

21世纪电学科高等学校教材

电工技术

张秀然 张希志 蔡振江 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

前 言

《电工技术》一书是由全国高等农业院校电学科教材研究会组织编写的系列教材之一。该书的基本内容符合全国高等农业院校电学科教材研究会审定的《电工技术》教学大纲,适用于高等农业、林业、水利水电院校或其它院校非电专业的本、专科教材,以及电气工程技术人员和电气技术爱好者参考与自学。

在本教材编写过程中,作者总结和吸收了各院校教学和教学改革的有益经验,注重理论的系统性和实用性,删除了以往陈旧过时或不适用的内容,增补了新的知识和技术,修改了对一些问题的分析思路和解答方法,使之更适合于组织教学和学生自学。书中例题、习题丰富,图形、符号均采用最新国家标准。本教材参考学时为50~70学时。

参加本教材编写的单位有:沈阳农业大学、黑龙江“八一”农垦大学、河北农业大学、南京农业大学、东北农业大学、河南农业大学、内蒙古农业大学等七所院校。

本书编写人员:张秀然、张希志、蔡振江、刘德营、任振辉、董桂菊、霍利民、王永田、崔岩、倪晶。全书由内蒙古农业大学郭永老师主审。

由于编者水平和时间所限,书中疏漏和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2001年5月

目 录

前 言

第一章 直流电路	1
第一节 电路及基本物理量	1
第二节 电路的工作状态	6
第三节 基尔霍夫定律	7
第四节 电源的等效变换	9
第五节 支路电流法	12
第六节 节点电压法	13
第七节 叠加定理	15
第八节 等效电源定理	17
第九节 受控源	20
习题	21
第二章 单相交流电路	25
第一节 正弦交流电的基本概念	25
第二节 正弦量的表示方法	29
第三节 单一参数的交流电路	34
第四节 RLC 串联交流电路	41
第五节 RLC 并联交流电路	45
第六节 电路中的谐振	50
第七节 复杂正弦电路的相量分析	54
第八节 非正弦交流电路	59
习题	62
第三章 三相交流电路	67
第一节 三相交流电源	67
第二节 负载星形连接的三相电路	70
第三节 负载三角形连接的三相电路	74
第四节 三相电路的功率	77
习题	79
第四章 电路的时域分析	80
第一节 过渡过程的概念	80
第二节 RC 电路的时域响应	83
第三节 RL 电路的时域响应	89
第四节 微分电路和积分电路	95

习题	96
第五章 磁路与变压器	99
第一节 磁路的基本概念	99
第二节 变压器的基本结构和工作原理	104
第三节 变压器的运行特性及变压器绕组极性与测定	109
第四节 三相变压器及特殊用途变压器	111
习题	114
第六章 电动机	116
第一节 三相异步电动机的结构和工作原理	116
第二节 三相异步电动机的电磁转矩与机械特性	121
第三节 三相异步电动机的使用	126
第四节 单相异步电动机	136
第五节 同步电动机简介	139
第六节 直流电机简介	139
习题	144
第七章 控制电机	146
第一节 伺服电动机	146
第二节 步进电动机	153
习题	155
第八章 电气控制线路	156
第一节 常用控制电器	156
第二节 继电器、接触器控制的基本电路	162
第三节 电气控制的基本方法	165
第四节 可编程控制器	172
习题	182
第九章 供电与安全用电	184
第一节 电力系统概述	184
第二节 配电变压器及其选择	186
第三节 高压配电装置	190
第四节 低压配电盘	195
第五节 电力排灌站的电气布置	199
第六节 保护接地和保护接零	203
第七节 防雷保护	206
第八节 触电的危害与急救	208
第九节 漏电自动开关与漏电继电器	211
习题	213
参考文献	215

第一章 直 流 电 路

本章首先介绍电路的基本知识,重点讨论直流电路的基本定理、定律及基本分析方法。这些基本规律和分析方法只要稍加扩展,又可适用于交流电路。

第一节 电路及基本物理量

一、电路模型

电路是由若干电工设备或电气元件组成的电流通路,一般而言指电流所通过的闭合路径。具体电路的形式和功能相差很大,图 1-1 是一个手电筒电路简图,它由干电池、灯泡和导线,开关等组成。

任何一个实际电路,无论其复杂程度如何都无一例外地包括电源(信号源)、负载和中间环节这三个要素。

电源是电路中电能的提供者,其作用是将其其它形式的能量转换成电能。

负载是电路中能量的消耗者,其作用是将电能转换成我们所需要形式的能量。

中间环节主要包括连接导线和一些控制电器。它们连接于电源和负载之间,起电能的传送、调整、分配和保护作用。

电路(或网络)是由许多电气元件或设备,为实现能量的转换或实现信息的传递和处理而构成的组合的总称。

实际生活和生产中遇到的电气元件太多,电气性能非常复杂。为了研究电路的基本规律,掌握电路元件最本质的物理特性,就需要对实际电路元件进行科学的概括和抽象,形成一些具有特定电磁性质的理想元件,即模型元件。

