

DIAN GONG

JI SHU JI CHU

电工技术基础

佘兆铭 马伟林
王建新 田子华 编著

云南大学出版社

电工技术基础

余兆铭 马伟林
王建新 田子华 编著

云南大学出版社

滇新登字 07 号

责任编辑:周永坤

封面设计:刘 雨

电工技术基础

余兆铭 马伟林
王建新 田子华 编著

云南大学出版社出版发行
(云南大学校内)
云南大学出版社印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:26.2 字数:655 千字
1995 年 10 月第一版 1995 年 10 月第一次印刷
印数:0001—1000 册

ISBN 7-81025-522-3/TM · 1

定价:25.00 元

前 言

近几年来，随着教学改革的深入及为适应综合性大学理科教学面向经济建设的需要，一些应用性基础课程已列入教学计划。虽然专业性较强的电路、电工类教材已相当多，但以综合大学理科学生为对象的电路、电工类教材尚不多见。编者正是以此为出发点而编写了本书。

本书初始作为试用教材供云南大学物理系、信息与电子科学系和成人教育学院本专科学生使用。从试用教材至今正式出版，已历时五年多。编者在教学实践中，广泛听取教师 and 学生的意见，对原教材作了认真地增删和修改，完成了本教材的编写工作。

本书取材方面力求少而精。在加强物理概念的同时，注重理论与实践的结合，以有利于读者增强解决实际问题的能力和达到学以致用效果。全书编写中设置比较多的例题和习题，不少例题具有典型性。

参加本书编写的有余兆铭、马伟林、王建新、田子华四位同志。其中余兆铭编写了第一章和第五章；马伟林编写了第三章、第八章和第九章；王建新编写了第二章和第六章；田子华编写了第四章和第七章。全书由余兆铭统稿。书中全部插图由王建新用计算机绘制。

本书在编写、出版过程中，得到了云南大学物理系的关心和大力支持。云南大学出版社周永坤、张世鸾二同志对全书编写提出了宝贵意见和对全书进行了编辑工作。编者在此谨致谢意。

由于受水平及时间的限制，书中疏漏及不妥之处，殷切希望使用本书的师生及其他同志们不惜赐教、指正。

编 者

一九九五年二月于昆明

目 录

第一章 直流电路	(1)
§ 1-1 电路和电路的基本物理量	(1)
§ 1-2 电路的基本定律	(4)
§ 1-3 电压源、电流源及其等效互换	(14)
§ 1-4 简单电阻网络的计算	(21)
§ 1-5 网络分析及支路电流法	(29)
§ 1-6 网孔电流法	(34)
§ 1-7 节点电压法	(37)
§ 1-8 迭加原理	(43)
§ 1-9 戴维南定理与诺顿定理	(48)
§ 1-10 Y- Δ 电阻网络的等效变换	(57)
小结	(65)
习题	(66)
第二章 正弦交流电路	(77)
§ 2-1 正弦交流电路的基本概念	(77)
§ 2-2 正弦交流电的相量表示法	(81)
§ 2-3 克希荷夫定律的相量形式	(86)
§ 2-4 单一参数元件的正弦交流电路	(87)
§ 2-5 简单正弦交流电路	(97)
§ 2-6 正弦交流电路的功率	(104)
§ 2-7 复杂正弦交流电路	(108)
§ 2-8 正弦交流电路的频率特性	(111)
小结	(120)
习题	(122)
第三章 正弦三相交流电路	(129)
§ 3-1 三相交流电的基本概念	(129)
§ 3-2 三相电路的计算	(132)
§ 3-3 三相电路的功率	(138)
小结	(142)
习题	(143)
第四章 非正弦周期电流电路	(145)
§ 4-1 概述	(145)
§ 4-2 非正弦周期函数的傅里叶级数	(145)
§ 4-3 几种对称周期函数的傅里叶级数展开式	(150)

