

高等学校 教材



● 畅玉亮 樊立萍 编

电工电子学 教程

化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

电工电子学教程

(非电类专业)

畅玉亮 樊立萍 编

化学工业出版社

教材出版中心

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电工电子学教程(非电类专业)/畅玉亮,樊立萍编.
北京:化学工业出版社,2000
ISBN 7-5025-2690-0

I.电… II.①畅…②樊… III.①电工学-高等学校-
教材②电子学-高等学校-教材 IV.TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 03232 号

高等学校教材
电 工 电 子 学 教 程
(非电类专业)

畅玉亮 樊立萍 编

责任编辑:杨 菁

责任校对:陈 静

封面设计:田彦文

*

化学工业出版社
教材出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

北京市彩桥印刷厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 18¼ 字数 453 千字

2000 年 7 月第 1 版 2000 年 7 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—6000

ISBN 7-5025-2690-0/G·708

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

“电工学”是工科院校非电类各专业的一门技术基础课。随着教学改革的不深入，许多院校“电工学”的教学课时已经大大削减。为适应少学时“电工学”教学需要，考虑到电工、电子技术在现代工业生产中的重要作用，为使学生在较短的时间内获得较全面的电路、电气、电子等方面的基础知识，本书对教学内容做了精心选择，以基本、常用为原则，抓住重点，兼顾发展，注重电工基础知识与实际应用的紧密结合，力求使本书成为一本既能为后续课程铺垫基础又可以独立应用于生产实践的教科书。

在教材内容的取舍和编写方法上，我们主要考虑了以下几个方面。

一、以“基本、常用，兼顾发展”为原则

本书内容主要分为三大部分。前四章为电路的基本理论和基本分析方法，这一部分基本保留了“电工学”教材的传统内容，与某些教科书相比还略有扩展。这部分内容是全书的基础，必须讲深讲透，务求学生牢固掌握，否则无法学好后边的内容。

第五章是三相异步电动机及其控制。同以往教材的电机及电器部分相比，考虑到工业生产中应用最广泛的电机是三相异步电动机，随着变频调速技术的应用和推广，三相异步电动机正在逐步替代直流电机；而变压器的工作原理在物理学中已经讲过，学生并不陌生；同步电机和控制电机专业性很强，非电类专业的学生在毕业后的工作中很少接触；本书做了较大的删节，没有把变压器、同步电机、控制电机、直流电机等内容编入书中。三相异步电动机在电机学中是重点内容之一，为使学生掌握较系统的电工学知识，这部分内容是必不可少的。只要突出重点，集中精力学好三相异步电动机及其继电接触控制，就为学习和掌握其他电机、电器知识打下必要的基础。

模拟电子电路是整个电子技术的基础。在这本教材中，选入了模拟电子电路的主要章节，并增加了广泛应用的场效应管和集成运算放大器的内容，试图为学生打下良好的电子技术的基础，并能够触类旁通地运用模拟电子技术的知识解决那些有可能接触到的集成化数字电路器件的实际应用问题。

二、以培养学生的能力为出发点，努力做到深入浅出、可读性强

教学改革的核心问题是如何培养学生分析问题、解决问题的能力，增强学生的创新意识，提高学生的综合素质。一本好的教材应做到深入浅出，易读易懂。为了做到这一点，在第一部分内容电路分析基础中，以各种电路的分析方法为重点，选入大量的例题，以使通过例题的演算，牢固地掌握分析各种电路的不同方法和技巧。在第三章中，通过三种基本电路元件特性的对比，抓住“相量法”这一重点，对同样的问题用不同的方法进行分析，这样不但巩固、复习了在直流电路中已经学过的各种电路的分析方法，也使学生加深了对相量法的理解，并且有助于学生开拓思路，举一反三，提高学生分析问题、解决问题的能力。

在第五章中，尽量避开复杂的电磁场问题，力图使用通俗的语言，帮助学生对三相异步电动机的工作原理、机械特性及控制方法建立比较系统的概念。在例题和习题的选择上，注重联系实际，使学生学了就有用、学了就能用。

在电子技术部分，不但详细介绍了二极管、三极管、场效应管的特性及典型的整流电路

和放大电路，还对这些半导体元件的开关特性做了归纳说明；这有助于学生建立较完整的概念，也为某些学生继续学习数字电路打下了基础。

三、以精练、实用为目的，既能满足教学需要又能应用于生产实践

满足少学时“电工学”课程的教学需要，是我们编写本书的初衷。本书全部内容在 80 学时内讲完，不会感到紧张，也显得比较充实。

虽经大胆取舍一些内容，但本书的全部内容仍不失为电工学知识体系中的精华。对于工科非电类专业的大学生，能够满足其知识结构的需要，同时本书也为某些学生更深入地学习电工学知识打下了基础。

作为一本技术基础课教材，应当为生产实践服务，我们在编写过程中尽量使各部分内容结合生产实际，此外，还把安全用电的基本知识作为一章（第六章）编入书中。

为使用方便起见，我们把实验指导书作为附录编入书中。

本书的教学时数可控制在 80 学时以内，其中实验部分为 12 学时，实验内容可适当增减。

第一、二章由畅玉亮编写，第三、四章由韩德荣编写，第五章和实验指导书由王德志编写，第六、七、八、九章由樊立萍编写，林峰承担了本书的计算机绘图工作。北京化工大学赵关旗教授担任本书的主审。由于编者水平有限，如有不当之处敬请读者指教。