模型元件在电路中用相应的符号来表示。电阻、电容、电感和干电池的符号读者已熟悉,以后常用到的还有:理想电压源符号 Φ ;理想电流源符号 Φ 。

用电路模型替代实际电路元件的原则,如图 1-1 所示的手电筒电路就可用图 1-2 电路模型来表示。

二、电路中的基本物理量

为了对电路作定性或定量分析,就必须确定电路的基本描述量,在这里可分为基本量和复合量两大类。

1. 电流

(1) 电流的大小。电流的大小用电流强度来表示,简称电流,它是单位时间内通过导

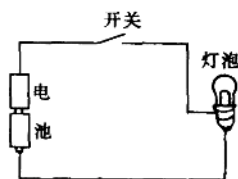


图 1-1 手电筒电路

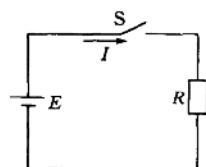


图 1-2 用电路符号绘制的电路图

线横截面积的电荷量，可表示为

$$i = \frac{dQ}{dt} \tag{1-1}$$

对于恒稳直流电，式 (1-1) 可改写为

$$I = \frac{Q}{t}$$

我国法定计量单位中电流的单位是安培 (A)，简称安，较小的电流可用毫安 (mA) 或微安 (μA) 等作单位。

(2) 电流的正方向。电荷的定向移动形成电流。习惯上人们规定正电荷的移动方向为电流的实际方向，但在分析较复杂的电路时，往往难以判断某支路电流的实际方向，而且有时电流的方向还会随时间交变，更难以表示其实际方向。为了解决这一问题，我们引入正方向 (参考方向) 的概念，即在分析电路之前，完全不考虑实际方向，而是假设一个电流方向。这个假定的电流方向称为电流的正方向，或称为参考方向。

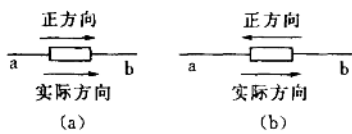


图 1-3 用箭头表示电流的正方向
(a) $I > 0$; (b) $I < 0$

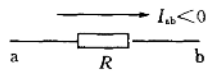


图 1-4 电流实际方向的确定

正方向可以任意选定，在电路中用箭头或双下标变量表示，如图 1-3 所示。图 1-3 (a) 中，电流的正方向可写作 I_{ab} ，表示电流从 a 点流向 b 点，显然 $I_{ab} = -I_{ba}$ 。同时规定：如果电流的正方向与实际方向一致，则电流为正，否则电流为负。在图 1-4 中，电流的正方向由 a 指向 b 且为负值，即 $I_{ab} < 0$ ，则说明电流的正方向与实际方向相反，即实际电流的流向从 b 流向 a。

需要指出的是，未标正方向时，电流的正负值是毫无意义的，本书中所标注的电流方向也都是正方向 (特殊说明除外)。

2. 电压与电位

(1) 电压。电压是衡量电场力做功能力大小的一个量，如图 1-5 中，设正电荷 Q 从 a 点移到 b 点时，电场力所做的功为 W ，则 a、b 两点间的电压为

$$U_{ab} = \frac{W}{Q} \tag{1-2}$$

在我国的法定计量单位中，电压的单位是伏特 (V)，简称伏，常用的单位还有微伏 (μV) 毫伏 (mV) 和千伏 (kV)。

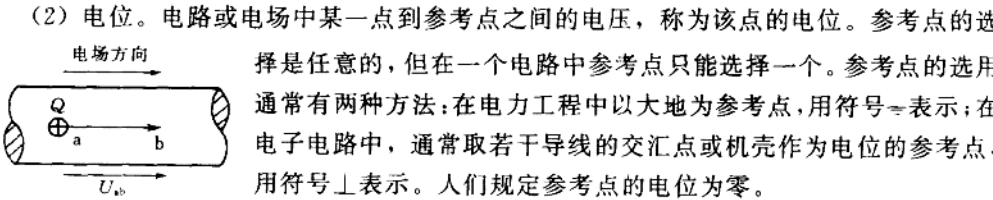


图 1-5 电压的概念

(2) 电位。电路或电场中某一点到参考点之间的电压，称为该点的电位。参考点的选择是任意的，但在一个电路中参考点只能选择一个。参考点的选用通常有两种方法：在电力工程中以大地为参考点，用符号 $\equiv$ 表示；在电子电路中，通常取若干导线的交汇点或机壳作为电位的参考点，用符号 $\perp$ 表示。人们规定参考点的电位为零。

电路中任何一点的电位值是与参考点相比较而得出的，比其

高者为正，比其低者为负。

电位与电压在表达形式上虽有区别，但从本质上是相同的。电路中两点之间的电压就是这两点间的电位差值。电位从形式上是指一点的电位，实质上仍然是两点间的电压，不过另一点是参考点而已。如图 1-6 中，选取电源的负极（C 点）作为参考点，那么 A、B 两点的电位对 C 点而言，分别为 V_A 和 V_B 。A、B 两点间的电压 U_{AB} 就是 V_A 与 V_B 之差，即 $U_{AB} = V_A - V_B$ 。所以电压又叫电位差，它是一个绝对量，与参考点的选择无关。电位是一个相对量，它与参考点的选取有关。

(3) 电压的正方向。与电流一样，电压也存在一个方向问题。电压的实际方向规定为由高电位端指向低电位端，即电位降的方向。电压的实际方向有时很难确定，因此也可任意假定一个方向，称之为参考方向或正方向。如图 1-7 所示电路中，若选 A 点为高电位点，标“+”号，则 B 点相对于 A 点为低电位点，标“-”号，表示这段电路电压的正方向是从 A 点指向 B 点。当电压的正方向与实际方向一致时，电压为正值，反之为负值。