§ 4-4 傅里叶级数的复数形式	(154)
§ 4-5 非正弦周期电流、电压的平均值、有效值和平均功率	(156)
§ 4-6 非正弦周期电流电路的计算	(158)
小结	(163)
习题	(164)
第五章 简单电路中的过渡过程	(167)
§ 5-1 概述	(167)
§ 5-2 RC 串联电路的过渡过程	(171)
§ 5-3 RL 串联电路的过渡过程	(189)
§ 5-4 一阶电路过渡过程解的一般形式	(201)
§ 5-5 RLC 串联电路的过渡过程	(208)
小结	(226)
习题	(227)
第六章 双口网络	(231)
§ 6-1 概述	(231)
§ 6-2 双口网络的基本方程和参数	(232)
§ 6-3 双口网络不同参数间的互换	(241)
§ 6-4 双口网络的等效电路	(244)
§ 6-5 双口网络的正弦稳态网络函数	(246)
小结	(250)
习题	(250)
第七章 磁路和变压器	(253)
§ 7-1 磁路及其基本定律	(253)
§ 7-2 直流铁芯线圈的磁路计算	(255)
§ 7-3 交流铁芯线圈电路	(259)
§ 7-4 具有直流励磁的交流铁芯电路	(265)
§ 7-5 变压器的构造和工作原理	(266)
§ 7-6 变压器的等值电路和相量图	(271)
§ 7-7 几种常用的小型变压器	(273)
§ 7-8 小功率电源变压器设计	(274)
小结	(277)
习题	(278)
第八章 电机简论	(281)
§ 8-1 直流电机	(281)
§ 8-2 交流电机	(300)
§ 8-3 微电机	(338)
小结	(359)
习题	(362)
第九章 电动机的接触控制及自动信号联锁保护	(366)

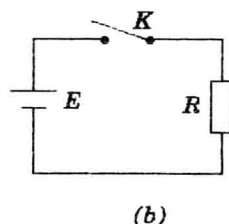
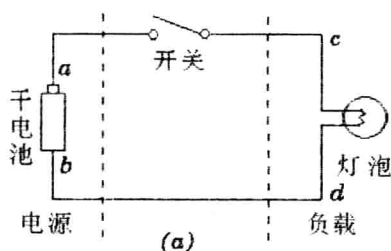
§ 9-1 常用低压控制电器	(366)
§ 9-2 鼠笼式异步电动机的控制	(377)
§ 9-3 单相异步电动机的控制	(386)
§ 9-4 自动信号联锁保护	(389)
小结	(397)
习题	(397)
附录一 GEIB 硅钢片规格表	(400)
附录二 漆色铜线规格表	(401)
附录三 部分习题参考答案	(402)

第一章 直流电路

直流电路是电路分析的入门知识，也是进一步学习交流电路及以后各章的基础。本章在复习电流、电压、电动势、欧姆定律和克希荷夫定律等基本概念和基本规律的基础上，引入电压源和电流源的概念，进一步介绍分析直流电路的几种常用方法和线性电路的一些基本定理，它们是：¹支路电流法、²网孔电流法、³节点电压法、⁴迭加原理、⁵戴维南定理、⁶诺顿定理以及⁷ $Y-\Delta$ 电阻网络的等效变换。最后，对受控源电路的计算作了简要介绍。这些方法和定理不仅适用于直流电路，一般说来，也适用于以后各章所讨论的电路。因此，熟练地掌握和应用这些方法和定理具有重要的意义。

§ 1-1 电路和电路的基本物理量

由若干个电气装置或器件按照一定方式联接起来所构成的电流通路叫做电路。电源、电阻器、电感器、电容器、晶体管、电子管等都是组成电路的装置或器件，统称为电路元件。



元件：电阻器、电感器、电容器、晶体管、电子管等。
器件：晶体管、大规模集成电路。

图 1-1

实际应用的电路种类很多，形式和结构也各不相同，但不论电路结构的复杂程度如何，就各元件在电路中的作用来说，可将电路归结为由三个主要部分组成，即电源、负载、联接电源和负载的导线及开关。一般说来，电源是电路中能量的提供者，负载是电路中能量的消耗者，导线则是能量的传输者。图 1-1 (a) 所示的手电筒电路就是一个最简单的电路，其中干电池为电源，灯泡为负载，其目的是将电能从电池输送到灯泡。图 1-1 (b) 是实物图 (a) 的电路原理图，简称为电路图。其中字母 E 、 R 、 K 及其符号分别代表电源、负载和开关。

电源是一种能将其它形式的能量转换成电能的装置，如发电机、干电池和光电池等，它们分别将机械能、化学能和光能转换成电能，向电路提供能量。负载是电路中消耗能量的装置，它能将电能转换成其它形式的能量消耗掉，如电炉、电阻器、电动机和灯泡等，它们分别将电能转换成热能、机械能和光能等。因此，常用“电阻”这样一个理想电路元件来反映负载消耗电能的特征。当电流通过它时，在它内部进行着将电能转换成热能或其它形式的能量的不可逆过程。在电路中还有一种“储能元件”，如各式各样的电感线圈和各种