编 者

1999 年 5 月

第一章 电路的基本概念与基本定律

现代人类生产与生活的各个领域，充满着各种各样的电气设备。这些电气设备尽管用途不同，性能各异，但几乎都是由各种基本电路组成的。所以，学习电路的基础知识，掌握分析电路的规律与方法，是学习电工学的重要内容，也是进一步学习电机、电器和电子技术的基础。

本章主要介绍有关电路的基本概念与基本定律。通过对本章内容的学习，应能正确应用电路的基本定律；深刻理解电流、电压参考方向（正方向）的意义；了解电路的负载，开路与短路三种状态；并能对简单的直流电路进行分析、正确计算电路中各点的电位。

第一节 电路的组成

把干电池和灯泡经过开关用导线联接起来，就构成了一个电路，图 1-1 就是常见的手电筒电路。电路中的干电池是提供电能的，称为电源；灯泡是取用电能的，称负载；而把电源和负载联接起来的开关及导线，是中间环节。

任何一个电路不论其具体用途和功能如何，也不论其复杂程度如何，都可以看成是由电源、负载和中间环节这三部分组成。通常把中间环节和负载称为外电路，而电源内的电流通路称为内电路。

一、电源

电源是把非电能转换成电能的装置。生产与生活实践中有各种不同类型的电源，例如：电池、蓄电池、发电机等。它们在电路中的作用是把其他形式的能（如：化学能或机械能）转换为电能，并提供给电路中的负载。另外把某种形式的电能转换成另一种形式电能的装置，例如应用很广的直流稳压电源，就是把交流电转换成直流电，并在一定条件下保持输出电压稳定的装置。这类装置通常也称为电源。

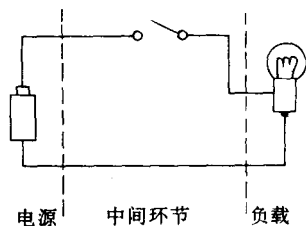


图 1-1 手电筒电路

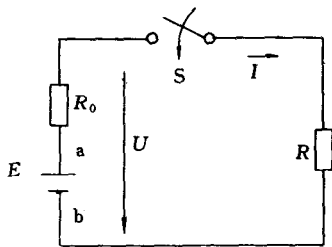


图 1-2 手电筒的电路图

在电路的分析与计算中，总是使用特定的符号和图形把实际电路画成电路图。例如图 1-1 的手电筒电路可以画成图 1-2 所示的电路图。在电路图中，电源部分用电动势 E 和内阻 R_0 表示，而做为负载的灯泡则用一个电阻 R 表示。电动势 E 的方向在电源内部是从低电位（电源负极）指向高电位（电源正极），输出电压 U 的方向是从高电位指向低电位；而电流 I 的方向在外电路是从高电位通过负载流向低电位，在内电路是从低电位流向高电位。

二、负载

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、光能等）。通常在生产与生活中经常用到的电灯、电动机、电炉、扬声器等用电设备都是电路中的负载。

负载的大小是用单位时间内耗用电能的多少来衡量的。电路中的负载通常表现为一定的电阻,但决不能简单地认为电阻越大负载也越大。事实上,当电源电压一定时,电阻大的负载取用的电流小,消耗的电能也少;反之,负载的电阻越小,取用的电流越大,消耗的电能也越多。

三、中间环节

中间环节在电路中起着传递电能、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联接导线(如图 1-1)。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件组成的网络系统。

通过以上对电路组成的研究及生产与生活中的实践经验,对电路的作用可以归纳为以下两个方面。

(1) 实现电能的传输和变换

这是电力工程要解决的主要问题,它包括发电、输电、配电、电力拖动、电热、电气照明,以及交流电与直流电之间的整流和逆变等。由于电力工程中传输和变换电能的规模很大,因此,要尽可能地减少电能传输和变换过程中的损耗,以提高电能的利用效率。

(2) 实现信号的传递和处理

在科学技术领域和现代化生产中,许多信号的传递和处理也是靠电路实现的。例如:生产过程的自动调节以及科学实验的自动测试装置中,需要对各种输入数据进行处理及对各种信号进行存贮和发送;在电讯事业中对语言、文字、图像、音乐的广播与接收等等,这些重要的任务都是由相应的电路来完成的。电路在实现信号的传递和处理中,虽然也有能量的消耗,但和电力工程相比,能量消耗的规模和数量都很小,更为关心的是准确地传递和处理信号,保证信号不失真。

第二节 电路的基本物理量

从电路分析与计算的角度,引入电流与电压参考方向(正方向)的概念,对进一步掌握电路的分析与计算是十分重要的。

一、电流强度

电流强度是计量电流强弱程度的物理量。一般,电荷在导体内运动的速率是随时间变化的,所以,电流的强弱也将随时间而变化。设在很短的时间 dt 内,通过导体截面 S 的微小电量为 dq , 见图 1-3, 则电流

$$i = \frac{dq}{dt}$$

如果通过导体截面 S 的电量不随时间变化,即

$$\frac{dq}{dt} = \text{常数} \quad (1-1)$$

则称这种电流为恒定电流,简称直流。直流电流强度用大写字母 I 表示:

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

Q 为在时间 t 内通过导体截面 S 的电量。

电流强度的单位是 A (安培)。实际应用中,大电流用 kA (千安培)表示,小电流用 mA (毫安培)表示或者用 μA (微安培)表示。其中:

$$\begin{aligned} 1\text{kA} &= 1000\text{A} \\ 1\text{mA} &= 10^{-3}\text{A} \\ 1\mu\text{A} &= 10^{-6}\text{A} \end{aligned}$$