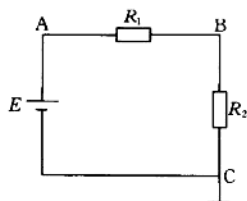


图 1-6 电压与电位比较

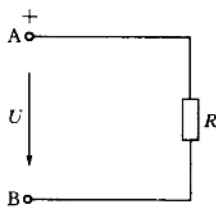


图 1-7 电压的正方向

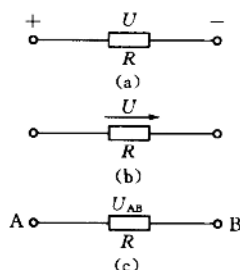


图 1-8 电压正方向的三种表示方式

电压的实际方向有三种表示方法，如图 1-8 所示。图 1-8 (a) 用“+”、“-”分别表示假定的高电位端和低电位端；图 1-8 (b) 则用箭头的指向表示，箭头由高电位端指向低电位端。图 1-8 (c) 用双下标来表示，电压的正方向即从下角标的第一个字母指向第二个字母，如 U_{AB} ，即表示 A 点高电位，B 点低电位。

(4) 电动势。电动势是衡量电源内部非电场力做功能力的物理量。在图 1-9 中，从外部看，正电荷在电场力的作用下从高电位（A 端）经负载 R 移向电源低电位（B 端）。为了保证电流的连续与持续，就需要非电场力将正电荷从电源负极经电源内部移到正极。

在数值上电动势等于非电场力把单位正电荷从负极经电源内部移到正极所做的功。因此，电动势的单位也是伏特（V）。

电动势的实际方向规定为电源力推动正电荷运动的方向，即电位升高的方向，所以电动势与电压的实际方向相反，如图 1-10 所示。

(5) 关联正方向。电压、电流的正方向在标定时都具有任意性，因而两者间应该相互独立，互不限制。但为处理问题方便，在同一段电路中，通常将两者的正方向取向一致，称之为关联正方向或关联参考方向，如图 1-11 所示。如电压与电流的正方向不一致，则称为非关联正方向，如图 1-12 所示。

关联正方向是一个很重要的概念，因为在电路理论中许多公式的导出均与关联正方向

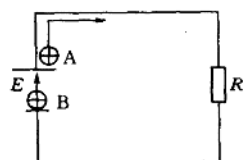


图 1-9 电动势的作用

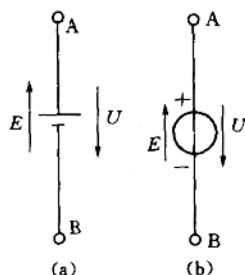


图 1-10 电动势的实际方向

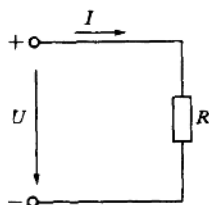


图 1-11 关联正方向

有关。以欧姆定律为例，在关联正方向条件下表示为

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = IR \quad (1-3)$$

若为非关联正方向，欧姆定律表示为

$$I = -\frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = -IR \quad (1-4)$$

