



PREFACE

《电工基础》（第一版）是德国“双元制”机电一体化师职业培训中“学习领域三：在安全的前提下安装电路”的本土化教材。

电工基础是电气自动化技术、电力系统继电保护技术、供配电技术、智能光电技术应用等专业的基础课程。本教材紧扣新时代高等职业教育办学新理念，结合高职教学的基本要求，借鉴德国“双元制”教学方法，以及德国“双元制”机电一体化师职业培训中“学习领域三：在安全的前提下安装电路”的教学内容和要求，以职业为导向设计课程内容，并将“学习领域三”的教学内容和教学理念本土化，按照电工基础知识学习逻辑编排。从日常生活中的照明、电器设备到工业生产中的自动化控制系统，从通信领域的高速数据传输到新能源领域的智能电网，电工技术无处不在，本书为读者提供一个全面、系统地了解电工技术的平台，为工程技术专业学生未来在多种行业就业，打下坚实的专业基础。

本书借鉴德国机电一体化师职业培训中“学习领域三”的知识内容，以国内工业自动化控制系统工程技术人员为职业背景，力求突出以下特色。

1. 根据自动化工程技术人员职业背景，共分为9个章节。各章节注重知识点的叙述，力求简洁明了、通俗易懂，各学校可根据自身实际情况进行教学设计，完成教学任务。

2. 注重理论与实践的结合。从电路的基本概念和定律入手，逐步深入到复杂的电子电路分析与设计，以及电机、电器等电气设备的工作原理和应用。

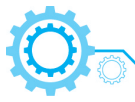
3. 通过大量的实例、例题和实验，帮助学生更好地理解 and 掌握所学知识，提高实际操作能力。

4. 在编写风格上，本书运用清晰的图表、生动的实例和简洁的语言，将复杂的电工电子技术知识以易于接受的方式呈现给读者。

5. 凸显课程思政元素。本书融入“思政课堂”模块，对本书中的教学内容与思政元素的对接进行分章设计，挖掘整理出每章课程思政要点。

6. 在教学实施过程中，有条件的学校可以完成全部的电工基础实验，增强学生的学习兴趣，以达到事半功倍的效果。

本书共分为9个章节，主要包括电路的基本概念和基本定律、电路基本分析方法、



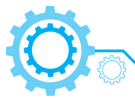
电路的过渡过程、正弦交流电路稳态分析、谐振电路、磁路与变压器、安全用电与防雷及信号与系统概述等内容。

在编撰书之际，编者对国内外出版物里的相关资料与资源进行了参考、引用和改编。在此，我们向这些资料的作者致以诚挚的谢意！我们在构建《电工基础》教材特色方面付出了诸多心血，然而，本书或许仍存在一些疏忽和欠缺之处。我们恳切地希望读者能够提出批评和指正，也将意见和建议及时反馈给我们，以便我们进一步对教材进行修订和完善。

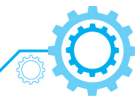


CONTENTS

第 1 章 电路的基本概念和基本定律	1
◆ 1.1 电路和电路模型	2
◆ 1.2 电阻元件	4
◆ 1.3 电路基本物理量	6
◆ 1.4 电压源和电流源	10
◆ 1.5 电路基本定律	12
◆ 思考与练习	18
第 2 章 电路基本分析方法	21
◆ 2.1 二端网络基本概念	22
◆ 2.2 线性电阻网络等效变换	22
◆ 2.3 电源等效变换	27
◆ 2.4 叠加定理	29
◆ 2.5 网孔电流法和节点电压法	31
◆ 2.6 戴维南定理和最大功率传输	36
◆ 2.7 受控源	39
◆ 思考与练习	43
第 3 章 电路的过渡过程	47
◆ 3.1 概述	48
◆ 3.2 储能元件	49
◆ 3.3 初始值和稳态值的确定	53
◆ 3.4 RC 电路的暂态分析	55
◆ 3.5 微分电路与积分电路	62
◆ 3.6 RL 电路的暂态分析	64
◆ 思考与练习	68



第 4 章 正弦交流电路稳态分析	71
◆ 4.1 正弦交流电	72
◆ 4.2 电阻、电感、电容在交流电路中的特性	76
◆ 4.3 三相交流电路	86
◆ 4.4 日光灯照明电路	92
◆ 思考与练习	97
第 5 章 谐振电路	101
◆ 5.1 串联谐振电路	102
◆ 5.2 并联谐振电路	106
◆ 思考与练习	110
第 6 章 磁路与变压器	113
◆ 6.1 铁芯线圈、磁路	114
◆ 6.2 变压器基本结构和工作原理	122
◆ 6.3 使用中的常见变压器	131
◆ 思考与练习	138
第 7 章 安全用电与防雷	141
◆ 7.1 家庭安全用电	142
◆ 7.2 保护接地和保护接零	146
◆ 7.3 防雷保护	149
◆ 思考与练习	153
第 8 章 信号与系统概述	157
◆ 8.1 信号的基本知识	158
◆ 8.2 无线电波的发射与接收	162
◆ 8.3 系统与网络简介	165
◆ 思考与练习	170
第 9 章 电工基础实验	171
◆ 9.1 实验基本要求	172
◆ 9.2 实验一 电源外特征的测定	172
◆ 9.3 实验二 线性与非线性元件伏安特性的测定	173
◆ 9.4 实验三 电位值、电压值的测定	175
◆ 9.5 实验四 基尔霍夫定律的验证	176
◆ 9.6 实验五 叠加定理和戴维南定理的验证	177



◆ 9.7 实验六 负载获得最大功率的条件	179
◆ 9.8 实验七 交流电路参数的测定	180
◆ 9.9 实验八 日光灯电路的连接及功率因数提高	181
◆ 9.10 实验九 RLC 串联谐振	182
◆ 9.11 实验十 三相负载的星、三角接法	183
◆ 9.12 实验十一 电容器的充放电过程	184
◆ 9.13 实验十二 互感电路	186

