ω 的支路并联在一起，那么总电阻就是 10Ω 的 $1/3$ ，也就是 3.33Ω 。如果在多支路的并联电路中存在相同的支路电阻，那么就可以使用这种技巧，直到电路中剩下的支路数量已经是最少的了。然后就可以使用积除以和的方法，或者倒数公式和欧姆定律来求出总电阻。

经验提示

如果在并联电路中没有相同的电阻，那么就不能使用这种简化技巧。但是，如果存在相同的电阻，请使用此种技巧，这种技巧确实可以简化计算过程。

5.6.5 假定电压法

如果在并联电路中存在各种“不匹配”的电阻，那么可以使用另外一种计算总电阻的方法：假定电压法。在FCC电台许可试验中，经常会遇到这种问题。

此方法包含两个步骤：

1. 假定电路的电压是某个值，当然此电压值要是一个易于进行计算的数值，然后求出各个支路上的电流。比如说，可以将此电压值定为各个支路电阻的乘积(最小公倍数)。

2. 用假定的电压值除以各个支路上的电阻，以求出各个支路上的电流。然后将各个支路电流相加，得到电路中的总电流。再用假定电压除以总电流，就可以得到电路的总电阻。

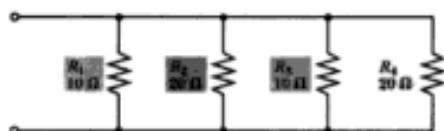


图 5-16 一种有效的简化技巧

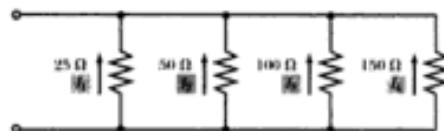
第1步：将 R_2 和 R_4 合并在一起，等效电阻为 10Ω 。

第2步：已知在并联电路中存在3条支路，每条支路上的电阻为 10Ω ，则总电阻为 10Ω 的 $1/3$ ，也就是 $R_T=3.33\Omega$ 。

例：请参考图5-17。按照上述的解题步骤，解题过程如下：

- 假设电源电压为 $300V$ ，此数值可以被各个支路上的电阻值除尽。
- 使用欧姆定律求出各个支路上的电流值。各支路电流分别为 $12A$ 、 $6A$ 、 $3A$ 和 $2A$ 。总电流为各支路电流的总和，也就是 $23A$ 。因此 $R_T=300V/23A=13.04\Omega$ 。

从这个意义上讲，使用这种方法时可以通过心算来进行第1步，以求出总电流。剩下的就是一个除法过程了， V_T/I_T ，这样就可以求出总电阻了。



解题的值：可以将假定电压定为 $300V$

$$\begin{aligned} I_1 &= 12A & I_2 &= 6A & I_3 &= 3A & I_4 &= 2A \\ I_T &= I_1+I_2+I_3+I_4=23A \\ R_T &= \frac{300V}{23A} = 13.04\Omega \end{aligned}$$

图 5-17 确定 R_T 的假定电压法

在图 5-17 中，如果电阻值分别变为 10 、 13 、 20 和 26Ω ，那么总电阻应该是多少呢？请试着使用假定电压法来求解答案。

您求出的答案应该是 3.77Ω 。可以将假定电压定为 $260V$ ，因为它可以被电路中的各个电阻值除尽。

注意，如果您将假定电压设为其他的值，计算结果并不会改变。

5.6.6 并联电路电阻设计公式

作为一名技术人员，有时可能需要在现有电路的基础上再并联一个电阻，以降低现有电路的总电阻。或者您需要得到某个特定的电阻值。也有可能您手边的电阻的阻值都不是您想要的。这些情况都是经常会出现的！为了获得所需的电阻值，我们可能需要在已有电阻的基础上再并联某个电阻，如何确定此并联电阻的阻值呢？(注意：可以使用 R_T (总电阻)和 R_e (等效电阻)来表示并联电路中的总电阻。您需要对这两种简写非常熟悉，因为经常会用到这两种简写。)

答案是一个由积除以和方法演变而来的公式：

$$R_e = \frac{R_k \times R_u}{R_k - R_u} \quad (5-6)$$

其中， R_u = 未知的电阻。

R_e = 并联电路中的理想等效电阻。

R_k = 并联电路中已知的电阻，此电阻和未知电阻并联以后就可以获得理想的等效电阻。

例：为了获得 6Ω 的总电阻，需要在 10Ω 已知电阻的基础上并联多大的电阻？请参看图5-18中的解答过程。

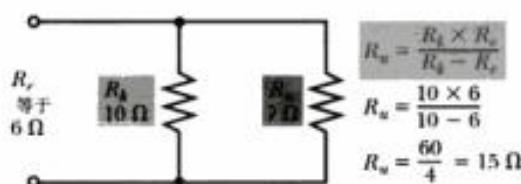


图 5-18 一个实际的电路设计公式

练习题 10

使用此方法来解决图5-19中的问题。

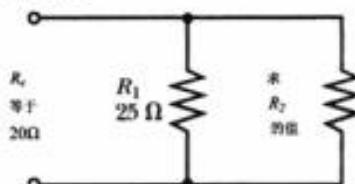


图 5-19 练习题 10 电路图

5.7 并联电路的功率

5.7.1 总功率

任何电路(串联、并联或者混合电路)的总功率都是电路中各个元件功率的总和，也可以使用以下公式之一来计算总功率： $P_T = V_T \times I_T$ ； $P_T = I_T^2 \times R_T$ ；或者 $P_T = V_T^2 / R_T$ 。也可以求出电路中的任何电阻元件的功率，当然需要根据各电阻元件的参数来进行计算，这些参数包括元件的压降、电流和阻值。

在阅读下面关于电路功率的文章时，您需要参考图5-20。

5.7.2 各个支路上的功率消耗

为了确定支路上的功率, 请使用此支路上的参数来进行计算。对于支路1 (R_1), $P = 100 \text{ V} \times I_1$ 。为了确定 I_1 , 将支路电压 V (100 V) 除以支路电阻 R (100 kΩ)。结果是 1mA。因此 $P_1 = 100 \text{ V} \times 1 \text{ mA} = 100 \text{ mW}$ 。

支路2: 支路电流 = $100 \text{ V} / 25 \text{ k}\Omega = 4 \text{ mA}$

支路功率 = $100 \text{ V} \times 4 \text{ mA} = 400 \text{ mW}$

支路3: 支路电流 = $100 \text{ V} / 20 \text{ k}\Omega = 5 \text{ mA}$

支路功率 = $100 \text{ V} \times 5 \text{ mA} = 500 \text{ mW}$

例: 如图5-20所示, 如果我们将电路中各个支路上的功率相加, 那么总功率就是 $100 \text{ mW} + 400 \text{ mW} + 500 \text{ mW} = 1 \text{ W}$ 。也可以使用功率计算公式来求出总功率, V_T 等于 100V 而 I_T 等于 10mA, 所以总功率为 $100 \text{ V} \times 10 \text{ mA} = 1000 \text{ mW}$ (1 W)。无论使用哪种方法, 电路中的总功率就是 1W。

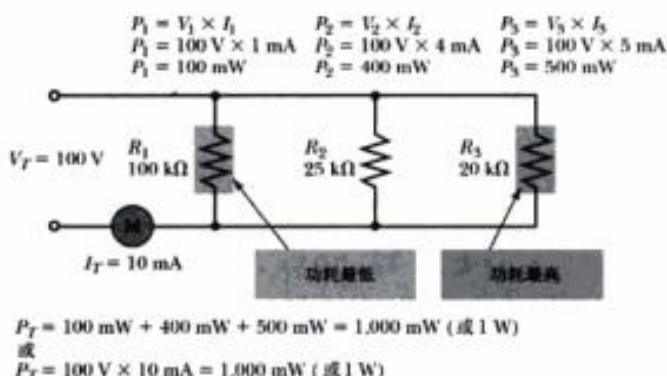


图 5-20 并联电路的功率

练习题 11

在图5-20中, 如果 $V_T = 150 \text{ V}$, 那么电路的总功率是多少?

5.7.3 功率消耗和支路电阻值之间的关系

请再次参看图5-20, 我们可以发现, 电阻最小的支路上所消耗的功率是最大的, 而电阻最大的支路上所消耗的功率是最小的。这是因为所有支路上的电压值都是相同的, 而支路上的电流值是反比于支路电阻的。这种现象和串联电路中的现象是恰恰相反的。在串联电路中, 最大的电阻元件上消耗的功率最大, 那是因为串联电路中各个元件上的电流相同, 而元件上的电压值和电阻值是成正比的。马上我们还会发现在串联电路和并联电路之间存在的几个有趣的相同之处和不同之处。在此之前, 先让我们看看当并联电路出现开路或者短路的时候, 电路中的参数会出现什么变化。

5.8 并联电路开路的效应以及故障调试提示

当并联电路中出现若干条开路支路时，相应的变化如图5-21所示。

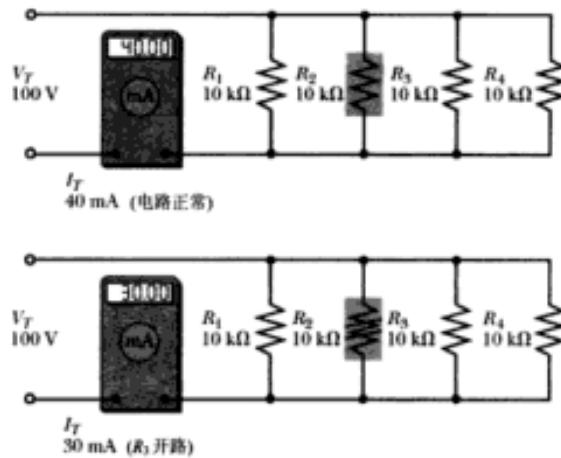


图 5-21 当并联电路出现开路时所发生的变化

1. 正常情况下此电路的各个参数为： $V_T = 100 \text{ V}$ ； $I_T = 40 \text{ mA}$ ； $P_T = 4000 \text{ mW}(4 \text{ W})$ ；每条支路上的 $I = 10 \text{ mA}$ ，每条支路上的 $P = 1000 \text{ mW}(1 \text{ W})$ 。

2. 如果支路 2 断开，因为没有电流流过支路 2，所以总电流降低为 30mA。在这种情况下，以下条件成立：

- 总电阻增加。
- 总电流降低(从 40 mA 降为 30 mA)。
- 总电压和支路电压保持不变。
- 总功率降低(降为 $100\text{V} \times 30\text{mA} = 3000 \text{ mW}$ ，也就是 3 W)。
- 正常(未开路)支路上的电流保持不变，因为支路上的电压 V 和电阻 R 保持不变。
- 同理，因为正常支路上的电压和电流保持不变，所以正常支路上的功率消耗保持不变，但是开路支路上的功率发生了变化。
- 因为开路支路上的电流降为 0A，所以开路支路上的功率消耗为 0W。而开路支路两端的电压值维持不变。

经验提示

如果电路(串联、并联和混合电路)中出现了开路，那么将发生以下情况：

1. 开路将引起电路总电阻增加。
2. 开路将引起电路总电流下降。
3. 开路将引起电路总功率下降

开路可能是由于元件损坏或者导线断开而引起的。在印刷电路板上，如果导线破损了，或者焊点接触不良，都有可能引起开路。在由导线直接连结而成的电路中，断开的导线(无效焊点)将引起开路，如图 5-22 所示。

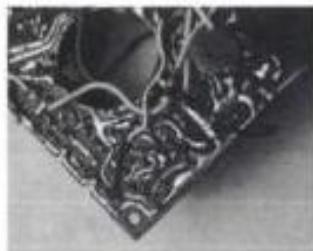


图 5-22 开路可能是由断开的导线和无效焊点而引起的

故障调试提示

因为并联电路中的开路会导致总电阻增加，总电流降低，并且开路支路上的电流为零。故障调试提示有助于发现这些现象。将电源从电路中取下，并用欧姆表测量电路的总电阻。如果测量出的电阻值比电路正常情况下的电阻值要大，那么就说明可能出现了开路支路，或者电路总的某个元件破损了或者元件阻值增加了。如果可以方便地将各个支路依次从整个电路中进行隔离，并同时观察欧姆表的读数变化，那么就可以很容易地找出开路的支路。例如，如果将某条支路隔离开以后，总电阻发生了变化(增大)，那么就说明这条支路是正常的。如果将某条支路隔离开以后，总电阻没有发生变化，那么就意味着您可能已经找到了开路支路。因为此条支路已经是断开的，所以再次将它断开并不会改变电路的总电阻。如果您观测的是电流读数，那么出现开路以后，电路中的电流读数就会降低。如果可以方便地对各个支路上的电流进行测量，那么当测量某条支路时，如果电流读数为零，则说明此支路是断开的。其他正常支路上的电流应该是保持不变的。

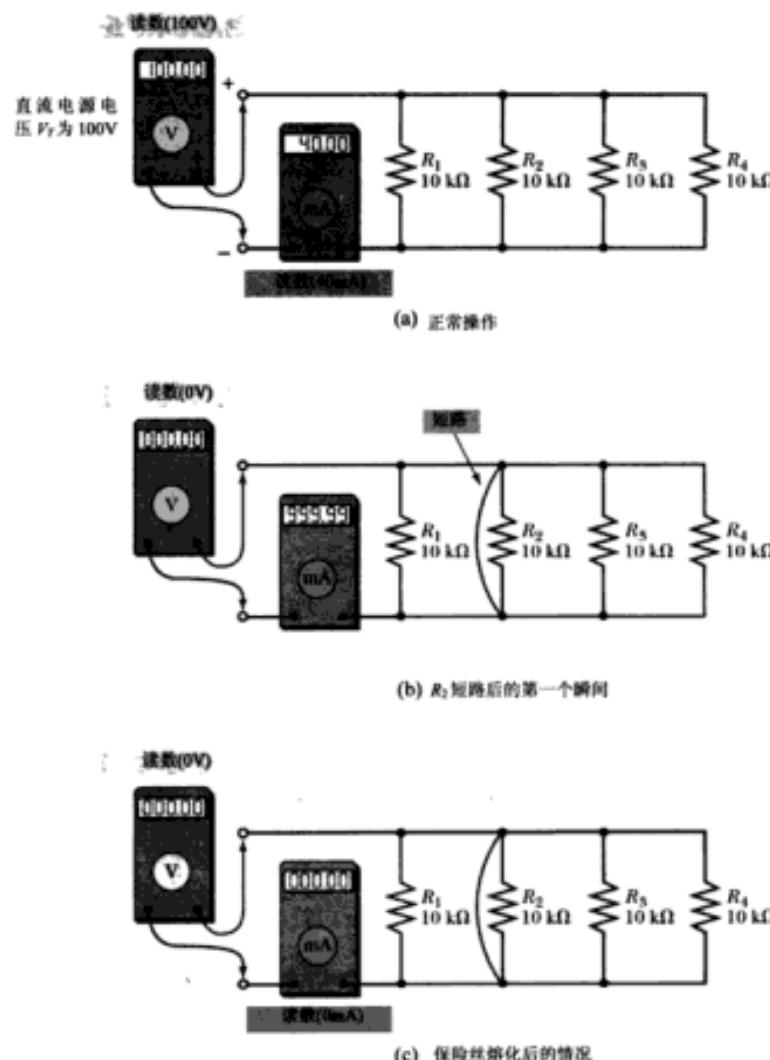
5.9 并联电路短路的效应以及故障调试提示

并联电路中的短路分支是一个严重的问题。由于每一个分支直接跨接在电压源的两端，短路分支在电压源两端呈现出的电阻将会为 0Ω 或者接近于 0Ω ，参见图 5-23。

正常情况下此电路的各个参数为： $V_T = 100 \text{ V}$ ； $I_T = 40 \text{ mA}$ ； $P_T = 4000 \text{ mW}(4 \text{ W})$ ；每条支路上的 $I = 10 \text{ mA}$ ，每条支路上的 $P = 1000 \text{ mW}(1 \text{ W})$ 。

如果支路 2 出现短路，电路中将可能出现以下变化：

- I_T 将会大大增加，直到保险丝熔化，或者电源耗尽。
- V_T 将大大降低！因为电源内部存在电阻，所以电源内部的压降将大大增加，从而导致外部输出电压大大降低。对于大部分电源来说，如果出现短路，那么输出电压将降低至近乎于零。
- P_T 将大大增加，直到电能耗尽或保险丝熔化为止！
- 其他正常支路上的电流将降低至几乎为零，因为支路上的电压值也已经降为几乎为零。

图 5-23 并联电路出现短路时发生的变化。 R_T 降低, I_T 增加, 直到保险丝熔化或者电能耗尽为止

- 电路中的总电阻将大大降低! 总电阻将小于任何支路电阻 R 。
- 如果电路中有保险丝, 那么保险丝将烧断或熔化。也有可能导致电路元件或电源冒烟。

经验提示

如果电路(串联、并联和混合电路)中出现了短路, 那么将发生以下情况:

1. 短路将引起电路总电阻降低。
2. 开路将引起电路总电流增加(至少是瞬时增加!)。
3. 开路将引起电路总功率增加(至少是瞬时增加!)。
4. 开路可能引起电路电压降低(可能降至 0V!)。

故障调试提示

首先断开故障电路的电源！这样就可以在不损坏电路、电源和导线等元件的基础上检查电路中的电阻值。对于短路故障，不能在带电的情况下进行故障检查。

同样，检查故障的最好的办法就是依次隔离各个支路。首先将各个支路从总体电路中隔离开，然后检查支路上的电阻。如果支路没有出现短路的，那么电阻值 R 将保持正常值。如果支路出现短路，那么支路电阻将接近于零。

在隔离开支路以后，应该首先目测各个元件、导线和印刷电路等有没有出现明显的故障。如果是元件的内部出现了短路，那么就可以测量元件的电阻值。

5.10 串联电路和并联电路的异同

在表 5-1 中，给出了一些串联电路和并联电路之间存在的很有意思也很重要的异同之处，这些异同之处都是您必须了解而且熟记的。请使用该表来进行此章节的学习。

5.11 按照要求设计并联电路

例：假设您想搭建一个 4 支路的并联电路，其中支路 1 和支路 3 具有相同的电流值，而支路 2 和支路 4 具有相同的电流值，但是要求支路 2 和支路 4 上的电流是支路 1 和支路 3 上电流的两倍。并且假设支路 1 上的电阻值为 $10 \text{ k}\Omega$ ，而且支路 1 上的电流值为 10 mA 。

表 5-1 串联电路和并联电路的比较

串联电路的特点	并联电路的特点
总电阻 $R_T =$ 各个元件电阻之和	总电阻 R_T 小于各个支路中最小的电阻 R
$I_T = V_T / R_T$	$I_T = V_T / R_T$
$I_T =$ 电路中的电流处处相等	I_T 等于各个支路电流之和，支路电流
$V_T = I_T \times R_T$	$(I_b) = V_b / R_b$
V_T 等于各个元件上压降的总和	支路电流和支路电阻成反比。
$V_{R_N} = I_{R_N} \times R_N$ 任何电阻 R 上的压降量和电阻值成正比关系	$V_T = I_T \times R_T$
$P_{R_N} = (R_N / R_T) \times V_T^2$	V_T 等于各个支路上的电压，各个支路上的电压等于电路的外加电压
电阻 R 所消耗的功率和电阻值直接相关。电路中最大的电阻上所消耗的功率最大；最小的电阻所消耗的功率最小	功率反比于电阻值。最大的电阻上消耗的功率最小，最小的电阻上消耗的功率最大
$P_T = I_T \times V_T$ 也等于所有功率之和开路后，电流为 0A；元件上的电压值为 0V； V_T （外加电压）都加在开路处的两侧	$P_T = V_T \times I_T$ 也等于所有功率之和 开路时，正常支路上不会出现什么变化；故障支路上的电流为零；但是所有支路的电压保持不变
短路时，电流增加；短路处的电压降低，而剩余部分的电压增加；电路中的总功率增加	短路时， I_T 和 P_T 增加（至少瞬时增加）；各个支路上的电压 V 降低；正常支路上的电流降低

在这个设计问题中，需要确定电路的各个参数，并画出电路的示意图。用符号表示出各支路和整个电路中的各项参数，包括电压、电流和电阻。

首先画出电路图，并标记出所有的已知量。并且在已知量的基础上，求出各个未知量。

请参看图 5-24(a)，整个设计过程的第一步就是画出电路图并标记出各个已知量。

第二步就是使用已知量求出未知量，并用适当的符号将求解出的未知量标记在电路图中。

- 因为支路 1 上的电阻值和电流值是已知的，那么就很容易求出支路 1 上的电压值。因此， $V = I \times R = 10 \text{ mA} \times 10 \text{ k}\Omega = 100 \text{ V}$ 。
- 因为这是一个并联电阻，所以各个支路上的电压值都是 100V。
- 因为支路 3 和 4 具有相同的电流值，而且各个支路上的电压是相同的，所以很明显，支路 3 上的电阻值和支路 4 上的电阻值应该是相同的。由此可以判断对于支路 3， $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ ， $I_3 = 10 \text{ mA}$ ，而 $V_3 = 100 \text{ V}$ 。
- 因为支路 2 和支路 4 上的电流是支路 1 和支路 3 上电流的两倍，所以支路 2 和支路 4 上的电流应该是 20mA。因为各个支路上的电压 V 都是相同的，所以支路 2 和支路 4 上的电阻值是：

$$100 \text{ V} / 20 \text{ mA} = 5 \text{ k}\Omega$$

- 求解电路中的总电流和总电阻是很简单的，并且您已经知道了外加电压值。总电流等于各个支路电流的总和，为 60mA。

$$R_T = V_T / I_T = 100 \text{ V} / 60 \text{ mA} = 1.67 \text{ k}\Omega$$

也可以使用各个支路的电阻来求出总电阻。两个 10kΩ 的支路并联后，等效电阻为 5kΩ。此电阻又和另外两个 5kΩ 的支路并联在一起，所以总电阻应该是 $(5/3=1.67)\text{k}\Omega$ 。对于等电阻值的支路，请记住使用这种技巧。

- 最后的任务就是在电路图中标记出各个参数，如图 5-24(b) 所示。

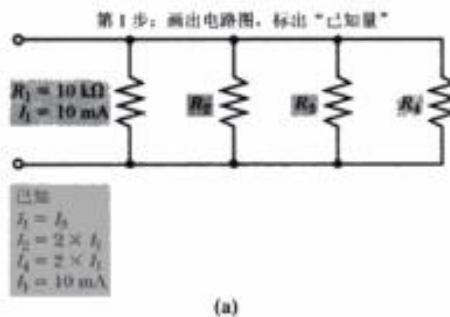


图 5-24 并联电路设计

第2步：利用已知求未知

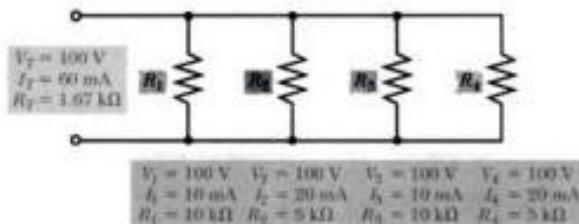


图 5-24 (续)