类型的电容器，它们可以将电能分别转换成磁场能和电场能储存起来，也可将储存的磁场能和电场能释放出来，其能量转换是可逆的。关于储能元件将在下一章中介绍。

对电源来说，由负载和导线组成的电路，叫做外电路，电源内部的电流通路叫做内电路，二者构成一个完整电路，即闭合电路。

电路中各个元件的能量转换状况，除了与反映元件自身电磁性能的参量（如电源的电动势 E 、内阻 r_0 ，负载的电阻 R 等）有关外，还与元件中通过的电流 I 和元件两端的电压 U 有关。当构成电路的元件和电路的结构确定后，电路中各个元件（或各段电路）中的电流和电压是反映上述能量转换的基本物理量。下面分别作简要介绍。

一、电流

带电粒子作有规则的运动就形成电流。在金属导体中，带电粒子是带负电的自由电子，它在电场作用下逆着电场方向作有规则的运动形成电流；在电解液导体中，带电粒子分别为带正电荷和带负电荷的正、负离子，在电场作用下，正离子顺电场方向、负离子逆电场方向作有规则的运动形成电流。

衡量电流大小的物理量是“电流强度”。电流强度在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电量。电流强度简称为电流，用字母 i 表示。设在 dt 时间内通过导体横截面 S 的电量为 dq ，则电流强度

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

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。

如果电流的大小和方向都不随时间变化，就叫做恒定电流，简称直流（简写为 dc 或 DC）。其电流强度用大写字母 I 表示。如果电流的大小和方向随时间作周期变化，则称为交流电流，简称交流（简写为 ac 或 AC），用小写字母 i 表示。

在国际单位制（简写为 SI）中，电流的单位为安培（库 / 秒），简称安，记作 A。电流的较小单位有毫安（mA）、微安（ μA ）和纳安（nA），它们之间的关系是：

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

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

$$1\text{nA} = 10^{-9}\text{A}$$

在简单的直流电路中，电流的实际方向容易确定，但在复杂一些的电路中，电流的实际方向往往难以判断。在交流电路中，电流的方向随时间变化，没有确定的方向，无法用一个固定的箭号表示它的实际方向。为解决这个问题，需要引入参考方向的概念。电流的参考方向是人为假设的一个电流方向，在电路图中用箭头表示。并规定：当电流的实际方向与参考方向一致时，电流为正值；反之，电流为负值。这样，我们就可以根据电流的正负及参考方向来判断电流的实际方向。电流的参考方向又叫做电流的正方向。以后在分析、计算电路时，如果不知道电流的实际方向，可以任意假定电流的参考方向，并以它为依据建立有关的电路方程，再从计算结果的正负来确定电流的实际方向。

二、电压

带电粒子在电场力作用下从电路中一点 a 移到另一点 b 时，需要克服阻力做功。衡

量电场力作功能力的物理量是“电压”。电压在数值上等于电场力把单位正电荷从电场中 a 点移到 b 点所作的功。设电场力把电荷 dq 从电场中的 a 点移到 b 点的过程中所作的功为 dW ，则 a 、 b 两点间的电压为

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1-2)$$

如果电压的大小和方向（或极性）都不随时间变化，就叫做恒定电压或直流电压，用大写字母 U 表示；如果电压的大小和方向随时间作周期性变化，则称为交流电压，用小写字母 u 表示。

在国际单位制（SI）中，电压的单位为伏特（焦耳 / 库仑），简称伏，记作 V，电压的其它单位有千伏（kV），毫伏（mV），微伏（ μV ）等，它们之间的关系是：

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}$$

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

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

从物理学中知道，在一般电路问题中，任意两点间的电压只与这两点（始点和终点）的位置有关，而与电荷移动的路径无关。为了便于分析，可以在电路中（特别是比较复杂的电路中）任取某一点 O 作为参考点，把其它各点与参考点 O 之间的电压称为各点的电位，例如电路中 a 点和 b 点的电位为：

$$U_a = U_{ao} \quad U_b = U_{bo}$$

在同一电路中，只能选取一个参考点。由定义易知：参考点的电位等于零。当 U_a （或 U_b ）大于零时， a 点（或 b 点）的电位为正；当 U_a （或 U_b ）小于零时， a 点（或 b 点）的电位为负。

对图 1-2 所示电路中的任意两点 a 、 b ，由定义可得

$$U_a = U_{ao} = U_{ab} + U_{bo} = U_{ab} + U_b$$

$$\text{即} \quad U_{ab} = U_a - U_b \quad (1-3)$$

式（1-3）表明，电路中任意两点 a 、 b 间的电压等于 a 、 b 两点的电位之差。因此，电压又称为电位差。

参考点 O ，在电路图中常用接地符号表示。电位参考点的选择是任意的，选取不同的参考点，电路中各点的电位不同，但参考点一经选定，各点的电位值便唯一地确定，这说明电位具有“单值性”。也就是说电路中各点的电位与参考点的选取有关。但任意两点之间的电压（或电位差）与参考点的选取无关。