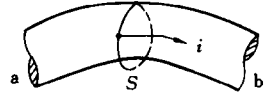


图 1-3 导体中的电流

在工程上，电流强度简称为电流。

外电路中的电流方向总是从高电位点指向低电位点，对直流电路而言，电流总是从正极流出电源，由负极流入电源。但在电路的分析与计算中，对于比较复杂的电路，很难预先知道电流在每一段电路中的实际方向，这就给分析和计算电路带来了困难。为了分析与计算上的方便，可以任意选定一个方向做为该段电路的参考方向，又叫正方向，在电路图中用箭头表示。当然，选定的电流参考方向，并不一定与电流的实际方向一致；计算的结果，如果电流为正值，则说明电流的实际方向与事先选定的电流参考方向相同，若为负值，则认为实际方向与电流的参考方向相反。

请注意，在电路分析中，只有在选定参考方向之后，电流值才有正负之分。

二、电位

电荷在电场中的不同位置所具有的能量（位能）是不同的。同样，电荷在电路中的不同位置上，也具有不同的能量。这正如重力场中的物体，在不同高度时具有不同的重力位能一样，当物体所处位置的高度改变时，其重力位能改变的大小，恰好等于重力（或外力）做功的大小。

把单位正电荷在电路中某一点所具有的电位能称为该点的电位。电位的数学表达式是：

$$V_a = \frac{W_a}{Q} \quad (1-3)$$

式中 W_a ——电路中 a 点的电位能，J；

V_a ——电路中 a 点的电位，V；

Q ——电量，C。

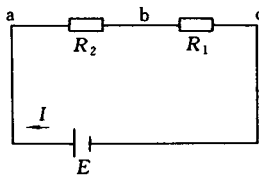


图 1-4

电流在外电路是由高电位点流向低电位点的。但是，电路中各点电位的高低是相对的，如图 1-4 所示的电路中，a 点电位比 b 点电位高，而 b 点电位又比 c 点电位高。所以，如果没有一个共同的参考点做标准，就无法确定电路中各点的电位，也无从比较各点电位的高低。

通常在分析电路时先选定一个参考点，认为参考点的电位为零，电路中其他各点的电位均与参考点（零电位点）相比较而定。

在生产实践中，把地球做为零电位点，凡是机壳接地的设备，接地符号是“⊥”，机壳电位即为零电位。有些设备或装置，机壳并不接地，而是把许多元件的公共点做为零电位点，用符号“⊥”表示。电路中，凡是比参考点电位高的各点电位是正电位，比参考点电位低的各点电位是负电位。

图 1-5 (a) 中，以 c 点为参考点，则 a、b、c 三点的电位分别是：

$$V_a = 9\text{V}$$

$$V_b = 6\text{V}$$

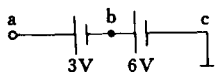
$$V_c = 0\text{V}$$

图 1-5 (b) 中，以 b 点为参考点，则 a、b、c 三点的电位分别是：

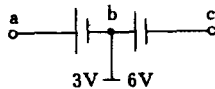
$$V_a = 3\text{V}$$

$$V_b = 0V$$

$$V_c = -6V$$



(a)



(b)

图 1-5

三、电压

设电路中 a、b 两点的电位分别为 V_a 、 V_b ，则 a、b 两点间的电位差为：

$$V_a - V_b = \frac{W_a}{Q} - \frac{W_b}{Q} = \frac{W_a - W_b}{Q} = \frac{W_{ab}}{Q} \quad (1-4)$$

即单位正电荷从 a 点沿任意路径移到 b 点时，电场力所做的功。

a、b 两点间的电位差定义为 a、b 两点间的电压，记为 U_{ab} ，由 (1-4) 可知：

$$U_{ab} = V_a - V_b = \frac{W_{ab}}{Q} \quad (1-5)$$

电压的单位是伏特 (V)，高电压可用千伏 (kV) 表示，低电压可用毫伏 (mV) 或微伏 (μV) 表示，它们的换算关系是：

$$1kV = 1000V$$

$$1mV = 10^{-3}V$$

$$1\mu V = 10^{-6}V$$

电压的方向规定为从高电位指向低电位，在电路图中可用箭头来表示。在比较复杂的电路中，往往不能事先知道电路中任意两点间的电压，为了分析和计算的方便，也采用任意选定电压参考方向的办法。先按选定的电压参考方向进行分析、计算，再由计算结果中电压值的正负来判断电压的实际方向与任意选定的电压参考方向是否一致；即电压值为正，则实际方向与参考方向相同，电压值为负，则实际方向与参考方向相反。

显然，只有在选定了电压参考方向的前提下，电压值的正、负才有意义。

应当指出，电路中任意两点间的电压，与参考电位点（零电位点）的选择无关。仍以 1-5 (a)、1-5 (b) 中的电路为例，图 1-5 (a) 中，电路的参考点为 c，则 ac 两点间的电压为

$$U_{ac} = V_a - V_c = 9V - 0V = 9V$$

图 1-5 (b) 中，电路的参考点为 b，ac 两点间的电压为

$$U_{ac} = V_a - V_c = 3V - (-6)V = 9V$$

可见，对于不同的参考点而言，虽然各点的电位发生了变化，但任意两点间的电压却没有发生变化。

四、电动势

电源的作用是把非电能转换成电能，以供给电路的负载使用。无论哪一类电源，都必须由非电场力（又叫电源力或局外力）做功，才能实现这一功能。如图 1-2 所示电路中，开关 S 闭合、电路中有电流通过时，为了保持电流的连续及电源两端有稳定的输出电压，电源 E 必须源源不断地把正电荷从负极 b 送往正极 a。这是一个电源力克服电场力做功的过程，正是通过这一过程，电源把非电能转换成了电能。