<u>参考答案</u>	189
-------------------	-----

<u>参考文献</u>	191
-------------------	-----

第1章

电路的基本概念和基本定律

【知识目标】

- 1.理解电路和电路模型。
- 2.理解电阻元件特性。
- 3.掌握电压源和电流量。
- 4.掌握电路基本定律。

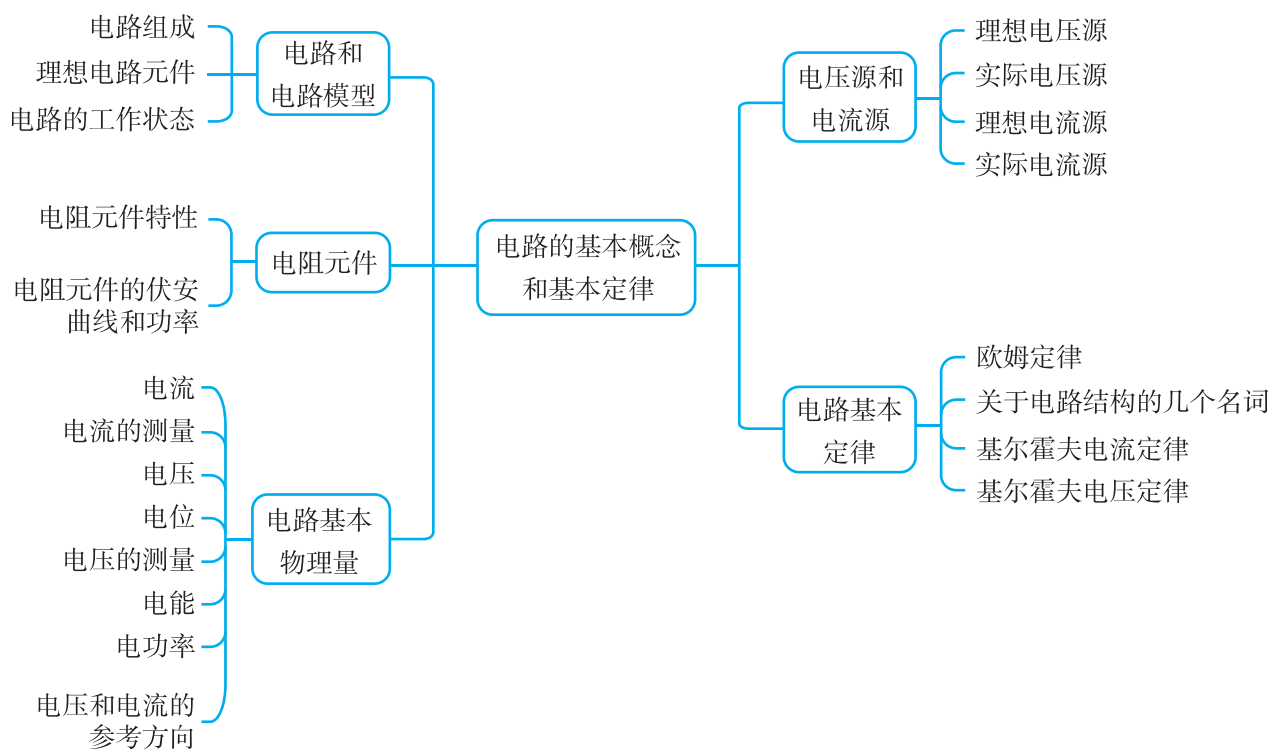
【技能目标】

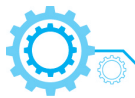
- 1.能够根据电路图组合电路模型。
- 2.能够讲述电流、电压、电能、电功率等基本物理量。

【课程思政】

- 1.了解电路发展历史、发展趋势、研究热点、科学创新及前沿应用，提升对我国电力发展水平的自信心和自豪感。
- 2.培养科学思维方法、批判性思维能力，提高正确认识问题、分析问题和解决问题的能力。

【思维导图】





1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路组成

在日常生活中，人们广泛使用着各种各样的电路，例如手电筒照明电路、信号放大电路等。实际电路是由电气器件相互连接构成的，从而实现一定的功能。这里所谓的电气器件泛指实际的电路部件，如电阻、电感、电容、变压器等。如图 1-1 所示的手电筒照明电路中，干电池提供电能，电灯泡利用电能发光，导线将干电池和电灯泡连接成通路，开关控制电路通断。

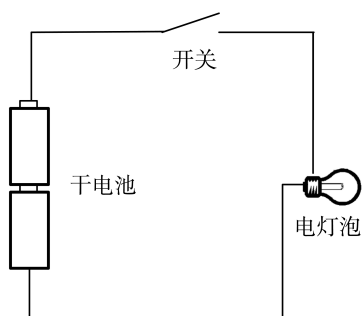


图 1-1 手电筒照明电路

由手电筒照明电路可知，任何电路都可以分为三部分。

- (1) 电源。提供电能的设备，电路中的作用是向负载提供电能。
- (2) 负载。将电能转换为其他形式能量的设备，在电路中接受电能。
- (3) 中间环节。包括将电源和负载连接成通路的导线，控制电路通断的开关以及保护、检测设备。

电路的基本作用有两个：一是实现电能的转换和传输，即在电路中，随着电流的通过，进行着从其他形式的能量转换成电能、电能的传输和分配，以及把电能转换成所需要的其他形式能量的过程。例如电力系统，发电厂的发电机组把热能或原子能或水能等转化成电能，通过变压器、输电线等输送给各用电单位，那里又把电能转换成机械能、光能、热能等。二是信号的处理，通过电路把施加的信号变换成其他需要的输出。例如收音机的调谐电路是用来选择所需要的信号的，而由于收到的信号很微弱，所以需要专门的放大信号工具来放大电路。调谐电路和放大电路的作用就是处理激励信号使之成为所需要的响应信号。

1.1.2 理想电路元件

为了便于用数学方法分析电路，一般要将实际电路模型化，用足以反映其电磁性质的理想电路元件或其组合来模拟实际电路中的器件，从而构成与实际电路相对应的电路模型。图 1-2 所示为三种基本理想元件的图形符号。

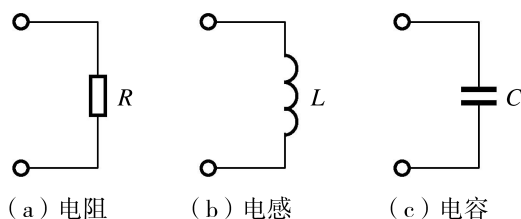


图 1-2 三种基本理想元件的图形符号

实际电路中的元件都可以用理想元件或者它们的组合表示。例如电灯泡主要特性是把电能转换成热能，因此可以用理想电阻元件代替。在工作频率较低的时候，一个线圈可以用理想电阻和理想电感元件的串联组合构成的模型表示，当频率较高的时候，线圈的绕线之间的电容效应就不能忽略了。

图 1-2 (a) 是理想电阻元件 R ，具有耗能的单一电特性，即吸收电能转换为其他形式的能量的过程不可逆，因此属于无源二端元件。

图 1-2 (b) 是理想电感元件 L ，只具有存储磁场、建立磁场的单一电特性，即在电路中只交换能量而不耗能，因此属于无源二端元件。

图 1-2 (c) 是理想电容元件 C ，只具有存储电能、建立电场的单一电特性，即在电路中只交换能量而不耗能，因此属于无源二端元件。

1.1.3 电路的工作状态

电路一般有三种工作状态：通路、开路和短路，如图 1-3 所示。

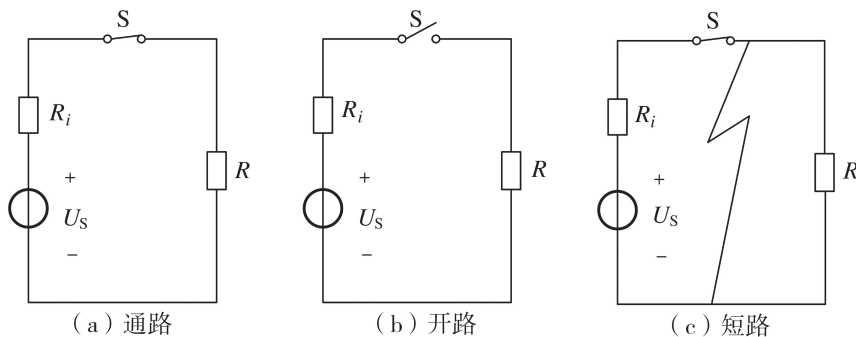


图 1-3 电路的三种工作状态

1. 通路

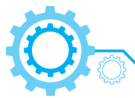
图 1-3 (a) 中，开关 S 闭合，电路中电源和负载构成闭合回路，电路中有电流流过，处于通路状态。