练习题 12

请独立完成此题。设计并画出一个3条支路的并联电路：

1. 电路的外加电压为 120 V。
 2. 电路中的总功率为 1.44 W。
 3. 支路 1 上的电流值是支路 2 上电流值的一半，是支路 3 上电流值的 1/3。
- 标记出电路中和各个支路上的 V 、 I 、 R 和 P 值。

5.12 并联电源

相对于单电源而言，**并联电源**可以为电路和负载提供更高的传送电流(和功率)的能力(在给定的电压下)。在使用这种方法时，这些并联在一起的电源应该具有相同的输出电压。一种常见的应用方式就是将电池并联在一起，如图5-25所示。



图 5-25 并联的相同电源可以比单电源为电路提供更大的电流和功率

5.13 分流器

您可能已经想到，在并联电路中，总电流是由各个支路来进行分配。您也应该明白，支路电流是和支路电阻值成反比关系的。并联电路的这些特性使得我们在设计电路的时候，为了得到理想的支路电流配比关系，我们就可以选择适当的支路电阻值。同样，在明白了这种电流分配关系后，我们就能在已知总电阻、支路电阻和总电流的条件下确定各个支路上的电流。

5.13.1 任意数量支路的并联电路中各个支路电流的通用公式

下面是确定任意给定支路上电流的通用公式：

$$I_x = \frac{R_T}{R_x} \times I_T \quad (5-7)$$

此处 I_x 是某指定支路上的电流值； R_T 是并联电路的总电阻； R_x 是指定支路上的电阻值。关于此公式的应用实例，请参考图 5-26。

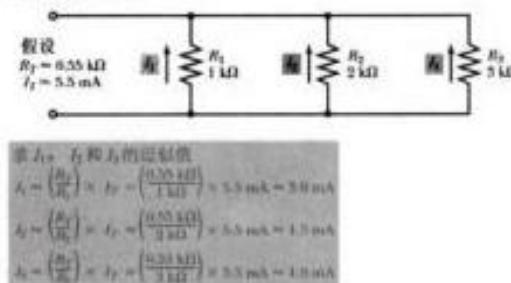


图 5-26 应用分流公式的例题

练习题 13

- 请再次参考图 5-26。假设 $R_1 = 27 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_T = 14.64 \text{ k}\Omega$, $I_T = 3.42 \text{ mA}$ 。
使用分流公式来求解各个支路上的电流值。
- 图 5-26 中的电路参数发生了变化，使得 $I_T = 4 \text{ mA}$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5.6 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 2.7 \text{ k}\Omega$ 。
 a. 求出 R_T 。
 b. 使用分流公式求解各个支路上的电流值。

5.13.2 双支路情形下的分流公式

如果电路中仅仅存在两条支路，如图 5-27 所示，那么在已知 I_T 和各个支路电阻值 R 的情况下，就可以使用以下的公式来求解支路电流：

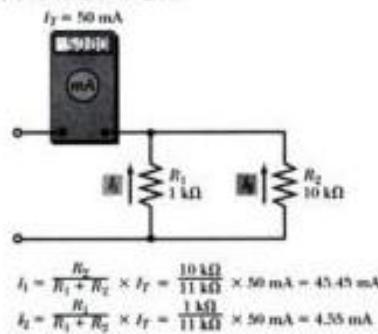


图 5-27 两条支路的分流情况

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times I_T \quad (5-8)$$

$$I_1 = 10\text{k}\Omega / 11\text{k}\Omega \times 50\text{mA} = 0.909 \times 50\text{mA} = 45.45\text{mA}$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times I_T \quad (5-9)$$

$$I_2 = 1\text{k}\Omega / 11\text{k}\Omega \times 50\text{mA} = 0.0909 \times 50\text{mA} = 4.545\text{mA}$$

警告

支路电流和支路电阻之间是反比关系。因此，在求解 I_1 的时候， R_2 是分子，而在求解 I_2 的时候， R_1 是分子。

练习题 14

- 请再次参看图 5-27，假设 R_1 和 R_2 的值分别为 $100\text{k}\Omega$ 和 $470\text{k}\Omega$ ，并假设总电流为 2mA 。请使用双支路情形下的分流公式来求解两条支路上的电流值。
- 假设图 5-27 所示电路中的总电流变化为 20mA ， R_1 等于 $1.8\text{k}\Omega$ ， R_2 等于 $8.2\text{k}\Omega$ 。请使用双支路情形下的分流公式来求解两条支路上的电流值。

经验提示

如果在现有电路的基础上再并联任意阻值的电阻，那么将改变电路中的总电阻和电流，因为电路中又增加了一条支路，又提供了一条电流通路。

在后续的章节中，我们将讨论上述的这个特性是如何影响测量仪器的选型和使用的，比如说电压表。这里只是提醒大家必须注意这个关于并联电路的重要现象。

正如前面所述的那样，无论在已有电路上并联多大阻值的电阻，电路的总电阻都将降低。现在的问题是，下降量到底有多大？

如图 5-28 所示，它说明了增加 $1\text{M}\Omega$ 的支路对电路总电阻的影响。正如您所看到的那样，并联一个很大的电阻后，总电阻的降低量很小。

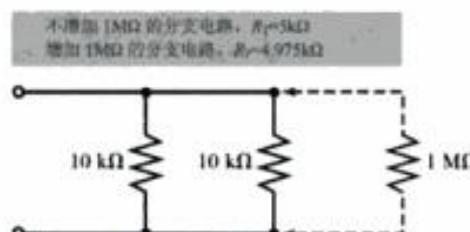
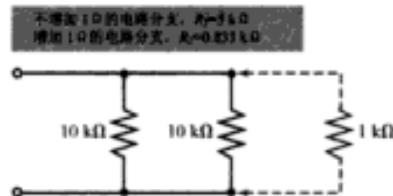


图 5-28 增加 $1\text{M}\Omega$ 的支路对电阻总电阻 R_T 的影响。

如图 5-29 所示，它说明了增加 $1\text{k}\Omega$ 的支路对电路总电阻的影响。相对于并联一个很大的电阻而言，当并联一个较小的电阻后，电路总电阻的降低量更大。

图 5-29 增加 1kΩ 的支路对电阻总电阻 R_T 的影响。

增加一条新的支路后，电阻的变化量不仅仅和新增支路的电阻值有关，而且和原有电路的总电阻有关。如果原有电路的等效电阻很小，那么当并联小电阻后，总电阻的变化量也较小，如果原有电路的等效电阻很大，那么当并联小电阻后，总电阻的变化量也较大。

5.14 知识点汇总

- 在并联电路中，电流会有两个或者更多的支路，并且这些支路上有同样的电压。
- 电路中的总电流按照支路电阻的反比例被分配到各个并联支路中。
- 一个并联电路中的总电流等于各个支路电流的总和。
- 基尔霍夫电流定律表述为在一个电路中，某一点电流的流入值应该等于同一点的电流流出值。
- 并联电路的总电阻一定比拥有最小电阻的支路的电阻小。
- 这里有几个方法来计算并联电路的总电阻：

① 欧姆定律

$$R_T = \frac{V_T}{I_T}$$

② 电阻倒数：相对电导方法

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

或者 $R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}$

③ 电导方法

$$R_T = \frac{1}{G_T}$$

④ 积除以和的方法

$$R_T = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

⑤ 假定电压法

- 在任何可能的时候，一个解决并联电路总电阻的技巧就是给原有电阻并联一个同样大小的电阻。例如：两个 10kΩ 的并联电阻相当于一个 5kΩ 的电阻(或者说是每个相等支路电阻的 1/2)，3 个 10kΩ 的并联电阻相当于一个 3.33kΩ 的电阻(或者说是每个相等支路电阻的 1/3)。

- 为了在一个并联电路中利用一个已给的电阻来获得一个希望得到的电阻值(总电阻)，通常用下面的公式来计算需要的电阻值：

$$R_s = \frac{R_t \times R_e}{R_t - R_e}$$

这里 R_s 是需要计算的未知的电阻值； R_t 是希望从并联电路中获得的合成总电阻值； R_e 是已知的电阻值，未知的电阻需要和它并联来获得所需的电阻值，或者是并联电路的总电阻值。而且，您也可以使用如下公式：

$$\frac{1}{R_s} - \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_e}$$

- 并联电路提供的或者损耗的总功率可以用如下公式来计算： $P_T = V_T \times I_T$, $I_T^2 \times R_T$, 或者是 $\frac{V_T^2}{R_T}$ ，或者是计算所有支路的功率损耗之和。
- 计算一个并联电路任意支路的损耗功率的方法是用指定支路中的 V 、 I 、和/或 R 来取代功率公式中的相应变量。
- 支路功率损耗的特点是最高电阻的支路功率损耗最低，而最低电阻的支路功率损耗最高。
- 并联电路中的一个开路支路将会导致整个电路电流(和功率)降低；总电阻增加；通过未断开支路的电流保持不变；通过开路支路的电流降低到零。电路的电压保持不变。
- 并联电路中的一个短路支路可能会对电路导线和/或电路功率供应造成损害，并且可能导致保险丝烧断。短路导致电路中的总电流急剧增加直到保险丝烧断或者电源毁坏，同时还会导致电路总电阻降低到零欧姆；并且从电源处需要的功率值就会有极大的增加。当保险丝烧断或者电源毁坏，电路中的 V 、 I 和 P 都会降低到 0。
- 处理并联电路中开路故障的方法是：在断电的情况下检查电阻器来隔离出现故障的电阻器，或者在通电的情况下逐一测量各个支路的电流。另一个技巧是在监控电路的电阻或者电流的时候，从电路中剩下的部分中把某一个带电的支路断开。那些对电路没有改变的支路就是开路的支路。
- 处理并联电路中短路故障的方法是：在执行断电的测试以便找到故障之前，请关闭电源并且把电路中电源的接线端移开。逐一支路的电阻测量通常可以获知问题的所在。当然，您也可以在监控电路的电阻或者电流的同时，顺序断开然后重新接通每一个支路。
- 并联电路和串联电路有几个重要的不同之处。串联电路中电流是共同的；而并联电路中电压是共同的。串联电路中的电压是直接按照电阻来分配到串联单位上的；而并联电路中的电流是按照电阻的倒数来分配到并联单位上的。在串联电路中，最大电阻的电阻损耗最大的功率；而在并联电路中，最小电阻的电阻损耗最大的功率。在串联电路中，总电阻等于所有电阻的和；而在并联电路中，总电阻比最小电阻值还要小。
- 为了在给定的电压等级下提供更高的电流/功率，通常把电压/功率源连接到一个并联电路中。

公式与计算器输入顺序示例

公式(5-1) $I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$ (计算并联电路的总电流)

输入顺序: I_1 的值, $\boxed{+}$, I_2 的值, $\boxed{+}$, I_3 的值, \dots , $\boxed{+}$

公式(5-2) $\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ (计算并联电路的 $\frac{1}{R_T}$ 或者说是总的电导)

输入顺序: R_1 的值, $\boxed{1/x}$, $\boxed{+}$, R_2 的值, $\boxed{1/x}$, $\boxed{+}$, R_3 的值, $\boxed{1/x}$, \dots , $\boxed{+}$

公式(5-3) $R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}$ (计算一个多支路并联电路中的总阻值)

输入顺序: R_1 的值, $\boxed{1/x}$, $\boxed{+}$, R_2 的值, $\boxed{1/x}$, $\boxed{+}$, R_3 的值, $\boxed{1/x}$, \dots , $\boxed{+}$, $\boxed{1/x}$

公式(5-4) $G_T = G_1 + G_2 + G_3$ (计算并联电路的总电导)

输入顺序: G_1 的值, $\boxed{+}$, G_2 的值, $\boxed{+}$, G_3 的值, $\boxed{+}$

公式(5-5) $R_T = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$ (计算一个两支路并联电路的总阻值)

输入顺序: R_1 的值, $\boxed{\times}$, R_2 的值, $\boxed{\div}$, $\boxed{+}$, R_1 的值, $\boxed{+}$, R_2 的值, $\boxed{\div}$, $\boxed{+}$

公式(5-6) $R_x = \frac{R_t \times R_e}{R_t - R_e}$ (计算为了得到需要的阻值在给定一个电阻的情况下要并联的电阻的阻值)

输入顺序: 已知电阻 R 的值, $\boxed{+}$, 等效电阻的值, $\boxed{+}$, $\boxed{\times}$

已知电阻 R 的值, $\boxed{\times}$, 等效电阻的值, $\boxed{\div}$, $\boxed{+}$

公式(5-7) $I_x = \frac{R_T}{R_x} \times I_T$ (当总电阻和各个支路的电阻阻值都已知时, 计算选定的一个支路的电流)

输入顺序: R_T 的值, $\boxed{+}$, R_x 的值, $\boxed{\times}$, I_T 的值, $\boxed{+}$

公式(5-8) $I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times I_T$ (利用两支路电流分流定律来计算选定的一个支路的电流)

输入顺序: R_2 的值, $\boxed{+}$, $\boxed{\div}$, R_1 的值, $\boxed{+}$, R_2 的值, $\boxed{\div}$, $\boxed{\times}$, I_T 的值, $\boxed{+}$

公式(5-9) $I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times I_T$ (利用两支路电流分流定律来计算选定的一个支路的电流)

输入顺序: R_1 的值, $\boxed{+}$, $\boxed{\div}$, R_1 的值, $\boxed{+}$, R_2 的值, $\boxed{\div}$, $\boxed{\times}$, I_T 的值, $\boxed{+}$

使用 EXCEL

并联电路公式(Excel 文件参考: F0E5_01.xls)。

FOE5_01.xls

警告

一旦在表格里输入公式，无需重复输入。解决新问题时只需采用该公式输入新的参数数据。

利用公式 5-3 的电子数据表格来计算 R_T ，设其他参数和练习题 6 第 2 题中的参数一样，并且把您的答案和附录中答案对照一下。

请参考图 5-27。假定 R_1 改变为 $27\text{k}\Omega$ ， R_2 改变为 $12\text{k}\Omega$ 。利用公式 5-8 的电子数据表格来计算 I_1 。

复习题

1. 当一个电路被认为是一个并联电路时，最少需要几个电流支路？
 - a. 1
 - b. 2
 - c. 3
 - d. 4
2. 并联电路的总电流被分配到不同的支路中，是按照：
 - a. 直接按照每个支路的电阻值。
 - b. 按照每个支路的电阻的倒数值。
 - c. 按照每个支路的额定功率值。
 - d. 以上都不是。
3. 并联电路中的总电流等于：
 - a. 两个最高支路电流的电流之和。
 - b. 最低支路电流和最高支路电流的乘积。
 - c. 外加电压除以电路的等效电阻。
 - d. 以上都不是。

4. 并联电路中的总电阻通常是:
 - a. 各个支路电阻的和。
 - b. 比最高电阻的值要高。
 - c. 最低电阻的值要低。
 - d. 等于最低电阻。
5. 并联电路中的功率分配是:
 - a. 最低电阻的支路消耗最多的功率。
 - b. 高阻的支路消耗最多的功率。
 - c. 既然所有电阻上的电压是一样的，那么所有电阻支路上消耗的功率就是一样的。
 - d. 以上都不是。
6. 请给出使用欧姆定律的方法来计算一个并联电路总电阻(或者等价电阻)的公式。
7. 请给出使用倒数电阻的方法来计算一个并联电路总电阻的公式。
8. 请给出使用电导的方法来计算一个并联电路总电阻的公式。
9. 请给出使用积除以和的方法来计算一个双支路并联电路总电阻的公式。
10. 请列出使用“假定电压法”来计算一个并联电路总电阻时所需要的步骤。
11. 请给出计算为了利用一个已知阻值的电阻来获得一个指定的总电阻而需要并联的一个电阻的公式。
12. 当处理一个并联电路的故障时，如果出现下面的情况，需要在处理故障之前把电路的电源断开:
 - a. 电路的电阻太高而电路的电流太低。
 - b. 电路的电阻太低而电路的电流太高。

思考题

1. 参考图 5-30 并且计算 R_T 。
使用您学过的下面的方法来计算结果:
欧姆定律
倒数方法
积除以和的方法
假定电压法

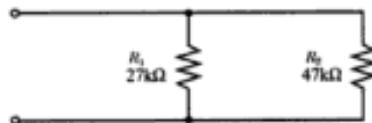


图 5-30 思考题 1 电路图

2. 参考图 5-31 并且计算 R_T 。
描述您用来解决这个问题的方法。

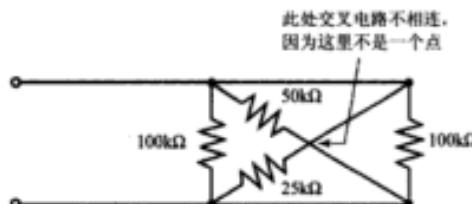


图 5-31 思考题 2 电路图

3. 参考图 5-32 并且计算 I_2

描述您用来解决这个问题的方法。

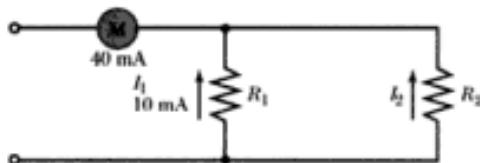


图 5-32 思考题 3 电路图

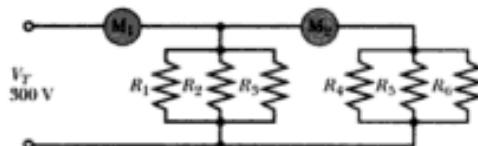
4. 假定图 5-33 中 6 个电阻每个都是 $150\text{k}\Omega$ ，请计算下面的电路参数： R_T 、 I_T 和 P_T ，表 1 的电流读数，表 2 的电流读数。

图 5-33 思考题 4 电路图

5. 请参考图 5-34 并且利用提供的信息，回答下面的问题，其中：I 表示增加；D 表示减少；RTS 表示保持不变。

a. 如果 R_2 断开： I_1 将会 _____ P_T 将会 _____ I_2 将会 _____ V_1 将会 _____ I_3 将会 _____ V_T 将会 _____ I_T 将会 _____b. 假定 R_3 内部短路了。在保险丝或者电源烧坏以前： I_1 将会 _____ 电路总电流将会 _____ I_2 将会 _____ I_3 将会 _____

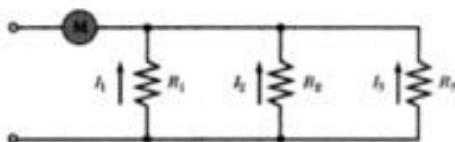


图 5-34 思考题 5 电路图

6. 请参考图 5-35 并且计算 R_1 的值。

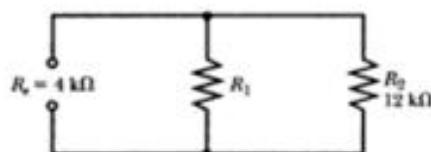


图 5-35 思考题 6 电路图

7. 请参考图 5-36，如果 I_T 是 18mA，那么 I_1 和 I_2 的值分别是多少？

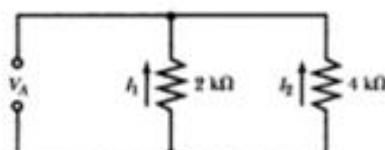


图 5-36 思考题 7 电路图

8. 请参考图 5-37， R_1 的值是多少？

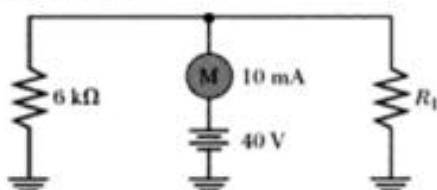


图 5-37 思考题 8 电路图

9. 请参考图 5-38， P_R 的值是多少？

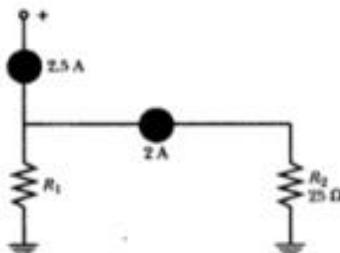


图 5-38 思考题 9 电路图

10. 请参考图 5-39 并且计算下面的参数：

$$\begin{array}{llll} R_T = \underline{\hspace{2cm}} & I_T = \underline{\hspace{2cm}} & P_T = \underline{\hspace{2cm}} & I_1 = \underline{\hspace{2cm}} \\ I_2 = \underline{\hspace{2cm}} & I_3 = \underline{\hspace{2cm}} & I_4 = \underline{\hspace{2cm}} & I_5 = \underline{\hspace{2cm}} \\ P_1 = \underline{\hspace{2cm}} & P_2 = \underline{\hspace{2cm}} & P_3 = \underline{\hspace{2cm}} & P_4 = \underline{\hspace{2cm}} P_5 = \underline{\hspace{2cm}} \end{array}$$

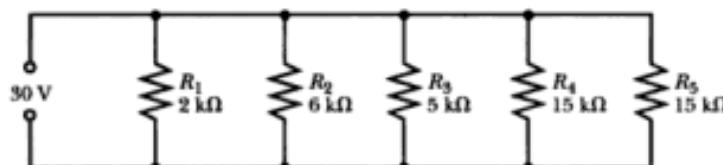


图 5-39 思考题 10 电路图

11. 请参考图 5-40 并且回答下面的问题：

- | | |
|--------------------|--------------------------------|
| a. M_1 的电流读数是多少？ | b. M_2 的电流读数是多少？ |
| c. M_3 的电流读数是多少？ | d. M_4 的电流读数是多少？ |
| e. M_5 的电流读数是多少？ | f. R_1 的功率消耗是多少？ |
| g. R_2 的功率消耗是多少？ | h. R_3 的功率消耗是多少？ |
| i. 电路的总共功率消耗是多少？ | j. 如果 R_2 断开， P_T 的新的值是多少？ |

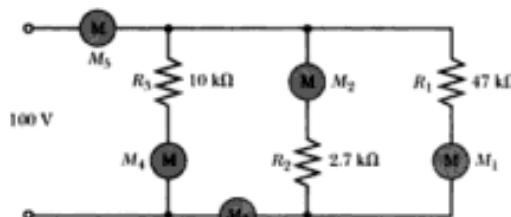


图 5-40 思考题 11 电路图

请参考图 5-41 的电路，回答第 12 题到第 16 题。

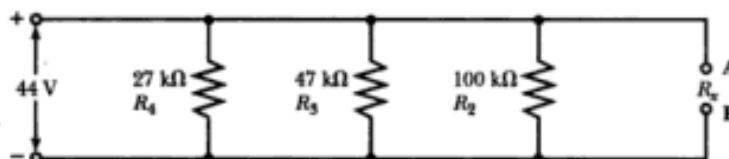


图 5-41 思考题 12~16 电路图

12. 不连接 A 点和 B 点，您将使用下面的什么方法来实现您的“逐步”的工作来计算 R_T ：

- a. 倒数方法
- b. 电导方法
- c. 假定电压方法
- d. 欧姆定律方法

13. 为了使电路的总电阻等于 $10\text{k}\Omega$ ，需要在 A 点和 B 点之间连接一个多大的电阻 R_x ？

14. 假定上个问题中的 R_x 已经连接到电路中。如果 R_4 的电阻值加倍而 R_2 减半，电路的 R_T 将会有什么变化？如果去掉 R_x ，上面的答案还是一样的吗？

15. 当第 13 题的 R_x 连接到电路时：
- 电路中的哪个电阻消耗的功率最多？
 - 这个电阻消耗的功率是多少？
16. 当第 13 题的 R_x 没有连接到电路上时：
- 电路中的哪个电阻消耗的功率最少？
 - 这个电阻消耗的功率是多少？

当您回答第 17 题到第 25 题的时候请参考图 5-42。

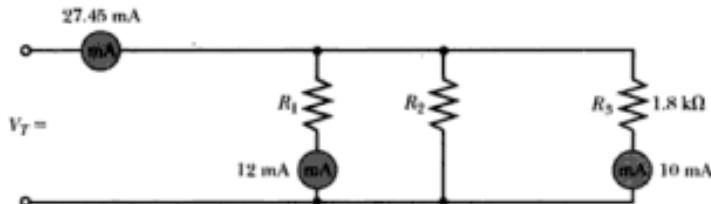


图 5-42 思考题 17~25 电路图

- V_T 的值是多少？
- R_1 的值是多少？
- 通过 R_2 的电流是多少？
- R_2 的值是多少？
- 哪个电阻消耗的功率最大？
- 哪个电阻消耗的功率最小？
- 如果 R_2 改成一个 $1.5\text{k}\Omega$ 的电阻(假定 V_T 仍然保持原有值不变)，那么总电流将会是多少？
- 如果 R_1 在数值上增加了(因为老化和使用的原因)，那么这种情况导致的总功率会发生什么变化？
- 对于第 24 题中所描述的情况， R_3 上消耗的功率会发生什么变化？

当您回答第 26 题到第 30 题的时候，请参考图 5-43(请注意：把答案适当地取最接近的整数)。

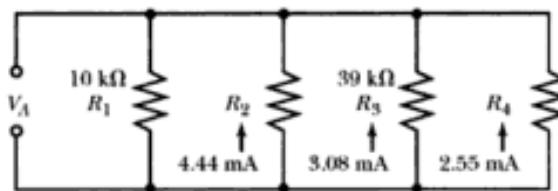


图 5-43 思考题 26~30 电路图

- R_2 和 R_4 的电阻值是多少？
- 电路的外加电压是多少？
- 如果 R_1 改成一个阻值为 $27\text{k}\Omega$ 的电阻，电路中消耗的总功率将会是多少？

29. 最初电路的等效总阻抗是多少?
 30. 为了使总的电路阻抗等于 $4\text{k}\Omega$, 需要在最初的电路中并联一个阻值为多大的电阻?