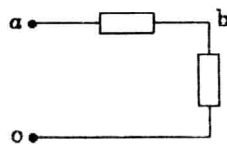


图 1-2

电压本是标量，但在分析电路时，我们也说它具有方向（或极性）。电压的方向规定为由高电位端指向低电位端，即电位降落的方向。与电流一样，当电压的实际方向不知道时，也可以任意规定电压的参考方向（或参考极性）。当电压的实际方向与参考方向一致时，电压为正值，反之，电压为负值。电压的参考方向可以在元件（或支路）侧边用箭头“ $\downarrow$ ”表示，也可以在元件两端用“+”、“-”符号表示，“+”为高电位端，“-”为低电位端，如图 1-3 所示。

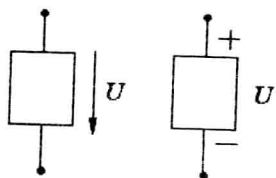


图 1-3

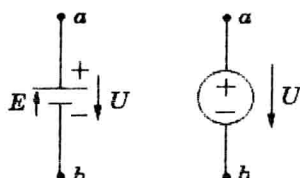


图 1-4

三、电动势

在图 1-1 电路中，由于存在电池 ab ，才能维持电流的持续流动。这表明在电源内部必定存在某种外力（又称为电源力，它是一种非电场力）把正电荷源源不断地从电位低的负极 b 输送到电位高的正极 a 。描述电源作功能力的物理量是“电动势”。电动势在数值上等于电源力把单位正电荷从负极（ b ）移到正极（ a ）所作的功。电动势的方向规定为由低电位的负极（ b ）指向高电位的正极（ a ）。

大小和方向不随时间变化的电动势叫做直流电动势，用大写字母 E 表示，其电路符号如图 1-4 所示。

由于电源力的作用，使电源的正极为高电位端，负极为低电位端，因而在电源内部存在由高电位指向低电位端的电场。也就是说，在电源内移动的电荷，除受电源力作用外，同时还受到电场力的作用。例如，当电源与外电路没有接通时（称为电源处于“开路”状态），电源中的电荷没有发生移动，这表明作用在电荷上的电源力和电场力等大反向，或者说电源力和电场力对正电荷作功的本领相同。因此，电源开路时，电源正负极之间的电压与电动势在数值上相等。

对于实际的电源，其正负极之间的电压总是随通过它的电流而发生变化。例如，当电源接上负载后，其端电压会降低，这表明在电源内部有电能消耗。因此，可以用一个等值电阻来表示电源内部的能量消耗，这个等值电阻称为电源的内电阻，简称内阻，用符号 r_0 表示。电动势 E 和内阻 r_0 是描述一个实际电源的两个参数，对于确定的电源，它们的数值是确定的，因此常用图 1-5 所示的三种电路符号表示一个实际电源。只有当内阻 $r_0 = 0$ 时才能用图 1-4 表示，内阻为零的电源称为理想电压源。

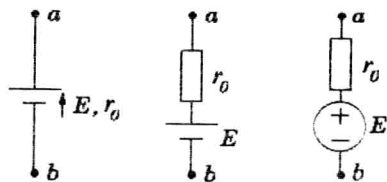


图 1-5

在 SI 单位制中，电动势的单位仍用 V、kV、mV 等。

§ 1-2 电路的基本定律

本节介绍欧姆定律、克希荷夫定律和焦耳定律。这些定律是分析电路的依据，不仅适用于直流电路，原则上也适用于其它电路。因此，熟练地掌握和应用这些定律十分重要。

一、欧姆定律

1. 欧姆定律的内容:

流过电阻的电流 I 与电阻两端的电压 U 成正比。在电压与电流的参考方向一致时, 如图 1-6 (a) 所示, 欧姆定律的数学表示式为

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

如果电压与电流的参考方向相反, 如图 1-6 (b) 所示, 则欧姆定律为

$$U = -RI$$

(1-4) 式表明, 电阻元件的特性是:

电流流过电阻时, 在顺着电流方向会产生电压 (降), 在任何时刻, 其电压与电流之间的关系都符合欧姆定律。比例常数 $R (U/I)$ 是联系电阻中电流和端电压的一个电气参数, 称为电阻元件的电阻, 简称电阻。这样, 电阻这个术语及其符号 R , 一方面表示一个消耗电能的理想电阻元件, 同时又是表示这个元件性能的参数。