2. 开路

图 1-3 (b) 中，开关 S 断开或者电路中某处断开，电路中没有电流流过，处于开路状态，又称为断路状态。

3. 短路

图 1-3 (c) 中，当电路中某两点由导线连接，称负载被短路。电路发生短路时，由于电流总是走捷径，而短接线的电阻近似为零，远小于负载电阻，因此本来流过负载的



电流不再从负载中流过，而是通过短路的导线直接流回电源。短路一般分为有用短路和故障短路，故障短路往往会造成电路中电流过大，使电路无法正常工作，严重的会产生事故。

1.2 电阻元件



1.2.1 电阻元件特性

电阻是电工技术中使用最多的元器件之一，在电路中的主要作用是限流和分压。

不同材料的物质载体通过相同电流时呈现的阻力差异很大。对电流呈现阻力非常大，导电性能几乎为零，如塑料、云母之类成为绝缘体；对电流呈现的阻力很小，导电性能很好，如铝、铜等成为导体；对电流呈现的阻力介于绝缘体和导体之间的，如硅、锗等成为半导体。

导体对电流呈现的阻碍作用称为电阻。从本质上来看，电阻的阻值大小取决于物质本身的电阻率、导体的长度和截面。电阻遵循以下规律

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-1)$$

式中， ρ ——导体的电阻率，单位是 $\Omega \cdot \text{m}$ （欧米），表 1-1 为常用材料在 20°C 时的电阻率；

l ——导体的长度，单位是 m （米）；

S ——导体的截面，单位是 m^2 （平方米）。

表 1-1 常用材料在 20°C 时的电阻率

材料名称	电阻率 $\rho/\Omega \cdot \text{m}$
银	1.6×10^{-8}
铜	1.7×10^{-8}
铝	2.9×10^{-8}
铁	1.0×10^{-7}
锡	1.1×10^{-7}
钢	2.5×10^{-7}
锰铜	4.4×10^{-7}
康铜	5.0×10^{-7}
镍铬合金	1.0×10^{-6}
铁铬铝合金	1.4×10^{-6}
铝镍铁合金	1.6×10^{-6}
石墨	$(8 \sim 13) \times 10^{-6}$

式（1-1）称为电阻定律。电阻 R 的单位是 Ω （欧姆），实际使用时还会用到千欧（ $\text{k}\Omega$ ）、兆欧（ $\text{M}\Omega$ ）。它们之间的换算关系是：



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

$$1 \text{ M}\Omega = 10^3 \text{ k}\Omega = 10^6 \Omega$$

【例 1-1】一捆铝芯绝缘导线，电阻率是 $2.9 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，长度是 150 m，横截面积是 1 mm^2 ，求这捆导线的电阻。

解：

$$\text{已知：} S=1\text{mm}^2, l=150\text{m}, \rho=2.9 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\text{得 } R = \rho \frac{l}{S} = 2.9 \times 10^{-8} \times \frac{150}{1 \times 10^{-6}} = 4.35 (\Omega)$$

1.2.2 电阻元件的伏安曲线和功率

如果横坐标（纵坐标）为电阻元件的电压，纵坐标（横坐标）为电阻元件的电流，画出电压和电流的关系曲线，这条曲线称作该元件的伏安曲线。线性电阻元件的伏安特性曲线在 $u-i$ ($i-u$) 平面内是一条通过坐标原点的直线，如图 1-4 所示。

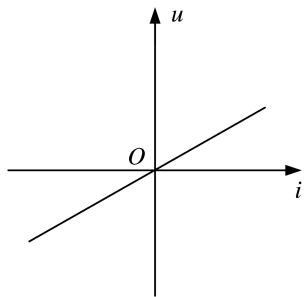


图 1-4 线性电阻元件的伏安特性曲线

在电压和电流为关联参考方向下，任何时刻线性电阻元件吸取的电功率

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

由式 (1-2) 可以看出，电阻元件上的电功率 $P \geq 0$ ，说明电阻元件在任何时刻都不可能发出电能，也就是它吸收的电能全部转换成其他非电能量而被消耗掉或者作为其他用途，即电阻元件是耗能元件。

【例 1-2】标有 “ $25 \Omega, 225 \text{ W}$ ” 的电阻元件，问其允许通过的最大额定电流和电压是多少？

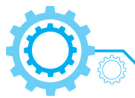
解：

$$\text{因为 } P = I^2 R, 225 = I^2 \times 25$$

$$\text{得 } I = 3 (\text{A})$$

$$\text{因为 } P = \frac{U^2}{R}, 225 = \frac{U^2}{25}$$

$$\text{得 } U = 75 (\text{V})$$



1.3 电路基本物理量

1.3.1 电流

导体内部存在大量的自由电子，当导体两端在外加电场作用时，导体内的自由电子就会定向移动形成电流。根据电流的大小和方向对时间变化的情况，电流分类如图 1-5 所示。

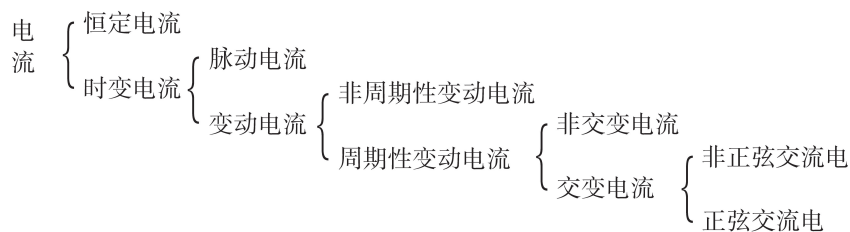


图 1-5 电流分类

恒定电流：大小和方向都不随时间变化的电流，简称直流，一般用“DC”表示。

时变电流：大小和方向或两者之一随时间变化的电流。

脉动电流：方向不变，但大小随时间变化的电流。

变动电流：大小和方向均随时间变化的电流。

周期性变动电流：每隔一段时间，总是重复前面变化的电流。

交变电流：在一个周期内，电流平均值为零的周期性变动电流，简称交流，一般用“AC”表示。

正弦交流电路：按正弦规律变化的交变电流。

电流的大小一般要电流强度定义，即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-3)$$

对于直流电，电流强度可表示为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-4)$$

电量 q 的单位是库仑 (C)，时间 t 的单位是秒 (s)，电流 i 的单位是安培 (A)。电流的单位还有千安 (kA)、毫安 (mA)、微安 (μA) 和纳安 (nA)，换算关系如下：

$$\begin{aligned} 1 \text{ kA} &= 10^3 \text{ A} \\ 1 \text{ A} &= 10^3 \text{ mA} = 10^6 \mu\text{A} = 10^9 \text{ nA} \end{aligned}$$