分析题

1. 当进行电路运算的时候, 在任何可能的情况下, 进行心算的目的是什么?
2. 请给出分流电路的一个可行的应用实例。
3. 假定一个电路中有 3 个并联的电阻。如果 $R_1=12\text{k}\Omega$, $R_2=15\text{k}\Omega$, $R_3=18\text{k}\Omega$, 为了确定电路的总的电阻值, 使用的计算器和计算技术的定义是:
 - a. 把计算器调到工程模式, 用倒数方法来确定 R_T 。这样计算器上的读数就是答案。
 - b. 把计算器调到科学符号模式。用倒数方法来确定 R_T 。这样计算器上的读数就是答案。
4. 当电阻的阻值已经给定时, 用什么方法可以比较容易地心算出 R_T 的值?
5. 画一个 3 个支路的并联电路的电路图, 其中最大的电阻的阻值是 $100\text{k}\Omega$ 。这个分流电路应该把电路的总电流划分成如下情况:
 支路 1 的电流是支路 2 的电流的一半。支路 2 的电流是支路 3 的 $1/5$ 。给您的电路图上的所有的电阻标上阻值。
6. 为了获得一个 $10\text{k}\Omega$ 的等效阻值, 需要在一个 $50\text{k}\Omega$ 的电阻上并联一个多大的电阻?
7. 请描述当处理一个并联电路故障的时候, 使并联组件或者一个单独的支路绝缘的好方法。

并联电路的 MultiSIM 练习

1. 利用 MultiSIM 对图 5-39 的电路编程, 把电源的负极与地参考点连起来。
2. 测量并记录以下参数。
 - a. 测量总电压。
 - b. 测量总电流(利用欧姆定律并计算电路的总电阻值)。
 - c. 测量流过 R_3 的电流(利用欧姆定律并计算 R_3 的电阻值)。
3. 把 MultiSIM 得到的结果和此电路的解题指导中给出的值比较一下, 看看您的结果是否与解题指导上的答案较接近(注: 您的导师也许希望他或她自己来检查)。
4. 从电路断开电源, 测量电路的总电阻, 测量得到的结果是否与题 2(b)中得到的答案一样?

建议

在进行故障调试时, 您应该在进行具体的测试之前查找或了解电路的规范, 这可以使您更容易发现故障的线索。

能力设计实验索引表

实验手册中建议的与本章内容有关的能力设计实验包括:

章节标题	能力设计实验题目	实验编号
5.2 并联电路的电压	并联电路的电压	17
5.3 并联电路的电流和 5.4 基尔霍夫电流定律	并联电路的电流	16

(续表)

章节标题	能力设计实验题目	实验编号
5.5 并联电路的电阻	并联电路的等效电阻	15
5.7 并联电路的功率	并联电路的功率分配	18
5.8 并联电路开路的效应以及故障调试提示	并联电路开路的效应	19
5.9 并联电路短路的效应以及故障调试提示	并联电路短路的效应	20

注：我们建议在做完以上实验后，学生应该被要求回答实验手册中该实验后面 Summary 部分的问题。

故障调试挑战性电路 3

请遵照 SIMPLER 故障调试流程，如图 5-43 所示。

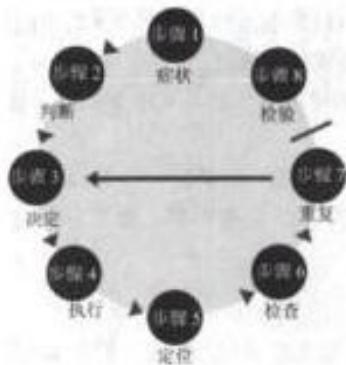


图 5-43 SIMPLER 流程图

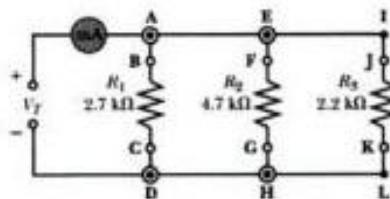


图 5-44 挑战性电路 3 的电路图

开始点信息

1. 电路图如图 5-44 所示。
2. $V_T=10\text{V}$ 。
3. 测量得到的 I_2 是 2.1 mA。
4. 测量得到的 I_T 是 6.7 mA。
5. 电阻值是在其余部分的电路与被测点隔离的情况下测量得到，其他值参见表 5-2 所示。

表 5-2 测量值表

测量值	结果在附录 C 中
V_{A-D}	(83)
V_{B-D}	(11)
V_{E-H}	(22)
V_{F-G}	(95)
V_{I-L}	(52)
V_{J-K}	(75)
V_{A-B}	(8)
V_{C-D}	(56)
V_{I-J}	(103)
V_{A-B}	(46)
V_{C-D}	(90)
V_{I-J}	(14)
V_{K-L}	(29)

挑战电路 3**步骤 1**

症状。电阻器 R_2 上的电流是正常的，但是电路的总电流很低。这表明总的电阻值大于正常情况，如图 5-45 所示。

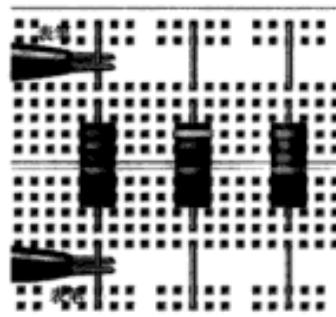


图 5-45 步骤 1

步骤 2

判断。最初的可疑区域：由于分支 2 看上去工作正常(电流值是正常的)，因此分支 1(A 点到 D 点)和分支 3(点 I 到点 L)构成可疑区域。

步骤 3

决定(测试任务)。测量点 A 到 D 的电压(分支 1)。

步骤 4

执行。第 1 步测试：观察测试结果。 V_{A-D} 等于 10 V，正常。如图 5-46 所示。

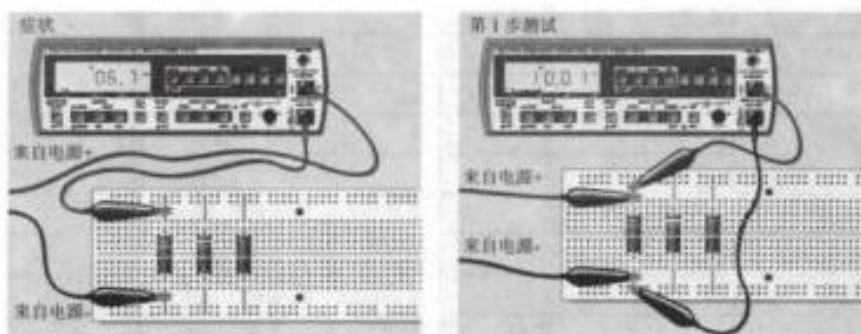


图 5-46 步骤 4

步骤 5

定位。新的可疑区域。分支 1 中的点 A 到 B 以及点 C 到 D，分支 3 中的所有元件构成新的可疑区域。

步骤 6

检查(已有的数据)。

步骤 7

重复上面的分析和测试。

第 2 步测试： $V_{B-C}, V_{B-C}=0V$ ，异常，这可能是由于点 A 和 B 之间或者点 C 和 D 之间的连接出现故障。如图 5-47 所示。

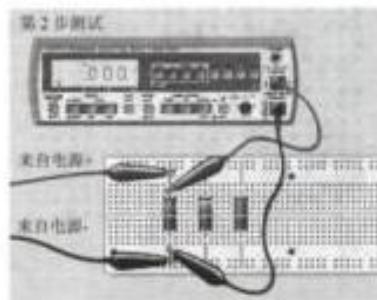


图 5-47 步骤 7 的第 2 步测试

第 3 步测试： $V_{A-B}, V_{A-B}=0 V$ ，正常。如图 5-48 所示。

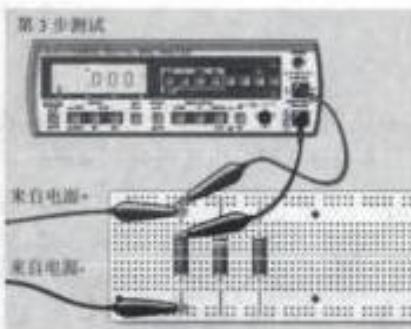


图 5-48 步骤 7 的第 3 步测试

第 4 步测试： V_{C-D} 、 V_{C-D} 等于 10 V，异常。如图 5-49 所示。

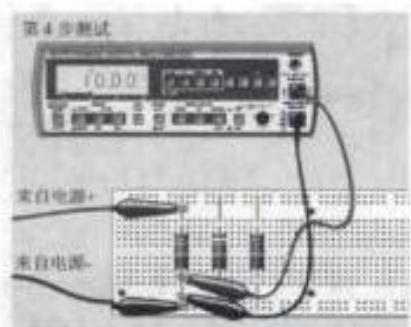


图 5-49 步骤 7 的第 4 步测试

第 5 步测试：把分支 1 隔离并检查点 C 到 D 之间的电阻值， R_{C-D} 为无穷大，表明发生了开路(注：在这里采用的仪表上，用一个闪烁的 30000Ω 表示无穷大，而其他的数字万用表也许采用不同的读数来表示无穷大的电阻值)。如图 5-50 所示。

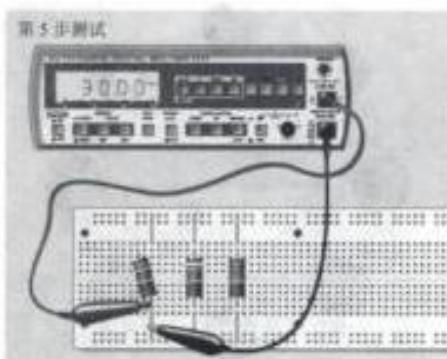


图 5-50 步骤 7 的第 5 步测试

步骤 8**验证**

第 6 步测试：保证点 C 和 D 之间良好连接并测量总的电流读数，如果所有分支都工作正常，总电流应为 10.4 mA，即当电路良好连接时总电流约为 10.4 mA，当完成以上操作后，电路恢复正常。如图 5-51 所示。

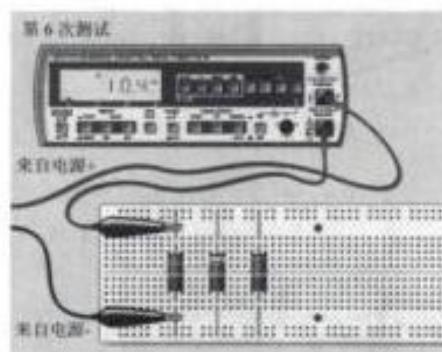


图 5-51 步骤 8 的第 6 步测试

提示

首先计算应该有的总电流值，然后确定减小的电流值恰好等于分支 1 应该提供的电流值，通过这样的方法能够迅速发现问题的所在，您可以立刻知道分支 1 中有问题，然后仍需要进行隔离测试来找到开路的地方。

故障调试挑战性电路 4(并联电路框图)

请遵照 SIMPLER 故障调试流程，如图 5-52 所示。

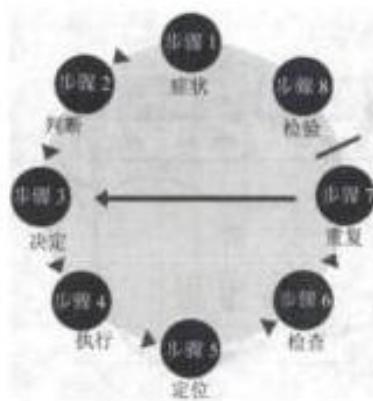


图 5-52 SIMPLER 流程图

电路图如图 5-53 所示。测量值参见表 5-3 所示。

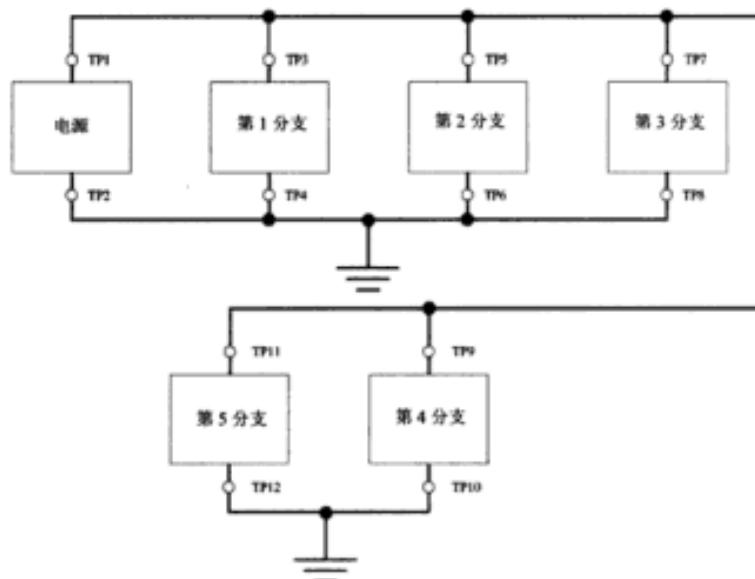


图 5-53 挑战性电路 4 的电路示意图

通用测试标识符

测量假定

可能的测试以及结果

 I 在测试点(TP)

电流(低, 高, 正常)

 V 从测试点(TP)到地

电压(低, 高, 正常)

 R 从测试点(TP)到地
(当电源从电路断开时)

电阻值(低, 高, 正常)

表 5-3 测量值表

开始点信息	测试点	附录 C 中的结果			
		V	I	R	信号
在 TP1	TP2	160	161	162	NA
	TP3	163	164	165	NA
	TP4	166	167	168	NA
	TP5	169	170	171	NA
	TP6	172	173	174	NA
	TP7	175	176	177	NA
	TP8	178	179	180	NA
	TP9	181	182	183	NA
	TP10	184	185	186	NA
	TP11	187	188	189	NA
	TP12	190	191	192	NA

步骤 1

症状。在测试点 TP1，电压正常，电流过高，当断开电源时，测量得到的电阻值低于正常值。

步骤 2

判断。最初的可疑区域：由于是并联电路，电路的症状可能是由于任意一个并联分支的元件框内对电流的阻碍作用减小，因此，所有 5 个并联分支(元件框)都被包含在最初的可疑区域内。

步骤 3

决定。根据上述症状信息，决定测试任务。由于图中表示的是并联电路的情况并且 TP1 的情况正常，我们知道其余并联分支的电压也是正常的。我们把电源再次接回电路，然后在适当的测试点对电路的分支电流进行测试，首先在 TP3 进行措施。

步骤 4

执行。第 1 步测试：TP3 处的电流是正常的。

步骤 5

定位(新的可疑区域)。其余的 4 个分支(2、3、4 和 5)仍有可能是故障区域。由于没有简单的方法缩小可疑区域，这里只好系统地分别检查上述可疑区域的电流。

步骤 6

检查(已有的数据)。

步骤 7

重复上面的分析和测试。

第 2 步测试：测量 TP5 的电流。

TP5 的电流读数正常。

第 3 步测试：测量 TP7 的电流。

TP7 的电流读数正常。

第 4 步测试：测量 TP9 的电流。

TP9 的电流高于正常情况，这表明分支 4 是存在问题的分支。

步骤 8

验证。第 5 步测试：用一个新的满足所需参数的模块替换分支 4 的模块，结果使得系统恢复到原来的正常情况。

第6章 串联-并联电路

教学大纲

- 6.1 什么是串联-并联电路
- 6.2 串联-并联电路的识别和分析
- 6.3 串联-并联电路中的总电阻
- 6.4 串联-并联电路中的电流
- 6.5 串联-并联电路中的电压
- 6.6 串联-并联电路中的功率
- 6.7 串联-并联电路中开路的影响以及故障调试的提示
- 6.8 串联-并联电路中短路的影响以及故障调试的提示
- 6.9 按要求设计串联-并联电路
- 6.10 加载的分压器
- 6.11 惠斯通电桥

教学目标

经过本章的学习，您应该能够：

1. 定义串联-并联电路中的术语。
2. 列出串联-并联电路的主要特征。
3. 求串联-并联电路中的总电阻。
4. 计算总电流以及在串联-并联电路中任意给定部分的电流。
5. 计算整个串联-并联电路的电压。
6. 确定整个串联-并联电路的功率值。
7. 分析串联-并联电路中开路的效应。
8. 分析串联-并联电路中短路的效应。
9. 按要求设计简单的串联-并联电路。
10. 解释在串联-并联电路上的负载效应(loading effect)。
11. 计算与加载分压器相关的电压值。
12. 进行与电桥(bridge circuit)相关的计算。
13. 利用计算机来解决电路问题。
14. 采用 SIMPLER 故障调试流程求解挑战性的故障调试问题。

预习指导

大多数的电子仪器、设备和系统都包括串联-并联电路。消费产品，例如高保真功放、电视机、计算机，实际上所有的电子产品都是由串联-并联电路组成的——将串联电路与并联电路在电路中进行连接、组合，从而完成特定的任务或功能。

在本章，您会研究这些“组合”电路各种各样的配置，利用已经学习过的有关串联和并联

电路的知识，您也会习惯于分析这些“组合”电路。同样，您也会看到，依据总的电路配置以及元件的值，电路中某一部分的变化如何或多或少的影响电路中的另外一部分。研究故障检查的概念。利用您对这些电路的理解，按照要求来设计一个简单的串联-并联电路。最后，要研究串联-并联电路特殊的应用。

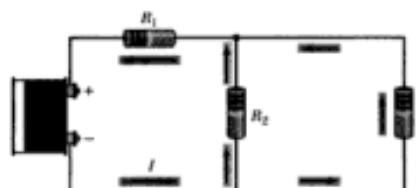
关键词

泻放电流(bleeder current)	负载(load)
泻放电阻(bleeder resistor)	负载电流(load current)
电桥(bridge circuit)	加载分压器.loaded voltage divider)
接地平面(ground reference)	串联-并联电路(series-parallel circuit)
直列(In-line)	惠斯通电桥(Wheatstone bridge circuit)