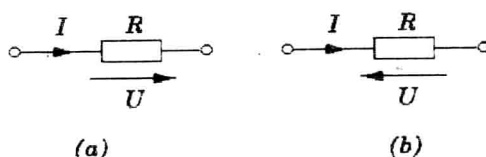


图 1-6

电阻的单位是“欧姆” (伏 / 安), 简称欧, 记作 Ω 。有时还用 $k\Omega$ (千欧)、 $M\Omega$ (兆欧) 等单位, $1k\Omega = 10^3\Omega$ 、 $1M\Omega = 10^6\Omega$ 。

电阻的倒数叫做电导, 用 G 表示, 即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-5)$$

电导的单位是“西门子” (安 / 伏) 记作 S 或 Ω^{-1} 。

引入电导后, 欧姆定律可表示为

$$I = GU \quad (1-6)$$

如果电阻 R 是与其端电压及电流无关的常量, 称为线性电阻; 如果电阻 R 与其端电压及电流有关, 即当电压和电流改变时, 电阻值 R 也随之改变, 则称为非线性电阻。严格说来, 所有的实际电阻元件 (如电阻器、电灯、电炉等) 都是非线性的, 但在一定的工作电流范围内, 许多电阻元件的电阻 R 随其端电压及通过它的电流变化很小, 可以近似地当作线性电阻。必须指出, 欧姆定律只适用于线性电阻元件。

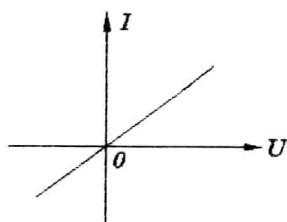


图 1-7

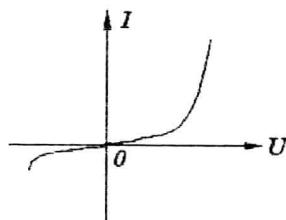


图 1-8

在电路分析中, 常用电路元件的电压 U 和电流 I 之间的函数关系来表明元件的特性, 这种函数关系称为元件的伏安关系或伏安特性。与它对应的函数曲线称为伏安特性曲线。如果元件的伏安特性曲线是一条直线, 就把这类元件称为线性元件, 图 1-7 所示的曲线是线性电阻的伏安特性曲线; 如果伏安特性曲线不是一条直线, 则这类元件称为非线性元件, 图 1-8 所示的曲线是二极管的伏安特性曲线, 它相当于一个非线性电阻。

2. 一段含源电路的欧姆定律

一段含源电路的欧姆定律是反映在一段含有电源的电路中, 其两端的电压 U 与这段电路中的电流 I 、电动势 E 及电阻 R 之间的关系。该定律的内容是: 任意一段含源电路两端的电压恒等于构成该电路的各个串联元件上的电压的代数和。

图 1-9 所示电路中的实线部分 (acb 段) 为一段含源电路, 由图示电压和电流的参考方向, 根据电压与路径无关的特性有

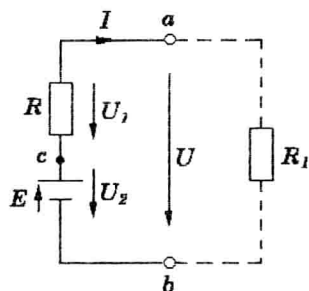


图 1-9

$$U_{ab} = U_{ac} + U_{cb}$$

即 $U = U_1 + U_2$

而 $U_1 = -RI \quad U_2 = E$

所以 $U = E - RI$

(1-7)

若该段电路中含有多个电阻和电源串联, 则有

$$U = \sum E_i - \sum (R_i I_i) \quad (1-8)$$

(1-7) 式和 (1-8) 式即为一段含源电路欧姆定律的数学表示式。其中 U 为顺电流参考方向时, 该段电路的终端与始端之间的电压; E_i 是第 i 个电源电动势的代数值, E_i 的正负视其方向与电流 I 的参考方向是否一致来确定, 凡一致的取正, 反之为负。例如对图 1-10 所示的一段含源电路 (acb 段), 则有