电动势是衡量电源力做功能力的物理量。把单位正电荷从电源的低电位端经电源内部移

到高电位端, 电源力克服电场力所做的功, 称为电源电动势 E 。图 1-2 中, 电源的电动势可以用表达式记为:

$$E_{ba} = \frac{W_{ab}}{Q} \quad (1-6)$$

电动势的单位是 V (伏特), 与电压相同, 但电动势与电压在物理意义上却有本质区别。前者表示电源力做功的能力, 后者是电场力做功的能力; 电动势的方向是由低电位点指向高电位点, 电压的方向是从高电位点指向低电位点。

五、电功与电功率

电源所做的功称为电功。设在时间 t 内, 正电荷 Q 在内电路沿电动势 E 的方向通过电源, 电源力所做的功 W_S 为:

$$W_S = EQ = EIt \quad (1-7)$$

电源所做的功分为两部分消耗, 一部分在内电路, 一部分在外电路。当电流通过内电路时, 在内阻 R_0 上要消耗一部分电能 W_0 :

$$W_0 = U_0 Q = U_0 I t = I^2 R_0 t \quad (1-8)$$

U_0 是电流经过内阻 R_0 时产生的电压降: $U_0 = IR_0$ 。

当电流经外电路通过负载 R 时, 将产生电压降 $U = IR$, 电场力做的功 W_L 为:

$$W_L = UQ = UI t = I^2 R t \quad (1-9)$$

根据能量守恒定律, 电源所提供的总能量为:

$$W_S = W_0 + W_L = I^2 (R_0 + R) t = EIt \quad (1-10)$$

电源把非电能转换为电能的速率, 亦即电源在单位时间内产生的电能, 称为电源产生的电功率 P_S :

$$P_S = \frac{W_S}{t} = \frac{W_0}{t} + \frac{W_L}{t} = P_0 + P_L$$

或

$$EI = I^2 (R_0 + R) \quad (1-11)$$

电功率的单位是瓦特, 简称 W (瓦)。

$$1W = \frac{1J}{1s} = \frac{1V \times 1C}{1s} = \frac{1V \times 1A \times 1s}{1s} = 1V \times 1A$$

较大的电功率单位是 kW (千瓦)

$$1kW = 1000W$$

计算电能的单位是 (W·s), 较大的电能单位是 kW·h (千瓦·时)

$$1W \cdot s = 1J$$

$$1kW \cdot h = 3.6 \times 10^6 W \cdot s$$

1kW·h 的电能, 通常称为 1 度电。

由于在分析、计算电路时, 电流、电压都选用了参考方向, 所以电流、电压的数值会有正负号, 计算出来的电功率也会有正负号。习惯上, 在电流、电压采取相同的参考方向时 (又称关联参考方向), 计算出的正功率值一定是消耗的功率, 负功率值则代表产生的功率。

例 1-1 已知图 1-6 所示电路中, 已知 $R_1 = 50\Omega$, $R_2 = 100\Omega$, $R_3 = 200\Omega$, $E = 350V$, 求: R_1 , R_2 , R_3 各自消耗的功率及电源产生的功率是多少?

解: 由欧姆定律知电路中的电流 I 为

$$I = \frac{350}{50 + 100 + 200} = 1A$$

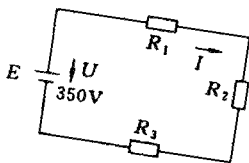


图 1-6

R_1 消耗的功率 $P_1 = I^2 R_1 = I^2 \times 50 = 50W$
 R_2 消耗的功率 $P_2 = I^2 R_2 = I^2 \times 100 = 100W$
 R_3 消耗的功率 $P_3 = I^2 R_3 = I^2 \times 200 = 200W$
 电源产生的功率: $P_S = -IU = -I \times 350 = -350W$
 注意, 对电源而言, 由于电源电压 U 的方向与电动势方向相反, 也与电流的方向相反, 在计算 P_S 时, 公式前使用了负号“-”。从计算结果可知, 电路正、负功率数值相等, 符合能量守恒规律。

第三节 欧姆定律

通过一个电阻元件的电流 I , 与电阻两端的电压 U 成正比, 而与电阻 R 成反比, 这就是欧姆定律。可以写成如下的形式:

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = IR \quad R = \frac{U}{I} \quad (1-12)$$

注意, 这里所说的电阻两端的电压 U , 必须是在电流流过的方向上产生的电压降。因为在电阻中, 电流实际上总是从高电位流向低电位。所以在使用 (1-12) 式时, 通常对电流 I 和电压 U 选取相同的参考方向; 如果选取了不同的参考方向, 则在使用 (1-12) 式时, 应在公式右边使用一个负号“-”。