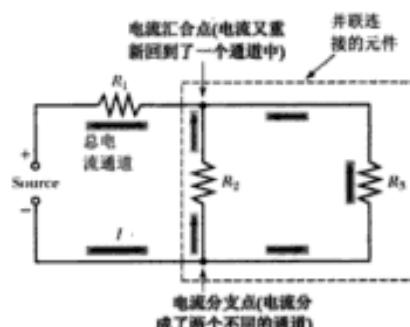
6.1 什么是串联-并联电路

定义

串联-并联电路是包含串联连接和并联连接元件的组合。既有连续的串联电流通道，也有“支路型”并联电流通道，如图 6-1 所示。



(a) 示意图



(b) 原理图

图 6-1 基本的串联-并联电路

特点

串联-并联电路中的串联元件可以和其他单独的元件进行串联，也可以同其他元件的组合进行串联，如图 6-2 所示。

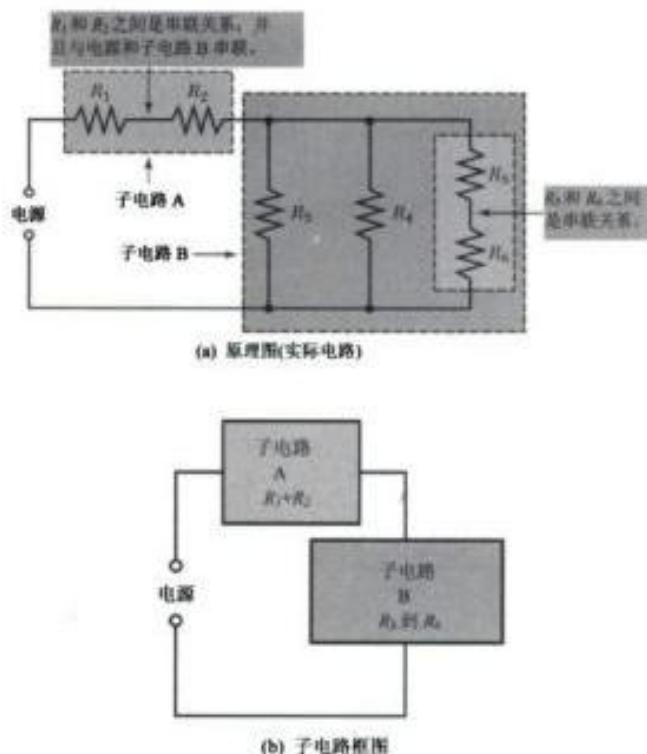


图 6-2 串联-并联电路中的串联元件

串联-并联电路中的并联元件可以和其他单独的元件进行并联，也可以同其他元件的组合进行并联，如图 6-3 所示。

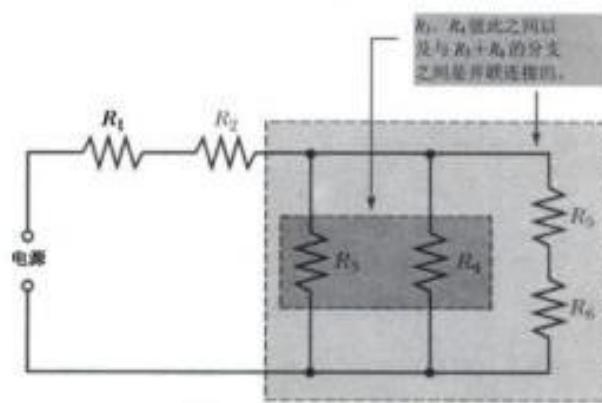


图 6-3 串联-并联电路中的并联元件

6.2 串联-并联电路的判断和分析方法

1. 从距离电源最远端的电路部分开始分析，并且向着电源进行分析，从而确定那些元件或是电路部分是串联连接还是并联连接。

2. 顺着总电流通道来确定串联连接的元件，如图 6-4 所示。总电流流过的元件或是元件的组合相互之间是串联连接的。

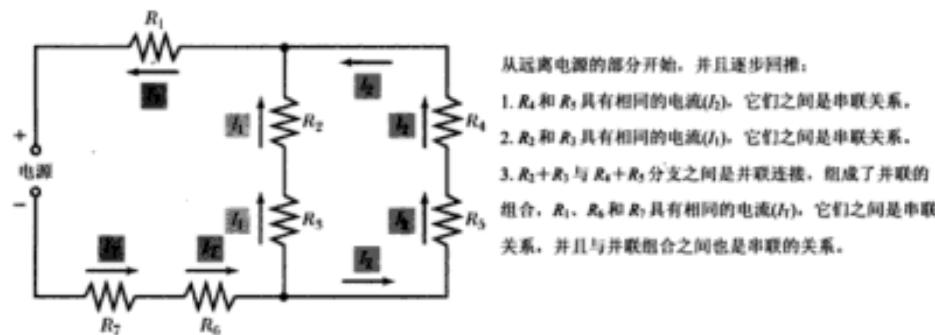


图 6-4 跟踪相同的电流通道来判断串联电路部分

3. 观察共用的电压(共同的)来确定采用并联方式连接的元件，如图 6-5 所示。具有相同电压连接点(在两端)的元件和元件组合相互之间是并联连接的。

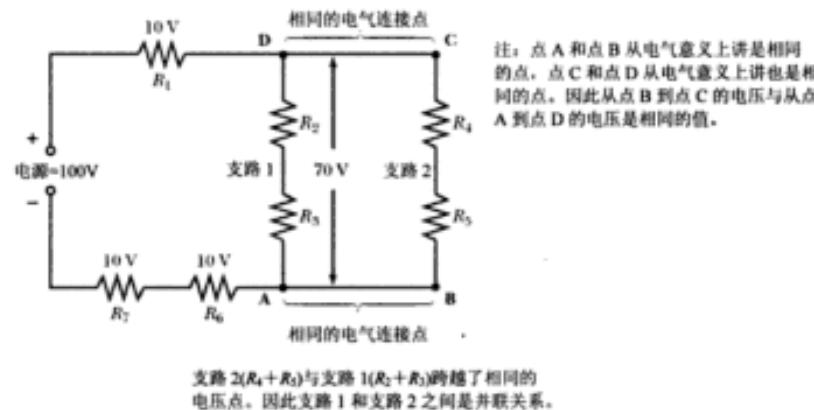


图 6-5 观察相同的电压点来判断并联电路部分

4. 观察电流支路和汇合点来判断相互并联的元件和元件的组合，如图 6-6 所示。

- 电流支路或分叉的点是并联元件或元件组合的一个端点。如图 6-6 中的点 A 和点 B。
- 那些相同的电流汇合(或是重新结合)的点是同一并联组合的另外一个端点。如图 6-6 中的点 C 和点 D。

5. 总而言之，在电路的串联部分，电流是相同的，电压(和电阻)是累加的。在电路的并联部分，电压是相同的，支路电流是累加的。

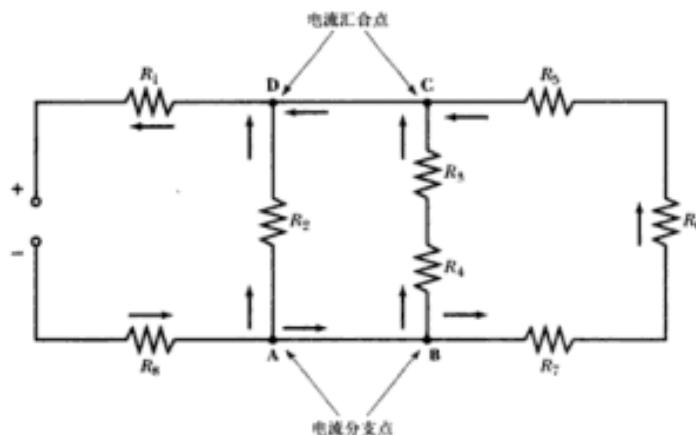


图 6-6 观察电流支路和汇合点来分辨电路的并联部分

练习题 1

参考图 6-7 来确定符合下面条件的单独的元件：

1. 通过总电流的元件。
 2. 互相之间并联的元件；即具有相同电压的元件。
 3. 互相之间串联的元件；即具有相同电流通过的元件。
- 下面我们看一些串联-并联电路的参数分析。

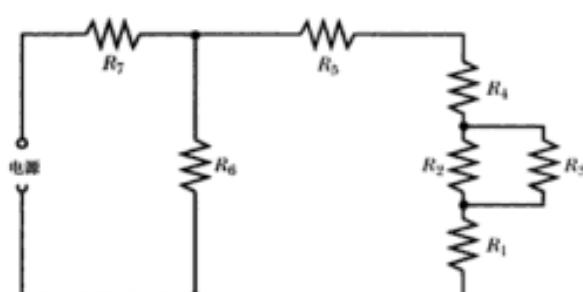


图 6-7 练习 1 电路图

6.3 串联-并联电路中的总电阻

如果电路总的电流和电压已知的话，那么求解回路总电阻就很简单了。

6.3.1 利用欧姆定律

简单的利用欧姆定律 $R_f = V_f / I_f$ 。如果电源电压(V_f)和回路的电流是未知的话，就需要应用前面部分讨论过的概念。

6.3.2 利用“外部向电源推进”的方法

1. 从距离电源最远的电路末端开始，向着电源回推，判断串联电路、并联电路以及串联—并联的组合，如图 6-8 所示。在整个电路中，您要在串联电路部分应用串联规则，在并联电路部分应用并联规则。

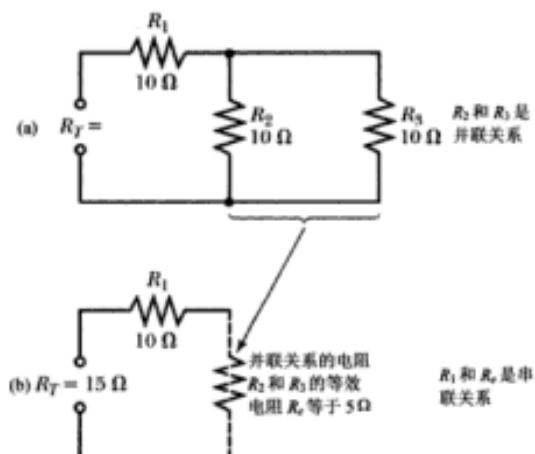


图 6-8 分析电路来找到 R_f

2. 首先，要判断和解决并联元件的部分。对于 R_2 和 R_3 来讲，相同电压以及电流支路、汇合的概念是适用的。因此，这两个元件之间是并联的关系，如图 6-8(a)所示。正如您知道的那样，两个具有相同阻值的电阻并联在一起，总的等效电阻值等于其中一个支路电阻阻值 R 的一半。这样， R_2 和 R_3 的等效电阻 R_e 就是 5Ω 。当然，您也可以用“乘积除以总和”这个公式来解决这个问题。即：

$$R_e = \frac{R_2 \times R_3}{R_2 + R_3} = \frac{10\Omega \times 10\Omega}{10\Omega + 10\Omega} = \frac{100\Omega}{20\Omega} = 5\Omega$$

3. 下一步，向着电源的方向来判断串联和/或串联—并联的组合。总电流当流过并联支路 R_2 和 R_3 的时候要分开和重新汇合。总电流也要流过 R_1 。因此， R_1 和 R_2 、 R_3 的并联组合彼此之间是串联关系，如图 6-8(b)所示。因此， R_2 和 R_3 并联再与 R_1 串联的总电阻就等于 $10\Omega + 5\Omega = 15\Omega$ 。电路总的电阻值 15Ω 。

例：参考图 6-9，让我们来看看另外一个采用“由外及内”分析方法的例子。这次我们用更加典型的电阻值，这就不像上一个例子那样容易分析了。

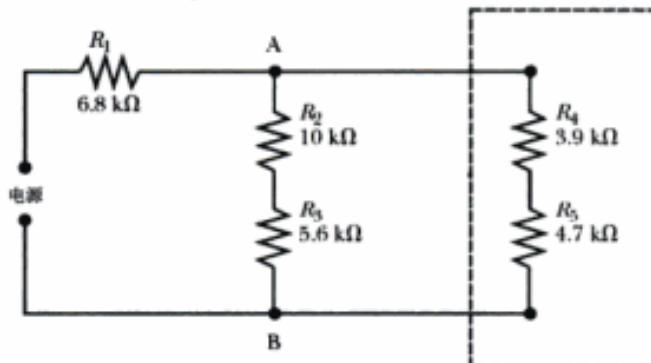


图 6-9 例题电路图

1. 由外面的支路开始，您可以看到 R_4 和 R_5 是串联关系。利用计算器，得到外部支路的电阻值是： $3.9\text{k}\Omega + 4.7\text{k}\Omega = 8600\Omega$ ，或者是 $8.6\text{k}\Omega$ 。

2. 继续向着电源的下一个支路回推，我们可以看出，在点 A 和点 B 之间的电阻等效为外部支路与串联电阻 R_2 和 R_3 并联。 $R_2+R_3=10\text{k}\Omega + 5.6\text{k}\Omega = 15.6\text{k}\Omega$ 。这个 $15.6\text{k}\Omega$ 与外部支路阻值为 $8.6\text{k}\Omega$ 并联，其等效电阻可以很快的通过计算器算出。15.6, [EE], 3, [1/x], +, 8.6, [EE], 3, [1/x], [.] [1/x]。在点 A 和点 B 之间的电阻值就是 5543Ω ，或者 $5.54\text{k}\Omega$ 。

3. 现在，所有剩下的工作就是将点 A 和点 B 之间的阻值与 R_1 的阻值加在一起了。这样，这个电路的总电阻 R_{total} : 6.8, [EE], 3, + 5.54, [EE], 3, [.] R_T ，等于 $12.34\text{k}\Omega$ 。

6.3.3 “简化-重绘”法

“简化-重绘”法是分析串联-并联电路的一个有效方法。此方法简化了电路分析。

例：参见图 6-10，讨论一下这个串联-并联电路组合的总电阻 R_T 。

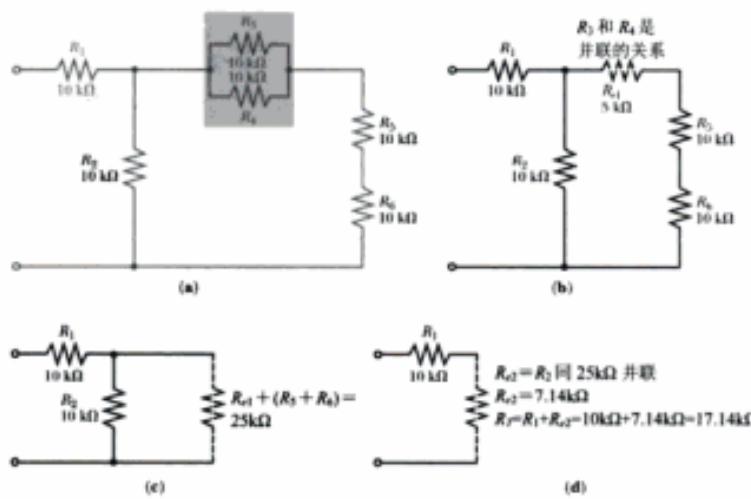


图 6-10 通过“简化-重绘”技巧进行简化

1. R_3 和 R_4 之间是并联关系，我们称其等效电阻为 R_{e1} 。这样 $R_{e1}=5\text{k}\Omega$ 。 R_{e1} 、 R_3 和 R_4 并联的总电阻等于：

$$\frac{(10\text{k}\Omega)(10\text{k}\Omega)}{10\text{k}\Omega+10\text{k}\Omega} = \frac{100 \times 10^3}{20 \times 10^3} = 5 \times 10^3 = 5\text{k}\Omega \text{ (图 6-10b)}$$

当然，一个更简单的方法是：两个电阻相等的支路并联在一起，其等效电阻是其中一个支路电阻值的一半。

2. R_3 和 R_4 并联在一起的电阻 R_{e1} 与 R_5 、 R_6 之间是串联关系。参见图 6-10(c)，计算过程如下：

$$R_{e1} \text{ 的电阻} = 5\text{k}\Omega$$

$$R_5 + R_6 \text{ 串联在一起的电阻} = 10\text{k}\Omega + 10\text{k}\Omega = 20\text{k}\Omega$$

$$R_{e1} + R_5 + R_6 = 25\text{k}\Omega$$

3. R_6 的元件组合 ($R_{e1} + R_5 + R_6$) 的总电阻是 $25\text{k}\Omega$ ， $R_2(10\text{k}\Omega)$ 同这个组合电路是并联的关系。

参见图 6-10(c)、图 6-10(d) 以及下面的计算。

$$R_{e2} = \frac{(10\text{k}\Omega)(25\text{k}\Omega)}{10\text{k}\Omega + 25\text{k}\Omega} = \frac{250 \times 10^3}{35 \times 10^3} = 7.14 \times 10^3 = 7.14\text{k}\Omega$$

4. 从 R_2 到 R_6 的元件组合与 R_1 之间是串联关系。参见图 6-10(d) 与下面的计算
总的电阻值 (R_T) = $R_1 + R_{e2} = 10\text{k}\Omega + 7.14\text{k}\Omega = 17.14\text{k}\Omega$

练习题 2

尝试通过“简化-重绘”法来完成下面的任务。

1. 求图 6-11 中电路的总电阻。

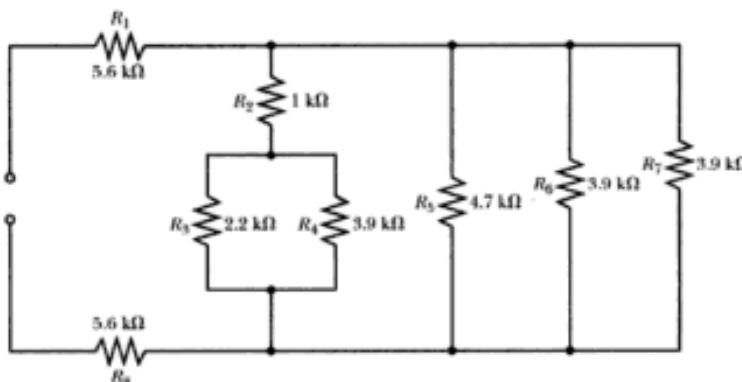


图 6-11 练习题 2 中第 1 题的电路图

2. 求图 6-12 中电路的总电阻。

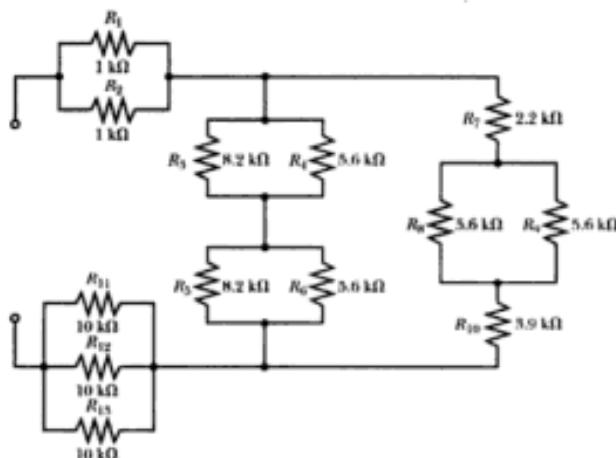
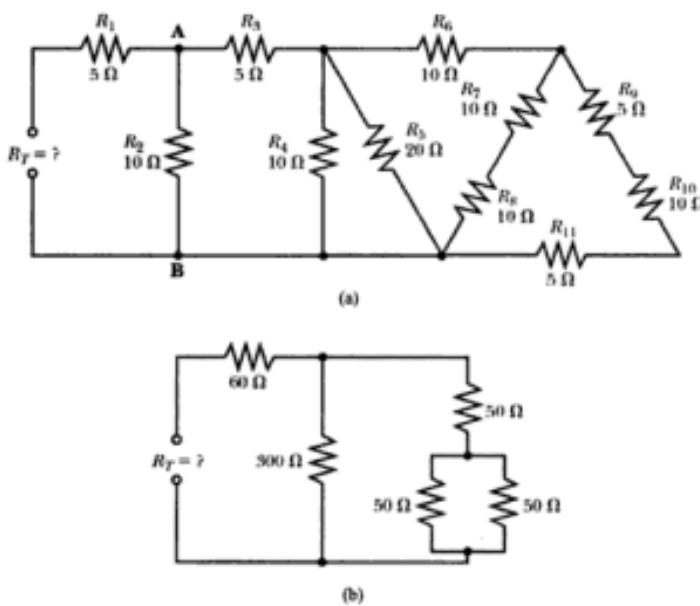


图 6-12 练习题 2 中第 2 题的电路图

课间测试 1

试着解决在图 6-13(a)和图 6-13(b)中的总电阻问题。利用外部向电源的方法来解决图 6-13(a)，利用“简化-重绘”的方法来解决图 6-13(b)。

图 6-13 在每个电路中解决 R_T **6.4 串联-并联电路中的电流**

现在我们来讨论一下串联-并联电路中的电流，如图 6-14 所示。您可以首先找到电路总电

流，然后利用欧姆定律、基尔霍夫定律、电流支路公式或者其他定律。从那个点开始来断定整个电路中的电流。

如果可以利用欧姆定律 $I_T = V_S / R_T$ 来求得总电流，则是比较简单的情况。在这个电路中，电源电压(V_S)是 175V，总电阻是 175Ω 。为了练习的目的，利用前面章节学过的知识来确定一下总电阻 R_T 。

既然 R_T 和 V_S 都是已知的，那么解决 I_T 就很简单了。

$$I_T = \frac{V_S}{R_T} = \frac{175V}{175\Omega} = 1A$$

那么通过整个回路的电流分布又是怎样的呢？对于这个电路来讲，由于使用的值的缘故，所以电流的分布很容易找到。您可以使用如下的分析过程：

1. R_1 和 R_7 由于同电源和剩余部分的电路串联，所以通过它们的电流值一定是 1A。换句话说就是 I_T 经过这两个电阻。

2. $R_2(25\Omega)$ 和外部的支路(250Ω)是电阻值相等的支路，所以总电流在它们之间平分。这样，通过 R_2 的电流就等于 0.5A，通过外部支路的电流也必然等于 0.5A，如图 6-14 所示。

3. 跟踪通过外部支路的电流，很显然，通过 R_3 、 R_4 和 R_5 的电流也必然是 0.5A。如图 6-14 所示。

为了找到电路的总电阻，通常是从远离电源的地方开始，然后向着电源回推。但是当分析电路电流的时候，您通常是从通过总电流的电源开始的，然后是向着外部电路，分析电流的分布。在这个例子当中，电路的电流如下：

I_T : I 通过 R_1 和 R_7 = 1A

I 通过 R_2 = 0.5A

I 通过 R_3 、 R_4 和 R_5 = 0.5A

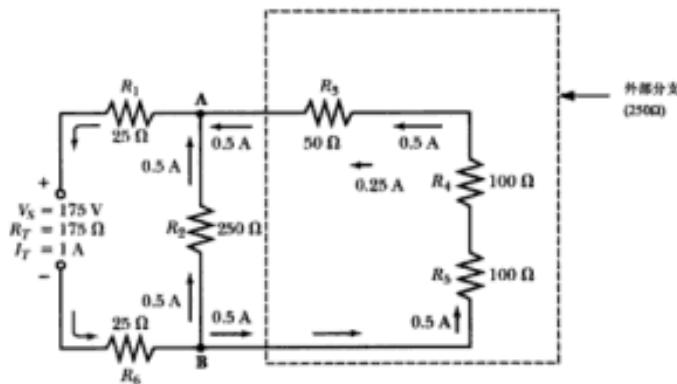


图 6-14 解决串联-并联电路中的电流问题

当然，其他几种方法或者方法的组合也可以用来解决这类问题，例如欧姆定律，基尔霍夫电压电流定律和电流支路公式。当问题中的值不便于计算的时候，您也许不得不用到这些方法。