$$-U = U_{ba} = (E_1 - E_2) - (r_1 I + r_2 I)$$

即 $U = E_2 - E_1 + (r_1 + r_2)I$

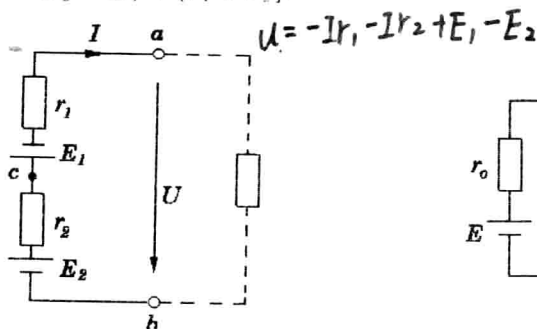


图 1-10

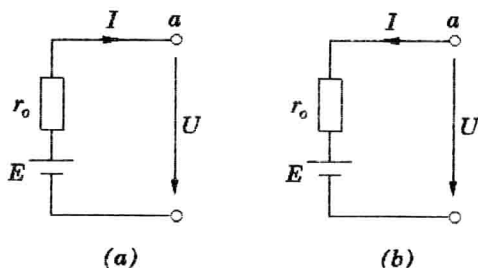


图 1-11

例 1-1 已知电源的电动势为 E , 内阻为 r_0 , 试分别写出电源处于放电和充电时的端电压。

解 图 1-11(a) 为电源处于放电情况的电路, 根据含源电路的欧姆定律, 其端电压为

$$U = E - r_o I$$

图 1-11(b) 为电源处于充电情况的电路, 则有

$$-U = -E - r_o I$$

即
$$U = E + r_o I$$

可见, 一般情况下, 电源的 $U \neq E$, 电源放电时 $U < E$; 充电时 $U > E$; 仅当电路断开时 ($I = 0$) 或内阻 $r_o = 0$ 时, 电源的端电压才等于电动势, 即 $U = E$ 。

二、克希荷夫定律

克希荷夫定律包括第一和第二定律, 它们分别概括了电路中电流和电压遵循的基本规律, 因此又分别称为克希荷夫电流定律和电压定律。下面先介绍几个名词。

支路: 电路中的任一分支叫做支路, 如图 1-12 中的 $a1b$ 、 $a2b$ 和 $a3b$ 都是支路。该电路有三条支路, 其中 $a1b$ 、 $a2b$ 中含有电源称为含源支路。

节点: 电路中三条或三条以上支路的连接点叫做节点, 如图 1-12 中的 a 点和 b 点都是节点, 该电路有两个节点。

回路: 电路中的任一闭合路径叫做回路, 如图 1-12 中的 $a1b2a$ 、 $a2b3a$ 和 $a1b3a$ 都是回路。该电路有三个回路。

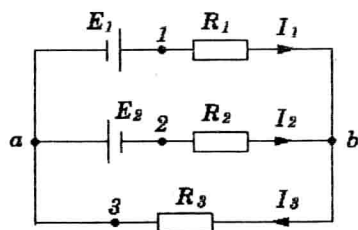


图 1-12

1. 克希荷夫电流定律 (记为 KCL)

克希荷夫电流定律的内容是: 对于电路中的任何一个节点, 在任一时刻, 流出 (或流入) 该节点的电流的代数和恒等于零。其数学表示式为

$$\sum I_i = 0 \quad (1-9)$$

该式又称为节点电流方程或 KCL 方程。式中 I_i 是与该节点相联接的第 i 条支路中电流的代数值, I_i 的 “+” 或 “-” 应根据它的参考方向是流出该节点还是流入该节点来确定, 如果规定流出为正, 则流入负; 反之, 如果流出为负, 则流入为正。例如对图 1-12 中的节点 a , 可写出节点电流方程为

$$\sum I_i = I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

或
$$I_1 + I_2 = I_3$$

可见, 克希荷夫电流定律又可以表述为: 在任一时刻, 流入任一节点电流的总和恒等于流出该节点电流的总和。这正是电流连续性的体现, (否则如果流入节点的电流不等于流出节点的电流, 则单位时间内流入节点的电量与流出节点的电量不相等, 在该节点上势必会有电荷的堆积, 这是违反实验事实的。)

