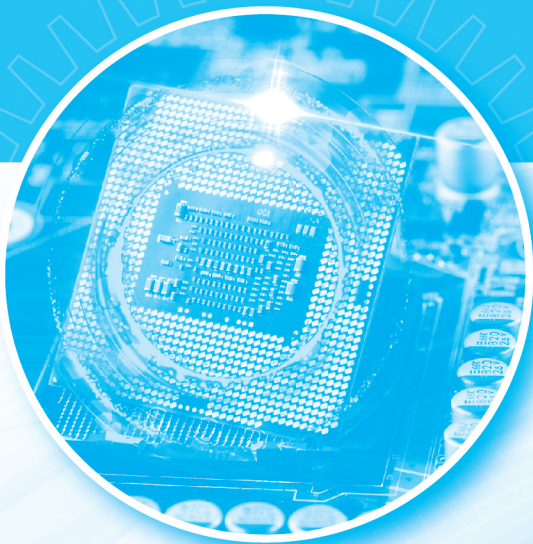




职业教育立体化精品教材
新时代课程思政建设配套教材

电工电子技术基础

李彦林 于杰 主编
李洁 副主编



北京出版集团
北京出版社
北京教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术基础/李彦林, 于杰主编. —北京:
北京出版社: 北京教育出版社, 2022. 6
ISBN 978-7-200-17257-7

I. ①电… II. ①李… ②于… III. ①电工技术—高等职业教育—教材 ②电子技术—高等职业教育—教材
IV. ①TM ②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 118597 号

电工电子技术基础

李彦林 于 杰 主编

*

北京出版集团
北京出版社 出版
北京教育出版社
(北京北三环中路 6 号)

邮政编码: 100120

网址: www.bph.com.cn

京版北教文化传媒股份有限公司总发行

全国各地书店经销

北京盛通印刷股份有限公司印刷

*

787 mm×1 092 mm 16 开本 17.5 印张 426 千字

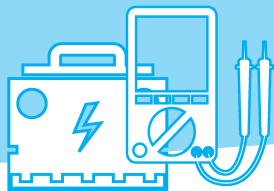
2022 年 6 月第 1 版 2022 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-200-17257-7

定价: 56.00 元

版权所有 翻印必究

质量监督电话: (010)58572525 58572393 购书电话: (010)59812309



电工电子技术基础是高职高专工科类专业的基础课程之一，也是一门实践性很强的技术基础课程，主要培养学生典型交直流电路分析与设计能力、常见电机控制线路安装及故障排除能力。

本书是根据高职高专培养人才的特点及目标，以新的教学理念和教学模式对传统电工电子技术知识体系进行合理取舍和优化重组后编写而成的。它是编者多年从事高职高专教育教学的经验积累和对别人成功经验的借鉴，体现了编者对高职高专教育的认识和理解。本书以就业为导向，以应用为目的，以基础知识、基本技能为引导，将“教、学、做”有机地融为一体，强化了对学生兴趣和能力的培养。

本书共有 12 章，内容包括电路基本概念和基本定律、线性电路分析的基本方法、正弦交流电路、三相交流电路、磁路和变压器、三相异步电动机、半导体与基本放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源、集成门电路及组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、数模转换和模数转换。

本书具有以下特点。

(1) 以实践掌握理论。 电工电子技术理论性强，实践性强，仅学理论知识难以真正理解和掌握，只有通过大量的实训，才能更好地理解和掌握电工电子技术，形成一定的专业技能。因此，本书每章都安排有实训内容，让学生在“做中学，学中做”，打破了实验室与教室的界限。如果条件允许，还可以把教室搬进实验室，尽可能在实验室上课，这样教学效果会更好。

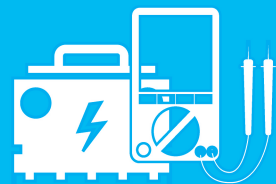
(2) 注重实用，可读性强。 本书力求突出应用性和针对性，降低理论深度，减少推导计算。本书知识讲解力求循序渐进、通俗易懂；内容取舍力求以够用为度；实践操作力求培养能力。









(3)贯彻课程思政理念。本书添加了课程思政元素，内容涵盖我国科技成就、大国重器、劳动模范的先进事迹等，以坚定学生理想信念、厚植学生爱国主义情怀、加强学生道德修养、培养学生奋斗精神，进而提升学生的综合素质。

由于电工电子技术发展迅速，电工电子技术教材应与时俱进、不断更新，以适应新的发展。鉴于编者水平有限，书中难免有不妥之处，诚请广大读者批评指正，提出宝贵的意见，以便今后改进。

编 者



 第 1 章	电路基本概念和基本定律 	
1.1	电路和电路模型	2
1.2	电流、电压及其参考方向	4
1.3	电功率及电能的概念和计算	7
1.4	电阻、电感和电容元件	9
1.5	基尔霍夫定律	12
	本章实训 基尔霍夫定律的验证	14
	本章小结	17
	本章检测	18
 第 2 章	线性电路分析的基本方法 	
2.1	电路等效变换的基本概念	22
2.2	电阻的等效变换	23
2.3	电源的等效电路及等效变换	25
2.4	支路电流法	29
2.5	节点电压法	32
2.6	叠加原理	35
2.7	戴维南定理	36
	本章实训 叠加原理的验证	41
	本章小结	44
	本章检测	45
 第 3 章	正弦交流电路 	
3.1	正弦交流电的基本概念	48
3.2	复数运算及正弦量的相量表示法	51



3.3	电阻、电感或电容元件单独作用的正弦交流电路	54
3.4	电阻、电感和电容串、并联的正弦交流电路	60
3.5	正弦交流电路的功率	62
3.6	功率因数的提高	63
3.7	谐振电路	66
	本章实训 正弦交流电路中电阻、电容、电感的特性	68
	本章小结	71
	本章检测	72