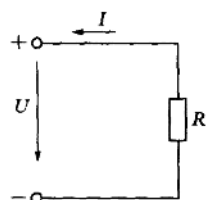


图 1-12 非关联正方向

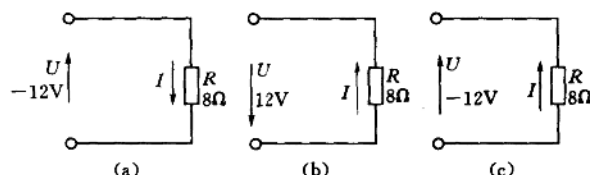


图 1-13 例 1-1 图

【例 1-1】 求图 1-13 中所示电路的电流 I 。

解 在图 1-13 (a) 中， U 、 I 为非关联正方向

$$I = -\frac{U}{R} = -\frac{-12}{8} = 1.5 \text{ (A)}$$

注意公式的正负号与电物理量本身的正负值不要相混淆。

在图 1-13 (b) 中， U 、 I 为非关联正方向

$$I = -\frac{U}{R} = -\frac{12}{8} = -1.5 \text{ (A)}$$

在图 1-13 (c) 中， U 、 I 为关联正方向

$$I = \frac{U}{R} = \frac{-12}{8} = 1.5 \text{ (A)}$$

【例 1-2】 求图 1-14 所示电路中 a、b、c 点的电位及电阻 R 。

解 根据图示电路，设 d 点为参考点。

$V_a = -9\text{V}$ ，即 a 点电位比 d 点电位低 9V；

$V_b = V_a + E_2 = -9 + 3 = -6 \text{ (V)}$ ，即 b 点电位比 d 点电位低 6V；

$V_c = E_3 = 4\text{V}$ ，即 c 点电位比 d 点的电位高 4V。

$$U_{bc} = V_b - V_c = -6 - 4 = -10 \text{ (V)}$$

$$R = \frac{U_{bc}}{I} = \frac{-10}{-2} = 5 \text{ (}\Omega\text{)}$$

【例 1-3】 分别计算图 1-15 (a) 电路中开关 S 打开时和闭合时 b 点和 c 点的电位。

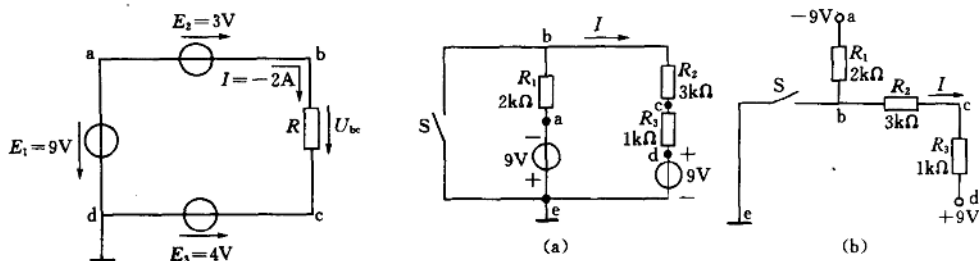


图 1-14 例 1-2 图

图 1-15 例 1-3 图

解 1) 当开关 S 打开时

$$I = \frac{U_{ad}}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{V_a - V_d}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{-9 - 9}{(2 + 3 + 1) \times 10^3} \\ = -3 \times 10^{-3} \text{ (A)} = -3 \text{ (mA)}$$

$$V_b = U_{bd} + V_d = I(R_2 + R_3) + V_d = -3 \times 10^{-3} \times (3 + 1) \times 10^3 + 9 = -3 \text{ (V)}$$

$$V_c = U_{cd} + V_d = IR_3 + V_d = -3 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^3 + 9 = 6 \text{ (V)}$$

2) 当开关 S 闭合时

$$I = -\frac{U_{db}}{R_2 + R_3} = -\frac{9}{(3 + 1) \times 10^3} = -2.25 \times 10^{-3} \text{ (A)} = -2.25 \text{ (mA)}$$

$$V_c = U_{cb} = -IR_2 = -(-2.25 \times 10^{-3}) \times 3 \times 10^3 = 6.75 \text{ (V)}$$

c 点电位也可沿 c→d→e 路径计算

$$V_c = U_{cd} + U_{de} = IR_3 + U_{de} = (-2.25) \times 1 + 9 = 6.75 \text{ (V)}$$

由此可见, 沿着不同的路径分别计算 c 点的电位, 所得的结果相同, 这说明电路中的参考点确定之后, 电路中任一点的电位就是一个确定的值, 它与该点到参考点的路径无关。

图 1-15 (a) 的电路图可简化为图 1-15 (b) 的电路, 不画出电源, 仅在各端标出其电位值。

(6) 电功率。我们把单位时间内电流所做的功称为电功率, 简称功率, 用 P 表示, 即

$$P = \frac{W}{t} \quad (1-5)$$

在图 1-16 中, 电压、电流为关联正方向。当正电荷 Q 从 A 点移到 B 点时, 根据电压的定义, 电能转换为其它形式的能量为

$$W = UQ = UI t$$

代入式 (1-4) 得

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UQ}{t} = UI \quad (1-6)$$

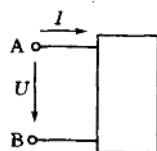


图 1-16 电功率的计算

若电压、电流为非关联正方向，则

$$P = -UI \quad (1-7)$$

式 (1-5) 说明在关联正方向情况下， $P > 0$ 时元件吸收功率（为负载）； $P < 0$ 时元件发出功率（为电源）。

式 (1-6) 说明在非关联正方向情况下， $P > 0$ 时元件发出功率， $P < 0$ 时元件吸收功率。

在法定计量单位中，功率的单位是瓦特（W）（简称瓦），常用单位还有 kW 或 mW。

在电能计量中，如果功率 P 的单位用千瓦（kW），时间 t 的单位用小时（h），则从公式 $W = UI t = P t$ 可知，电能的单位为千瓦小时（kW·h），习惯称为度。

第二节 电路的工作状态

一、有载运行状态与额定值

电路中的电流经负载而与电源形成闭合通路，电路的此种状态称为负载运行或有载运行状态，如图 1-17，此时电路中的电流为

$$I = \frac{E}{R_0 + R} \quad (1-8)$$

电阻两端的电压为

$$U = IR = E - IR_0 \quad (1-9)$$

由于内阻 R_0 的作用，负载两端的电压 U 总小于电动势 E 。

从式 (1-9) 可得 $E = IR_0 + IR$ ，两边同乘以电流 I 即为功率平衡方程式

$$EI = I^2 R_0 + I^2 R$$

$$I^2 R = EI - I^2 R_0$$

即

$$P = P_E - P_0$$

式中 P ——负载消耗的功率， $P = UI = I^2 R$ ；

P_E ——电源产生的总功率， $P_E = EI$ ；

P_0 ——电源内阻消耗的功率， $P_0 = I^2 R_0$ 。

在一个实际电路中，功率总是平衡的，即

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}}$$

式中 P_{out} ——发出功率；

P_{in} ——吸收功率。

实际的电源和负载所允许通过的电流都是有限度的，为了保证电气设备安全可靠、经济地工作，电气制造厂商就电气设备正常工作时的参数标在铭牌上，称之为额定值，常见的有：

(1) 额定电压 U_N ，即电气设备规定正常使用的电压。当电压过高或过低时，设备不能正常工作，而且可能损坏。

(2) 额定电流 I_N ，即设备长期（或规定时间内）允许通过的最大电流。当电流超过额定值时称为过载，小于额定电流时称为轻载或欠载，达到额定值时称为额定工作状态。一般电路允许短时过载，但长时间过载是不允许的。

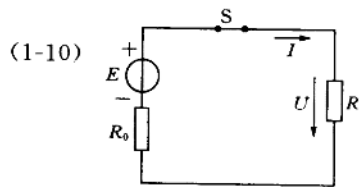


图 1-17 有载运行状态

(1-11)