例：解决了总电流(1A)之后，您可以参考图 6-14，应用已知的值来解决那些未知的参数。

1. I_T 通过 R_1 和 R_7 。我们可以利用欧姆定律找到电压降的值。

$$V_1 = I_T \times R_1 = 1A \times 25\Omega = 25V$$

$$V_6 = I_T \times R_6 = 1A \times 25\Omega = 25V$$

2. 根据基尔霍夫电压定律，在任何临近的回路周围，电压降的总和必然等于所加的电压。这意味着 $V_1 + V_{A-B} + V_6$ 一定等于 175V。这样 $25V + V_{A-B} + 25V = 175V$

$$50V + V_{A-B} = 175V$$

$$V_{A-B} = 175V - 50V = 125V$$

3. 基尔霍夫电流定律指出流出点 A 的电流必然等于流入点 A 的电流。换句话说，通过 R_2 和外部支路的总电流在这种情况下必然等于 I_T 。

a. 利用欧姆定律来找到通过 R_2 的电流

$$\text{通过 } R_2 \text{ 的 } I = \frac{V_2}{R_2} = \frac{125V}{250\Omega} = 0.5A$$

b. 利用基尔霍夫电流定律

$$\text{通过外部支路的 } I = I_T - I(\text{通过 } R_2) = 1A - 0.5A = 0.5A$$

4. 欧姆定律和基尔霍夫电压定律都是被用来解决通过外部电路中电阻上的电压降问题的。已知外部支路的电流是 0.5A

$$V_3 = 0.5A \times R_3 = 0.5A \times 100\Omega = 50V$$

$$V_4 = 0.5A \times R_4 = 0.5A \times 100\Omega = 50V$$

$$V_5 = 0.5A \times R_5 = 0.5A \times 50\Omega = 25V$$

练习题 3

1. 为了练习解决串联-并联电路中电流分布的问题，参考图 6-15。解决 I_T 、 I_1 、 I_2 和 I_3 。

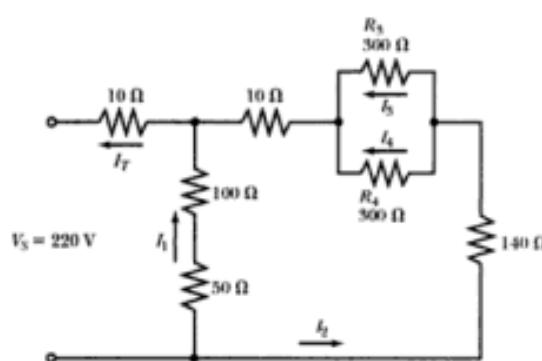


图 6-15 练习题 3 中第 1 题的电路图

2. 参考图 6-16，找出 I_T 、 I_1 、 I_2 和 I_3 的值。

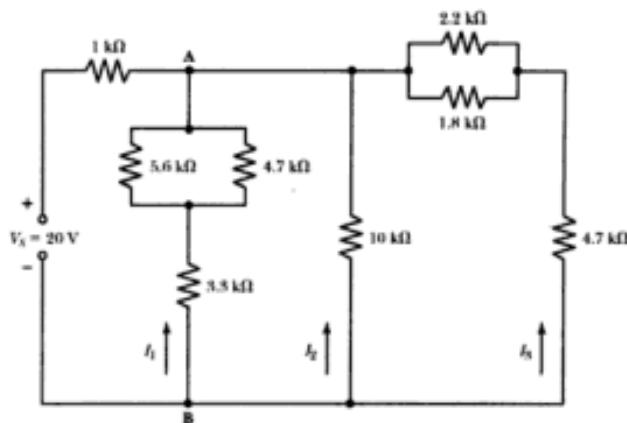


图 6-16 练习题 3 中第 2 题的电路图

6.5 串联-并联电路中的电压

串联-并联电路中的电压分布有两个特点：(1)处于串联关系的元件或是电路部分，加在其上的电压是相加的。(2)处于并联关系的元件或是电路部分，加在其两端的电压是相等的。

如您预料的那样，串联-并联电路中，一个给定元件上的电压降是要根据其在电路中的位置以及电阻值而视情况而定的。位置能够指出回路的总电流通过的部分。紧接着，在串联-并联电路范围内，任意给定元件的位置对它的电压降 $I \times R$ 都有直接的影响。

参考图 6-17，用两种方法来分析电压分布特性：欧姆定律的方法、电阻和分配器的技巧。

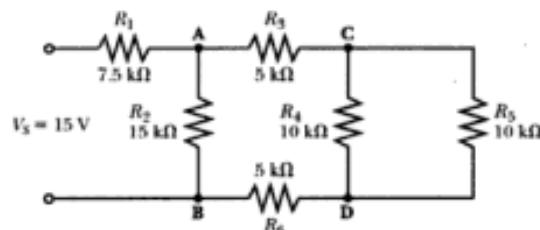


图 6-17 在串联-并联电路中分析电压

例：应用欧姆定律。

求电路的电阻值和电流值，然后利用欧姆定律来计算电压。

$$1. R_{C-D} = \frac{R_4 \times R_5}{R_4 + R_5} = \frac{(10 \times 10^3) \times (10 \times 10^3)}{10 \times 10^3 + 10 \times 10^3} \Omega = \frac{100 \times 10^6}{20 \times 10^3} \Omega = 5 \times 10^3 \Omega = 5k\Omega$$

$$2. R_3 + R_{C-D} + R_6 = 5k\Omega + 5k\Omega + 5k\Omega = 15k\Omega$$

$$3. R_{A-B} = \frac{R_2 \times (R_1 + R_{C-D} + R_6)}{R_2 + (R_3 + R_{C-D} + R_6)} = \frac{(15 \times 10^3) \times (15 \times 10^3)}{15 \times 10^3 + 15 \times 10^3} \Omega = \frac{225 \times 10^6}{30 \times 10^3} \Omega = 7.5 \times 10^3 \Omega = 7.5k\Omega$$

$$4. R_T = R_1 + R_{A-B} = 7.5 \text{ k}\Omega + 7.5 \text{ k}\Omega = 15 \text{ k}\Omega$$

$$5. I_T = \frac{V_T}{R_T} = \frac{15\text{V}}{15\text{k}\Omega} = 1\text{mA}$$

$$6. V_1 = I_T \times R_1 = 1\text{mA} \times 7.5\text{k}\Omega = 7.5\text{V}$$

7. 电流在 R_2 以及 R_3 到 R_6 这两个支路之间均匀的分开，因为每个支路的电阻值都等于 $15\text{k}\Omega$ 。这就意味着：

$$V_2 = 0.5I_T \times R_2 = 0.5\text{mA} \times 15\text{k}\Omega = 7.5\text{V}$$

$$V_3 + V_{C-D} + V_6 \text{ 等于 } 7.5\text{V}$$

$$8. V_3 = 0.5I_T \times R_3 = 0.5\text{mA} \times 5\text{k}\Omega = 2.5\text{V}$$

9. 电流在 R_4 和 R_5 之间均匀的分开，这样，每一个支路就承载 0.25mA 的电流

$$V_4 = 0.25I_T \times R_4 = 0.25\text{mA} \times 10\text{k}\Omega = 2.5\text{V}$$

$$V_5 = 0.25I_T \times R_5 = 0.25\text{mA} \times 10\text{k}\Omega = 2.5\text{V}$$

$$10. V_6 = 0.5I_T \times R_6 = 0.5\text{mA} \times 5\text{k}\Omega = 2.5\text{V}$$

例：电阻和分压器的技巧。

1. 观察图 6-17 中的电路，您可以看到

a. R_4 和 R_5 是并联的，因此 $V_4 = V_5$ 。

b. R_{4-5} 等效电阻 $R_e = 5\text{k}\Omega$ 。

c. R_3 、 R_{4-5} 和 R_6 是串联关系，并且一起成为电路中一个阻值为 $15\text{k}\Omega$ 的支路。而且，由于这 3 个实体每一个的电阻值都是 $5\text{k}\Omega$ ，所以每一部分的电压降都等于加在 A 点和 B 点之间电压的 $1/3$ 。

d. 这个 $15\text{k}\Omega$ 的支路与 R_2 ，另一个 $15\text{k}\Omega$ 的支路，之间是并联的。所以从 A 点到 B 点之间的等效电阻 R_e 等于 $7.5\text{k}\Omega$ 。

e. R_1 也是 $7.5\text{k}\Omega$ ，并且同 A 点、B 点之间形成的一个 $7.5\text{k}\Omega$ 电阻之间是串联的。这样 V_1 就等于 V_{A-B} ，并且电压值都等于所加电压的一半(基尔霍夫电压定律)。

2. 应用分压器的原理

$$a. V_{A-B} = \frac{R_{A-B}}{R_T} \times V_T = \frac{7.5\text{k}\Omega}{15\text{k}\Omega} \times 15\text{V} = 7.5\text{V}$$

$$b. V_{C-D} = \frac{R_{4-5}}{R_2 + R_{4-5} + R_6} \times V_{A-B} = \frac{5\text{k}\Omega}{15\text{k}\Omega} \times 7.5\text{V} = 2.5\text{V}$$

$$c. V_3 = V_{4-5} = V_6$$

$$d. V_2 = V_{A-B}$$

$$e. V_1 = \frac{R_1}{R_T} \times V_T = \frac{7.5\text{k}\Omega}{15\text{k}\Omega} \times 15\text{V} = 7.5\text{V}$$

例：让我再看一个利用欧姆定律来分析串联-并联电路的例子。参考图 6-18 中的电路，先求电阻值和电流值，然后采用适当方法计算电压。

$$1. R_{C-D} = R_4 \parallel (R_5 + R_6)$$

$$R_{C-D} = \frac{R_4 \times (R_5 + R_6)}{R_4 + (R_5 + R_6)} = \frac{(3.9 \times 10^3) \times (4.9 \times 10^3)}{3.9 \times 10^3 + 4.9 \times 10^3}$$

$$R_{C-D} = \frac{19.11 \times 10^6}{8.8 \times 10^3} = 2.17 \text{k}\Omega$$

2. $R_{C-D} + R_3 = 4.7 \text{ k}\Omega + 2.17 \text{ k}\Omega = 6.87 \text{ k}\Omega$

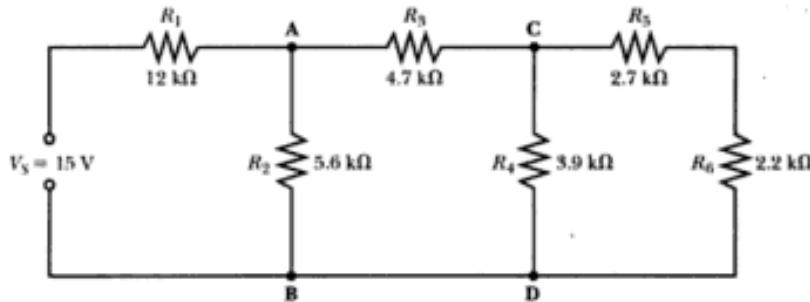


图 6-18 例题电路图

经验提示

在实际应用当中，经常会使用一种简化符号的方法来表示元件之间的并联关系，这种方法就是在元件的标识符之间用垂直的两条线或短线来分隔。例如，为了表示图 6-17 所示电路中， R_4 和 R_5 的并联关系，我们就可以声明 $R_4||R_5$ 。如果用这种类型的符号，我们就能够指出电阻以及它们之间的连接。在点 A 到点 B 之间的电阻，就可以表示成下面的符号： $R_{A-B} = R_2 + [R_3 + (R_4||R_5)] + R_6$

$$3. R_{A-B} = R_2 \parallel (R_3 + R_{C-D}) = \frac{(5.6 \times 10^3) \times (6.87 \times 10^3)}{5.6 \times 10^3 + 6.87 \times 10^3} = \frac{38.47 \times 10^6}{12.47 \times 10^3} = 3.09 \text{k}\Omega$$

$$4. R_T = R_1 + R_{A-B} = 12 \text{k}\Omega + 3.09 \text{k}\Omega = 15.09 \text{k}\Omega$$

$$5. I_T = \frac{V_S}{R_T} = \frac{15 \text{V}}{15.09 \text{k}\Omega} = 0.994 \text{mA}$$

$$6. I_{R_1} = 0.994 \text{mA}$$

$$V_{R_1} = I_{R_1} \times R_1 = 0.994 \text{mA} \times 12 \text{k}\Omega = 11.93 \text{V}$$

$$7. I_{R_2} = \frac{V_{R_1}}{R_2} = \frac{3.07 \text{V}}{5.6 \text{k}\Omega} = 0.5482 \text{mA}$$

$$8. I_{R_3} = I_T - I_{R_2} = 0.994 \text{mA} - 0.5482 \text{mA} = 0.4458 \text{mA}$$

$$V_{R_3} = I_{R_3} \times R_3 = 0.4458 \text{mA} \times 4.7 \text{k}\Omega = 2.095 \text{V}$$

$$9. I_{R_4} = \frac{V_{R_3} - (V_{R_1} + V_{R_2})}{R_4} = \frac{15 \text{V} - 14.025 \text{V}}{3.9 \text{k}\Omega} = 0.25 \text{mA}$$

$$10. I_{R_5} = I_{R_6} = \frac{V_{C-D}}{R_5 + R_6} = \frac{0.975V}{4.9k\Omega} = 0.198mA$$

$$V_{R_5} = I_{R_5} \times R_5 = 0.198mA \times 2.7k\Omega = 0.5346V$$

$$V_{R_6} = I_{R_6} \times R_6 = 0.198mA \times 2.2k\Omega = 0.4356V$$

练习题 4

1. 分析图 6-19 中整个电路的电压和电流参数。

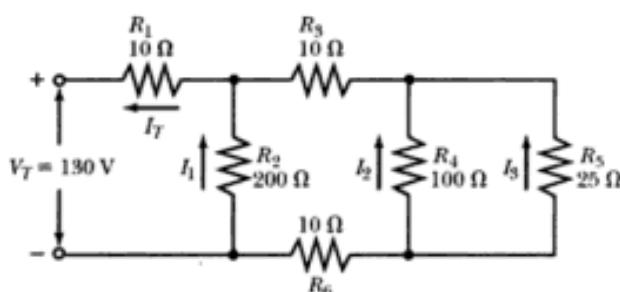


图 6-19 练习题 4 第 1 题电路图

2. 分析图 6-20 中整个电路的电压和电流参数。然后，列出每个电阻上的压降以及通过每个电阻的电流值。

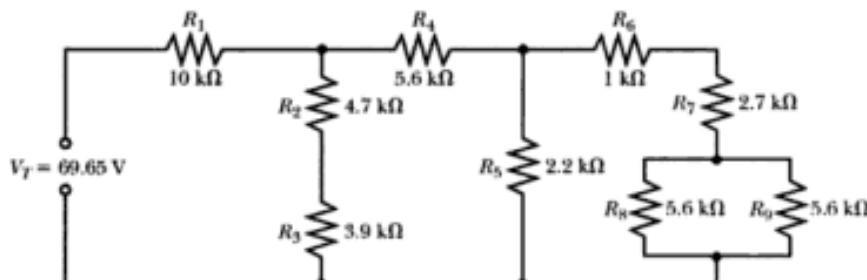


图 6-20 练习题 4 第 2 题电路图

6.6 串联-并联电路中的功率

分析串联-并联电路中的功耗问题与应用于串联或并联电路的方法相同。要记住下面几个重要的知识点：

1. 总功率 = $V_T \times I_T$ (或者是 $I_T^2 \times R_T$ ，或者是 V_T^2 / R_T)；
2. 总功率也等于所有单独功耗的总和；
3. 单独元件的功耗要根据单独元件的参数来计算：即 $V \times I$ (或者是 $I^2 \times R$ ；或者是 V^2 / R)。

例：注意在图 6-21 中整个电路的功耗。如果您花时间来完整地分析电路的话，您会发现电路的总电阻是 30Ω 。这就意味着整个电路的总电流是 $30V/30\Omega$ 或者是 $1A$ 。电流在两个外部支路中平分。因此通过 R_4 和 R_5 的电流都等于 $0.5A$ ，通过 R_6 和 R_7 的电流也是 $0.5A$ 。正如您从电路图中看到的那样， $1A$ 的电流也均匀地分开流过 R_2 和 R_3 ，这两个电阻上通过的电流也是 $0.5A$ 。

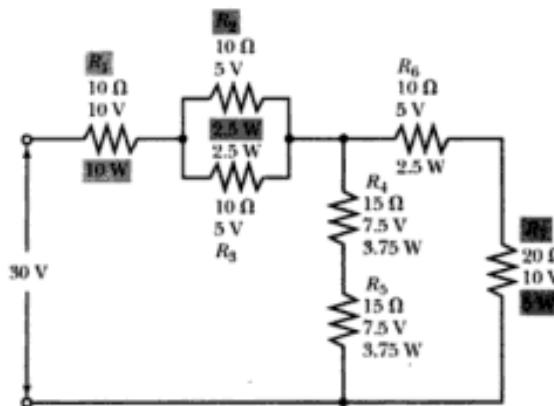


图 6-21 位置对功率、电压和电流的影响

由于通过每个电阻上的电流都已知，那样您就可以找到每个元件上的电压降以及功耗，如图 6-21 所示。既然我们已经知道了电流、电阻和电压，那么任何一个公式($P=V \times I$; $P=I^2 \times R$; 或者是 $P=V^2/R$)都可以用来计算元件的功耗了。例如， $P_{R_1}=V \times I=10V \times 0.5A=5W$;
 $P_{R_1}=V \times I=10V \times 1A=10W$ 等等。

经验提示

1. 在串联电路中，阻值最大的电阻消耗的功率最多，阻值最小的电阻消耗的功率最少。
2. 在并联电路中，阻值最小的电路支路消耗的功率最多，阻值最大的电路支路消耗的功率最少。
3. 在串联 - 并联电路中，消耗最多功率的电阻可以是电路中阻值最大的电阻器，也可以不是这个电阻。消耗最少功率的电阻也许是电路中阻值最小的电阻器，也可能不是这个电阻器。

消耗的功率是由在整个电路布局中给定电阻的位置所决定的。通过图 6-21 可以说明这一点。注意下面的事项：

- R_7 的阻值是 R_1 的两倍，但其消耗的功率却只有 R_1 所消耗功率的一半。
- R_1 和 R_2 是具有相同阻值的电阻，但二者消耗的功率却是不同的值。

为了检验您对串联 - 并联电路的主要参数的掌握情况，完成下面的课间测试。

课间测试 2

参考下面的电路图，找到如下几项：

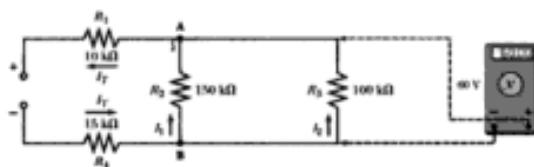
I_1 =_____ 电阻值显示在了电路中。

I_T =_____ 消耗了最多的功率？_____

V_T =_____

$$R_T = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$P_3 = \underline{\hspace{2cm}}$$



6.7 串联-并联电路中开路的影响以及故障调试的提示

影响

正如您看到的那样，在串联-并联电路中，一个给定元件的电气位置对所有电路的电气参数都有重要的影响。在电路配置中的开路位置对整个电路的所有参数也有很大的影响。

看一下在课间测试 2 中所使用的电路，您会观察到，如果 R_1 或者 R_4 成为开路的话，那么总电流的通路就成为了断路。这样的话，所有其他元件的电压降、电流和功耗都减为零了。

另一方面，如果 R_3 出现开路的话，由于总电阻从 $85\text{k}\Omega$ 增长到 $175\text{k}\Omega$ ，总电流就减小了。但是电流并没有减小到 0。这样单独每个元件的电压、电流和功耗就改变了；但是外加的电压却没有变化。

这里为您准备了一个特别的思考练习。再次参考一下课间测试题的电路，然后假定 R_2 是开路的，则下列参数是增加、减小还是保持不变？

V_T 将会 _____

I_T 将会 _____

V_1 将会 _____

通过 R_1 的电流将会 _____

V_2 将会 _____

通过 R_2 的电流将会 _____

V_3 将会 _____

通过 R_3 的电流将会 _____

V_4 将会 _____

通过 R_4 的电流将会 _____

P_T 将会 _____ P_3 将会 _____ P_4 将会 _____

当外加电压保持不变的时候，由于总电阻增加了，所以总功率和总电流要减小。

因为通过 R_1 和 R_4 的电流减小了，所以它们上面的电压降要减小，但是它们的电阻值却保持不变。

R_2 和 R_3 上面的电压降增加了，因为与它们串联的元件 R_1 和 R_4 上面的电压降变小了，这样在并联组合 R_2 和 R_3 上面就留下了更多的电压，点 A-B。

通过 R_1 和 R_4 的电流减小了(总电流 I_T 减小了)；但是，由于电流在 R_2 和 R_3 之间不再分开，所以通过未开路的并联支路 R_3 上面的电流增加了。很显然，通过 R_2 的电流值减为零，因为它是一个断开的路径。

最后，功耗改变了。 P_T 、 P_1 、和 P_4 减小了，因为总电流 I_T 减小了。 P_3 增加了，因为通过 R_3 的电流增加了。

到现在为止，当在串联-并联电路中分析事件的结果以及开路的影响的时候，您应该意识到这是需要逻辑思维的，并不只有一条简单的途径。相反，要考虑在电路各个部分之间，相互之间及其整个电路参数之间的相互影响。

故障调试提示

由于元件对电路的其他部分有影响，所以元件在电路中的位置很重要，基于上述原因，这里给出的提示只是在某种程度上一般的情况。

在电路中，如果任何一个元件发生了开路，总电阻就会增大；最终，总电流就会减小。如果您对总电流进行测量（或是监控），您会发现总电流比正常情况下外加电压的时候要小，这样在电路中的某个地方出现开路或是其中的某个电阻值增大了。

注：在图 6-22 中显示了两种在电路中判定总电流的典型方法。

a. 同电源和电路串联的方式插入电流表。

b. 在一个已知通过总电流的电阻上，测量它上面的电压，利用欧姆定律(V/R)来判定电流。

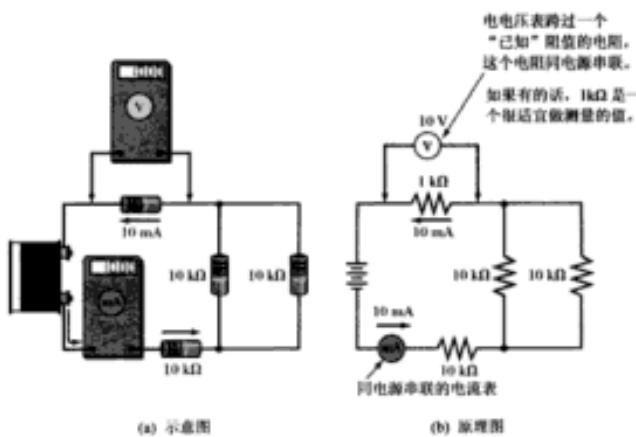


图 6-22 检查总电流的两种方法

经验提示

对于这种方法来讲，如果能得到的话， $1\text{k}\Omega$ 是一个很合适的值，因为它上面的电压降等于通过它的 mA 数。换句话说，

$$\frac{10\text{V}}{1\text{k}\Omega} = 10\text{mA}$$

（参见图 6-22）

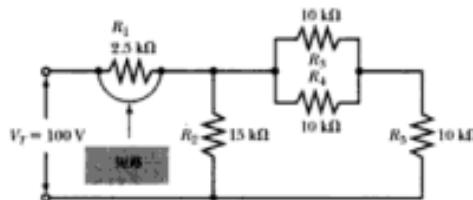
1. 如果同电源串联的任何元件发生开路的话，总电阻就增加到 ∞ ，总电流减小到零。正如在串联电路中学过的那样，外加电压好像都加在了发生开路的串联元件上，而那些好的元件上面的电压降是零。
2. 如果在那些不同电源串联的元件上面发生开路的话，那么测量电流以及直观的感觉会将这个问题孤立出来。
3. 如果不太容易进行电流的测量，那么您可以在整个电路上做大量的电压检查。观察哪里的电压比通常的情况高了或是低了，然后通过逻辑判断一下发生开路的位置。