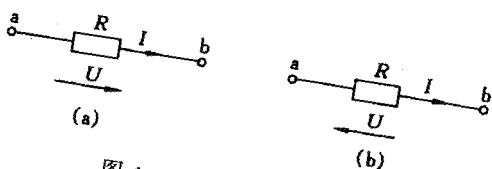


图 1-7 欧姆定律的应用

对于图 1-7 (a) 所示的电阻, 有:

$$I = \frac{U}{R}$$

而对于图 1-7 (b) 所示的电阻, 电流 I 应该记为:

$$I = -\frac{U}{R}$$

例 1-2 计算下列图 1-8 中电阻两端的电压 U 或流过电阻元件的电流 I 。

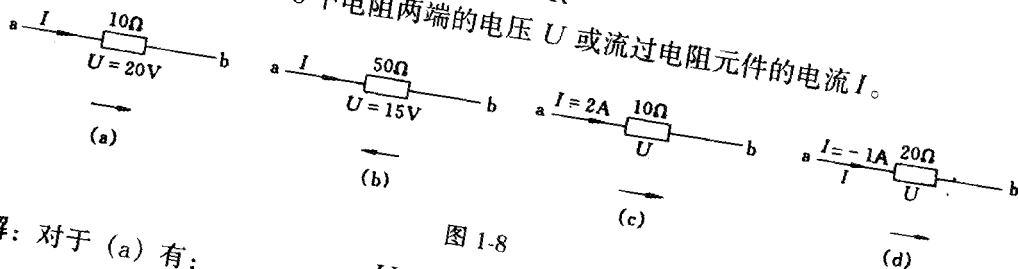


图 1-8

解: 对于 (a) 有:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{20}{10} = 2A$$

对于 (b) 有:

$$I = -\frac{U}{R} = -\frac{15}{50} = -0.3A$$

对于 (c) 有:

$$U = IR = 2 \times 10 = 20V$$

对于 (d) 有:

$$U = IR = -1 \times 20 = -20V$$

欧姆定律说明电阻元件电流与电压的关系, 它是对电路进行分析和计算的基本定律之

一。由欧姆定律可以看出,电阻不仅是一种消耗电能的电路元件,而且又是一种电路参数,所以电阻符号 R ,具有两重身份。

第四节 电路的状态

电路在工作中可能呈现负载、空载和短路三种状态,本节将分别讨论这三种电路的状态,并对电路中负载获得最大功率的条件做一分析。

一、负载状态

当电路接通,负载上有电流通过时,电路就工作在负载状态。(图 1-9) 通常,电源的电动势 E 和内阻 R_0 是一定的,所以,在负载状态下,电流 I 的大小将由负载电阻 R_L 决定。

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} \quad (1-13)$$

这时,负载上消耗的功率为:

$$P = IU = IE - I^2 R_0 = P_E - P_0 \quad (1-14)$$

即负载消耗的功率等于电源发出的总功率减去内阻 R_0 上消耗的功率。

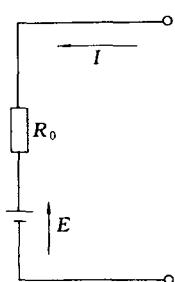


图 1-10 电源处于负载状态

无论是电源还是负载,通过的电流都不能无限增加,否则将会损坏电源或用电设备。所以,各种电气设备或电路元件,都规定了电流、电压和功率的使用数据,也就是设备或元件的额定值。例如:日光灯的额定电压是 220V,额定功率是 40W。电气设备在规定的额定值下运行,称为额定运行状态。为了保证电气设备的安全使用,延长电气设备的使用寿命,电路应该尽量在设备的额定状态下工作。

应当注意的是,电路中的电源元件,并不是在任何时候都能发出功率。只有在电动势 E 方向与电流 I 的方向一致时,才能发出功率,这时,乘积 EI 为正值。如果流经电源的电流 I 与电动势 E 的方向相反,如图 1-10 所示,则电源将吸收功率,说明电源元件实际上是做为负载而运行。例如:

蓄电池的充电过程就是这种情况。

二、空载状态

如果把图 1-9 所示电路的开关 S 打开,电路就将处于空载状态。这时,外电路对于电源而言相当于一个无穷大的电阻,电路中没有电流;电源两端的端电压 U_S 等于电源的电动势 E ,称为开路电压 U_{OC} 。由于电流为零,负载上不消耗功率 $P=0$,电源也不能产生功率 $P_E=0$ 。电路的空载状态可表示为:

$$\begin{aligned} I &= 0 \\ U_S &= U_{OC} = E \\ P &= 0 \end{aligned} \quad (1-15)$$

三、短路状态

当电路中电源的两个端点,如图 1-11 中的 a, b 端,由于某种原因(人为或事故)被联接在一起时,电源就被短路,电流将不再通过负载,这种情况称为电路的短路状态。在短路状态下,电流通过的回路中只剩下很小的内阻 R_0 ,所以,电流将会达到很大

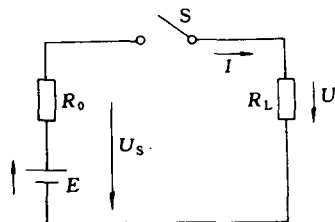


图 1-9 负载和空载状态

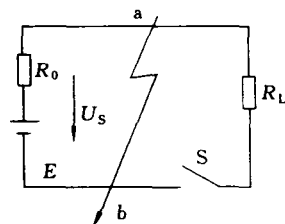


图 1-11 电路的短路状态

的数值, 该电流称为短路电流 I_{SC} 。而电源的电动势全部降落在内阻 R_0 上, 对外电路不再输出电压, 即电源的端电压 $U_S = 0$, 电源产生的功率将全部消耗在内阻 R_0 上, 对外电路也不再输出功率。

电源短路时的特征可表示为:

$$\begin{aligned} I &= I_{SC} = \frac{E}{R_0} \\ U_S &= E - I_{SC}R_0 \\ P &= I_{SC}^2 R_0 \end{aligned} \quad (1-16)$$