(3) 额定功率 P_N ，即电气设备在额定电压时允许的最大输入或输出功率。

二、开路状态

如图 1-18 所示，当开关 S 打开，电路就处于开路状态（对电源而言，又称为空载状态）。

开路时电路的电阻对电源而言相当于无穷大，电路中电流为零。此时电源的端电压（空载电压）等于电源电动势，电源对外不输出功率。

三、短路状态

电流不经过负载而直接流回电源，我们称之为短路，如图 1-19 所示。

一般来说，电源内阻很小，导线电阻可视为零，短路电流 I_s 必然很大，这时电源所发出的功率全部消耗在电源内阻 R_0 上，因此会产生大量的热而烧毁电源。

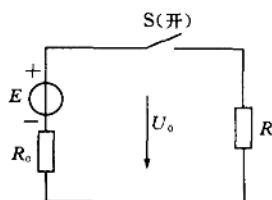


图 1-18 开路状态

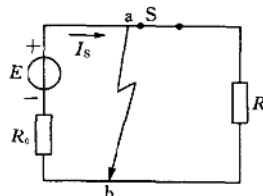


图 1-19 短路状态

短路通常是一种事故，应竭力避免。为了防止短路事故所引起的后果，实际电路中应接入熔断器或断路器，一旦发生短路能迅速将故障电路与电源自动断开。

有时根据需要，将电路中的某一部分或某一元件短路，常称为短接，应该把它与事故短路区分开。

第三节 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律的依据是两条基本原理，即基于电荷守恒的电流连续性原理和基于能量守恒的电位单值性原理。在叙述基尔霍夫定律之前，先定义几个术语：

(1) 支路。电路中通过同一电流的分支称为支路。图 1-20 中 ab 、 acb 、 adb 均是支路。其中 ab 支路不含电源，称无源支路， acb 、 adb 支路含有电源，称为有源支路。

(2) 节点。电路中三条或三条以上支路的连接点称为节点。图 1-20 中 a 、 b 均为节点。

(3) 回路。电路中任一闭合路径称为回路。图 1-20 中的 $adbca$ 、 $adba$ 、 $acba$ 均是回路。

(4) 网孔。闭合回路内部不含其它支路的回路称为网孔。图 1-20 中的 $adbca$ 、 $acba$ 均是网孔。

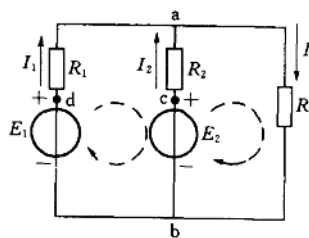


图 1-20 具有三条支路
两个节点的电路

一、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (KCL) 又称基尔霍夫第一定律。它的内容是：对于电路中的任何

一个节点, 在任何瞬间流入节点的电流之和, 必然等于流出节点的电流之和, 即

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}} \quad (1-12)$$

对于图 1-20 所示的电路节点 a, 显然可得到 $I_1 + I_2 = I$ 。

如果规定流入节点电流为正, 流出节点电流为负, 此定律又可描述为

$$\sum I = 0 \quad (1-13)$$

KCL 通常用于节点, 但也可以将节点推广到电路的一个闭合面 (即广义节点) 所包围的部分电路。在图 1-21 所示电路中

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

即流入闭合面的电流等于流出闭合面的电流, 这也体现出电流的连续性原理。

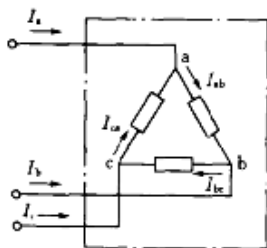


图 1-21 KCL 的扩展应用

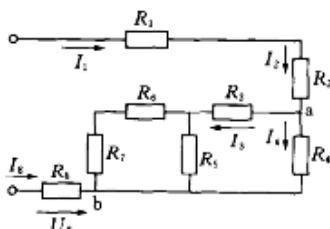


图 1-22 例 1-4 图

【例 1-4】 在图 1-22 中, 已知 $I_3 = -1\text{A}$, $I_4 = 2\text{A}$, $R_8 = 10\Omega$, 试计算 R_8 上的端电压 U_s 。

解 对节点 a 列 KCL 方程

$$I_1 = I_2 = I_3 + I_4 = -1 + 2 = 1 (\text{A})$$

按照 KCL 的扩展应用, a、b 间电路可以看作一个闭合面, 相当于一个广义节点

$$I_1 + I_8 = 0$$

$$I_8 = -I_1 = -1 (\text{A})$$

故 $U_s = I_8 R_8 = (-1) \times 10 = -10 (\text{V})$

根据负号可以看出, I_8 、 U_s 的实际方向与图中所示方向相反。

二、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (KVL) 又称基尔霍夫第二定律。它的内容是: 对电路中的任一回路, 沿任一规定的方向 (顺时针或逆时针) 绕行一周, 在任何瞬时, 各部分电压降的代数和恒等于零, 即

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

式中电压 U 的正方向与绕行方向一致取正号, 相反取负号。在图 1-20 所示的回路中, 若以顺时针方向作为绕行方向, 对回路 acbda 列 KVL 方程为

$$U_{ac} + U_{cb} + U_{bd} + U_{da} = 0$$

如果直接用电动势和电阻来列方程, 对图 1-20, 得到

$$U_{ac} = -I_2 R_2, U_{cb} = E_2, U_{bd} = -E_1, U_{da} = I_1 R_1 \\ -I_2 R_2 + E_2 - E_1 + I_1 R_1 = 0$$