1.3.2 电流的测量

测量电流采用电流表，理论分析时，为了简化分析问题的步骤，常把电流表的内阻忽略为零。实际中，电流表的内阻非常小，测量时必须把电流表串联在电路中。如果误将电流表并联在电路中，会因为内阻比较小造成电流过大导致电流表烧毁，如图 1-6 所示。

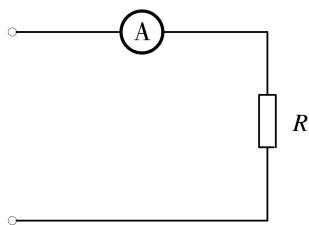


图 1-6 电流测量示意图

1.3.3 电压

电路中，电场力推动电荷做功，将电能转化为其他形式的能。为了衡量电场力对电荷的做功能力，引入电压这一物理量。电路中任意两点 A、B 的电压，在数值上等于电场力将单位正电荷从 A 点移动到 B 点所做的功。

直流电压符号为 “ U ”，则

$$U = \frac{W}{q} \quad (1-5)$$

交流电压符号为 “ u ”，则

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-6)$$

电压的单位为伏特 (V)，常用的还有千伏 (KV)、毫伏 (mV) 和微伏 (μV)。它们之间的换算关系：

$$\begin{aligned} 1 \text{ kV} &= 10^3 \text{ V} \\ 1 \text{ V} &= 10^3 \text{ mV} = 10^6 \mu\text{V} \end{aligned}$$

1.3.4 电位

电路中，任意选择一点作为参考点，则某点到这个参考点的电压就叫作这一点相对于参考点的电位。参考点在电路图中一般用符号 “ $\perp$ ” 表示，如图 1-7 所示。

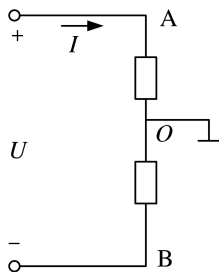
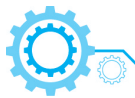


图 1-7 电位示意图

图 1-7 中，电位符号用 φ 表示，以 O 点为参考点，A 点电位记做 φ_A ，B 点电位记做 φ_B ，则 $\varphi_A = U_{AO}$ 。

$$U_{AB} = U_{AO} + U_{OB} = U_{AO} - U_{BO} = \varphi_A - \varphi_B$$

由此可见，两点间的电压就是这两点的电位之差。电压的实际方向是从高电位指向低电位，所以电压也称“电压降”。



1.3.5 电压的测量

电路中一般选用电压表或者万用表电压档测量电压。理论分析时,为了简化分析问题的步骤,常常认为理想电压表的内阻为无穷大。实际中,电压表的内阻非常大,测量时必须把电压表并联在电路中。如果误将电压表串联在电路中,会因为内阻比较大造成电表不动作,如图 1-8 所示。

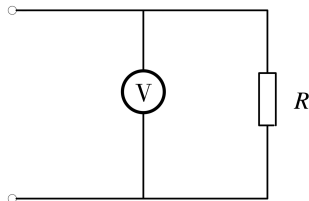


图 1-8 电压测量示意图

1.3.6 电能

电场力推动电荷做功,将电能转换为其他形式的能量。因此消耗多少电能,可以用电场力做的功来度量。电功的计算公式为

$$W = UI t \quad (1-7)$$

电能的单位是焦耳 (J), 另一个常用单位是千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$), 1 千瓦时就是 1 度电。即 $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$ 。

1.3.7 电功率

电能对时间的变化率就是电功率,用符号 P 表示。

当电压和电流为关联参考方向时,电功率可以定义为

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UI t}{t} = UI \quad (1-8)$$

当 $P > 0$ 时,元件吸收电能;当 $P < 0$ 时,元件释放电能。

在国际单位中,电压 U 的单位是伏特 (V), 简称伏; 电流 I 的单位是安培 (A), 简称安; 功率 P 的单位是瓦特 (W), 简称瓦, 常用的还有千瓦 (kW)、毫瓦 (mW)。它们之间的换算关系如下:

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

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

1.3.8 电压和电流的参考方向

电流在电路中的实际方向只有两种可能,如图 1-9 所示。图 1-9 (a) 中,当有正电荷从 A 端流入并从 B 端流出时,习惯上称电流从 A 端流向 B 端,反之图 1-9 (b) 认为电流从 B 端流向 A 端。实际分析电路时,有时会对某一段电路中的电流实际流向很难预先判断出来,为了解决这个问题,引入“参考方向”的概念。

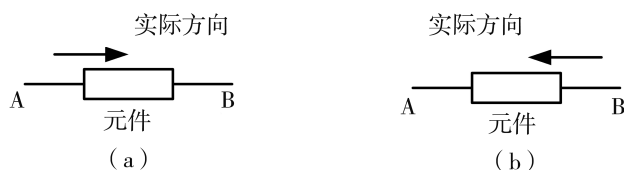


图 1-9 电流方向

在图 1-10 中，任意选定一个方向为电流的参考方向（图中实线表示），电流的实际方向（图中虚线表示）不一定和参考方向一致。把电流看作代数量，当电流的参考方向 and 实际方向一致时，图 1-10 (a) 所示，电流为正值；当电流的参考方向 and 实际方向相反时，图 1-10 (b) 所示，电流为负值。因此，在确定电流的参考方向情况下，电流值的正负反映了电流的实际方向。

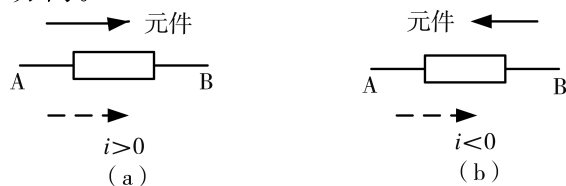


图 1-10 电流方向

特别说明：电流的参考方向是任意指定的，在电路中一般用箭头表示，有时也用双下标表示，如 i_{AB} ，表示参考方向由 A 指向 B。

同理，电压的实际方向也只有两种，把电压当作代数量，如图 1-10 所示，任意选定电压的参考方向为左正右负，当电压的参考方向 and 实际方向一致时，电压为正值；当电压的参考方向 and 实际方向相反时，电压为负值。

特别说明：电压的参考方向是任意指定的，在电路中一般用正（+）、负（-）极性表示，正极指向负极的方向就是电压的参考方向。有时也可以用箭头表示，或者用双下标表示，如 u_{AB} ，表示参考方向由 A 指向 B，如图 1-11 所示。