因为短路电流 I_{SC} 很大, 并且将在内阻 R_0 上全部转换为热能, 所以电源温度会迅速上升以至于烧坏电源。因此, 短路是一种严重的事故, 应采取措施加以避免或防护。通常在电路中接入熔断器或自动断路器, 可以在发生短路时, 将故障电路迅速切除, 起到保护电源的作用。

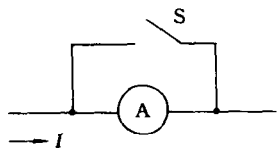


图 1-12 电流表的
开关旁路

在实践中, 有时为了达到某种目的, 人为地利用短路的特性。例如: 电动机起动时电流很大, 为了保护串联在电路中的电流表, 可以在起动前将电流表两端短接, 使起动电流旁路通过, 见图 1-12, 待电动机起动后再断开短路线, 恢复电流表的工作。

四、负载获得最大功率条件

电路的负载电阻 R_L 为无穷大 (空载状态) 或等于零 (短路状态) 时, 电源都不能输出功率; 除了这两种情况外, 电源将有功率输出。可见, 对于一个具有一定电动势 E 和一定的内阻 R_0 的电源, 其输出功率的大小是由负载电阻 R_L 决定的。那么, 负载电阻 R_L 在什么条件下才能获得最大的功率呢?

图 1-13 中, 电动势 E 及内阻 R_0 已确定, 问负载电阻 R_L 为何值时获得的功率最大? 设 R_L 上获得的功率为 P_L , 则 $P_L = I^2 R_L$

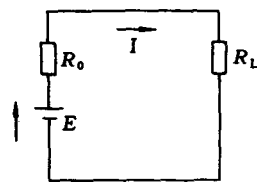


图 1-13 负载电路

其中: $I = \frac{E}{R_0 + R_L}$

$$\text{所以: } P_L = \left(\frac{E}{R_0 + R_L} \right)^2 R_L = \frac{E^2 R_L}{(R_0 + R_L)^2}$$

可见: P_L 是 R_L 的函数, 对 R_L 取一阶导数:

$$\frac{dP_L}{dR_L} = \frac{E^2(R_0 - R_L)}{(R_0 + R_L)^3}$$

$$\text{令 } \frac{dP_L}{dR_L} = 0 \quad \text{则有} \quad R_L = R_0$$

所以, 只有当 $R_L = R_0$ 时, 负载电阻 R_L 才能获得最大的功率 $P_{L\max}$ 。

$$\text{显然} \quad P_{L\max} = \frac{E^2 R_L}{(R_0 + R_L)^2} = \frac{E^2}{4R_0} \quad (1-17)$$

由式 (1-17) 可知: 电路中电源的电动势越大, 内阻越小, 电源的最大输出功率 $P_{L\max}$ 越大。但是, 由于负载电阻 R_L 与电源内阻 R_0 相等, 所以, 电源产生的功率 P_S 只有一半输出到负载上, 另一半则消耗在内阻 R_0 上, 即效率只有 50%。

在电子技术中, 经常遇到使负载获得最大功率的问题。例如: 要使收音机的扬声器获得最大功率, 就必须使扬声器的电阻与收音机最后一级的输出电阻接近相等, 这种情况称为阻抗匹配。

第五节 克希荷夫定律

克希荷夫定律是电路中电流和电压遵循的基本规律，是分析和计算电路的基础。在研究克希荷夫定律之前，先介绍几个有关电路的名词。

(1) 节点 电路中，三条或三条以上导线的汇聚点称为节点。如图 1-14 中的 b, e 两点。

(2) 支路 任意两个节点之间无分叉的分支电路称为支路。如图 1-14 中的 bafe, be, bcde 三条支路。

(3) 回路 电路中任一闭合路径称为回路。如图 1-14 中 abefa, bcdeb, abcdefa 都是回路。

(4) 网孔 不包围任何支路的单孔回路称网孔。如图 1-14 中 abefa 和 bcdeb 都是网孔，而 abcdefa 不是网孔。

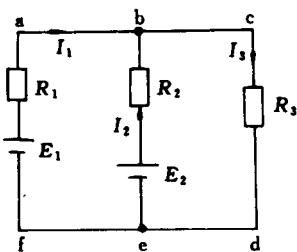


图 1-14 节点、支路与回路

一、克希荷夫电流定律 (KCL)

电路中，在任一瞬间，流入一个节点的电流之和等于从这个节点流出的电流之和。对于图 1-15 的节点 a 来说，有：

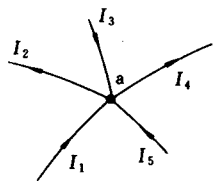


图 1-15 节点的电流

$$I_1 + I_3 + I_5 = I_2 + I_4$$

如果规定流出节点的电流取“+”号，流入节点的电流取“-”号，则有：

$$-I_1 + I_2 - I_3 + I_4 - I_5 = 0$$

于是，可以把克希荷夫电流定律写成一般形式：

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

即对于电路中的任一节点，在任一瞬间，电流的代数和恒等于零。

克希荷夫电流定律是电流连续性原理在电路中的体现。电流的连续性本质上是电荷守恒的反映。因为在任一节点处，电荷是不会自行产生或消灭的，也不可能出现电荷的积累。如果流入节点的电流不等于流出该节点的电流；则在该节点处就会有电荷的产生或消灭，或者出现电荷的积累，这是不可能的。

克希荷夫电流定律是电路中联接到任一节点的各支路电流必须遵守的约束，而与各支路上的元件性质无关。这一定律对于任何电路都普遍适用。

二、克希荷夫电压定律 (KVL)