第4章 三相交流电路

4.1	三相交流电源	74
4.2	三相负载的接法	77
4.3	三相功率的计算	80
4.4	安全用电	83
	本章实训 三相功率的测量	86
	本章小结	90
	本章检测	91

第5章 磁路和变压器

5.1	磁路	94
5.2	变压器	100
	本章实训 单相变压器空载和负载实验	106
	本章小结	110
	本章检测	110

第6章 三相异步电动机

6.1	三相异步电动机的结构	112
6.2	三相异步电动机的工作原理	114
6.3	三相异步电动机的铭牌数据	117
6.4	三相异步电动机的选择及安装	119
6.5	三相异步电动机的维护	121
	本章实训 笼式三相异步电动机的拆装	122
	本章小结	126
	本章检测	126





 第 7 章 半导体与基本放大电路 	
7.1 半导体与 PN 结	128
7.2 二极管	130
7.3 晶体管	134
7.4 基本放大电路	139
本章实训 基本放大电路实验	147
本章小结	152
本章检测	153
 第 8 章 集成运算放大器 	
8.1 集成运算放大器概述	156
8.2 差动放大电路	160
8.3 集成运放的线性应用	165
8.4 集成运放的非线性应用	172
本章实训 差动放大电路实验	173
本章小结	177
本章检测	177
 第 9 章 直流稳压电源 	
9.1 直流稳压电源概述	180
9.2 整流电路	181
9.3 滤波电路	187
9.4 稳压电路	189
本章实训 简单直流稳压电源的安装与调试	194
本章小结	198
本章检测	198
 第 10 章 集成门电路及组合逻辑电路 	
10.1 数字电路	202
10.2 数制和码制	203
10.3 逻辑代数	207
10.4 逻辑门电路	209



10.5 组合逻辑电路	214
10.6 编码器	218
10.7 译码器及数码显示电路	222
本章实训 逻辑门电路的连接与检测	225
本章小结	228
本章检测	229

第 11 章 触发器和时序逻辑电路

11.1 触发器	232
11.2 时序逻辑电路	235
11.3 常见时序逻辑电路	237
11.4 555 定时器	244
本章实训 555 定时器构成的汽车转向灯闪光器的制作	252
本章小结	254
本章检测	255

第 12 章 数模转换和模数转换

12.1 数模转换器	258
12.2 模数转换器	261
本章实训 D/A、A/D 转换电路实验	267
本章小结	271
本章检测	271

参考文献





第1章 电路基本概念和基本定律

在楼道里有声控灯，在家里有空调、电扇、洗衣机等家用电器，这些电器为什么接通电源就能工作呢？这些电器的电压、电流又是多少呢？家里所有电器一个月消耗多少电能呢？如果电器出现了故障，那么该如何分析与维修呢？下面就一起来讨论这些问题。

▶ 学习目标

1. 掌握电路的组成及电路模型。
2. 掌握电流、电压及其参考方向的定义、测量和计算。
3. 掌握电功率和电能的概念及计算。
4. 熟悉电阻、电感、电容等电路元件的识别与测量。
5. 熟悉基尔霍夫电流、电压定律的计算。

育人目标

了解时代楷模的先进事迹，培养学生爱岗敬业、无私奉献的精神。



1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路概述

1. 电路及其组成

简单地讲，电路是电流通过的路径。实际电路通常由各种电路实体部件(如电源、电阻器、电感线圈、电容器、变压器、仪表、二极管、晶体管等)组成，每一种电路实体部件都具有各自不同的电磁特性和功能。如果电路元器件的数量很多且电路结构较为复杂，则称为电路网络。

不管是简单的电路还是复杂的电路，其基本组成都包括电源、负载和中间环节。

电源是向电路提供电能的装置。它可以将其其他形式的能量，如化学能、太阳能、机械能、核能等转换为电能。在电路中，电源是激励，是激发和产生电流的因素。负载是取用电能的装置，其作用是把电能转换为其他形式的能，如机械能、热能等。在生产与生活中经常用到的电灯、电动机、电炉、扬声器等都是电路中的负载。中间环节在电路中起着传输电能、分配电能和控制整个电路的作用。最简单的中间环节即开关和连接导线；一个实用电路的中间环节通常还有一些保护和检测装置；复杂的中间环节可以是由许多电路元器件组成的网络系统。

在如图 1-1 所示的手电筒照明电路中，电池属于电源，灯泡属于负载，导线和开关作为中间环节将灯泡和电池连接起来。

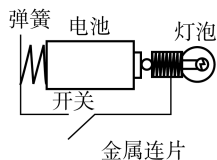


图 1-1 手电筒照明电路



电路的组成及各部分功能

2. 电路的种类及功能

工程应用中的实际电路，按照功能不同可分为两大类。一是完成能量的传输、分配和转换的电路，如图 1-1 所示的手电筒照明电路。电池通过导线将电能传输给灯泡，灯泡将电能转换为光能和热能。这类电路的特点是功率大、电流大。二是实现对电信号的传输、变换和处理的电路，如图 1-2 所示的扩音机电路。话筒将声音的振动信号转换为电信号，即相应的电压和电流，经过放大处理后，通过电

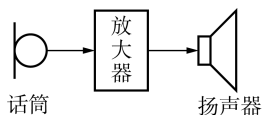


图 1-2 扩音机电路



路传输给扬声器，再由扬声器还原为声音。这类电路的特点是功率小、电流小。

1.1.2 电路模型

实际电路的电磁过程是相当复杂的，难以进行有效的分析和计算。在电路理论中，为了便于对实际电路进行分析和计算，人们通常在工程实际允许的条件下对实际电路进行模型化处理，即忽略次要因素，抓住足以反映其功能的主要电磁特性，抽象出实际电路器件的电路模型。