6.8 串联-并联电路中短路的影响以及故障调试的提示

影响

在总电路中发生故障的元件或电路的位置决定其他元件的参数变化。

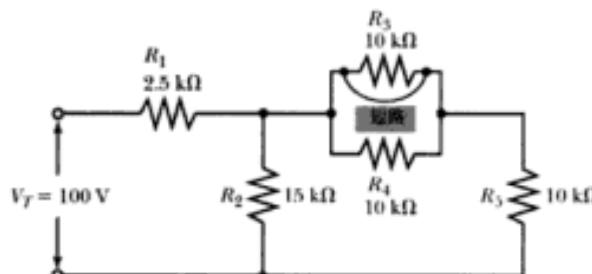
参考图 6-23。如果短路的元件是在主通道上，流过总电流，即同电源是串联的关系，那么(1)总电流减小，(2)短路元件两端的电压减小到 0，(3)整个电路其他部分的电压增加(除了 V_T)。



如果 R_2 短路的话：
 $R_T \downarrow$ (从 $10\text{k}\Omega$ 到 $7.5\text{k}\Omega$)
 $V_T \rightarrow$ (保持在 100V)
 $I_T \uparrow$ (从 10mA 增加到 13.3mA)
 $V_{R1} \downarrow$ (减小到 0)
 $V_{R2-R5} \uparrow$ (因为电流↑以及 V_{R3} ↑)

图 6-23 串联(在主线上)元件短路的影响

参考图 6-24。如果短路的元件是在电路中其他位置，那么(1)总电流增加，因为总电阻减小了；(2)短路元件以及直接同短路元件并联的元件上面的电压减小到 0V ，因为短路的元件分流了与之并联的其他元件的电流；(3)其他元件的“电压降”要根据它们位置的不同，或者升高，或者降低。



如果 R_3 短路的话：
 $R_T \downarrow$ (从 $10\text{k}\Omega$ 到 $8.5\text{k}\Omega$)
 $V_T \rightarrow$ (保持在 100V)
 $I_T \uparrow$ (从 10mA 增加到 11.76mA)
 $V_{R1} \uparrow$ (从 25V 到 29.4V)
 $V_{R3-R4} \downarrow$ (因为短路减小到 0)
 V_{R4} 和 $V_{R5} \uparrow$ (因为电压降 V_{R3} 增加了，而 V_T 保持不变)

图 6-24 在串联-并联电路中组合部分元件短路的影响

故障调试提示

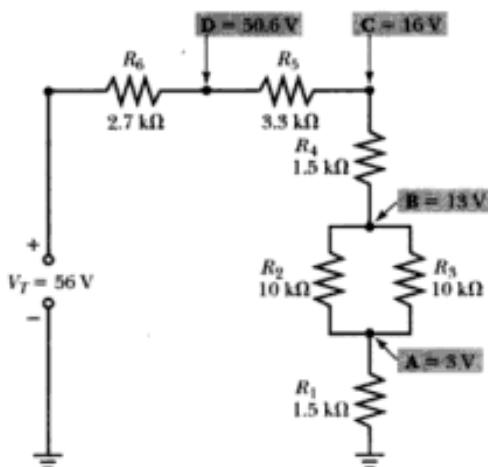
下面是在串联 - 并联电路中进行故障调试的一般思路：

1. 电路中任何元件的短路都能导致总电阻减小，总电流增大。
2. 如果总电流大于正常情况下的总电流(或者总电阻比正常的 R_T 小了)，这样就表示在电路中的某个位置发生了短路或者电阻降低了。
3. 对电路中的元件进行电压测量，发生短路元件的电压以及那些与短路元件直接并联元件的电压接近 0。好的元件根据它们各自在电路中位置的不同，它们的电压比正常水平或高或低。电压测量是一个定位短路元件或元件组合的简单方法。
4. 一旦确定了发生短路的电路部分的位置，电阻测量就可以确定发生短路的元件或电路中的部分。电阻的测量包括在测量的过程中要关闭电源，要将每一个支路的一个端点从电路中抬起。

让我们看看您的分析能力是否在逐步提高。在下面的课间测试里，试着解决其中的故障问题。

课间测试 3

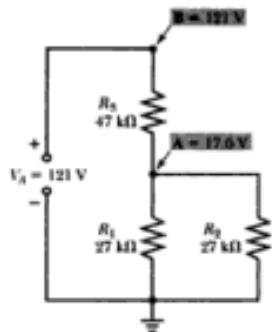
1. 参考图 6-25。判断存在故障的元件以及故障的性质。



注意：标出的电压是从指定的测试点到接地平面之间的电压

图 6-25 课间测试 3 第 1 题电路图

2. 参考图 6-26。指出那些元件值得怀疑，它们存在什么问题。
3. 参考图 6-27。指出如果 R_2 的值增大的话，那个电压值会改变，是增大还是减小？



注意：标出的电压是从指定的测试点到接地平面之间的电压

图 6-26 考间测试 3 第 2 题电路图

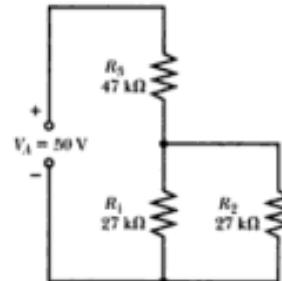


图 6-27 考间测试 3 第 3 题电路图

6.9 按要求设计串联-并联电路

对于设计的问题，假定我们正在设计并绘制一个照明电路的框图，这个照明电路包括 4 个电灯泡，其中每一个都在 10V 电压下正常工作。电路中包括 4 个电灯以及三个 SPST 开关，开关 1 是控制所有电灯的开关；开关 2 控制两个电灯的开关模式(假定开关 1 是合上的)，开关 3 控制其余电灯的开关条件(假定开关 1 是合上的)。电源电压是 20V。

例：解决这个问题的思路如下：

1. 因为电源电压等于 20V，而灯泡都是 10V 的灯泡，所以可以在逻辑上假定两个灯泡在 20V 的电路中是串联关系。
2. 因为有 4 个灯泡，也可以从逻辑上假定两两灯泡的支路连接在 20V 的电源上。
3. 开关 1 控制着与电源连接的总电路的开关条件，逻辑上这个开关要与电源串联，并且要将其连接到电源和剩余部分的电路之间。
4. 电路的要求是单独的控制各自两个电灯泡的支路，那么开关 2 和开关 3 必须放置在同这两个灯泡支路各自串联的位置上。

根据上面的分析就可以绘制出电路框图了，如图 6-28 所示。

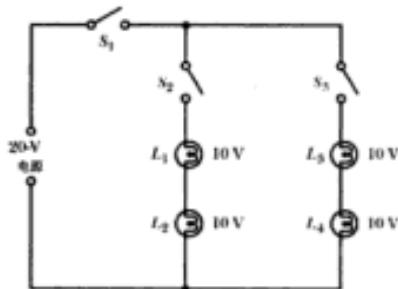


图 6-28 样本设计问题的电路

练习题 5

看看您是否能够设计出满足下列条件的串联-并联电路。

给定 6 个 $10\text{k}\Omega$ 的电阻和 1 个 45V 的电源，设计并绘制出电路图，满足：

$$V_1=20\text{V}; V_2=5\text{V}; V_3=5\text{V}; V_4=5\text{V}; V_5=5\text{V}; V_6=20\text{V}$$

6.10 加载的分压器

参考图 6-29。回忆一下，我们在第 5 章曾经学过，沿着串联电路不同点上的电压是由在整个串联电路中电阻的比率来控制的。因为分压电路没有连接外部电路负载(需要电流的元件或设备)，所以这些分压器被称为非加载分压器。

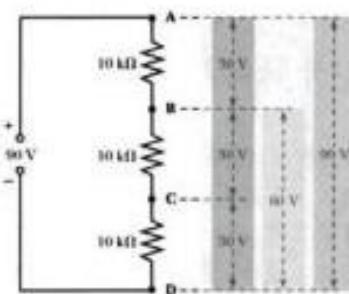


图 6-29 无负载电压分配器

串联-并联电路在电子技术中最常用的应用是加载分压器和惠斯通电桥。

在电子电路中经常会有这样的要求，对于电路或系统不同的部分要提供不同的电平。这些不同的部分也许也会需要不同的负载电流。分压器经常与电源一起使用，从而在需要不同电流值的部分提供并分配这些不同的电平。

为了有助于我们对加载分压器的讨论，有必要定义一些在讨论当中使用的术语。您学习这些定义的时候请参考图 6-30。

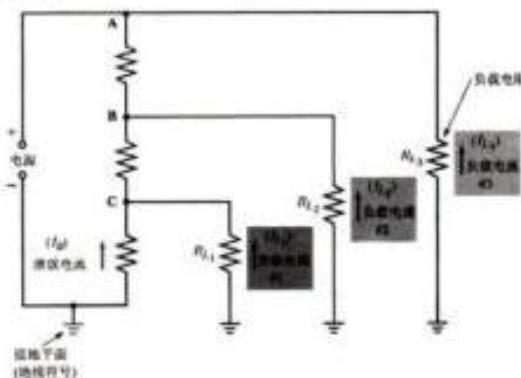


图 6-30 与加载分压器相关的术语

1. 负载是一个能够从电源吸收电流的元件/设备或者电路。
2. 负载电流就是指与电源和/或其输出分压器相连的元件或电路要求的电流。
3. R_L 是负载电阻器或元件的电阻值。
4. 接地平面是一个电路参考点，这个参考点用于在电路中定义或测量电压值。

通常在电路中电气接地平面是底板接地，这是公共的金属传导路径，通过这条路径，许多元件或电路在电气上就同电源的另一端连接了起来。在印刷电路板中，它是一个公共的金属导体回路，通过这条回路许多元件在电气上就被连接了起来，或者称为“共地”。在以金属机箱为基础的电路中，金属箱体通常作为“返回”的路径，或者是公共传导路径；因此，就有了术语“底板接地”。底板接地的符号是 N 。在电子线路图，例如家庭布线，“大地”是一个公共的参考和连接点。大地的符号是 G 。由于在许多文章和简图中，这个符号经常被用来代表“公共地”，我们也用它来代表电路中的公共参考点。

5. 泄放电流被认为是流过一个电阻网络或者是连接到电源输出端的泄放电阻器的固定电流。许多电源都使用泄放电阻，泄放电阻能够从电源中吸收一个固定的最小电流来协助调整电源输出电压。即，在不同负载的条件下保持电源输出电压的恒定。因为连接到分压器上的负载经常是功能电路而不是固定阻值的电阻，因此在运行期间负载的要求(例如，负载需要的电流)经常会发生变化。由于这个原因，分压器的设计需要满足下列条件，即在负载电流产生适当的变化时，各个分配器的输出点上的电平不能受到超出限度的干扰。对于吸收的负载电流，泄放电流越高，那么电压的供应就表现得越“硬朗”。即，当负载电流发生变化时，输出电压相应的变化越小。典型的情况是泄放电流大约是所需负载电流的10%到25%。如果采用了更高的百分比，那么就表明需要更恒定的电压供应。

6. 泄放电阻是能够从电源中吸收泄放电流的电阻或电阻网络，这些电阻或电阻网络是同电源的电路部分并联的。泄放电阻另一个常用的功能是能够在电路断电之后放掉电源电容器剩余的电量以保证安全。在今后的学习当中，您会学习到更多有关电源供电电路的知识。

7. 电位器(如图6-31所示)是一个带有3个终端的电阻器，这个元件用来进行分压。第1个触点位于电阻器的一端，第2个触点是在电阻器的另外一端，第3个触点是一个“滑线刷头”，这个触点能够沿着电阻元件移动到任意位置。滑线刷头在电阻器上的位置决定了电阻的大小，这样也就决定了从这点到其余任意触点的电压。

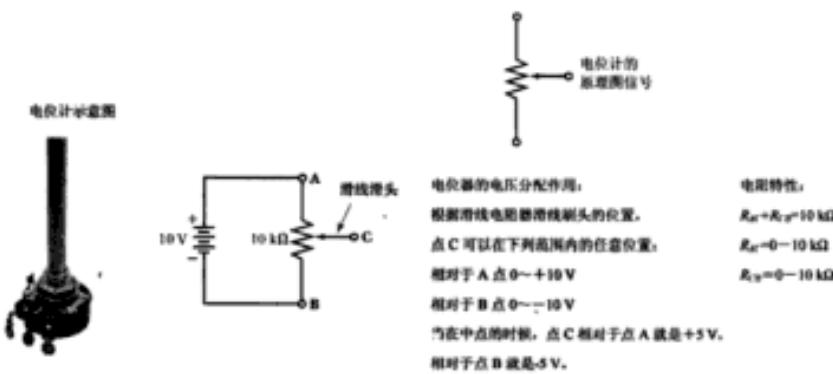


图 6-31 电位器

经验提示

仪器设备的底板一般被作为电路的“公共”返回路径，当操作这种设备的时候一定要注意安全。设备的底板和大地的电势不同，在许多(或者大多数)情况下，一定要确保底板也要连接到一个较好的接地点，这样可以避免由于电势差而产生的电击，或者避免威胁到人身安全的危险。与大地的连接经常是通过在电气上连接到水管或者一根插入大地的金属棒。交流系统通常有一条“中性”的传导路径，通过将这条传导路径连接到电气意义上的大地来实现。

某些设备被设计成为能够在“浮动”的状态下工作而不用连接到大地上。也就是说机箱和大地不相连。在这种情况下，为了保证安全最好采用一个“隔离变压器”，将交流电源与机箱公共电路回路隔断。在后面的章节中，您会学到更多有关变压器的知识。如果您同时接触机箱和大地的话，电路和设备可能会对您造成电击(或者造成死亡)，我们这里只是想警告您在与这些电路和设备打交道的时候要小心。要正确的操作这些设备，并且要了解机箱是否已经正确的接地或绝缘。

您必须清楚您现在正在使用、操作或测试的设备存在的接地情况。用伏特表检查在箱体和大地之间的电势差总是很好的做法。如果机箱相对于地或电源线的地之间存在一定电压的，那么，您必须判断是否应该继续操作这个设备，在设备继续工作是否需要修理的话，还是要将电源插头反转。

根据这些背景知识，让我们看一个典型的加载分压器电路的分析。

6.10.1 加载的两单元分压器

当您学习下面内容的时候观察图 6-32(a)和 6-32(b)。我们将对这个电路做详细的讨论。

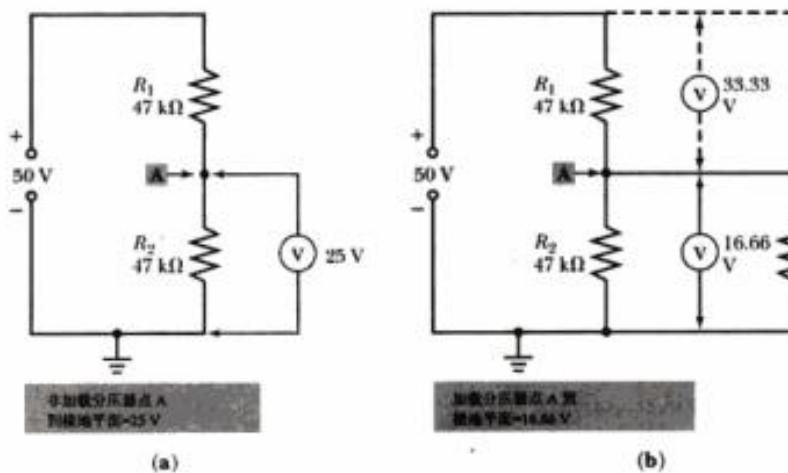


图 6-32 两个元件的分压电路

当连接负载电阻器 R_L 的时候，是什么使得在 A 点和接地平面之间的电压从 25V 减小到大约 16.7V 呢？在负载连接之前，因为这两个串联连接的等值电阻器流过相同的电流，所以它们平分了输入电压(每个是 25V)。

当连接负载电阻器的时候，对于电流来讲通过 R_L 产生了一个新的支路路径。通过 R_L 的电流必须也通过 R_1 ，然后流回电源的负极。现在流经 R_1 的电流量增大了。

如果流经 R_1 的电流增大了，但它的阻值没有变化，那么它的电压降 $I \times R$ 一定就会增加。在这种情况下，电压从 25V 增加到大约 33.33V。这样，从点 A 到接地平面之间只剩下了 16.67V 的电压降，而在接入负载之前，这个电压降的值是 25V。

6.10.2 多负载情况的三单元分压器

观察图 6-33(a)和(b)，可以看出将一个负载连接到三单元分压器所引起的变化。该变化与发生在两单元分压器上的变化很相似。

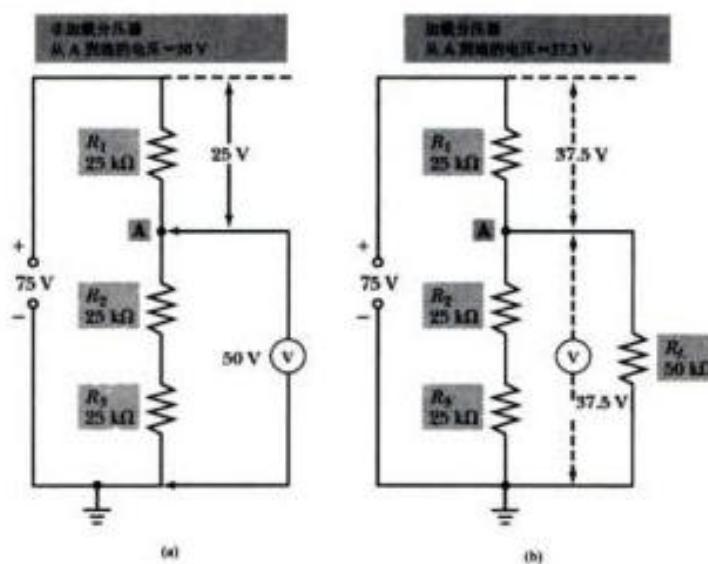


图 6-33 非加载和加载分压器的对比(分压器电路中连入一个负载的影响)

从欧姆定律和基尔霍夫定律的观点出发，来看一下在图 6-33(b)中的 3 个元件组成的负载分压器。

通过您所学的串联和并联电路的知识就可以求解 R_T 。 R_L 同串联组合 R_{2-3} 是并联的关系。这就表明，阻值为 50kΩ 的 R_L 同 50kΩ 是并联的关系，所以从点 A 到接地平面的等效电阻等于 25 kΩ。这个 25 kΩ 同阻值为 25kΩ 的 R_1 是串联关系，这样电路的总电阻就是 50 kΩ。

利用欧姆定律来解决 I_T ，这里

$$I_T = \frac{V_T}{R_T} = \frac{75V}{50k\Omega} = 1.5mA$$

因为 I_T 流经 R_1 ， $V_1 = I_T \times R_1 = 1.5mA \times 25k\Omega = 37.5V$

因为点 A 到接地平面是由两个等于 50 kΩ 的支路(R_L 和 R_{2-3})复合而成，所以总电流在这两个支路之间平均分配。这就意味着有 0.75 mA 的电流通过了 R_L ，有 0.75mA 的电流通过了 R_{2-3} 。 R_L 的电压降 = $0.75mA \times 50 k\Omega = 37.5V$ ； R_2 的电压降 = $0.75mA \times 25 k\Omega = 18.75V$ ； R_3 的电压降 = $0.75mA \times 25 k\Omega = 18.75V$ ；因此， $V_{2-3} = 37.5V$ 。

当然，通过基尔霍夫定律(回路压降的总和等于外加电压)，您知道从点 A 到接地平面的电压一定等于 37.5V。因为计算 R_1 的电压降是 37.5V，外加电压剩余的部分一定加在了从点 A 到接地平面之间。

让我们更深入地学习负载分压器，看看为得到给定的电平和负载电流，如何进行电路的设计和分析。

例：参考图 6-34 求解电路设计参数。注意电压分配系统提供的电压和电流在下面列出：

负载 1(R_{L_1})=25 V 在 12.5 mA

负载 2(R_{L_2})=75 V 在 25 mA

负载 3(R_{L_3})=225 V 在 50 mA

泄放电流(I_B)=25 mA

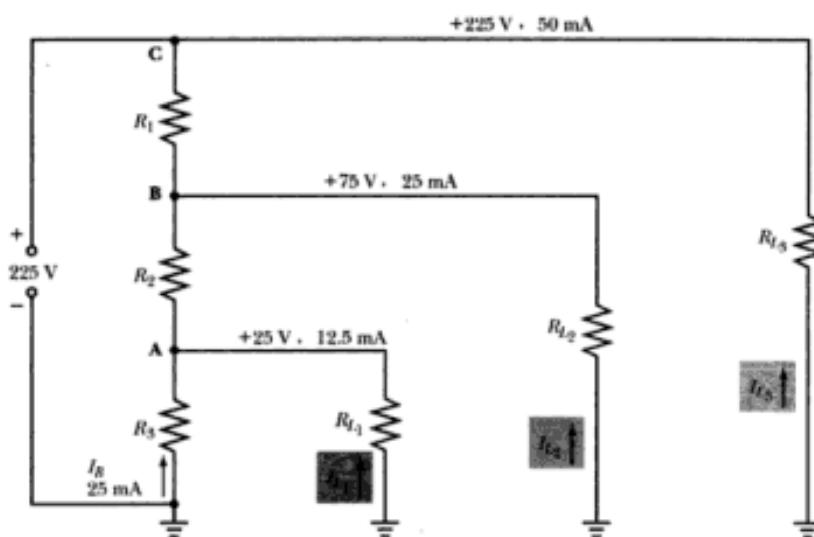


图 6-34 分析并设计一个加载分压器电路

要得到更多的信息，我们的一个任务就是求得负载 1、2 和 3 的电阻值。利用已经提供的参数，对于设计任务来讲，这不是关键的，但非常有用。

由于希望加在负载上的电压值以及流过负载的电流值已知，通过简单地应用欧姆定律就可以找出负载电阻值。

$$R_{L_1} = \frac{25V}{12.5mA} = 2k\Omega$$

$$R_{L_2} = \frac{75V}{25mA} = 3k\Omega$$

$$R_{L_3} = \frac{225V}{50mA} = 4.5k\Omega$$

第2个任务是一个设计任务，求分压器电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 的值。这些电阻要向负载提供适当的电压。