在任一瞬间，对于电路中任一闭合回路，各部分电压的代数和恒等于零，即：

$$\sum U = 0$$

如图 1-16 所示的闭合回路中，沿 abcdea 顺序绕行一周，则有：

$$U_1 - U_2 + U_3 - U_4 + U_5 = 0$$

各部分电压的正负号规定如下：按绕行方向经过一个电压时，该电压的方向与绕行方向一致，电压前取正号“+”，否则，取负号“-”。

克希荷夫电压定律实际上反映了电路中任意两点间的电压与路径无关这一基本性质。图 1-16 中 a, d 两点的电压 U_{ad} ，按路径 abcd 计算应为：

$$U_{ad} = U_1 - U_2 + U_3$$

如果沿路径 aed 计算则为：

$$U_{ad} = -U_5 + U_4$$

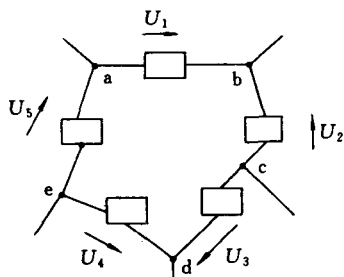


图 1-16 回路电压

显然

$$U_1 - U_2 + U_3 = -U_5 + U_4$$

即

$$U_1 - U_2 + U_3 - U_4 + U_5 = 0$$

克希荷夫电压定律的一般形式为:

$$\sum U = 0 \quad (1-19)$$

克希荷夫电压定律是电路中任一闭合回路内各支路电压必须遵守的约束,与各支路元件的性质无关。这一定律对于任何电路也是普遍适用的。

克希荷夫定律 (KCL, KVL), 是分析和计算复杂电路的基础。所谓复杂电路是指那些不能简单地按照串、并联关系

进行分析计算的电路。对于复杂电路,可以根据克希荷夫定律和欧姆定律列出方程或方程组进行分析和计算。

例 1-3 图 1-17 所示电路中, 已知 $E_1 = 3\text{V}$, $E_2 = 2\text{V}$, $E_3 = 5\text{V}$, $R_2 = 1\Omega$, $R_3 = 4\Omega$, 求各支路电流。

解: 该电路看似简单, 但由于电路中有多个电源, 不能用串、并联的方法进行分析, 所以也是一个复杂电路。

首先选定各支路电流的参考方向, 并用箭头标注在电路中。沿回路 $E_1 R_2 E_2$ 方向绕行一周, 根据 KVL 列出方程:

$$R_2 I_2 = E_1 - E_2$$

可得

$$I_2 = \frac{E_1 - E_2}{R_2} = \frac{3 - 2}{1} = 1\text{A}$$

沿回路 $E_3 E_1 R_3$ 方向绕行一周, 根据 KVL 列方程:

$$-R_3 I_3 = E_3 + E_1$$

可得

$$I_3 = \frac{E_3 + E_1}{-R_3} = \frac{5 + 3}{-4} = -2\text{A}$$

根据 KCL 对 a 点可列方程:

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

可得

$$I_1 = I_2 - I_3 = 1 - (-2) = 3\text{A}$$

例 1-4 图 1-18 所示电路中, $E = 10\text{V}$, $R_1 = 2\text{k}\Omega$, $R_2 = 5\text{k}\Omega$, 求各支路电流。

解: 这是一个简单电路, 可以根据并联关系及欧姆定律求解。

因为

$$U_{ab} = E = 10\text{V}$$

根据欧姆定律:

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{R_1} = \frac{10}{2} = 5\text{mA}$$

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2} = \frac{10}{5} = 2\text{mA}$$

根据 KCL: $I_3 = I_1 + I_2 = 5 + 2 = 7\text{mA}$

例 1-5 图 1-19 所示为某复杂电路中的一部分, 已知流过 R_1 的电流 $I_1 = 3\text{A}$, 流过 R_3 的电流 $I_3 = -2\text{A}$, 流过 R_6 的电流 $I_6 = 7\text{A}$, 求流过 R_7 的电流 I_7 。

解: 我们可以把图 1-19 中 R_2 , R_4 , R_5 组成的部分电路, 看成一个大节点, 或称广义节点; 事实上电路中任意可用封闭面包围起来的部分都可视为一个广义节点, 同样适用克希

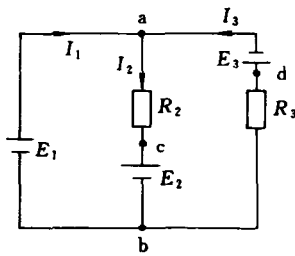


图 1-17

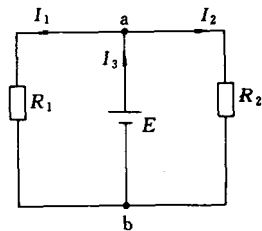


图 1-18

荷夫电流定律。因此，可列方程：

$$I_1 - I_3 - I_6 - I_7 = 0$$

即

$$3 - (-2) - 7 - I_7 = 0$$

可得

$$I_7 = -2\text{A}$$

在应用克希荷夫定律解题时，经常遇到两类符号，一类是定律所要求的按电流或电压的参考方向确定的正负号，另一类是电流、电压本身数值的正负号。两者不可混淆。

第六节 电路中电位的计算

在电路分析和计算中，尤其是在分析电子线路时，常常需要计算电路中任意一点的电位。要计算电路中各点的电位，必须先选定一个零电位点做为参考点，例如，在图 1-17 所示电路中，我们选择 b 点为参考点，即设 b 点的电位为零：