电阻器、白炽灯、电炉等电气设备接收电能并将电能转换成光能或热能，光能和热能显然不可能再回到电路中，因此这种能量转换过程不可逆的电磁特性称为耗能。这些电气设备除了具有耗能的电磁特性，还有其他一些电磁特性，但在研究和分析问题时，即使忽略这些电磁特性，也不会影响整个电路的分析和计算。因此，可以用一个只具有耗能电磁特性的“电阻元件”作为它们的电路模型。

实际电路器件理想化而得到的只具有某种单一电磁特性的元件称为理想元件。每一种理想元件都体现了某种基本现象，具有某种确定的电磁特性和精确的数学定义。常用的有表示将电能转换为热能的电阻元件、表示磁场性质的电感元件、表示电场性质的电容元件及电压源元件和电流源元件等，它们的图形符号如图 1-3 所示。

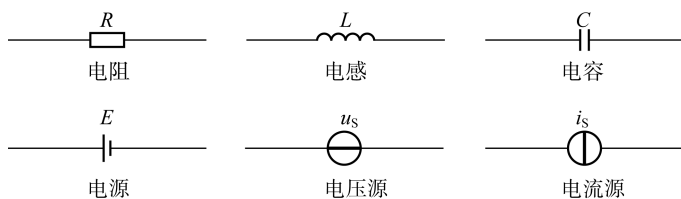


图 1-3 理想元件的图形符号

由理想元件相互连接组成的电路称为电路模型。如图 1-4 所示，电池对外提供电压的同时，内部也有电阻消耗能量，因此电池用其电动势 E 和内阻 R_0 的串联表示；灯泡除了具有消耗电能的性质(电阻性)外，通电时还会产生磁场，具有电感性。但电感微弱，可忽略不计，可认为灯泡是一个电阻元件，用 R_L 表示。

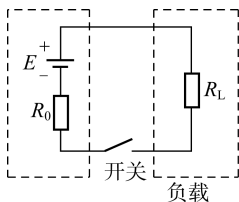


图 1-4 手电筒照明电路的电路模型



1.2 电流、电压及其参考方向

电路中的变量是电流和电压。无论是电能的传输和转换，还是信号的传输和处理，都是这两个量变化的结果。因此，弄清电流、电压及其参考方向，对进一步掌握电路的分析和计算是十分重要的。

1.2.1 电流及其参考方向

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

电流主要分为两类。一是大小和方向均不随时间变化的电流，称为恒定电流，简称直流，英文缩写为 DC 或 dc，其大小用符号 I 表示。二是大小和方向均随时间变化的电流，称为变动电流，其大小用符号 i 表示。其中，一个周期内电流的平均值为零的变动电流称为交流，用 AC 或 ac 表示。

图 1-5 给出了几种常见的电流，其中图 1-5a 所示为直流，图 1-5b 所示为正弦交流电流，图 1-5c 所示为锯齿交流电流。

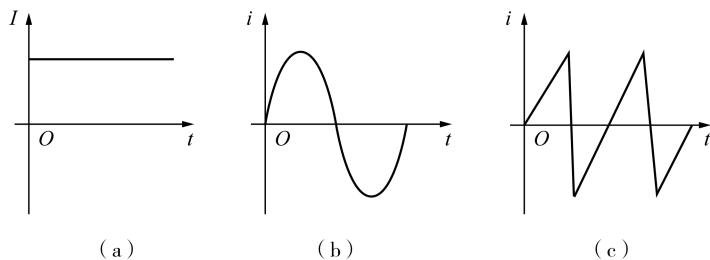


图 1-5 常见的电流

对于直流，单位时间内通过导体横截面的电荷量是不变的，可表示为

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

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

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

电流的单位是安培，简称安，用符号 A 表示。在电力系统中，常用千安(kA)作为电流的单位；而在无线电系统(如晶体管电路)中，常用毫安(mA)或微安(μ A)作为电流的单位。它们之间的换算关系为

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



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

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

电流有大小和方向，通常把正电荷的运动方向定义为电流的实际方向。但是当电路较复杂时，很难直接确定电流的实际方向。为了分析电路方便，在一段电路中，可假定一个电流方向作为电流的参考方向。电流的参考方向可以任意假设，但电流的实际方向是客观存在的。因此，电流的参考方向并不一定是电流的实际方向。对电路中的电流设定参考方向后，若经计算得出的电流大小为正值，则说明所设的参考方向与实际方向一致；若经计算得出的电流大小为负值，则说明所设的参考方向与实际方向相反。

小提示

电流大小的正负在设定参考方向的前提下才有意义。

在本书中，电路图上所标的电流方向均为参考方向。电流的实际方向和参考方向的关系可以用图 1-6 表示。

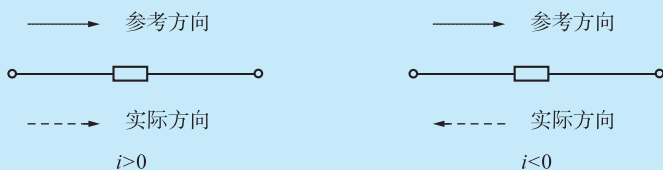


图 1-6 电流参考方向 and 实际方向的关系

1.2.2 电压及其参考方向

在物理学中，将两点间的电压定义为电场力把单位正电荷由一点移动到另一点所做的功。

在直流电路中，电压为恒定值，用 U 表示，即

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

在变动电流电路中，电压为变化的值，用 u 表示，即

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-4)$$

电压的单位是伏特，简称伏，用符号 V 表示。在电力系统中，常用千伏(kV)作为电压的单位；而在无线电系统中，常用毫伏(mV)和微伏(μV)作为电压的单位。

与电流相同，电压也有大小和方向。电压的实际方向就是正电荷在电场中受电场力作用移动的方向，即电位真正降低的方向。在分析电路时，需要事先选择电压的参考方向。电压的参考方向也是任意选择的，在电路中通常用“+”“−”表示极性，如图 1-7a 所示；也可以用双下标 u_{ab} (电压的参考方向为由 a 点指向 b 点)表示，如图 1-7b 所示；还可以用实线箭头表示，如图 1-7c 所示。