则

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$$

即

$$\sum E = \sum (IR) \quad (1-15)$$

上式是 KVL 方程在电阻电路中的表达形式。它表明：在任一瞬间，电路中任一回路中电动势的代数和等于各个电阻元件上电压的代数和。

在应用 KVL 时，需要说明以下几点：

(1) 应用 KVL 时，需要先假设回路绕行方向。在应用式 (1-14) 时，凡电压的正方向与绕行方向一致者取正号，与绕行方向相反取负号。

(2) 闭合回路可以任意选取，但一定要是独立的闭合回路。如图 1-20 共有三个闭合回路，即 adbc a, acba, adba。若选任意两个作为独立回路后，则第三个回路就不再是独立回路了，其回路方程可以从前两个回路方程导出。

在图 1-23 所示电路中，也可对 acea 回路列 KVL 方程如下

$$I_C R_C + U_{CE} - U_{cc} = 0$$

即

$$U_{CE} = I_C R_C + U_{cc}$$

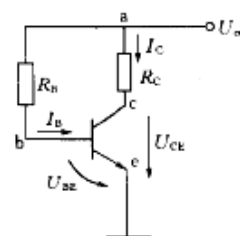


图 1-23 三极管电路的计算

第四节 电源的等效变换

在实际应用中，电源的种类很多。它们的共同点是向电路提供电压和电流，因此可将电源分成两大类：电压源和电流源。

一、实际电源的两种模型

一个实际电源，其端电压一般会随其供电电流的增大而有所下降。通常把电源电压和电流间的这种关系称为伏安特性或电源的外特性。在 $I-U$ 坐标平面中，伏安特性通常是一根呈下降趋势的曲线，如图 1-24 (b) 中的曲线 1 所示。显然，当电源开路时，电流 $I=0$ ，电源开路电压 U_{oc} 就等于电源电动势 E ，即图中 C 点；当电源两端短路时，电源端电压 $U=0$ ，电源中流过短路电流 I_{sc} ，即图中 D 点。

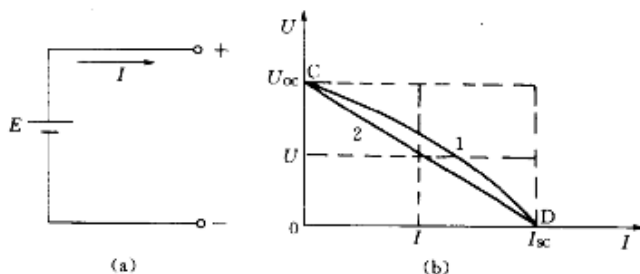


图 1-24 实际电源及其伏安特性

(a) 实际电源；(b) 电源的伏安特性曲线

为简化分析，通常把实际电源的伏安特性近似看成一条直线，如图 1-24 (b) 中的曲线 2。此时伏安特性可用直线方程描述如下

$$U = U_{oc} - IR_0 \quad (1-16)$$

式中, $R_0 = U_{OC}/I_{SC}$, 称为电源的内电阻, 简称内阻。 IR_0 即为电源内阻上的电压降。

根据式 (1-16), 可把实际电源描述成一个电压值为开路电压 U_{OC} (或电源电动势 E) 的恒定电压和内阻为 R_0 的串联电路, 我们称之为实际电源的模型, 如图 1-25 所示。

式 (1-16) 中, 当内阻 R_0 为零时, $U = U_{OC}$, 伏安特性成为平行于电流轴的一条直线, 如图 1-26 (a) 所示。此时电源的端电压与电流大小无关。这种端电压与电流无关的电源称为理想电压源或恒压源。图 1-26 (b) 为理想电压源的符号。

将式 (1-16) 变换可得到

$$\frac{U_{OC}}{R_0} = \frac{U}{R_0} + I \quad (1-17)$$

式中, $U_{OC}/R_0 = E/R_0 = I_{SC}$, 即短路电流, 它对固定的电源而言是不变的, 称之为激励电流, 可用 I_S 表示。

根据式 (1-17) 我们可以把实际电源描述成另一种形式, 它由一个电流值为短路电流 I_{SC} 的恒定电流源与电阻 R_0 并联构成, 如图 1-27 所示。

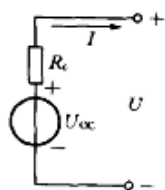


图 1-25 用电压源
构成实际电源
的电路模型

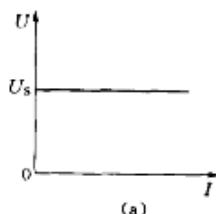


图 1-26 恒压源

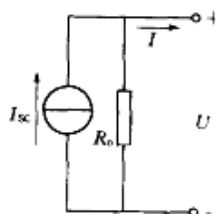
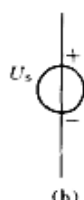


图 1-27 用电流源构成
实际电源的电路模型

假如某电源的短路电流为一定值而内阻 R_0 为无限大, 由式 (1-17) 可知, 该电源的电流 I 将与电源的端电压 U 无关, 其伏安特性为一条与电压轴平行的直线, 如图 1-28 (a) 所示。这种电流与端电压无关的电源称为理想电流源, 又称恒流源。其符号如图 1-28 (b) 所示。 I_S 表示它的电流值, 箭头为电流的正方向。