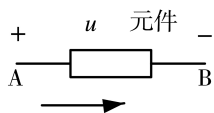


图 1-11 电压的参考方向

参考方向在电路分析中起着重要的作用。引入电流和电压的参考方向之后，分析任何电路之前都要先设定各处的电流和电压参考方向。对任意一段电路的电压和电流的参考方向可以独立地加以任意指定。当指定电流从标着电压“+”极性的一端流入，并从标着“-”极性的另一端流出时，即电流的参考方向和电压的参考方向一致，把电流和电压的这种参考方向称作关联参考方向，如图 1-12 所示。

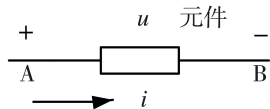
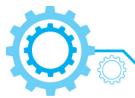


图 1-12 电压和电流的关联参考方向



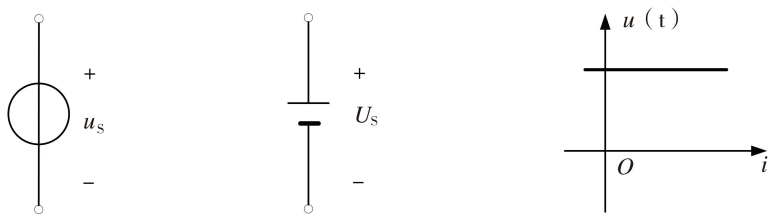
1.4 电压源和电流源

1.4.1 理想电压源

理想电压源是一个理想有源二端元件，元件的电压与通过它的电流无关，电压总保持为某给定的时间函数。因此，理想电压源具有以下两个特点。

- (1) 理想电压源输出电压不受外电路影响，只根据自己固有的变化规律变化。
- (2) 元件中的电流随与它连接的外电路变化而变化。

图 1-13 (a) 和 (b) 是理想电压源的图形符号。 u_s 为理想电压源的电压，“+”“—”为参考极性。如果电压 u_s 为常数，则成为直流理想电压源，如图 1-13 (b) 所示，长线段表示电压源的高电位端，短线段表示电压源的低电位端。图 1-13 (b) 也可以表示电池的图形符号。图 1-13 (c) 是直流理想电压源的伏安特性曲线，是一条不通过原点且与电流轴平行的直线。

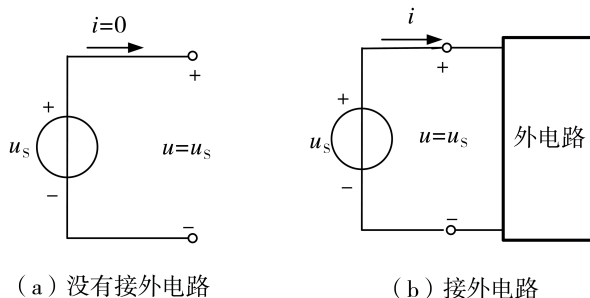


(a) 理想电压源 (b) 直流理想电压源 (c) 直流理想电压源伏安特性曲线

图 1-13 理想电压源图形符号和伏安特性曲线

当理想电压源没有接外电路时，如图 1-14 (a)，此时电流 i 为零，电压源两端的电压为 u_s ，称这种情况为电压源处于开路，电压源两端的电压即为开路电压。图 1-14 (b) 表示电压源接有外电路，随着外电路的改变，电流随之改变，但电压源端电压始终是 u_s ，不受外电路影响。当电压源的电压 $u_s = 0$ 时，电压源的伏安特性曲线是 $i-u$ 平面上的电流轴，相当于短路，即电压为零的电压源相当于短路。

通常，电压源的电流和电压取非关联参考方向。



(a) 没有接外电路

(b) 接外电路

图 1-14 理想电压源电路



1.4.2 实际电压源

实际的电压源，端电压会随着电流的变化而变化，这是因为实际电压源内部是有电阻的原因。如图 1-15 (a) 是实际电压源的模型，用一个理想电压源和一个电阻串联来等效，图 1-15 (c) 为直流电压源 [图 1-15 (b)] 的伏安特性曲线。实际电压源的端电压为

$$U = U_s - IR_0 \quad (1-9)$$

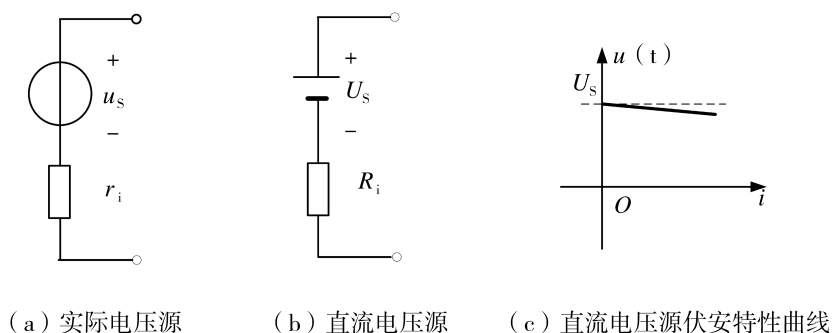


图 1-15 实际电压源图形符号和伏安特性曲线

1.4.3 理想电流源

理想电流源是有源二端元件，与理想电压源相反，通过理想电流源的电流与电压无关，电流总是保持某给定的时间函数。因此，理想电流源具有以下两个特点。

- (1) 理想电流源输出电流不受外电路影响，只根据自己固有的变化规律变化。
- (2) 元件中的电压随与它连接的外电路变化而变化。

图 1-16 (a) 是理想电流源的图形符号。 i_s 为理想电流源的电流，箭头所指的方向为 i_s 的参考方向。如果电流 i_s 为常数，则成为直流理想电流源，图 1-16 (b) 是直流理想电流源的伏安特性曲线，是一条不通过原点且与电压轴平行的直线。

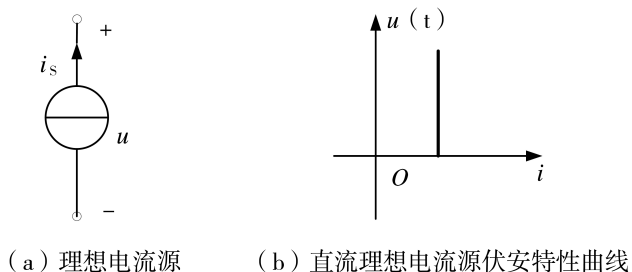


图 1-16 理想电流源图形符号和伏安特性曲线

图 1-17 所示为理想电流源的两个重要特点，图 1-17 (a) 表示理想电流源外接式短路情况，其端电压 $u=0$ ， $i=i_s$ 。图 1-17 (b) 表示外接电路时的情况，如果外电路改变，电压 u 随之改变，但电流 i 始终为 i_s ，不受外电路影响。