电压的概念

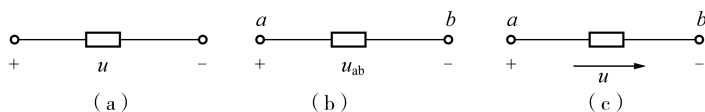


图 1-7 电压的参考方向

设定电压的参考方向后，若计算得到的电压值为正，则说明电压的参考方向与实际方向一致，如图 1-8a 所示；若计算得到的电压值为负，则说明电压的参考方向与实际方向相反，如图 1-8b 所示。

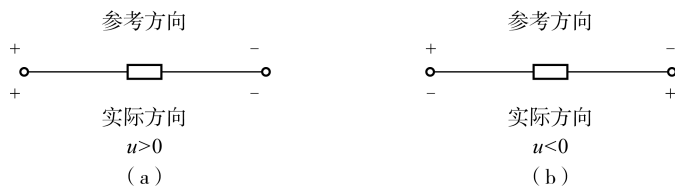


图 1-8 电压参考方向 and 实际方向的关系

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

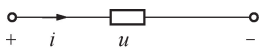


图 1-9 电压和电流的关联参考方向

1.2.3 电位的概念及其分析和计算

为了分析问题方便，常在电路中指定一点作为参考点，假定该点的电位为零，用符号“ \perp ”表示。在生产实践中，常把地球作为零电位点，凡是机壳接地的设备（接地符号是“ \perp ”），其机壳电位为零；有些设备或装置，机壳并不接地，而是把许多元件的公共点作为零电位点，也用符号“ \perp ”表示。

电路中其他各点相对于参考点的电压即各点的电位，因此，任意两点间的电压等于这两点的电位之差。

电路中各点电位的高低是相对的，参考点不同，各点电位的高低也不同，但是电路中任意两点之间的电压与参考点的选择无关。电路中，凡是比参考点电位高的各点的电位是正电位，凡是比参考点电位低的各点的电位是负电位。

【例 1-1】 求图 1-10 中 a 点的电位。

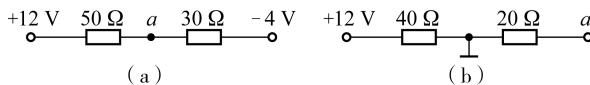


图 1-10 例 1-1 图



解 对于图 1-10a, 有

$$U_a = \left\{ -4 + \frac{30}{50+30} \times [12 - (-4)] \right\} \text{ V} = 2 \text{ V}$$

对于图 1-10b, 因 20Ω 电阻中的电流为零, 故

$$U_a = 0$$

【例 1-2】 电路如图 1-11 所示, 求开关 S 断开和闭合时 A、B 两点的电位 U_A 、 U_B 。

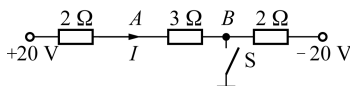


图 1-11 例 1-2 图

解 设电路中的电流为 I , 如图 1-11 所示。

(1) 开关 S 断开时, 有

$$I = \frac{20 - (-20)}{2 + 3 + 2} \text{ A} = \frac{40}{7} \text{ A}$$

因为

$$20 - U_A = 2I$$

所以

$$U_A = 20 - 2I = \left(20 - 2 \times \frac{40}{7} \right) \text{ V} = \frac{60}{7} \text{ V}$$

同理

$$U_B = 20 - (2 + 3)I = \left(20 - 5 \times \frac{40}{7} \right) \text{ V} = -\frac{60}{7} \text{ V}$$

(2) 开关 S 闭合时, 有

$$I = \frac{20 - 0}{2 + 3} \text{ A} = 4 \text{ A}$$

$$U_A = 3I = (3 \times 4) \text{ V} = 12 \text{ V}$$

$$U_B = 0$$

1.3 电功率及电能的概念和计算

1.3.1 电功率

在电路的分析和计算中, 电功率和电能是很重要的概念。一方面, 电路在工作时总伴随着其他形式能量的转换; 另一方面, 电气设备和电路元器件本身都有电功率的限制, 在使用时要注意是否超过其额定值, 以防造成设备损坏。

电流通过电路时传输或转换电能的速率, 即单位时间内电场力所做的功, 称为电功



率，简称功率，即

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

功率的单位是瓦特，简称瓦，用符号 W 表示。

在直流电路中，式(1-5)可写成

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

采用式(1-5)、式(1-6)计算功率时，电压和电流应选择关联参考方向。若电压和电流选择非关联参考方向，则

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

小提示

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

- (1) $p > 0$ ，说明该元器件吸收(或消耗)电能。
- (2) $p < 0$ ，说明该元器件放出(或产生)电能。
- (3) $p = 0$ ，说明该元器件不产生也不消耗电能。

【例 1-3】 计算如图 1-12 所示电路中各元件的功率，指出是吸收电能还是放出电能，并求整个电路的功率。已知电路为直流电路， $U_1 = 4 \text{ V}$ ， $U_2 = -8 \text{ V}$ ， $U_3 = 6 \text{ V}$ ， $I = 2 \text{ A}$ 。

