

DIAN LU JI QI YING YONG 电路及其应用

刘希真 周文俊 杨爱琴 编著

西北大学出版社

前言

电路课程教科书，可以见到的何止一种！不过，笔者还是欢迎高职高专的电子应用技术专业、电子信息专业、计算机应用专业、计算机网络专业、自动化专业、信息工程专业及电类、计算机信息类专业和本科的非电类专业，选用这本教科书。读者可以从书中察觉到笔者对高等教育层次分工的清晰理解，也可以从书中察觉到笔者表露的“有主张、有特色的书才可能是一本有价值的书”的明确观念。

高职高专教学以培养高素质应用型人才为根本目的，相关电路教学更不应例外。电路课程的理论性和实用性都很强，两强益彰，是故取名《电路及其应用》，以确保不违不偏高职高专教学的基本宗旨。

全书共8章，首章概述电路基本构成和基本规律，其余7章将所涉电路梳理为八大类电路，即直流电路、正弦交流电路、三相交流电路、暂态电路、电磁电路（磁性材料及应用）、继电控制电路、工厂输配电电路及安全用电电路；各大类电路下又延拓有诸如谐振电路、微分电路、积分电路等有重要实用价值的一些小类电路，各种电路再配上基本应用。这些基本内容，对于满足电工、电子、计算机、通信等不同电子信息类高职高专的相关电路教学要求，笔者认为相去不远。

首先，刻意强调以应用眼光解读电路教学的重要性。

一个不争的事实是，在信息社会，各种电路已深入到当代信息技术的各个层面，能否熟练地把各种电路应用于当代信息技术的各个层面，被视为是对高职高专电路教学的根本挑战。电路教学不能再只局限于传统本科教学的以电路分析与设计方法为主的理论框架内。为此，本书强调了各类电路应用的重要性。书中展示的电路多样性，实际上也是强调了电路应用的多样性。本书是从理论分析和应用两个侧面组织各种电路教学内容的。但是，作为一种高职高专教材，没有强调理论分析的系统性和严密性，作为一种专业基础课，则强调具体的实际电路。这是选用本书作教材的高职高专专业能够理解的。

其次，着力体现结构决定功能的基本思想。

有功能才有应用价值，电路的不同功能则取决于不同的电路结构，即结构决定功能。因此，各种电路的结构特征（包括信号特征和元件特征）和相应的功能性是本书所涉各类电路的一个研究对象的两个侧重点。结构是基础，功能是目标。功能的理论分析则以容易接受为度灵活处理。

再次，力图用浅显清晰的语言承载尽量深层的电路知识。

电路本身具有独特的完整理论内核,没有电路理论,就不可能形成各种功能的实用电路。掌握必要的电路理论对于高素质的应用型高职高专人才是不可或缺的,当然也不必要在电路理论上进行学术研究。考虑到高职高专学生理论功底的实际情况,本书力图用浅显清晰的语言承载尽量深层的电路理论知识,成书时甚至大胆地保留了课堂讲授用的口语感和现场感,方便高职高专学生去体会“电路”的质感。这个主张和特色应该不会降低本书的教学价值,甚至学术价值。

本书第1,第2章由杨爱琴编写;第3,第4,第5章由周文俊编写;第6,第7,第8章由刘希真编写。最后,由刘希真统稿,王治祥教授主审。在编写过程中,温州大学信息学院电子教研室的全体老师提出过一些修改意见,在此专致谢意。

编者都是长期从事电路教学的教师,为了发展新兴的高职高专教学,感到有责任编写一本高职高专的电路教科书。由于时间仓促,水平所限,书中难免有错误,恳请读者批评指正。

编者

2002年7月

目 录

第 1 章 电路的基本构成和基本规律	(1)
1.1 电路的基本构成	(1)
1.2 电路的基本物理量	(3)
1.3 电路负载中的电阻元件	(7)
1.4 电路的基本规律	(8)
1.5 电阻的串联和并联	(13)
1.6 电路的电源	(16)
1.7 电路的工作状态	(21)
1.8 电路中的电位	(23)
第 2 章 电路的分析方法	(31)
2.1 简单电路分析方法	(31)
2.2 支路电流法	(34)
2.3 网孔分析法	(35)
2.4 叠加原理	(37)
2.5 戴维南定理	(39)
第 3 章 正弦交流电路	(48)
3.1 正弦量的瞬时描述及正弦量的三要素	(48)
3.2 正弦量的相量表示法	(52)
3.3 纯电阻元件的正弦交流电路	(57)
3.4 纯电感元件的正弦交流电路	(59)
3.5 纯电容元件的正弦交流电路	(62)
3.6 RLC 串联的正弦交流电路	(65)
3.7 阻抗的串联和并联	(73)
3.8 交流电路中的谐振	(76)
3.9 功率因数的提高	(82)
第 4 章 三相交流电路	(89)
4.1 对称三相电源	(89)
4.2 负载为星形联接的三相电路	(92)