克希荷夫电流定律与各支路中所接元件的性质无关, 对线性电路或非线性电路都普遍适用。

根据电流的连续性, 可以把节点电流定律推广到电路中任一假设的封闭曲面。例如对图 1-13 中的封闭曲面 S , 电流的代数和仍为零, 即

$$\sum I_i = I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

例 1-2 求图 1-14 所示电路中的未知电流 I_1 和 I_2 。

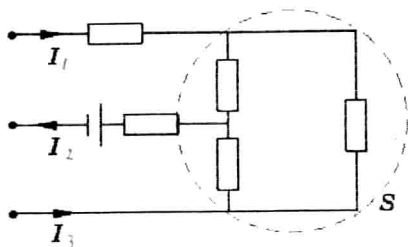


图 1-13

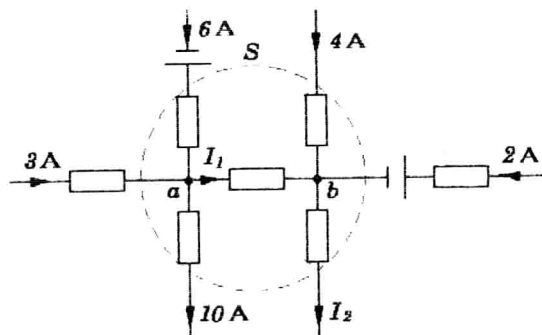


图 1-14

解 根据节点电流方程, 对节点 a 有

$$I_1 + 10 - 6 - 3 = 0$$

$$I_1 = -1\text{A}$$

其中“-”表示该电流的实际方向与假设的参考方向相反, 即该电流的实际方向是由 b 点指向 a 点。同理对节点 b 有

$$I_2 = I_1 + 4 + 2 = (-1) + 4 + 2 = 5\text{A}$$

也可以利用图设的封闭曲面 S 求 I_2 , 对 S 有

$$\sum I_i = 3 + 6 + 4 + 2 - 10 - I_2 = 0$$

可得 $I_2 = 5\text{A}$

2. 克希荷夫电压定律 (记为 KVL)

克希荷夫电压定律的内容是: 对于电路中的任一回路, 在任一时刻, 回路中各段电压的代数和恒等于零。其数学表示式为

$$\sum U_i = 0 \quad (1-10)$$

该式又称为回路电压方程或 KVL 方程。式中 U_i 是回路中第 i 段电压的代数值, U_i 的“+”或“-”应根据它的参考方向与对回路规定的“绕行方向”是否一致来确定, 如果 U_i 的参考方向与回路的绕行方向一致, 则 U_i 为正; 反之 U_i 为负。例如对图 1-15 中的回路 $abcd a$, 根据回路的绕行方向, 可写出回路电压方程为

$$\sum U_i = U_1 - U_2 - U_3 + U_4 = 0 \quad (1-11)$$

利用一段含源电路的欧姆定律可将各段电压分别写为

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= -U_{ba} = -(E_1 - R_1 I_1) \\ U_2 &= -U_{bc} = -(E_2 - R_2 I_2) \\ U_3 &= -U_{cd} = -(E_3 - R_3 I_3) \\ U_4 &= -U_{ad} = -(E_4 - R_4 I_4) \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

将 (1-12) 式代入 (1-11) 式, 整理可得

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_4 I_4 = E_1 - E_2 + E_3 - E_4 \quad (1-13)$$

如果规定：凡（参考方向）与绕行方向一致的电流为正，反之为负；同样，凡与绕行方向一致的电动势为正，反之为负。那么（1-13）式的左端即为回路中所有电阻上电压（降）的代数和，右端即为该回路中所有电动势的代数和。于是（1-13）式或（1-11）式可表为

$$\sum (R_i I_i) = \sum E_i \quad (1-14)$$

可见，克希荷夫电压定律又可以表述为：任一时刻，在电路的任一回路中，所有电阻上电压（降）的代数和等于所有电动势的代数和。

同样，克希荷夫电压定律与回路中所接元件的性质无关，对线性电路或非线性电路都普遍适用。

例 1-3 在复杂电路中，取出一部分电路如图 1-16 所示。试求：（1）电流 I ；（2）电压 U_{da} 和 U_{fb} ；（3）以 O 点为电位参考点时， a 、 b 、 c 、 d 各点的电位。