当电流源的电流 $i_s=0$ 时，电流源的伏安特性曲线是 $i-u$ 平面上的电压轴，相当于开路，即电流为零的电流源相当于开路。

通常，电流源的电流和电压取非关联参考方向。

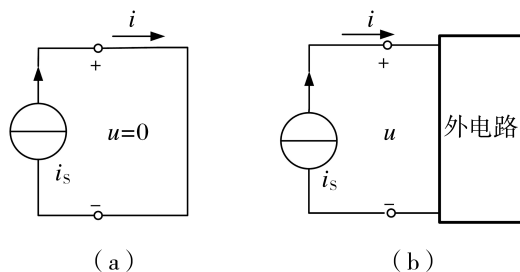
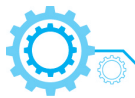


图 1-17 理想电流源电路

1.4.4 实际电流源

实际的电流源由于内部有电阻，因此在接通外电路后，输出电流会降低。如图 1-18 (a) 是实际电流源的模型，用一个理想电流源和一个电阻并联来等效，图 1-18 (b) 为直流电流源的伏安特性曲线。实际电流源输出电流为

$$I = I_s - \frac{U}{R_i} \quad (1-10)$$

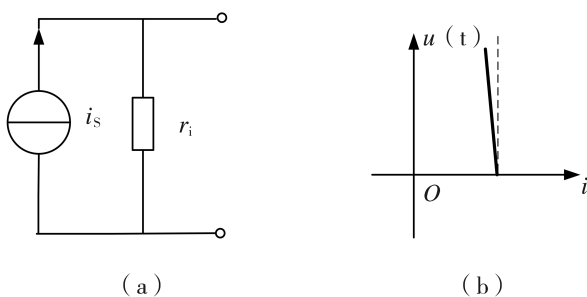


图 1-18 实际电流源图形符号与伏安特性曲线

1.5 电路基本定律

1.5.1 欧姆定律

十九世纪德国科学家欧姆通过实验得出：在同一电路中，导体中的电流跟导体两端的电压成正比，跟导体的电阻阻值成反比，称为欧姆定律。

当电压和电流取关联参考方向时，欧姆定律表达式为

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

在国际单位中，电流 I 的单位是安培 (A)，简称安；电压 U 的单位是伏特 (V)，简称伏；电阻 R 的单位是欧姆 (Ω)，简称欧。



式 (1-11) 还可推导为

$$U = IR \quad (1-12)$$

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-13)$$

欧姆定律只适用于线性电阻, 反映了电阻元件上电压和电流之间的约束关系。其伏安特性曲线如图 1-4 所示, 是一条通过原点的直线, 即电压和电流是线性关系, 说明电阻 R 是不随电压和电流变化而变化的, 是导体本身固有的一种性质, 是一个定值, 不存在比例关系。因此式 (1-13) 只能用来计算电阻的大小, 不能当作电阻的定义式。

1.5.2 关于电路结构的几个名词

在讨论基尔霍夫定律之前, 先定义几个有关电路结构的名词。

支路: 一个或者几个两端元件相串联组成的无分岔电路称作支路。同一条支路上各元件通过的电流相同。含有电源的支路称为有源支路, 不含电源的称为无源支路。如图 1-19 中, ac 、 ad 是支路。

节点: 三条或者三条以上的支路的连接点称作节点。如图 1-19 中, a 点、 d 点是节点。

回路: 电路中任意闭合路径称作回路。如图 1-19 中, $abcda$ 、 $dbcd$ 是回路。

网孔: 内部没有跨接支路的回路称为网孔。如图 1-19 中, $acba$ 、 $dbcd$ 是网孔, 而 $abcda$ 、 $acda$ 不是网孔。

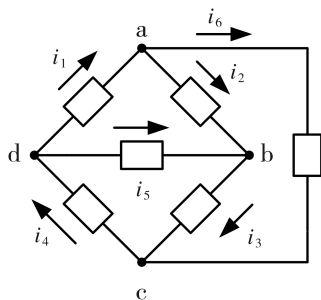


图 1-19 电路名词定义图

1.5.3 基尔霍夫电流定律

德国物理学家基尔霍夫在 1845 年提出电路中电压和电流所遵循的基本规律的两个定律, 即基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

基尔霍夫电流定律是基尔霍夫第一定律, 简称 KCL, 其内容为: 在电路中, 任何时刻, 对任一节点, 所有支路电流的代数和恒等于零, 表达式为

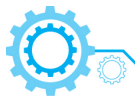
$$\sum i = 0 \quad (1-14)$$

例如: 对图 1-19 中节点 a , 应用 KCL, 在电流参考方向情况下, 有

$$i_1 - i_2 - i_6 = 0$$

即

$$\sum i = 0 \quad (1-15)$$



在此, 定义流入节点的电流取正号, 流出节点的电流取负号。

由式 (1-15) 得

$$i_1 = i_2 + i_6 \quad (1-16)$$

式 (1-16) 表明: 任何时刻, 流入任一节点的支路电流等于流出该节点的支路电流, 这也是 KCL 另一种表达, 即

$$\sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}} \quad (1-17)$$

【例 1-3】 图 1-19 中, 已知 $i_3 = 3\text{A}$, $i_4 = -4\text{A}$, 求支路电流 i_6 是多少?

解: 根据 KCL 定律, 对节点 c 有

$$\begin{aligned} i_3 + i_6 - i_4 &= 0 \\ 3 + i_6 - (-4) &= 0 \end{aligned}$$

所以

$$i_6 = -7 (\text{A})$$

由此可见, i_6 电流的实际流向与参考方向相反, 是流向节点 a。

KCL 不仅适用于节点, 也适用于包围几个节点的闭合面。如图 1-20 中, 对闭合曲面 S 有 $i_1 - i_2 + i_3 = 0$, 即 $\sum i = 0$ 。

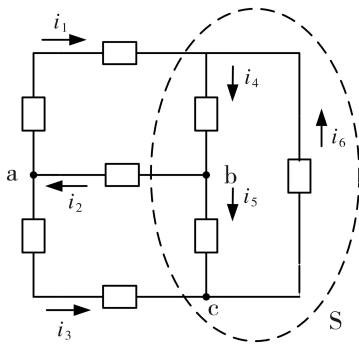


图 1-20 KCL 推广图

应用 KCL 要注意以下两点。

- (1) 列写 KCL 方程之前, 必须先设定支路电流的参考方向。
- (2) KCL 定律不仅适用于线性电路, 也适用于非线性电路。

1.5.4 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律简称 KVL, 其内容为: 在电路中, 任何时刻, 沿任一回路所有支路电压的代数和恒等于零。表达式为

$$\sum u = 0 \quad (1-18)$$

KVL 是描述电路中任一回路上各段电压之间应该遵循的规律。如图 1-21 (a) 中 3 个回路的参考绕行方向均选择顺时针绕行, 并且规定: 沿回路绕行方向, 凡元件端电压从 “+” 到 “-” 的参考方向与绕行方向一致时取正, 相反时取负。依据此约定, 根据 KVL 对回路 adba 列方程有