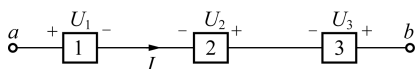


图 1-12 例 1-3 图

解 在图 1-12 中，元件 1 的电压与电流为关联参考方向，得

$$P_1 = U_1 I = (4 \times 2) \text{ W} = 8 \text{ W}$$

故元件 1 吸收电能。

元件 2 和元件 3 的电压与电流为非关联参考方向，得

$$P_2 = -U_2 I = [-(-8) \times 2] \text{ W} = 16 \text{ W}$$

$$P_3 = -U_3 I = (-6 \times 2) \text{ W} = -12 \text{ W}$$

故元件 2 吸收电能，元件 3 放出电能。

整个电路功率为

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = (8 + 16 - 12) \text{ W} = 12 \text{ W}$$

本例中，元件 1 和元件 2 的电压与电流实际方向相同，两者吸收电能；元件 3 的电压与电流实际方向相反，放出电能。由此可见，当电压与电流实际方向相同时，电路一定是吸收电能；反之，则是放出电能。实际电路中，电阻元件的电压与电流的实际方向总是一致的，说明电阻总在消耗能量；而电源则不然，其功率可能为正也可能为负，这说明它可能作为电源提供电能，也可能被充电，吸收电能。



1.3.2 电能

电路在一段时间内消耗或提供的能量称为电能。电路元器件在 $t_0 \sim t$ 时间内消耗或提供的能量为

$$W = \int_{t_0}^t p dt \quad (1-8a)$$

直流时为

$$W = P(t - t_0) \quad (1-8b)$$

在国际单位制中,电能的单位是焦耳,简称焦,用符号 J 表示。1 J 等于功率为 1 W 的用电设备正常工作时在 1 s 内消耗的电能。通常电力部门用“度”作为单位测量用户消耗的电能,“度”是千瓦时(kW·h)的简称。1 度(或 1 kW·h)等于功率为 1 kW 的用电设备正常工作时在 1 h 内消耗的电能。即

$$1 \text{ 度} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = (10^3 \times 3\,600) \text{ J} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

如果通过实际元件的电流过大,可能会温度过高,而使元件的绝缘材料损坏,甚至使导线熔化;如果电压过大,那么会击穿绝缘材料,因此必须加以限制。

电气设备或元器件长期正常运行的电流容许值称为额定电流,其长期正常运行的电压容许值称为额定电压;额定电压和额定电流的乘积为额定功率。通常电气设备或元件的额定值标在产品的铭牌上。如一只白炽灯标有“220 V 40 W”,表示其额定电压为 220 V,额定功率为 40 W。

1.4 电阻、电感和电容元件

电阻、电感和电容元件都是理想的电路元件,它们均不发出电能,称为无源元件。它们有线性与非线性之分,线性元件的参数为常数,与所施加的电压和电流无关。本节主要分析讨论线性电阻、电感和电容元件的特性。

1.4.1 电阻元件

电阻元件是一种最常见的、用于反映电流热效应的二端电路元件。电阻元件可分为线性电阻和非线性电阻两类,如无特殊说明,本书所称电阻元件均指线性电阻元件。在实际交流电路中,像白炽灯、电阻炉和电烙铁等,均可看作线性电阻元件。图 1-13a 所示为线性电阻元件,当电压、电流为关联参考方向时,其伏安关系为

$$u = Ri \quad (1-9a)$$

式中, R 为常数,用来表示电阻及其数值。

式(1-9a)表明,凡是适用欧姆定律的元件即为线性电阻元件。图 1-13b 所示为其伏安



特性曲线。

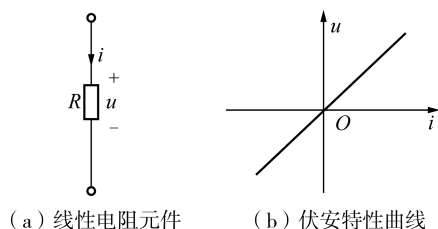


图 1-13 线性电阻元件及其伏安特性曲线

若电压、电流为非关联参考方向，则其伏安关系应写成

$$u = - Ri \tag{1-9b}$$

在国际单位制中，电阻的单位是欧姆(Ω)，当导体上电压为 1 V、电流为 1 A 时，所对应的电阻值为 1 Ω 。此外，电阻的单位还有千欧(k Ω)、兆欧(M Ω)。电阻的倒数称为电导，用符号 G 来表示，即

$$G = \frac{1}{R} \tag{1-10}$$

电导的单位是西门子(S)，或 1/欧姆(1/ Ω)。

电阻是一种耗能元件。当电流通过电阻时会发生电能转换为热能的过程，而热能向周围扩散后，不可能再直接回到电源而转换为电能。电阻所吸收并消耗的电功率可由式(1-9a)计算得到，即

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \tag{1-11}$$

一般地，电路消耗或发出的电能可由下式计算得出。

$$W = \int_{t_0}^t ui dt \tag{1-12}$$

在直流电路中，有

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \tag{1-13a}$$

$$W = UI(t - t_0) \tag{1-13b}$$

1.4.2 电感元件

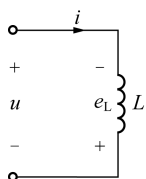


图 1-14 电感元件

电感元件是实际的电感线圈及电路元件内部所含电感效应的抽象，它能够储存和释放磁场能量。空心电感线圈常可抽象为线性电感，其符号及规定的电压、电流参考方向如图 1-14 所示。

其中

$$u = - e_L = L \frac{di}{dt} \tag{1-14}$$

式(1-14)表明，电感元件上任一瞬间的电压大小，与这一瞬间电流



对时间的变化率成正比。如果电感元件中通过的是直流电流，因电流的大小不变，即 $di/dt=0$ ，那么电感上的电压就为零，所以电感元件对直流可视为短路。

在关联参考方向下，电感元件吸收的功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1-15)$$

则电感线圈在 $0 \sim t$ 时间内，线圈中的电流由 0 变化到 I 时，吸收的能量为

$$W = \int_0^t p dt = \int_0^I Li di = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1-16)$$