4.3	负载为三角形联接的三相电路	(95)
4.4	三相功率	(97)
第5章	电路的暂态分析	(101)
5.1	换路定律和暂态初始值的计算	(101)
5.2	RC 电路的充电和放电	(104)
5.3	一阶电路暂态分析的三要素法	(110)
5.4	微分、积分电路	(114)
第6章	铁磁材料及其应用	(121)
6.1	磁场基本物理量和磁路欧姆定律	(121)
6.2	铁磁材料的磁特性	(123)
6.3	铁磁材料的损耗	(125)
6.4	磁记录 and 磁记忆材料	(126)
6.5	铁芯线圈与理想变压器	(127)
第7章	继电控制电路	(132)
7.1	常用低压电器	(132)
7.2	三相异步电动机	(146)
7.3	笼式电动机的点动、起停控制电路	(151)
7.4	笼型三相异步电动机的正反转控制电路	(154)
7.5	行程控制、时间控制应用电路	(156)
7.6	继电控制实用电路	(159)
第8章	输配电和安全用电	(177)
8.1	输配电	(177)
8.2	安全用电	(179)
	参考文献	(187)
	部分习题答案	(188)

第一章 电路的基本构成和基本规律

本章要点

- 电路模型
- 基本物理量：电流、电压、功率
- 欧姆定律、基尔霍夫定律
- 电阻串、并联
- 电源
- 电路中的电位

电路分析不是分析实际电路，而是分析由理想电路元件构成的电路模型。本章所讨论的电路元件都是对实际器件进行近似化、理想化抽象出来的模型。本章主要讨论电路的基本电量、电路的基本规律、电路的工作状态以及电流和电压的正方向等，这些内容都是分析与计算电路的基础。本章将引入等效的概念，等效变换是分析电路的常用方法之一。

1.1 电路的基本构成

1.1.1 电路的作用

电路是电流的通路，实际电路是为了某种需要由某些电工设备或电路元器件按一定的方式相互连接组成的。它们可以完成各种具体的任务。电路的结构形式和所能完成的任务虽然多种多样，但按其功能看，电路的一种作用是实现能量的传输和转换，最典型的例子如电力系统，其电路示意图如图 1.1.1 (a) 所示。该系统将发电厂的发电机所发出的电能通过变压器和输电线传输给用户，经过不同的用户将电能转换成光能、机械能或热能等。

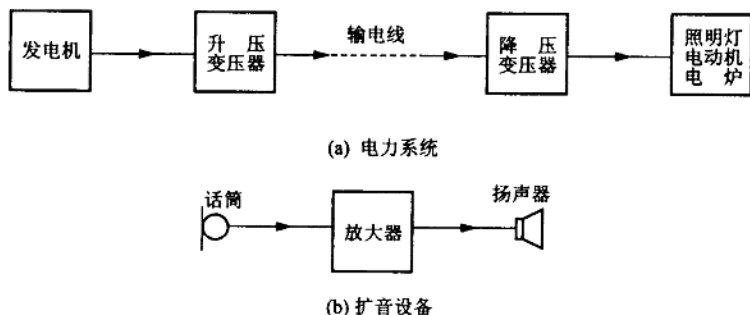


图 1.1.1 电路示意图

电路的另一种作用是实现信号的传递和处理，最常见的例子如扩音设备，其示意图如图 1.1.1 (b) 所示。话筒将语言转换为电信号，经放大器放大处理并传递给扬声器，以推动扬声器发音。

1.1.2 电路结构与电路模型

对于一个完整的电路，无论它是实现能量的传输和转换，还是进行信号的传递和处理，都是由电源（或信号源）、负载和中间环节组成。

图 1.1.1 (a) 中的发电机是电力系统中的电源，是提供电能的设备。除发电机外，电池也是常见的电源，它们分别将机械能和化学能转换为电能。图 1.1.1 (b) 中的话筒是扩音设备中的信号源，是提供信号的设备。除话筒外，天线也是常见的信号源，它们分别将语言和无线电波转换为相应的电信号。

图 1.1.1 (a) 中的照明灯、电动机、电炉等都是负载，是取用电能的设备。它们分别将电能转换为光能、机械能和热能。图 1.1.1 (b) 中的扬声器也是负载，是接受和转换信号的设备。它将电信号还原为语言信号。

图 1.1.1 (a) 中的变压器和输电线是中间环节，是联接电源和负载的设备，它起传输和分配电能的作用。在图 1.1.1 (b) 中，由于话筒输出的电信号非常微弱，不足以推动扬声器发音，因此用中间环节放大器来放大电信号，它起传递和处理信号的作用。