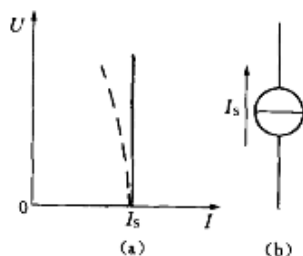


图 1-28 恒流源

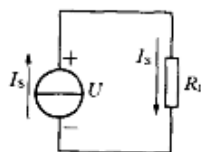


图 1-29 恒流源电路

理想电流源是内阻为无穷大而电流为恒值的理想电源。注意它两端仍有电压值, 此值取决于外电路。如图 1-29 所示, 很明显, 其两端的电压 $U = I_S R_L$ 。事实上, 任何实际电流源的内阻不可能为无限大, 它的伏安特性肯定要有所倾斜, 如图 1-28 (a) 中虚线所示。

【例 1-5】 已知某直流发电机外特性如图 1-30 (a) 所示, 试分别作出其特性范围内的两种电路模型。

解 首先将外特性曲线 AB 近似看作一条直线。从图 1-30 (a) 可知: 当 $I=10\text{A}$ 时, $U=115\text{V}$ (B 点); 当 $I=0$ 时, $U_{\text{oc}}=120\text{V}$ (A 点, 发电机开路)。则内阻为

$$R_0 = \frac{U_{\text{oc}} - U}{I} = \frac{120 - 115}{10} = 0.5 (\Omega)$$

短路电流为

$$I_{\text{sc}} = \frac{U_{\text{oc}}}{R_0} = \frac{120}{0.5} = 240 (\text{A})$$

所求的两种电路模型见图 1-30 (b)。

二、电源的等效变换

同一个实际电源可以有两种不同形式的电路模型, 它们的伏安特性是相同的, 我们把具有相同伏安特性的不同电路称为等效电路, 或者说它们互为等效。然而这种等效是相对于外电路而言的。如图 1-31 所示, 一个恒压源 E (U_s) 与内阻 R_0 串联的电路可以等效为一个恒流源 I_s 与内阻 R_0 并联的电路。因为对外接负载 R_L 来说这两个电源提供的电压和电流完全相同, 即 $U=U'$, $I=I'$, 所以对负载而言, 这两个电源是相互等效的, 它们之间可以变换。变换的条件为: $R_0=R'_0$, $E=I_s R'_0$, $I_s=E/R_0$ 。

变换时要注意 I_s 与 E 的正方向必须保持一致, 即 I_s 的方向对应从 E 的负极指向正极。

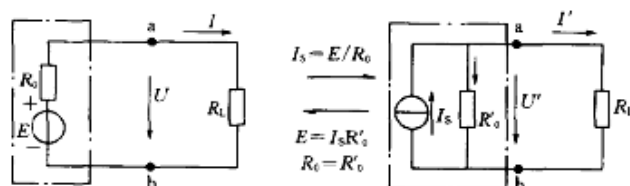


图 1-31 电压源与电流源的等效变换

【例 1-6】 试求图 1-32 (a) 所示电路的等效电流源模型并求出流经 15Ω 电阻中的电流。

解 图 1-32 (a) 中 $U_s=10\text{V}$, $R_0=5\Omega$, 则 $I_s=2\text{A}$, I_s 的方向为箭头向下, 再把 5Ω 的电阻与 I_s 并联即可, 如图 1-32 (b) 所示。

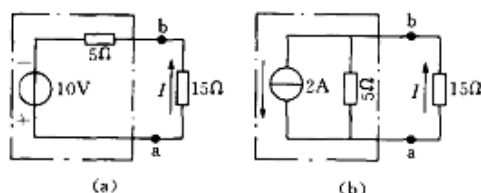


图 1-32 例 1-6 图

现在来检验这两种模型分别对 15Ω 电阻提供的电流, 图 1-32 (a) 中

$$I = \frac{10}{20} = 0.5 (\text{A})$$

图 1-32 (b) 中

$$I = \frac{5}{15+5} \times 2 = 0.5 (\text{A})$$

若要求出两种模型中流过 5Ω 电阻中的电流, 则图 1-32 (a) 中 $I=0.5\text{ A}$, 图 1-32 (b) 中 $I'=2-0.5=1.5\text{ (A)}$ 。

假如 15Ω 电阻断开, 图 1-32 (a) 所示电路中无电流流过, 功耗为零, 而图 1-32 (b) 所示电路中电流为 2 A , 则功耗 $P=I_3^2 R_0$ 。

从这里可以看出, 这种等效是针对外电路 (如 15Ω 电阻) 而言的, 对电源内部来说, 这种等效是不成立的。

需要指出, 理想电压源与理想电流源之间没有等效关系, 因为它们的伏安特性不一样。电源的等效变换可以作为分析电路的一种方法。

【例 1-7】 求图 1-33 (a) 中的端电压 U_{ab} 。

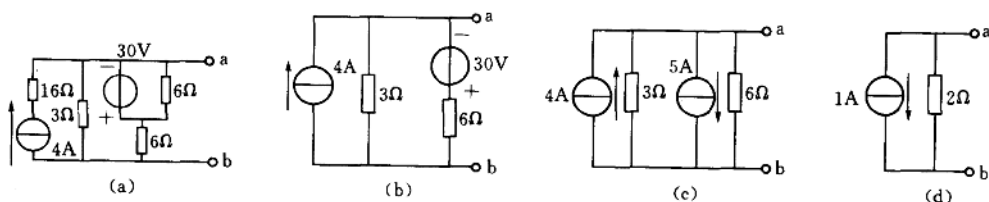


图 1-33 例 1-7 图

解 从电源模型分析, 与理想电压源串联的电阻以及与理想电流源并联的电阻才相当于电源的内阻。在图中与 30 V 恒压源并联的 6Ω 电阻并非它的内阻。因为这个并联电阻的大小以及存在与否, 并不影响其本身的端电压, 其值恒为 30 V , 因此这个电阻可以去掉。