即电感元件在一段时间内储存的能量与其电流的平方成正比。当通过电感的电流增大时，电感元件就将电能转换为磁能并储存在磁场中；当通过电感的电流减小时，电感元件就将储存的磁能转换为电能释放给电源。因此，电感是一种储能元件，以磁场能量的形式储能，同时又因为不会释放出多于其吸收或储存的能量，所以也是一种无源的储能元件。

1.4.3 电容元件

电容器种类很多，但从结构上都可看作是由中间夹有绝缘材料的两块金属极板构成的。电容元件是实际的电容器及电路元件的电容效应的抽象，用于反映带电导体周围存在电场，能够储存和释放电场能量的理想化的电路元件。其符号及规定的电压、电流参考方向如图 1-15 所示。

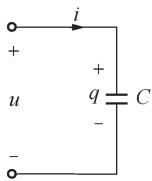


图 1-15 电容元件

当电容接上交流电压 u 时，电容器不断被充、放电，极板上的电荷也随之变化，电路中出现了电荷的移动，形成电流 i 。若 u 、 i 为关联参考方向，则有

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-17)$$

式(1-17)表明，电容器的电流与电压对时间的变化率成正比。如果电容器两端加直流电压，因电压的大小不变，即 $du/dt=0$ ，那么电容器的电流就为零，所以电容元件对直流可视为断路，因此电容具有“隔直通交”的作用。

在关联参考方向下，电容元件吸收的功率为

$$p = ui = uC \frac{du}{dt} = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-18)$$

则电容器在 $0 \sim t$ 时间内，其两端电压由 0 变化到 U 时，吸收的能量为

$$W = \int_0^t p dt = \int_0^U Cu du = \frac{1}{2} CU^2 \quad (1-19)$$

式(1-19)表明，对于同一个电容元件，当电场电压高时，其储存的能量就多；对于不同的电容元件，当充电电压一定时，容量大的储存的能量多。从这个意义上说，电容 C 也是电容元件储能本领大小的标志。

当电压的绝对值增大时，电容元件吸收能量，并转换为电场能量；当电压的绝对值减小时，电容元件释放电场能量。电容元件本身不消耗能量，同时也不会放出多于其吸收或储存的能量，因此也是一种无源的储能元件。



1.5 基尔霍夫定律

电路分析和计算的依据来源于两种电路规律：一种是各类理想元件的伏安特性，这一点只取决于元件本身的电磁性质，即各元件的伏安关系，与电路连接状况无关；另一种是与电路的结构及连接状况有关的定律，而与组成电路的元件性质无关。基尔霍夫定律就是表达电压、电流在结构方面的规律和关系的。

1.5.1 常用电路术语

基尔霍夫定律是与电路结构有关的定律，在研究基尔霍夫定律之前，先介绍几个有关的常用电路术语。

(1) 支路：任意两个节点之间无分叉的分支电路称为支路。如图 1-16 中的 $b-a-f-e$ 支路、 $b-e$ 支路、 $b-c-d-e$ 支路。

(2) 节点：电路中，三条或三条以上支路的汇交点称为节点。如图 1-16 中的 b 点、 e 点。

(3) 回路：电路中由若干条支路构成的任一闭合路径称为回路。如图 1-16 中 $a-b-e-f-a$ 回路、 $b-c-d-e-b$ 回路、 $a-b-c-d-e-f-a$ 回路。

(4) 网孔：不包围任何支路的单孔回路称为网孔。如图 1-16 中 $a-b-e-f-a$ 回路和 $b-c-d-e-b$ 回路都是网孔，而 $a-b-c-d-e-f-a$ 回路不是网孔。即网孔一定是回路，而回路不一定是网孔。

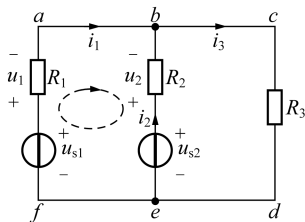


图 1-16 电路举例



基尔霍夫定律

1.5.2 基尔霍夫电流定律

某处流进一定量的电荷，必定同时从该处流出同一数量的电荷，这一结论称为电流的连续性原理。根据这一原理，对电路中任一节点，在任一瞬间，流出节点的电流之和必定等于流入节点的电流之和。

例如，对如图 1-17 所示电路中的节点 a ，连接在 a 点的支路共

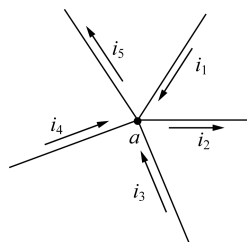


图 1-17 节点电流



有五个,按各支路电流的参考方向,流出节点的电流为 i_2 和 i_5 ,流入节点的电流为 i_1 、 i_3 和 i_4 。

则

$$i_2 + i_5 = i_1 + i_3 + i_4$$

上式可以写成

$$-i_1 + i_2 - i_3 - i_4 + i_5 = 0$$

对于任意一个节点有

$$\sum i = 0 \text{ 或 } \sum I = 0 \quad (1-20)$$

式(1-20)称为基尔霍夫第一定律,又称基尔霍夫电流定律(KCL)。它表明,汇集于任意一个节点的电流的代数和等于零,其中规定流出节点的电流为正,流入节点的电流为负。

在实际运用中,任意一个节点的电流方程也可以用下式来表示

$$\sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}} \text{ 或 } \sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}} \quad (1-21)$$



小提示

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

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

1.5.3 基尔霍夫电压定律

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

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

$$\sum u = 0 \text{ 或 } \sum U = 0 \quad (1-22)$$

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

应用 KVL 列电压方程时,首先需要选定回路的绕行方向,凡电压的参考方向与绕行方向一致时,在该电压前面取正号;凡电压的参考方向与绕行方向相反时,在该电压前面取负号。