$$u_{R3} - u_{R2} = 0$$



即

$$\sum u = 0$$

KVL 不仅适用于闭合回路，也适用于任一不闭合回路。如图 1-21 (b) 是非闭合回路，设回路参考绕行方向时顺时针，由 KVL 得

$$u_{R1} + u_{ab} - u_{R2} - u_s = 0$$

即

$$\sum u = 0$$

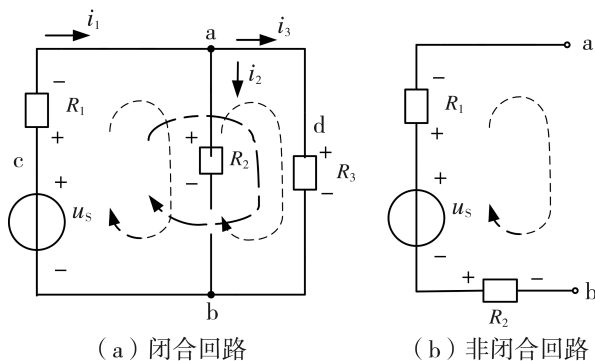


图 1-21 KVL 定律

【例 1-4】如图 1-22 所示电路中，已知 $R_1 = 4\Omega$ ， $R_2 = 3\Omega$ ， $R_3 = 8\Omega$ ， $u_{s1} = 28\text{ V}$ ，流过 u_{s1} 和 R_3 的电流各是多少？

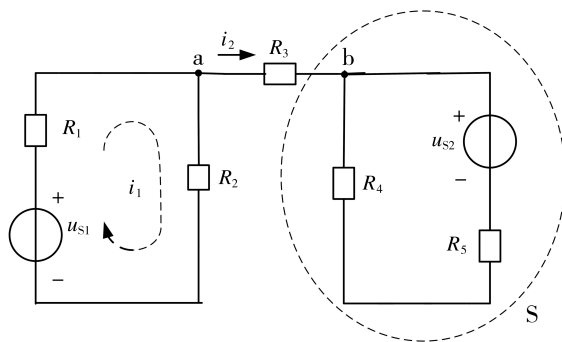


图 1-22 例 1-4 图

解：根据 KCL，对封闭曲面 S 有

$$i_2 = 0 \text{ (A)}$$

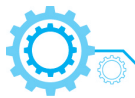
设 u_{s1} 所在回路参考方向为顺时针方向，根据 KVL 有

$$u_{R1} + u_{R2} - u_{s1} = 0$$

$$i_1 R_1 + i_1 R_2 - u_{s1} = 0$$

所以

$$i_1 = \frac{u_{s1}}{R_1 + R_2} = \frac{28}{4 + 3} = 4 \text{ (A)}$$



本章小结

1. 电路模型

为便于分析计算, 实际电路一般需要模型化, 电路模型就是将电路中的元器件根据其主要的电磁特性理想化为电阻、电容和电感及其组合。

2. 电阻

导体对电流呈现的阻碍作用称为电阻。电阻的单位是欧姆 (Ω)。电阻的阻值大小取决于物质本身的电阻率、导体的长度和截面。

在电压和电流为关联参考方向下, 电阻元件上的电功率 $P \geq 0$, 电阻元件是耗能元件。

3. 电路基本物理量

(1) 电流: 当导体两端在外加电场作用下的时候, 导体内的自由电子就会定向移动形成电流。电流的大小一般用电流强度定义, 电流的单位是安培 (A)。

(2) 电压和电位: 电压是衡量电场力对电荷的做功能力。电路中任意两点 A、B 的电压, 在数值上等于电场力将单位正电荷从 A 点移动到 B 点所做的功。电压的单位为伏特 (V)。电路中某点到参考点的电压就叫作这一点相对于参考点的电位。

(3) 电能: 电场力推动电荷做功, 将电能转换为其他形式的能量, 消耗的电能可以用电场力做的功来度量。电能的单位是焦耳 (J), 常用单位是千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$), 1 千瓦时就是 1 度电。

(4) 电功率: 电能对时间的变化率就是电功率, 用符号 P 表示, 单位是瓦特 (W)。

4. 电压源和电流源

理想电压源是一个理想有源二端元件, 元件的电压与通过它的电流无关, 电压总保持为某给定的时间函数。实际电压源可以用理想电压源和电阻串联等效。

理想电流源是有源二端元件, 通过理想电流源的电流与电压无关, 电流总是保持某给定的时间函数。实际电流源可以用理想电流源和电阻并联等效。

5. 电路基本定律

(1) 欧姆定律: 在同一电路中, 导体中的电流跟导体两端的电压成正比, 跟导体的电阻阻值成反比。当电压和电流取关联参考方向时候, 欧姆定律表达式: $I = \frac{U}{R}$, 还可推

导为 $U = IR$ 和 $R = \frac{U}{I}$ 。

(2) 基尔霍夫定律。

基尔霍夫电流定律 (KCL) 指出在电路中, 任何时刻, 对任一节点, 所有支路电流的代数和恒等于零, 即 $\sum i = 0$ 。

基尔霍夫电压定律 (KVL) 指出在电路中, 任何时刻, 沿任一回路所有支路电压的代数和恒等于零, 即 $\sum u = 0$ 。



党建设的伟大电力工程——西电东送

2024年3月15日,国家电网宣布,陕北—安徽±800千伏特高压直流输电工程、岳西抽水蓄能电站正式开工,这两项工程对于保障我国电力安全可靠供应、加快建设新型能源体系、实现碳达峰碳中和目标、推动高质量发展具有重要意义。

陕北—安徽特高压工程额定电压±800千伏、额定容量800万千瓦,动态投资205亿元。工程起于陕西省延安市宝塔山换流站,止于安徽省合肥市合州换流站,途经陕西、河南、安徽三省,直流线路全长1069千米。该工程送端接入配套新能源1100万千瓦,是安徽省第一条全额消纳的高比例可再生能源特高压直流输电通道。项目投产后,每年可向安徽输电超360亿千瓦时。

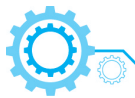
作为我国重要的综合能源基地和西电东送枢纽,陕西省探明的能源保有储量及产量均位居全国前列,新能源可开发规模达1.45亿千瓦。陕北—安徽特高压工程投产后,陕西电力外送规模将超3100万千瓦,对华北、华东、华中、西南电网形成坚强电力支撑。

岳西抽蓄电站位于安徽省岳西县黄尾镇境内,动态投资75亿元。建成投产后,国家电网在华东地区运行抽蓄总装机将达到2750万千瓦,将更好形成电站群优势,发挥顶峰保供重要作用,助力安徽打造长三角千万千瓦级绿色储能基地。

据了解,两项工程将提高电力余缺互济、时空互补、多能互换能力,实现更大范围电力资源优化配置,更好保障电网安全稳定运行,有效助力全国统一大市场和现代化基础设施体系构建,推动城乡、区域协调发展。