参考图6-34，按照如下步骤让我们来检查设计任务：

(1) 若电路，没有负载电流流过 R_3 ，这就意味着只有给定的25mA泄放电流(I_B)流过 R_3 。因为它与负载1是并联的关系，所以它的电压等于负载1的电压，即25V。因此

$$R_3 = \frac{25V}{25mA} = 1k\Omega$$

(2) R_2 的电流一定等于泄放电流25mA加上负载1的12.5mA，等于37.5mA。 R_2 的电压降一定等于75V减去 R_3 的电压降。这样 V_{R_2} 等于50V。因此，

$$R_2 = \frac{50V}{37.5mA} = 1.33k\Omega$$

(3) R_1 的电流一定等于泄放电流加上负载1的电流，再加上负载2的电流。通过 R_1 的电流等于25mA(泄放电流)加上12.5mA(I_{L_1})，再加上25mA(I_{L_2})，等于62.5mA。这样 R_1 的电压降一定等于225V减去从点B到地的电压降，即225V-75V=150V。这就意味着

$$R_1 = \frac{150V}{62.5mA} = 2.4k\Omega$$

完整的设计参见图6-35。

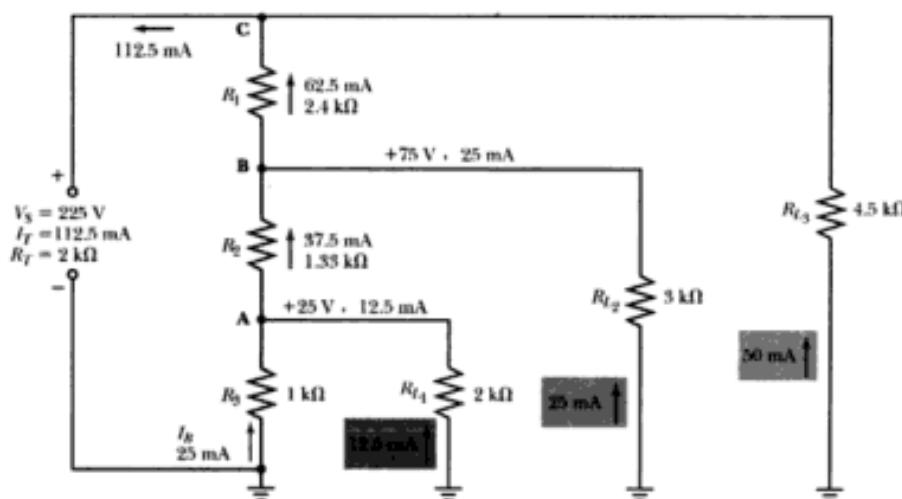


图6-35 分压器问题的解决方案

练习题6

- 如我们在例子中所讲的那样，画一个包含3个负载的三电阻器分压器的电路图。令顶部的电阻是 R_1 ，中间的电阻是 R_2 ，底部的电阻是 R_3 。
- 假定电路如下面所描述，求每一个负载电阻器的电阻值，并求出分配器电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 的电阻值：

- a. 电源电压=100 V
- b. 漏放电流=200 mA
- c. 1# 负载需要的电压是 10 V, 需要的电流是 10 mA
- d. 2# 负载需要的电压是 30 V, 需要的电流是 20 mA
- e. 1# 负载需要的电压是 100 V, 需要的电流是 40 mA
- 3. 完整的在电路图上标出所有的电阻、电压和电流。

6.10.3 实际的分压器形式

看一下在图 6-36 中的电路。伏特表的滑线电阻器的刷头在顶部(位置 1), 阻值为 $20\text{ k}\Omega$ 的 R_L 同电位器的总电阻 $30\text{ k}\Omega$ 是并联的关系, 相当于从 A 点到地有一个 $12\text{ k}\Omega$ 的等效电阻器。电路电压分配的功能是通过 $40\text{ k}\Omega$ 的总电阻来分配 200 V 的电压, 这 $40\text{ k}\Omega$ 的电阻是由一个 $28\text{ k}\Omega$ 的电阻与一个 $12\text{ k}\Omega$ 的并联等效电阻串联而成。因此, R_L 的电压降是 200V 的 40 分之 12 , 或者说是 60 V 。 $28\text{ k}\Omega$ 电阻器的电压降是剩余的 140 V 。

另一方面, 如果滑线电阻器的刷头在位置 2(或者地), 那么 R_L 的两端就都连到地上了。因此, 加在 R_L 上的压降就是零。这就意味着, 我们能够利用电位器使通过 R_L 的电压在 $0\sim60\text{V}$ 之间变化。在以后的电子技术的实践中您将会看到, 电位器的这种“可变分压器”的作用非常实用。

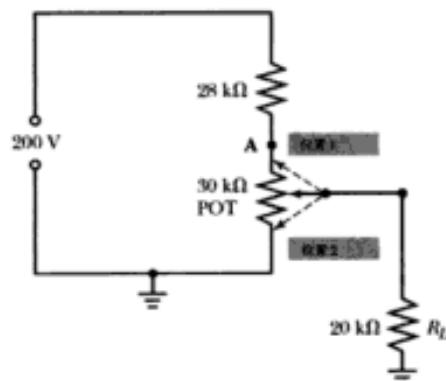


图 6-36 电位器改变电压输出示例: 电位器能够使加在 R_L 上的电压在 $0\sim60\text{V}$ 的范围内改变。

练习题 7

参考图 6-37 并且回答下列问题:

1. R_L 两端的电压值是多少? R_L 消耗的功率是多少?
2. R_L 的电阻值是多少?
3. R_2 的电阻值是多少?

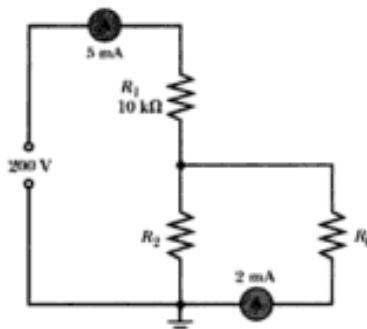


图 6-37 练习题 7 电路图

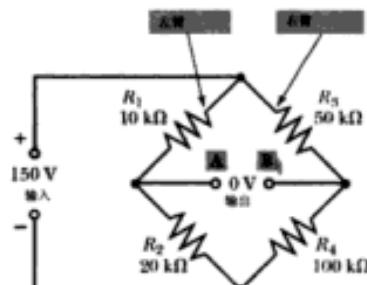
4. 如果由于 R_2 的变化而引 V_{R_L} 起突然的下降，那么这里所指的 R_2 ，其值是增大还是减小？
5. 如果在问题 4 中 V_{R_L} 的下降是由于 R_1 的变化而引起的，那么这里指的 R_1 值是增加还是减小？
6. 如果 R_L 从电路中的分压器断开连接，那么 V_{R_L} 现在的值是多少？
7. 如果 R_1 开路，那么 V_{R_L} 会发生什么变化？

6.11 惠斯通电桥电路

图 6-38 中是一种特殊形式的串联一并联电路，被称为电桥电路，一般用来在电子电路中做测量。(注：当电桥平衡的时候，在 A 点和 B 点之间就会出现零电位。只有当左臂电阻和右臂电阻之间的比例相等的时候，才会出现这种平衡。)

例如，观察一下图 6-38。在电桥左边的臂中， $R_1=10\text{k}\Omega$ ， $R_2=20\text{k}\Omega$ 。在电桥右边的臂中， $R_3=50\text{k}\Omega$ ， $R_4=100\text{k}\Omega$ 。如果外加电压是 150V，那么 R_1 上的电压降就是加在左臂上电压的 $\frac{1}{3}$ ，即是 50V(因为 R_1 的阻值是左臂总电阻的 $\frac{1}{3}$)。 R_2 上的电压降是 150V 的另外三分之二。

电桥另外一臂的情况又怎么样呢？同样的 150V 加在了这个臂的 $150\text{k}\Omega$ 上。 R_3 上的电压降是外加电压的 $\frac{1}{3}$ ，即是 50V， R_4 上的电压降是外加电压的三分之二(R =右臂总电阻的三分之二)，即是 100V。

图 6-38 当 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ 的时候，就出现了平衡电桥

注意，在点 A 和点 B 之间的电压差是零。这是因为相对于电源的负极，点 A 的电压是 +100 V。而相对于电源的负极，点 B 的电压也是 +100 V。因为点 A 和点 B 具有相同的电势，这样在它们之间的电势差就是零了。

无论什么时候，只要在电桥的左右两臂之中，顶部电阻和底部电阻的比例相等，这样平衡的条件就满足了。

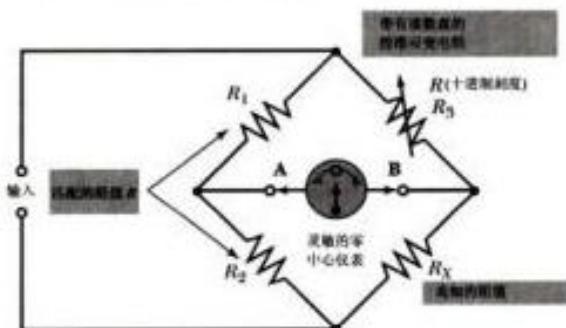
电桥平衡的条件：

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (6-1)$$

注意：

电阻的值并不重要，每个臂中电阻的比例才起决定的作用。电阻的比例决定了整个臂中的电压分布。回忆一下串联电路的概念，如果两个臂中有相同的电压分布，那么每个臂的中点就有相同的电势，电桥就平衡了。

惠斯通电桥电路是电桥电路的一个特殊应用，可以测量未知的电阻值。当电桥平衡的时候，在输出的终端(点 A 和点 B)之间就有了零电势差。在另一方面，如果电桥没有处于平衡状态，在输出终端之间就有电势差存在。当您阅读下列讨论的时候，参考图 6-39。



下面是一个用惠斯通电桥来判定未知电阻阻值的方法：

1. 仔细的选择 R_1 和 R_2 来作为匹配(等值)电阻。
2. 在点 A 和点 B 之间放置一个“中心零刻度”的电流计，这个电流计是电桥电路的输出。
3. 用一个带有刻度的可变电阻，例如一个象 R_3 那样的“十进制电阻箱”。注意：这种可变电阻带有标有刻度的读数盘，这样可以使您能够读出电阻设置，如图 6-40 所示。

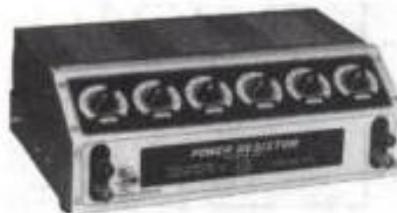


图 6-40 用作带有刻度阻值的十进制电阻箱

4. 将未知电阻 R_X 放在与标有刻度的可变电阻同一个臂中。
5. 因为 R_1 和 R_2 在左臂中是等值电阻，这样当标有刻度的可变电阻和未知阻值的电阻在右臂中彼此相等的时候，电桥就平衡了。在这种情况下，敏感电流计的指针应该是指在“0”这个位置，即在刻度盘的中间。如果电桥没有平衡，指针指向中心的左面，这就说明通过电流计的电流在这个方向上，或者当指针指向中心的右侧，这说明电流是在另一个方向上。指针的方向是由 A 点和 B 点之间电势差的极性而决定的，即是由在电桥电路中 A 点和 B 点之间的比较电压而决定的。
6. 一旦标有刻度的可变电阻调整到了零电流示数(平衡了)，这样未知电阻的阻值就可以直接从标有刻度的电阻读数盘上读取了。

另一个判定未知电阻阻值的方法就是利用已知电阻的阻值和平衡电桥电路的概念。

1. 回忆一下，当 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ 的时候，电桥平衡。

2. 这些关系，从数学上可以表述为： $R_1 \times R_4 = R_2 \times R_3$ (公式中十字相乘因子)

3. 如果 R_4 是未知阻值的电阻(R_X)，那么公式可以被变形为解决 R_X 的形式，如下：

$$R_X = \frac{R_2 \times R_3}{R_1} \quad (6-2)$$

4. 参考图 6-41 中的数字，看一下先前描述的步骤是否有效。

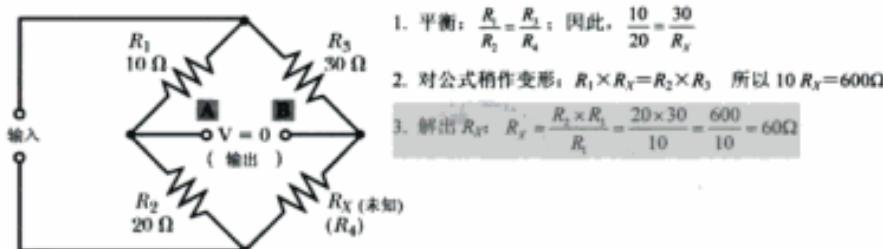


图 6-41 在电桥电路中，求解 R_X 阻值的计算方法

5. 将我们的答案带入原来电桥平衡的公式来确认一下答案的正确性：

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} = \frac{10}{20} = \frac{30}{60} = \frac{1}{2} \text{ (公式是正确的)}.$$

电桥电路的一些应用

在工业中，有大量的传感器和控制电路用于控制机器和制造系统的运行。例如，用于检测温度、流量、压力或者电子条件变化的传感器都是很常见的。这些传感器其中的一个输出可以作为电桥的一个臂，这个电桥电路在希望得到的温度、压力、流量等等的参考水平上达到平衡，如图 6-42 所示。任何可观察到的条件变化都能引起电桥不平衡。在电桥输出端上的变化量通常被用作电路或仪器设备的输入，为了便于监控，这些电路或仪器设备最后将这个变化转化成可以读出的输出指示，例如数字显示或者是反馈的控制显示，如图 6-42 所示。这样就可以控制这些系统条件的变化，或者通过手动的方式，或者在大多数情况下，能自动使系统回到希望的运行状态下。

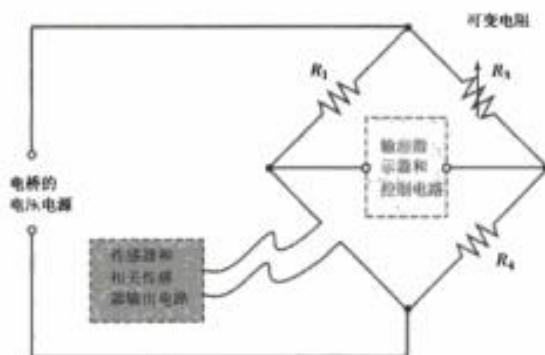


图 6-42 用于工业控制的电桥电路

我们已经讨论了惠斯通电桥一个通常的应用，即测量未知阻值的电阻。电桥电路的各种变形也可以用来测量其他类型元件的数值，例如电容，有关这些知识，您可以在后续的章节中学到相关的细节。在进行测量时仍然将待测量的元件放在电桥的一个臂中，如图 6-43 所示。通过调整标准电容(C_S)，使其同未知电容(C_x)的值相同，当电桥平衡的时候，耳机中应该是听不到音调或者是音调最小的。

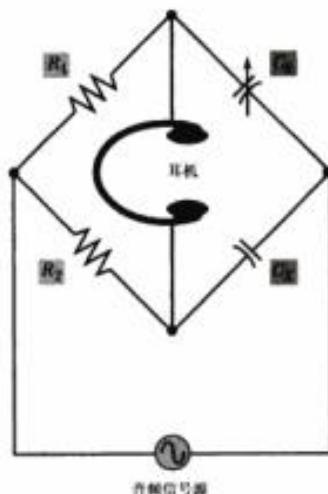


图 6-43 用于测量未知电容值的电桥电路

经验提示

因为串联-并联电路是组合电路，而这个组合电路是有各种任意的配置，所以没有任何信号分析的技术是通用的。然而，为了分析，将电路分解成串联与并联的部分是十分必要的。

在学习本章的过程中，您已经了解到利用串联-并联的概念来分析串联的部分，在这里(1)通过串联元件和/或串联的电路部分的电流是相同的，(2)串联元件的压降同它们的电阻成正比。

同时您也学到，通过并联电路的法则来分析串联-并联电路中的并联部分，在这里(1)加在并联元件或者并联电路部分上的电压是相等的，(2)电流的分配与支路的电阻成反比。

而且，您也会注意到，在电路中，给定元件或电路部分的位置会影响整个电路的所有参数。因此，为了排除串联-并联电路的故障，一定要用适合那个电路部分的概念来单独的隔离那个电路。然后，移到下一部分，依此类推，直到找到发生故障的电路为止。在那部分电路中要用到隔离的技术，从而在那部分的范围内，将特定的故障元件或仪器隔离。

经过变形后的电桥电路还有另一个应用，这就是莫里(Murray)回路，它在电力和电话公司已经应用许多年了。莫里回路被用于找到传输电能或电话消息的长途线路中发生了意外导体接地的部分，如图 6-44 所示。根据已知的每英尺导体的电阻，并且利用在回路中那些输出和返回的导线形成电桥电路的部分，就能精确的判断发生接地故障的位置，然后就可以派服务人员那个地点进行相应的修理。

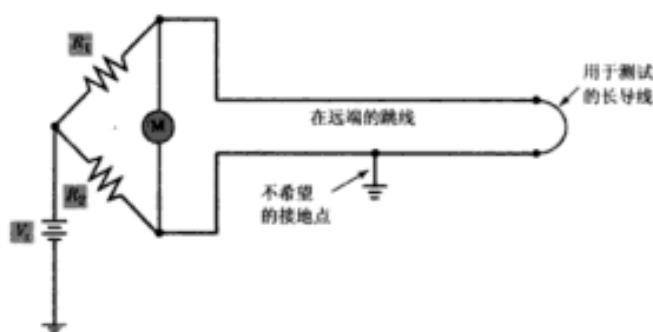


图 6-44 莫里环路的例子

6.12 知识点汇总

- 串联-并联电路是串联和并联连接的元件和/或电路部分的组合。
- 可以利用串联电路的法则来分析串联连接的元件或电路部分。
- 可以利用并联电路的法则来分析并联连接的元件或电路部分。
- 整个电路中，电流分开和汇合的点有助于用来辨别并联的部分。
- 整个电路中，分享相同电压的点也有助于用来辨别并联连接的元件或电路部分。
- 电路中流过相同电流的路径有助于辨别串联的电路元件。
- 分析整个电路的电阻可以从远离电源的那一端开始，然后逐一解决并将所得的结果合成一个结果，向着电源回推。(注意：如果 V_T 和 $I_{T\circ}$ 是已知的话，那这就没有必要了，利用 $R_T = V_T / I_{T\circ}$)
- 分析电路中的电流可以通过总的电流值进行，然后向着电源回推，分析通过不同电路部分的电流。
- 整个电路功耗可以利用相关的 I 、 V 和 R 参数来和相应的功率公式来解决，例如 $V \times I$ ， $I^2 R$ ，或者是 V^2/R 。

- 在电路中的任意位置，电阻的短路或者阻值的下降都能引起 R_T 的下降以及 I_T 的升高。
- 在电路中的任意位置，电阻的开路或者阻值的升高都能引起 R_T 的升高以及 I_T 的下降。
- 串联-并联电路的两个特殊应用就是用于各种用途的分压器和电桥电路。

公式与计算器输入顺序示例

公式(6-1)

当 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ 的时候，电桥平衡 (求平衡电桥电路的电阻比例)

输入顺序： R_1 的值， \square , R_2 的值， \square , (检验是否等于) R_3 的值， \square , R_4 的值， \square

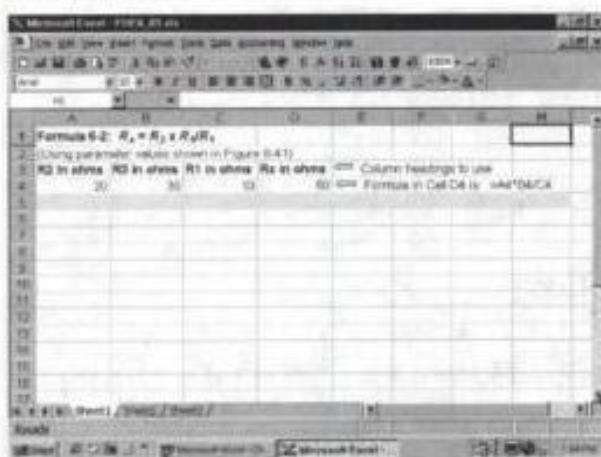
公式(6-2)

$R_x = \frac{R_2 \times R_3}{R_1}$ (利用平衡电桥公式，求未知电阻 R 的阻值)

输入顺序： R_2 的值， \square , R_3 的值， \square , R_1 的值， \square

使用 EXCEL

串联-并联电路公式(Excel 文件参考：FOE6_01.xls)



FOE6_01.xls

警告

在表格里输入公式后，就无需重复输入。解决新问题时只需采用该公式输入新的参数数据。

参考在图 6-41 中给定的参数。假定 R_1 的值变为 50Ω ，利用公式 6-2 中电子数据表格求解 R_x 。

复习题

- 用您自己的语言来描述串联-并联电路的主要特征。
- 说出两种判断组合(串联-并联)电路的方法，在这些电路中元件是并联连接的。
- 说出两种判断组合(串联-并联)电路的方法，在这些电路中元件是串联连接的。

4. 就电路的总电阻这方面讲，描述一种有效的分析组合(串联一并联)电路的方法。
 5. 就电路的电流分布这方面讲，描述一种有效的分析组合(串联一并联)电路的方法。
 6. 在串联一并联电路中，最大阻值的电阻上有最大的压降。
 - a. 不管电阻在电路中的什么位置，这个说法总是真。
 - b. 不管电阻在电路中的什么位置，这个说法总是假。
 - c. 根据电阻在电路中的位置，有时候为真。
 7. 在串联一并联电路中，总的功耗总是等于单独元件功率消耗的总和。
 - a. 不管包括多少个元件，一直真是。
 - b. 一直是假，因为总功率等于 $V_T \times I_T$ 。
 - c. 只有当所有的元件有相同阻值的时候是真。
 - d. 只对电路并联的部分是真。
 8. 当对串联一并联电路部分进行故障调试的时候：
 - a. 进行分析的时候，总是从串联的部分开始。
 - b. 进行分析的时候，总是从并联的部分开始。
 - c. 从哪里开始分析没什么关系。
 - d. 进行分析的时候，要将电路分解成串联和并联的部分。
 9. 如果串联一并联电路的总电阻增加了，那么：
 - a. 一定有一个电路部分或是元件发生了开路。
 - b. 一定有一个电路部分或是元件发生了短路。
 - c. 某个元件的阻值下降了，或是电路中发生了短路。
 - d. 某个元件的阻值增加了，或是电路中发生了开路。
 10. 向一个串联关系的电路部分中加入并联的电阻，或是在串联一并联关系的电路中加入并联关系的电阻，这样会导致电路的总电阻：
 - a. 增加
 - b. 减小
 - c. 保持不变

思考題

- 参考图 6-45, 求 R_T 的值。
 - 参考图 6-46 并求出:

$$I_T \quad V_3 \quad I_2 \quad V_2 \quad V_1 \quad I_1$$

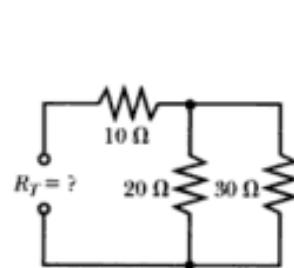


图 6-45 思考题 1 电路图

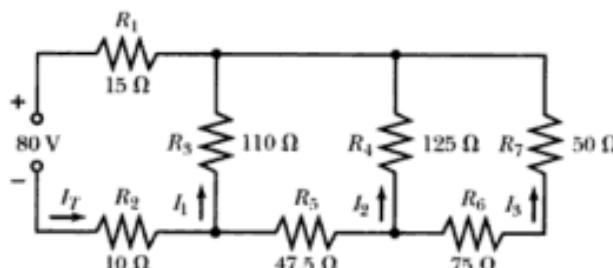


图 6-46 思考题 2 电路图

3. 参考图 6-47, 用下列符号来回答问题: I 代表增加; D 代表下降; RTS 代表不变。假定 R_5 短路:

R_T 会 _____ V_3 会 _____ R_4 会 _____ P_T 会 _____ V_1 会 _____

4. 在图 6-48 中, 可能出现的最大电流是多少?