如图 1-18 所示的电路,选定回路的绕行方向为顺时针方向,则可列出电压方程为

$$I_1 R_1 + U_S - I_2 R_2 + I_3 R_3 - I_4 R_4 - U_S = 0$$



KVL 也可以推广应用于假想回路, 例如在图 1-19 中, 可以假想有回路 $a-b-c-a$, 其中 $a-b$ 段未画出支路。对于这个假想回路, 如从 a 出发, 则顺时针方向绕行一周。

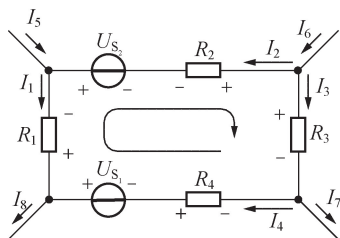


图 1-18 任一电路中的一个回路

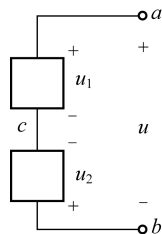


图 1-19 KVL 应用于假想回路

按图中规定的参考方向, 有

$$u + u_2 - u_1 = 0$$

则

$$u = u_1 - u_2$$

有了 KVL 这个推论, 就可以很方便地求出电路中任意两点的电压。

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

本章实训 基尔霍夫定律的验证

实训目的

- (1) 验证基尔霍夫定律的正确性, 加深对基尔霍夫定律普遍性的理解。
- (2) 进一步学会使用电压表、电流表。

实训器材

本实训所需的器材见表 1-1。

表 1-1 本实训所需的器材

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	可调直流稳压电源	0~30 V	2	
2	直流数字电压表		1	
3	直流数字毫安表		1	



实训原理

基尔霍夫定律验证实训电路图如图 1-20 所示。

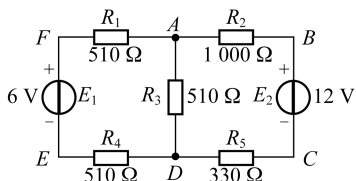


图 1-20 基尔霍夫定律验证实训电路图

基尔霍夫定律是电路的基本定律，分为如下两条定律。

- (1) KCL: 对于电路中的任意节点，流入、流出该节点的电流的代数和为零，即 $\sum I = 0$ 。
- (2) KVL: 在电路中的任一闭合回路，电压升降的代数和为零，即 $\sum U = 0$ 。

实训步骤

- (1) 实验前先任意设定三条支路的电流参考方向。
- (2) 按原理的要求，分别将两路直流稳压电源接入电路。
- (3) 将电流插头的两端接至直流数字毫安表的“+”“-”两端。
- (4) 将电流插头分别插入三条支路的三个电流插座中，记录电流值于表 1-2 中。
- (5) 用直流数字电压表分别测量两路电源及其他电路元件上的电压值，记录于表 1-2 中。

表 1-2 实训数据

测量值	I_1/mA	I_2/mA	I_3/mA	E_1/V	E_2/V	U_{FA}/V	U_{AB}/V	U_{AD}/V	U_{CD}/V	U_{DE}/V
计算值										
测量值										
相对误差										

实训报告要求

- (1) 画出实训电路图，简单描述其工作原理。
- (2) 写出实训步骤，记录实验的测量数据。
- (3) 对记录的数据进行误差分析。



实训点评

1. 学生自评

2. 同学互评

3. 教师点评

思政园地

“时代楷模”钱海军：我愿做一盏灯，照亮别人，温暖自己

钱海军是国网浙江宁波慈溪市供电有限公司的一名普通员工，自1999年成为社区义工以来，他从一个人到引领带动身边1200多人参与志愿服务，发起了“千户万灯”“星星点灯”“暖心空巢”等公益项目，累计帮扶3万余人。

“爱是一盏灯，照亮别人的同时，也温暖了自己。”2022年5月18日，在浙江省宁波市举行的“时代楷模”钱海军同志先进事迹报告会上，钱海军如是说。

钱海军从小在农村长大，村里民风淳朴，谁家碰到造房子、结婚这样的大事，乡亲们都会不计报酬地来帮忙。

“我的父亲是一名党员，也是电工，经常免费为左邻右舍修电灯、换保险丝，看得久了，我就觉得这些都是应该做的。”钱海军直言，父亲的言行让他明白，帮助别人，自己也会感到快乐。

1992年，钱海军成为一名电工。

彼时，钱海军的父亲对他说：“军儿，进了单位一定要虚心向老师傅学习，刻苦钻研技术活儿，把技术练精，练出一身绝活儿，好好为老百姓服务，这样才算是一名合格的电工。”

父亲的这句话一直鞭策着钱海军，从电厂维修工到电器设备技术员，再到社区经理，他跟着师傅和班长一刻不忘对业务技术的学习，逐渐成长为电力技术人员。

1998年，钱海军从农村搬到了慈溪市区，不时帮街坊邻居义务修电灯、换开关。



慢慢地，他发现城市有一些老小区，老房子多，老年人多。很多老人连生活起居都困难，更无法保证用电安全。

“第二年，我在社区居委会填了一张义工申请表，想发挥自己的专业技能，免费给社区居民解决用电方面的问题。”钱海军表示，为了帮助更多有需要的老人，他做了500张名片，挨家挨户发到社区老人手中，“我对他们说如果有用电方面的需求打我电话，这是义务服务，不收钱。”

一个电话，两个电话，一传十，十传百，就这样，钱海军为社区居民免费提供用电服务的消息传开了。从那以后，只要老人们有需求，不论刮风下雨，钱海军都会在最短的时间内赶去。23年的时间里，他从来没有间断过。