$$V_b = 0$$

因为

$$U_{ab} = V_a - V_b$$

所以

$$V_a = U_{ab} = E_1 = 3\text{V}$$

同理

$$V_c = U_{cb} = E_2 = 2\text{V}$$

$$V_d = U_{db} = -R_3 I_3 = -4 \times (-2) = 8\text{V}$$

可见，某一点的电位，实际上还是指两点之间的电压，只不过另一点是参考点罢了。所以，计算电位的方法和计算电压的方法相同。

例 1-6 试求图 1-20 (a) 所示电路中的开关 S 打开及闭合时 a 点的电位。

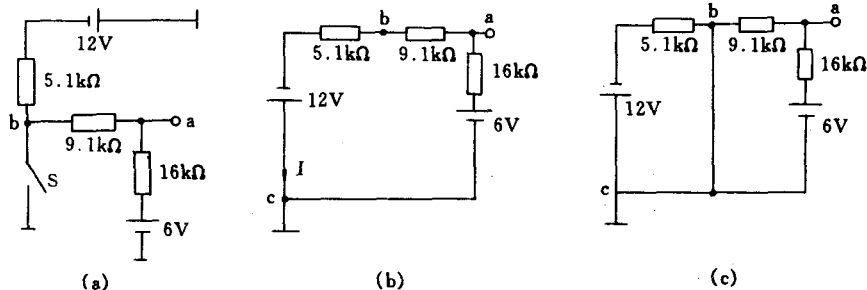


图 1-20

图 1-20 (a) 所示电路是电子线路的习惯画法，图中三个接地点是零电位点，实际上是连在一起的。当开关 S 打开时可画成如图 1-20 (b) 中所示单回路电路。设电流 I 的参考方向如图所示，并以此方向绕行一周，则可列电压方程：

$$I(16 + 9.1 + 5.1) = 6 + 12$$

$$I = \frac{18}{30.2} = 0.596 \text{mA}$$

所以

$$V_a = U_{ac} = -0.596 \times 16 + 6 = -3.536 \text{V}$$

当开关闭合时, 电路可画成图 1-20 (c) 所示, 这时 b 点已成为零电位点, 所以

$$V_a = 9.1 \times \frac{6}{16 + 9.1} = 2.175 \text{V}$$

可见, 由于开关 S 的闭合使 a 点的电位由 -3.536V 升高到 2.175V 。

例 1-7 图 1-21 所示电路中, 已知 $E_1 = 120 \text{V}$, $E_2 = 50 \text{V}$, $R_1 = 40 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$, $R_3 = 10 \Omega$, $R_4 = 40 \Omega$, $R_5 = 100 \Omega$, 试求 (1) 开关 S 打开时 a 点和 b 点的电位。(2) 开关 S 闭合时 a 点和 b 点的电位及 R_5 中的电流。

解: (1) 开关 S 打开时在电源 E_1 所在回路中:

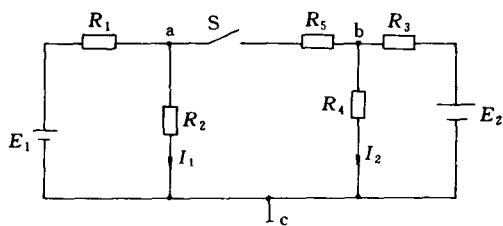


图 1-21

$$(R_1 + R_2)I_1 = E_1$$

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1 + R_2} = \frac{120}{40 + 20} = 2$$

在电源 E_2 所在的回路中:

$$(R_3 + R_4)I_2 = E_2$$

$$I_2 = \frac{E_2}{R_3 + R_4} = \frac{50}{10 + 40} = 1 \text{A}$$

因此, a 点的电位 V_a 及 b 点的电位 V_b 分别为:

$$V_a = U_{ac} = R_2 I_1 = 20 \times 2 = 40 \text{V}$$

$$V_b = U_{bc} = R_4 I_2 = 40 \times 1 = 40 \text{V}$$

(2) 由于开关 S 打开时 a, b 两点电位相同, 所以, 即使将开关 S 闭合, 也不会有电流通过 R_5 , 故 a, b 两点的电位不会发生变化, 即:

$$V_a = V_b = 40 \text{V}$$

例 1-8 求图 1-22 所示电路中 a 点的电位。

解: 图中 a 点的电位以零电位点开始向 a 点逐段推算, 5Ω 的电阻中不可能有电流通过, 所以:

$$V_b = 8 \text{V}$$

因为图中: $I = \frac{3}{2+1} = 1 \text{A}$

所以, 从 b 点到 c 点将有电位的升高:

$$V_c = 8 + 1 \times 2 = 10 \text{V}$$

从 c 点到 a 点的电压降是 3V , 所以:

$$V_a = V_c - 3 = 10 - 3 = 7 \text{V}$$

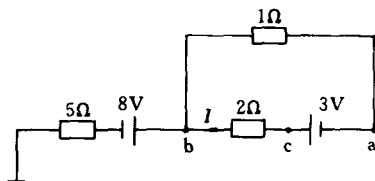


图 1-22

对电路中各点电位的计算, 往往能使问题简化。例如, 一个电路有 5 个节点, 则电路中将会有 10 个不同的电压需要进行计算。如果选定一个节点为参考点, 那么只需对其余 4 点的电位进行计算就行了。当然, 知道了各个节点的电位以后, 任意两点间的电压就都可以知道了。在对电路中各点电位的计算中, 还发现, 电路中凡是等电位的点, 不管它们是否联接在一起, 也不管它们之间有没有电阻, 都不会有电流在它们之间流过, 也不会它们在它们之间产