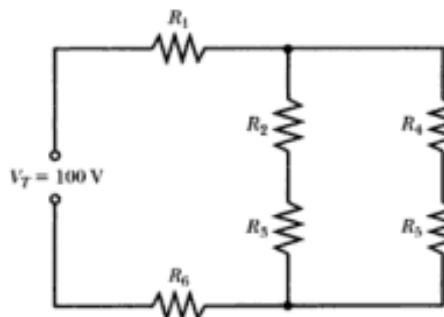


图 6-47 思考题 3 电路图

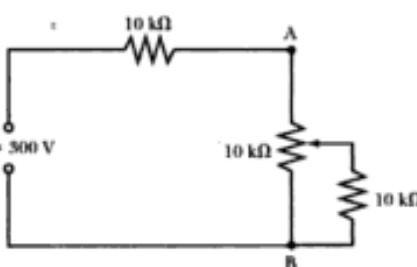


图 6-48 思考题 4 电路图

5. 在图 6-49 中, 如果改变电位器的设置, 从 A 点到地的可能出现的最小和最大的电压是多少? 从 _____ V 到 _____ V。

6. 在图 6-50 中, I_T 是 10A。求出 R_1 和 P_{R_1} 。

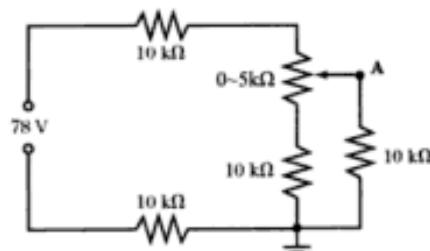


图 6-49 思考题 5 电路图

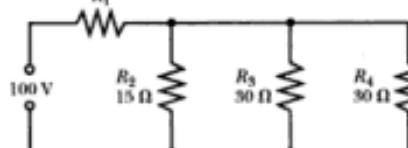


图 6-50 思考题 6 电路图

7. 在图 6-51 中, 求出 R_4 和 I_2 的值。

8. 在图 6-52 中, 求出在点 A 和点 B 之间的电阻。

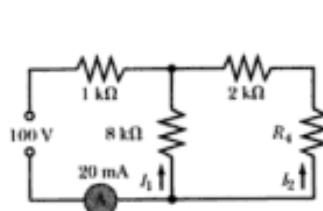


图 6-51 思考题 7 电路图

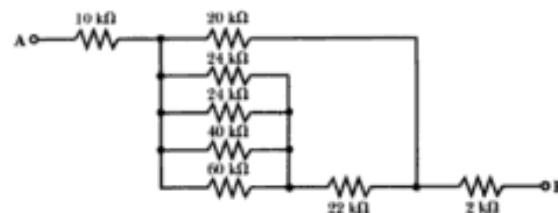


图 6-52 思考题 8 电路图

9. 在图 6-53 中，在开关闭合之后，电灯是变得更亮、更暗还是亮度保持不变。

10. 在图 6-54 中，求出外加电压。

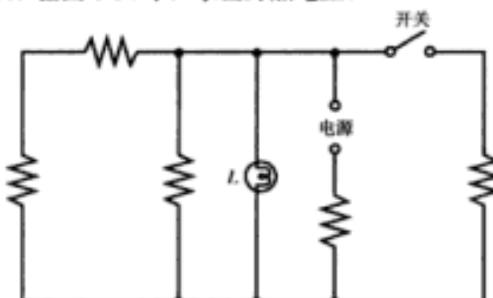


图 6-53 思考题 9 电路图

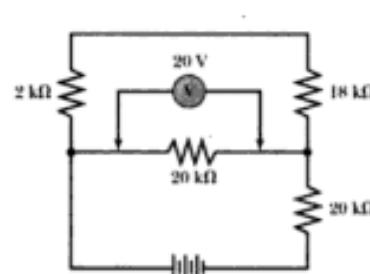


图 6-54 思考题 10 电路图

11. 在单独的纸上准确的复制电路图 6-55。当您完成的时候，在电路图上画出箭头来表明流过每个电阻电流的方向。利用这张电路图，假定每个电阻的阻值都是 $100\text{ k}\Omega$ 。求出下列参数的值(答案舍入到整数)。

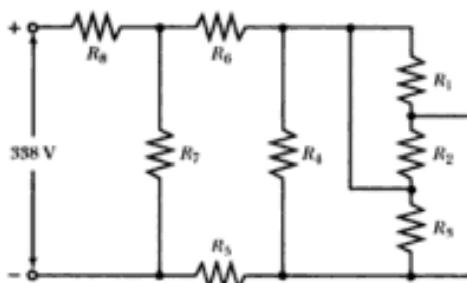


图 6-55 思考题 11 电路图

- a. 求出 R_T
- b. 求出 I_T
- c. 求出 V_{R_1}
- d. 求出 V_{R_2}
- e. 求出 V_{R_3}
- f. 求出 V_{R_4}
- g. 求出 V_{R_5}
- h. 求出 V_{R_6}
- i. 求出 V_{R_7}
- j. 求出 V_{R_8}

12. 参考在图 6-56 中的电路，并且回答下列问题：

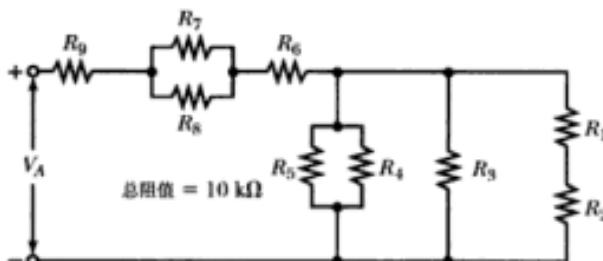


图 6-56 思考题 12 电路图

- 如果 R_1 增加，那么通过 R_5 的电流会有什么变化？
- 如果 R_7 下降，那么加在 R_9 上的电压会有什么变化？
- 如果 R_4 短路，那么加在 R_2 上的电压会有什么变化？ R_8 上的呢？
- 如果所有的电阻都是 $10\text{ k}\Omega$ ，那么 R_7 的值是多少？（所有的条件都是正常的！）
- 如果外加电压是 278.5 V ，那么 R_1 上的电压降是多少？
- 如果电路的外加电压减小到问题 e 中所示的电压值的一半的时候，那么 R_9 消耗的功率是多少？
- 如果电路的外加电压是 557 V ，那么哪个电阻会消耗最大的功率？
- 不管外加电压是多少，哪个电阻消耗的功率最小？
- 对于在问题 g 中定义的条件，消耗最大功率的电阻所消耗的功率是多少？消耗最小功率的电阻所消耗的功率是多少？

参考图 6-57，回答问题 13~21。

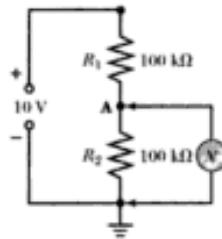


图 6-57 练习题 13~21 电路图

- 在将伏特表连接到 A 点和地之间之前， R_1 上的电压是多少？
 - 在将伏特表连接到 A 点和地之间之前， R_2 上的电压是多少？
 - 假定伏特表使用的量程是 10 V ，并且在这个量程上的伏特表电阻是 200000Ω ，当伏特表连接到电路中，以测量 A 点和地之间的电压的时候，在伏特表上显示 R_2 的电压是多少？
 - 对于在问题 15 中所述的条件，根据基尔霍夫定律，在那个时候 R_1 上的电压降是多少？
 - 将伏特表连入电路中会改变电路的电气参数吗？解释一下。
 - 如果伏特表连入的电阻是 R_1 而不是 R_2 ，解释一下电路的条件。
 - 伏特表连入的是其中的任何一个电阻，总电流是多少？
 - 不连伏特表，总电流是多少？
 - 在电路中的哪个点上可以连入伏特表而不影响 R_1 和 R_2 上的电压降。
- 参考图 6-58 来回答问题 22~31。
- 判定 R_{L_1} 、 R_{L_2} 和 R_{L_3} 的值。
 - 判定分配器电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 的值。
 - 在这个电路中，分压器是负载分配器还是非加载分配器？
 - 如果 R_{L_1} 改变使得希望的参数是电流为 10 mA 的时候电压为 150 V ，那么分配器中 R_1 的值是需要增加、降低还是保持不变？
 - 对于在问题 25 中描述的条件， R_{L_1} 需要的参数是在电流为 10 mA 的时候电压为 150 V ，那么 R_1 的值是多少？

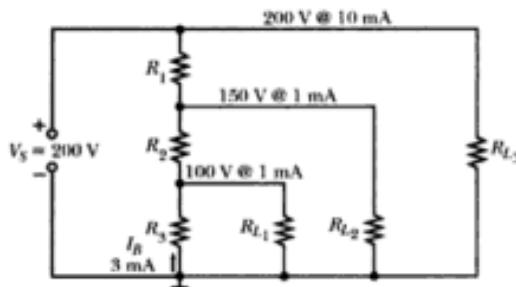


图 6-58 练习题 22~31 电路图

27. 如果所有的负载都从电路中移走，并且 R_1 的值也改变到在问题 26 中计算出来的那样，那么分配器的泄放电流会变成多少？
28. 为了保持最小的电阻额定功率是电阻将要消耗功率的两倍，那么在图 6-58 中所示的电路中， R_3 的最小额定功率应该是多少？
29. 在图 6-58 中所示的电路中，为了保持 R_2 的安全边界是额定功率的两倍，那么 R_2 最小的额定功率应该是多少？
30. 在图 6-58 中所示的电路中，为了保持 R_3 的安全边界是额定功率的两倍，那么 R_3 最小的额定功率应该是多少？
31. 在图 6-58 中所示的电路中，电源提供的总功率是多少？

分析题

对图 6-59 中所示的电路进行相应的分析，然后回答下列问题：I 代表增加，D 代表下降，RTS 代表保持不变：

1. 如果 R_2 的值下降很多的话：
 - R_3 上的电压会_____。
 - R_1 上的电压会_____。
 - 通过与 R_4 并联的负载上的电流会_____。
2. 如果 R_2 “开路”：
 - 连接到 R_1 底部的负载电阻(外部回路负载)上的电压会_____。
 - R_1 上的电压会_____。
3. 简要的解释一下，工业传感器的输出是如何与电桥电路连接来控制工业过程的。
4. 求图 6-59 电路中， R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 的值。
5. 求图 6-60 电路中 R_X 的值：假定将可变电阻 R 设为 $100\text{ k}\Omega$ 而使电桥平衡，那么 R_X 的值是多少？
6. 对于图 6-60 中的电路，如果 R_1 是 $47\text{ k}\Omega$ ， R_2 是 $27\text{ k}\Omega$ ，电桥平衡的时候可变电阻设在了 $100\text{ k}\Omega$ 上，那么 R_X 的值是多少？
7. 对于图 6-60 中的电路，如果可变电阻设在了 $1.5\text{ k}\Omega$ 上，电路中位于 R_X 位置的电阻是 $27\text{ k}\Omega$ ，那么为了使电桥平衡在电桥左臂上的电阻比例必须是多少？

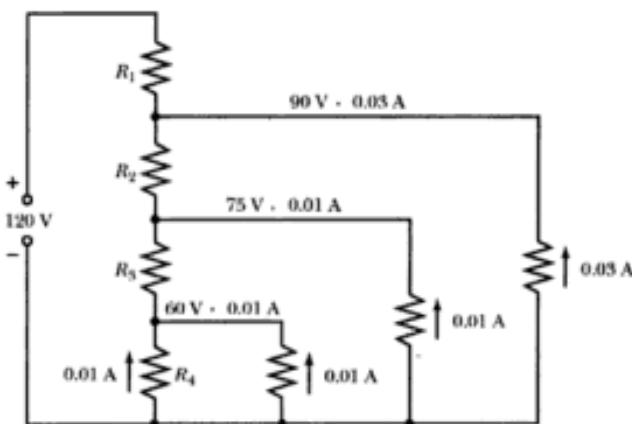


图 6-59 分析题 1-4 电路图

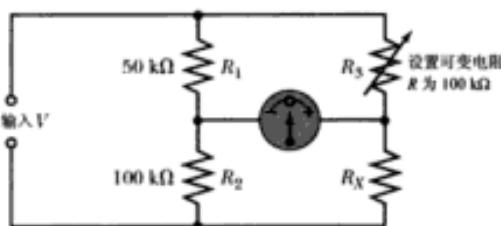


图 6-60 分析题 5-8 电路图

8. 对于图 6-60 中的电路，假定输入的电压相对于电路的顶部是正的，相对于底部是负的。如果直流仪表的负表笔连到了 R_2 的顶部，正端子连到 R_X 的顶部，仪表的指针指向零点的左侧，这是否表示 R_2 或 R_X 有更大的压降？
9. 利用计算器的倒数功能进行 3 个并联电阻的等效电阻 $R_{\text{等效}}$ 的计算，简要的定义一下按键的顺序或步骤，假定您使用计算器的工程模式。
10. 解释一下，利用伏特表来测量串联-并联电路中的串联部分的时候，会对电路条件造成什么样的影响。

MultiSIM 串联-并联电路练习题 1

1. 使用 MultiSIM 编程实现图 6-52 中的电路(注意：在 B 点要接地)。
2. 测量并记录从 A 点到 B 点电阻的值。
3. 如果允许的话，把 MultiSIM 得到的结果和第 6 章问答题 8 的解题指导中给出的值比较一下，看看您的结果是否与解题指导上的答案较接近。

MultiSIM 串联-并联电路练习题 2

1. 使用 MultiSIM 编程并实现图 6-48 中的电路(注意：在 B 点要接地)。
2. 将 R_3 的顶部连接到点 B；测量并记录总的电路电流。
3. 移开这个连接并将这个连接挪到 R_3 的顶部，以便将其连接到点 A 上。然后再次测量并记录电路的总电流。

步骤 5

定位新的可疑区域。新的可疑区域包括到 CRT 垂直极板余下的垂直信号路径。

步骤 6

检查已有的数据。

步骤 7

重复上面的分析和测试。

第 2 步测试：在点 E 和地之间检查垂直放大器的输出信号，发现没有信号存在，这表明问题出在垂直放大器电路。我们已经完成了模块级的故障调试，从现在开始，垂直放大器需要元件级的故障调试。如图 12-24 所示。

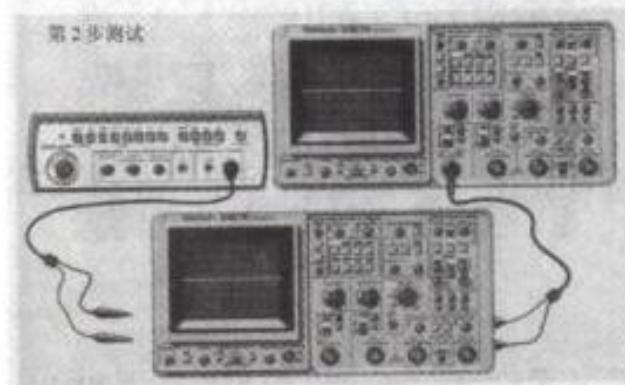


图 12-24 第 2 步测试

步骤 8

验证。第 3 步测试：当完成了元件级的故障调试以及所需要的维修之后，采用同样的信号对系统进行测试，结果在 CRT 屏幕上可以看到两个正弦波周期。如图 12-25 所示。

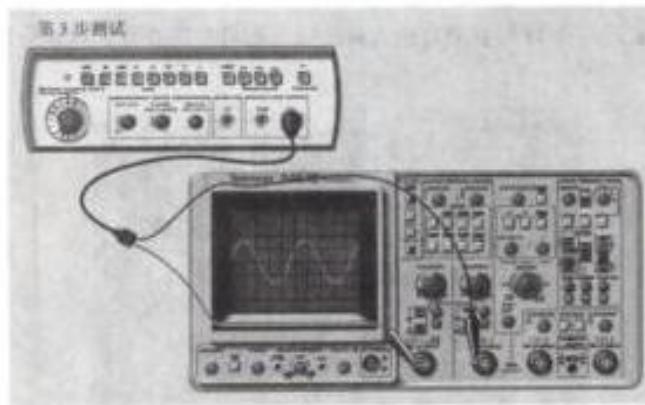


图 12-25 第 3 步测试

第IV部分 反应性元件

- 电感◆
- 交流电路中的感抗◆
- 交流电路中的 RL 电路◆
- 基本变压器原理◆
- 电容◆
- 交流电路中的容抗◆
- 交流电路中的 RC 电路◆
- RLC 电路分析◆
- 串联和并联谐振电路◆

第13章 电 感

教学大纲

- 13.1 知识背景
- 13.2 法拉第定律和楞次定律回顾
- 13.3 自电感
- 13.4 影响电感线圈电感值大小的因素
- 13.5 电感的串联和并联
- 13.6 电感线圈磁场中存储的能量
- 13.7 L/R 时间常数
- 13.8 采用 e 辅助计算电路参数
- 13.9 电感线圈的总结说明
- 13.10 故障调试提示

教学目标

通过学习本章您应该能够：

1. 定义电感(inductance)和自电感。
2. 解释法拉第定律和楞次定律。
3. 计算给定电路条件时的感生电动势大小。
4. 根据给定参数计算电感值。
5. 计算串联和并联的电感值。
6. 确定磁场所储存的能量。
7. 绘制并解释时间常数图。
8. 给定电路条件时计算时间常数。
9. 在直流 RL 电路中利用 e 求解电路参数。
10. 列出电感常见的故障。
11. 利用计算机求解电路问题。

预习指导

在您理解电子学理论时，电阻的电气特性及其实际元件电阻器是非常重要的概念。与此相似，电感的特性以及实际元件电感线圈具有同样的重要性。电阻器和电感线圈之间一个显著特点就是电阻器消耗电能，而电感线圈可以暂时存储电能。就像您在学习直流仪表和发电机时应用了新学的有关磁场和电磁机理的知识一样，在研究电感特性时也可以采用相同方法。

电感线圈在电子领域用途广泛。例如在“调谐”电路中电感线圈用来选择希望的广播电台或电视台节目频道。它作为滤波器单元可以平滑波形或者抑止不希望的频率。电感线圈可以用来构成变压器，它是一种能够增大或减小交流电压、电流和电阻的器件。在汽车里很多年来一直用电感线圈来产生高压，高压可以在火花塞缝隙里产生火花。诸如此类的应用和其他用途都是利用电感线圈独特的性质。

本章我们主要讨论电感线圈与直流电路工作有关的性质，在后面的内容里，您将看到这些电磁性质在交流条件下的应用。理解直流和交流情况都对您非常有益。

关键词

感生电动势(cemf)

e

法拉第定律(Faraday's law)

H

亨利(Henry)

电感(inductance)

自电感(self-inductance)

焦耳(Joule)

楞次定律(Faraday's law)

L, L_T

L/R 时间常数

τ

13.1 知识背景

在前面的章节里您已经了解到电阻(R)反映了电路对电流的阻碍作用，还了解了电感(L)的特性对电流的变化具有阻碍作用。

电感线圈具有各种不同的物理和电气尺寸，图 13-1 表示了一些用来阻碍电流变化的实际电感器件。这里应该强调的是，即使一小段直导线也会呈现出非常小的电感，有时候在电路设计和布局时必须考虑到这种“寄生”的电感(通常是不希望产生的)。对于高频电路情况尤其如此，您以后将会看到这一点。这里再次提醒您记住：电感并不会阻碍电流，但是会阻碍电流变化。



图 13-1 各种电感线圈及其符号

电感和电感线圈的另一个特性是它能够以周围形成磁场的形式储存电能。当电感线圈上流

电子学原理

Electronics Concepts: An Introduction

本书清楚完整地介绍了电子学——现代微电子学的基本原理，着重讲解了模拟电路和数字电路、实际电子系统中一些特殊器件以及电路的应用。全书将对器件、电路以及系统的介绍融为一体，给读者以一种耳目一新的感觉。

本书首先概述了几个重要的电子系统，详细讨论了系统中所使用电路的信号类型；接着分别介绍了几种器件的物理特性，如双极结型晶体管和金属氧化物半导体场效应晶体管，并给出了每种器件在特殊电路中的不同模型。此外，全书还利用SPICE计算机仿真软件辅助进行了分析。

书中包括500多个电路图、400多个课后练习以及100多个仿真设计题目，还有许多工作实例及电子学中的数据手册。这是一本关于电子学课程方面理想的专业基础教科书，非常便于自学。书中涉及到的实验设备信息在因特网上均可以查到。

作者简介

Jerrold H. Krenz：毕业于美国斯坦福大学，获博士学位。现任美国得克萨斯大学电子与计算机工程系教授。先后编写出版了 *Microelectronic Circuits: A Laboratory Approach*, *An Introduction to Electrical Circuity and Electronic Devices: A Laboratory Approach* 等著作，发表论文多篇。

ISBN 7-5053-7588-1



9 787505 37588 >



责任编辑：王春宁
封面设计：毛惠庆

本书贴有激光防伪标志，凡没有防伪标志者，属盗版图书

ISBN 7-5053-7588-1/TN·1577 定价：36.00 元