“用电有困难，就找钱海军”，老人们口口相传，钱海军服务对象也越来越多。

据国网浙江宁波慈溪市供电有限公司党委书记、执行董事童灵华介绍，在钱海军的精神感召下，该公司构建了五位一体“以德育企”模式，成立了以钱海军为带头人的劳模创新工作室、道德模范工作室、电力驿站，开设了企业道德讲堂，开展评选“微感动人物”“钱海军式好员工”，“实现了从‘人人学习钱海军’到‘人人都是钱海军’的升华。”

2015年，国网浙江宁波慈溪市供电有限公司又注册成立了钱海军志愿服务中心，发起了“千户万灯”等公益项目。

此后，“千户万灯”项目也获得了广泛的社会关注，从慈溪推广至宁波市，后又覆盖浙江省。

从2017年开始，钱海军团队结合东西部协作、结对帮扶，又把它带到了其他省份，并通过开展乡村电工培训班，授之以渔。

钱海军说：“服务没有海拔，爱心没有距离。作为一名电力战线的共产党员，应该毫无保留，力所能及地把电和光送到老百姓最需要的地方去。”

“近几年，钱师傅和我聊得最多的，就是如何酝酿更多有价值的公益项目，如何带动更多的人，培养更多的优秀志愿者，如何让我们这个团队越来越规范，越来越强大，帮助更多需要帮助的人。”作为与钱海军共事10年的同事，在宁波慈溪市钱海军志愿服务中心主任兼党支部书记唐洁看来，钱海军平时话不多，但他一直在用实际行动表达世上最美丽的语言。

“‘时代楷模’这个荣誉不是终点，而是激励我和我的团队继续不忘初心、脚踏实地的新起点。”钱海军告诉记者，“我特别感谢党，为我们创造了这么好的一个时代。我只是一个普普通通的人，做了一些平平常常的事。我希望有更多的人加入到公益事业中来。”

讨论：

钱海军热心公益，乐于助人，用自己微薄的力量，点燃了一盏盏温暖的灯。请讲一讲发生在身边的助人为乐的事。

●●● 本章小结 ●●●

(1) 电路是电流通过的路径。实际电路通常由各种电路实体部件(如电源、电阻器、电



感线圈、电容器、变压器、二极管、晶体管等)组成,每一种电路实体部件具有各自不同的电磁特性和功能。人们按照需要,把相关的电路实体部件按一定的方式进行组合,就组成了电路。实际电路的电磁过程是相当复杂的,难以进行有效的分析和计算。在电路理论中,为了便于对实际电路进行分析和计算,人们通常在工程实际允许的条件下对实际电路进行模型化处理,即忽略次要因素,抓住足以反映其功能的主要电磁特性,抽象出实际电路器件的“电路模型”。

(2)电荷的定向移动形成电流。简单电路中,电流从电源正极流出,经过负载,回到电源负极。在分析复杂电路时,一般难于判断出电流的实际方向,而列方程、进行定量计算时需要电流有一个约定的方向,因此引入电流的参考方向。对于交流电流,电流的方向随时间改变,无法用一个固定的方向表示。

(3)为了分析问题方便,常在电路中指定一点作为参考点,假定该点的电位是零,用符号“ \perp ”表示。在生产实践中,常把地球作为零电位点,凡是机壳接地的设备(接地符号是“ \perp ”),其机壳电位为零。有些设备或装置,机壳并不接地,而是把许多元件的公共点作为零电位点,也用符号“ \perp ”表示。

(4)电流通过电路时传输或转换电能的速率,即单位时间内电场力所做的功,称为电功率,简称功率。电路在一段时间内消耗或提供的能量称为电能。

(5)电阻、电感和电容元件都是理想的电路元件,它们均不发出电能,称为无源元件。它们有线性与非线性之分,线性元件的参数为常数,与所施加的电压和电流无关。

电阻是一种耗能元件,当电阻通过电流时会发生电能转换为热能的过程,而热能向周围扩散后,不可能再直接回到电源而转换为电能。

电感是一种储能元件,以磁场能量的形式储能,同时又因为不会释放出多于其吸收或储存的能量,所以也是一种无源的储能元件。

电容元件本身不消耗能量,同时也不会放出多于其吸收或储存的能量,因此也是一种无源的储能元件。

(6)对于任何电路中的任意节点,在任意时刻,流过该节点的电流之和恒等于零;对于任何电路中的任一回路,在任一时刻,沿着一定的方向(顺时针方向或逆时针方向)绕行一周,各段电压的代数和恒为零。

●●● 本章检测 ●●●

1-1 如图 1-21 所示,所标出的是各元件的电压和电流的参考方向,分别计算各元件的功率,并判断该元件是耗能元件还是电源。

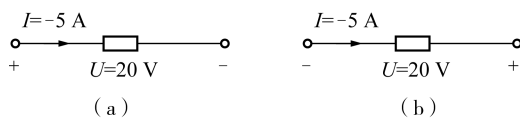


图 1-21 题 1-1 图



1-2 电路如图 1-22 所示，每个方框表示一个元器件，根据已知的电流值求 I 。

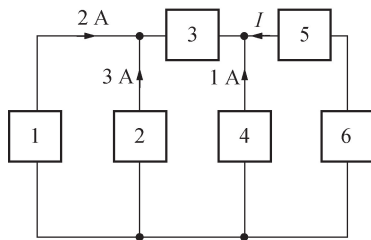


图 1-22 题 1-2 图

1-3 电路如图 1-23 所示，求开路电压 U_{ab} 。

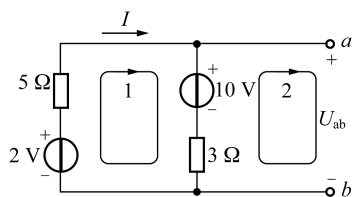


图 1-23 题 1-3 图