同样, 16Ω 这个电阻也可去掉, 这样图 1-33 (a) 可以等效为图 1-33 (b)。再将 30 V 的恒压源与 6Ω 电阻串联视作电压源并且等效变换成电流源, 得到图 1-33 (c), 其中激励电流 $I_{S1}=30/6=5\text{ (A)}$ 。合并电流源, 并将并联电阻化为等效电阻, 得到图 1-33 (d), 所以

$$U_{ab} = -(1 \times 2) = -2\text{ (V)}$$

第五节 支路电流法

支路电流法是求解电路最基本的方法。这种方法是以前支路电流为未知量, 直接应用 KCL 和 KVL 分别对节点和回路列出所需要的方程组, 然后联立求解出各未知电流。

现以图 1-34 所示电路为例, 说明支路电流法的求解过程。

该电路中有三条支路, $b=3$, 两个节点, $n=2$, 有三个回路, $L=3$ 。首先在电路图中选取各支路电流的正方向和回路绕行方向。因为有三条支路则有三个未知电流, 需要列出

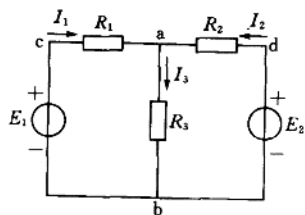


图 1-34 两个电源并联的电路

三个独立方程才能得到唯一解。应用 KCL 分别对节点 a、b 列出的方程实际上是相同的, 即 a、b 节点中只有一个节点电流方程是独立的, 因此对具有两个节点的电路, 只能列出一个独立的 KCL 方程。

再按 KVL 列回路电压方程, 每个方程式中至少要包含一条未曾使用的支路 (即没有列过方程) 的电流或电压, 因此在图 1-34 中只有两个独立回路电压方程式。据上述, 可列

出如下三个独立的方程式:

$$\text{节点 b:} \quad -I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

$$\text{abca 回路:} \quad I_3 R_3 + I_1 R_1 = E_1$$

$$\text{adba 回路:} \quad -I_2 R_2 - I_3 R_3 = -E_2$$

上式称为支路电流方程式, 联立求解, 便可求得支路电流 I_1 、 I_2 和 I_3 , 由支路电流就可求出相应的电压和功率。

通过讨论, 用支路电流法求解电路的步骤可归纳如下:

- (1) 假定各支路电流的正方向。
- (2) 用 KCL 列出 $(n-1)$ 个电流方程。
- (3) 用 KVL 列出独立回路方程, 一般可取网孔来列方程。
- (4) 联立求解各方程, 求出各未知电流。

【例 1-8】 在图 1-34 所示电路中, 已知 $E_1 = 250\text{V}$, $E_2 = 239\text{V}$, $R_1 = 1\Omega$, $R_2 = 0.5\Omega$, $R_3 = 30\Omega$, 试求各支路电流并进行验算。

解 将已知数据代入前述方程组得

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$I_1 + 30I_3 = 250$$

$$0.5I_2 + 30I_3 = 239$$

联立求解得: $I_1 = 10\text{A}$, $I_2 = -2\text{A}$, $I_3 = 8\text{A}$ 。

验算: 对未选用的回路应用 KVL 验证, 沿 cadbc 回路

$$\sum E = E_1 - E_2 = 250 - 239 = 11 \text{ (V)}$$

$$\sum IR = I_1 R_1 - I_2 R_2 = 10 \times 1 - (-2) \times 0.5 = 11 \text{ (V)}$$

方程平衡, 计算无误。

也可以用功率平衡关系验证, 请读者自行验证。

第六节 节点电压法

以节点电压为未知量列 KCL 方程则为节点电压法。若在电路中任选一节点作为参考点, 以它的电位为零作为参考电位, 则其它各节点与参考点间的电压即为该点的电位, 故节点电压法又称节点电位法。

此种分析方法是以节点电压代替支路电流作为未知量, 求解联立方程, 步骤如下:

- (1) 在电路中任选一节点为参考点。
- (2) 应用 KCL 列出其余 $n-1$ 个节点电流方程。
- (3) 应用 KVL 和欧姆定律, 列出节点电压与支路电流的关系式, 并将其代入节点电流方程, 得出 $n-1$ 个节点电压方程。
- (4) 联立求解方程组, 得各节点电压。
- (5) 利用节点电压与支路电流的关系式, 求各支路电流及其它待求量。

【例 1-9】 图 1-35 所示电路, 已知 $E_1 = 12\text{V}$ 、 $E_2 = -12\text{V}$ 、 $R_1 = 2\text{k}\Omega$ 、 $R_2 = 4\text{k}\Omega$ 、 $R_3 = 1\text{k}\Omega$ 、 $R_4 = 4\text{k}\Omega$ 、 $R_5 = 2\text{k}\Omega$, 用节点电压法求各支路电流。