国家电网董事长辛保安表示,两项工程是国家电网以数智化坚强电网推动构建新型电力系统、建设新型能源体系、形成新质生产力的具体实践,是服务支撑陕皖两省高质量发展的重点工程、绿色工程、民生工程。工程将架起西电东送新通道,开辟电力保供新局面;将推动新能源高质量发展,谱写绿色低碳转型新篇章;将服务现代化产业体系建设,培育发展新质生产力的新动能;将扩投资稳就业惠民生,激发经济社会发展新活力。

资料来源:https://www.gov.cn/lianbo/difang/202403/content_6939593.htm



思考与练习

一、填空题

1. 电源和负载的本质区别是：电源是把_____能量转换成_____能的设备，负载是把_____能转换成_____能量的设备。
2. 电力系统中的电路，其功能是实现电能的_____、_____和_____。
3. 实际电路中的元器件，其电特性往往_____而_____，而理想电路元件的电特性则是_____和_____的。
4. 在电器商场买回的电线，每卷电线的电阻值为 $0.5\ \Omega$ ，将 2 卷这样的电线接长使用，电阻值为_____ Ω ，将 2 卷这样的电线并接起来使用，电阻值为_____ Ω 。
5. 常见的无源电路元件有_____、_____和_____；常见的有源电路元件是_____和_____。
6. 用指针式万用表测量电阻时，应断开电路使被测电阻_____带电。测量一个阻值在 $200\ \Omega$ 左右的电阻时，应选择_____挡，测量前指针式万用表应先进行_____。当万用表挡位旋钮置于“ $R \times 100$ ”位置，指针指示数为 3.6，则该被测量的电阻的电阻值为_____ Ω 。
7. 任何一个完整的电路必须包含_____、_____和_____三个基本组成部分。

二、判断题

1. 在用万用表测量电阻时，每次换挡后都要调零。()
2. 温度一定时，导体的长度和横截面积越大，电阻越大。()
3. 用万用表测量电阻时，两手应紧捏电阻的两端。()
4. 电路中有电流必定有产生电流的电压。()
5. 实际电压源和电流源的内阻为零时，即为理想电压源和电流源。()
6. 基尔霍夫两定律不仅适用于直流电路，也适用于交流电路。()
7. 并联电阻数目越多，等效电阻越小，因此向电路取用的电流也越少。()
8. 当几个直流电压源相串联时，可提高向电路提供的电压值。()
9. 实际应用中新、老电池可以混在一起使用。()
10. 当参考点发生变化时，电位随之改变，电压等于电位差也改变。()

三、选择题

1. 一条导线的电阻值为 $4\ \Omega$ ，在温度不变的情况下把它均匀拉长为原来的 4 倍，其电阻值为 ()。
A. $4\ \Omega$ B. $16\ \Omega$ C. $20\ \Omega$ D. $64\ \Omega$
2. 万用表的指针停留在“ Ω ”刻度线上“12”的位置，被测量电阻的电阻值为 ()。
A. $12\ \Omega$ B. $12\ \text{k}\Omega$ C. $1.2\ \text{k}\Omega$ D. 不能确定



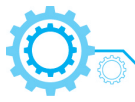
3. 电流源开路时, 该电流源内部 ()
 A. 有电流, 有功率损耗 B. 无电流, 无功率损耗 C. 有电流, 无功率损耗
4. 某电阻的额定数据为 “1 k Ω 、2.5 W”, 正常使用时允许流过的最大电流为 ()
 A. 50 mA B. 2.5 mA C. 250 mA
5. 长度和横截面积相等的三种材料的电阻率 $\rho_A > \rho_B > \rho_C$, 则电阻 ()。
 A. $R_A > R_B > R_C$ B. $R_B > R_A > R_C$ C. $R_A > R_C > R_B$ D. $R_C > R_B > R_A$
6. 电路中的三大基本元件分别代表了实用技术中的三大电磁特性, 其中 () 代表的是实用中耗能的电特性。
 A. 电阻元件 B. 电感元件 C. 电容元件 D. 无法判断
7. 实际工程技术中向负载提供电压形式的电源, 其电源内阻的阻值 ()。
 A. 越大越好 B. 越小越好
8. 实际工程技术中向负载提供电流形式的电源, 其电源内阻的阻值 ()。
 A. 越大越好 B. 越小越好
9. 基尔霍夫两定律的适用范围是 ()。
 A. 直流电路 B. 交流电路 C. 正弦电路 D. 非正弦电路
10. 电能的单位是 ()。
 A. 瓦特 B. 千瓦·时 C. 焦耳 D. 安培
11. 电流的单位是 (), 电压的单位是 (), 电能的单位是 (), 电功率的单位是 ()。
 A. 瓦特 B. 焦耳 C. 安培 D. 伏特
12. 电流表的内阻 () 其精度越高; 电压表的内阻 () 其精度越高。
 A. 越大 B. 越小

四、简述题

1. 将一个内阻为 0.5 Ω 、量程为 1 A 的安培表误认为成伏特表, 接到电压源为 10 V, 内阻为 0.5 Ω 的电源上, 试问此时安培表中通过的电流有多大? 会发生什么情况? 你能说说使用安培表应注意哪些问题吗?
2. 两个数值不同的电压源能否并联后“合成”一个向外供电的电压源? 两个数值不同的电流源能否串联后“合成”一个向外电路供电的电流源? 为什么?
3. 电功率大的用电器, 其电功是不是也大? 为什么?
4. 基尔霍夫电流定律的适用范围是什么? 是否只对电路结点成立?
5. 电能表是否在任何情况下都能直接接入电路进行测量? 若在高电压或大电流下, 应如何接入线路?
6. 实用中测量电阻时能否在线测量? 能否带电测量?

五、分析计算题

1. 高压输电线由 50 根横截面积为 1 mm² 的铝导线绞合组成, 求 1 km 这样的高压输电线电阻值。



2. 在图 1-23 所示电路中, 已知电流 $I=10\text{ mA}$, $I_1=6\text{ mA}$, $R_1=3\text{ k}\Omega$, $R_2=1\text{ k}\Omega$, $R_3=2\text{ k}\Omega$ 。求电流表 A_4 和 A_5 的读数是多少?

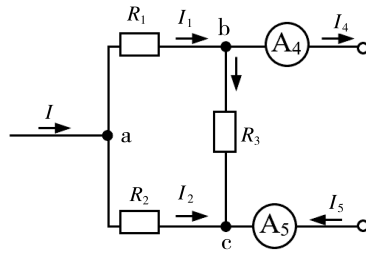


图 1-23

3. 图 1-24 所示电路中, 求流过 6 V 电源、 12 V 电源以及 $2\text{ }\Omega$ 电阻中的电流分别为多少?

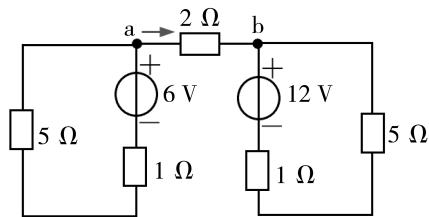


图 1-24