解 （1）设 bc 支路的电流为 I_1 ，根据 KCL 方程分别对节点 b 和节点 c 有

$$I_1 - 1.8 - (-2) = 0$$

$$I + 1.4 - I_1 = 0$$

求得 $I = -1.6A$

$$I_1 = -0.2A$$

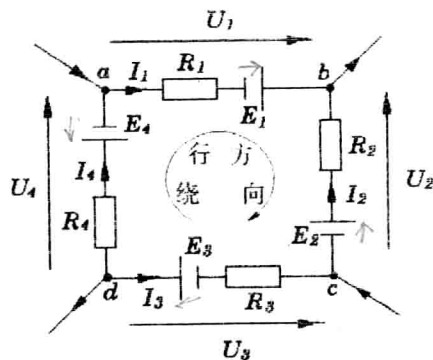


图 1-15

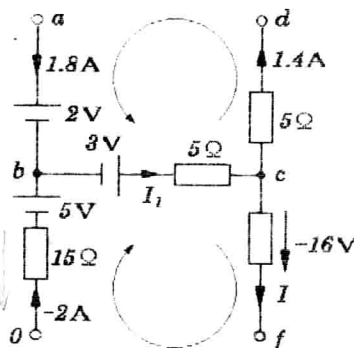


图 1-16

（2）图示电路虽未形成闭合回路，但仍可根据 KVL 方程写出

$$U_{da} + 5 \times (-0.2) + 5 \times 1.4 = -2 + 3$$

$$U_{fb} + 5 \times (-0.2) + (-16) = 3$$

求得 $U_{da} = -5V$ $U_{fb} = 20V$

（3）根据含源电路的欧姆定律，可以求出以 O 为电位参考点时其它各点的电位。

$$U_b = U_{bo} = 5 - 15 \times (-2) = 35V$$

$$U_a = U_{ao} = U_{ab} + U_{bo} = 2 + 35 = 37V$$

$$U_c = U_{co} = U_{cb} + U_{bo} = 3 - 5 \times (-0.2) + 35 = 39V$$

$$U_d = U_{do} = U_{dc} + U_{co} = -(5 \times 1.4) + 39 = 32V$$

$$U_f = U_{fo} = U_{fc} + U_{co} = -(-16) + 39 = 55V$$

显然 d 、 a 间和 f 、 b 间的电压分别为

$$U_{da} = U_d - U_a = 32 - 37 = -5\text{V}$$

$$U_{fb} = U_f - U_b = 55 - 35 = 20\text{V}$$

例 1-4 分别求图 1-17 (a) 所示电路中的开关 K 断开和接通时 d 点的电位 U_d 。

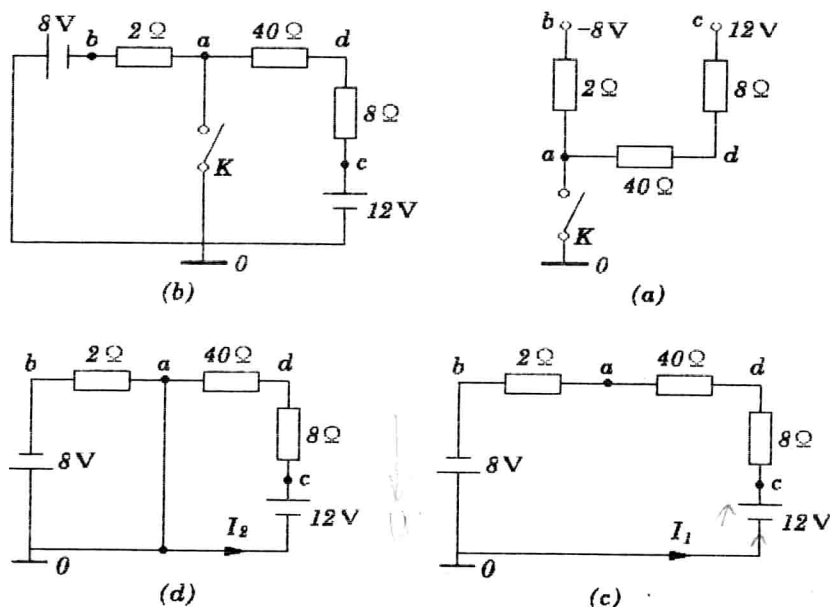


图 1-17

解 图 (a) 是电子电路图的习惯画法，它只标出与电源相联各点的电位值而不画出电源。电位参考点 O 通常是很多元件的汇集点，且与机壳相联，虽然它并不真的接地，仍称为“接地”点，常以接机壳符号“ $\perp$ ”表示。按照电路的一般画法，图 (a) 所示电路可改画为图 (b) 所示。其中， C 端标出 $+12\text{V}$ 表示电源正极接在 C 端，电压为 12V ，电源负极接在参考点 O ，不再标出。同理， b 端的 -8V ，表示电源负极接在 b 端，电压为 8V ，电源正极则接在参考点 O ，不再标出。当开关 K 断开和接通时，电路分别如图 (c) 和图 (d) 所示。

(1) K 断开时，由图 (c) 求 d 点的电位 U_d 。

根据图示参考方向有

$$I_1 = \frac{12 + 8}{8 + 40 + 2} = 0.4\text{A}$$

根据含源电路的欧姆定律，沿路径 dco 可得

$$U_d = 12 - 8 \times 0.4 = 8.8\text{V}$$

若沿路径 $dabo$ ，则有

$$U_d = -8 + (40 + 2) \times 0.4 = 8.8\text{V}$$

可见，沿不同路径计算 d 点的电位，所得结果相同，说明电路中任意两点间的电压（即