不论是电能的传输和转换，或者是信号的传递和处理，其中电源或信号源的电压或电流都称为激励，它推动电路工作；由激励在电路各部分所产生的电压和电流称为响应。进行电路分析，就是在已知电路结构和元件参数的条件下，讨论电路的激励与响应之间的关系。

实际电路都是由一些按需要起不同作用的实际电路元件或器件组成，诸如电动机、变压器、发电机、电池、各种电阻器等，它们的电磁性质较为复杂。为了便于对实际电路

进行分析,将实际电路元件或器件理想化(或称模型化),把它近似地看作理想电路元件。例如,白炽灯可认为是一电阻元件。由理想电路元件所组成的电路,就是实际电路的电路模型。例如,常用的手电筒,其实际电路元件有干电池、电珠、开关和筒体,干电池用电动势 E 和内阻 R_0 表示;电珠用电阻 R 表示;筒体和开关是联接电源(干电池)和负载(电珠)的中间环节,筒体用导线表示。手电筒的电路模型如图 1.1.2 所示。

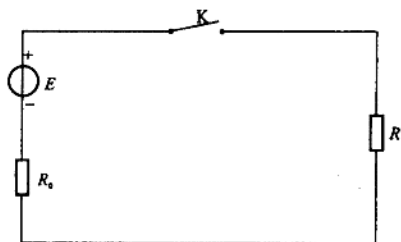


图 1.1.2 手电筒的电路模型

今后所分析的都是指电路模型,简称电路。在电路图中,各种电路元件用规定的图形符号表示。

1.2 电路的基本物理量

对于一个电路,无论是进行能量的传输和转换,还是进行信号的传递和处理,要完成这些功能都要通过电流、电压来实现。因此,在分析和计算电路之前,首先讨论电路的基本物理量——电流和电压。

1.2.1 电流及其正方向

电流是由电荷有规则的定向运动形成的。

电流在数值(大小)上等于单位时间内通过某一导体横截面的电荷量。设在极短的时间 dt 内通过导体横截面的微小电荷量为 dq , 则电流为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.1)$$

上式表示电流是随时间而变化的,是时间的函数。

如果电流不随时间而变化,即 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$, 则这种电流称为恒定电流,简称直流。直流常用大写的字母 I 表示,式(1.2.1)可改写为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.2.2)$$

式中, q 是在时间 t 内通过导体横截面的电荷量。

电流的实际方向: 习惯上规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。电流的实际方向是客观存在的。

电流的正方向：在较为复杂的直流电路中，往往难于事先判断各支路中电流的实际方向；在交流电路中，支路中电流的实际方向随时间变化，无法在电路中用一个箭头表示电流的实际方向。为此，在分析和计算电路时，可以任意选定某一方向作为电流的正方向，或称为参考方向。根据电流的正方向对电路进行计算，计算的结果是一代数量。当电流为正值时，表示电流的实际方向与所选正方向一致，如图 1.2.1 (a) 所示；反之，当电流为负值时，表示电流的实际方向与所选正方向相反，如图 1.2.1 (b) 所示。因此，只有在选定正方向之后，电流的正负才是有意义的。

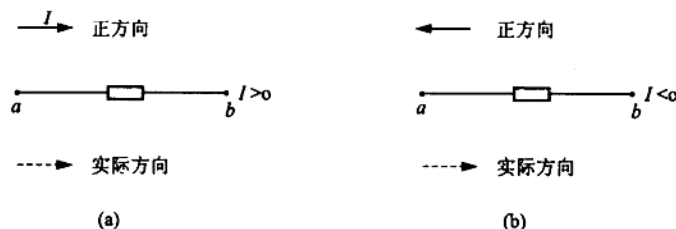


图 1.2.1 电流的正方向

本书电路图中所标的电流方向都是正方向。

电流的单位：在国际单位制中，电流的单位是安培 (A)，即 1 秒 (s) 内通过导体横截面的电荷量为 1 库仑 (C) 时，则电流为 1 安培 (A)。电流的辅助单位有毫安 (mA) 和微安 (μA)。

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

例 1.2.1 已知元件 A 中流过 1A 的电流，实际方向由 $a \rightarrow b$ ，下图表示方法中哪种表示方法是正确的。

解：图 1.2.2 (b) 中，电流的正方向由 $a \rightarrow b$ ，电流 $I = 1\text{A}$ 为正，所以电流的实际方向与正方向一致，由 $a \rightarrow b$ ；图 1.2.2 (d) 中，电流的正方向由 $b \rightarrow a$ ，电流 $I = -1\text{A}$ 为负，所以电流的实际方向与正方向相反，由 $a \rightarrow b$ 。因此，图 1.2.2 (b) 和图 1.2.2 (d) 的表示方法是正确的。图 1.2.2 (a) 和图 1.2.2 (c) 中由于没有标出电流的正方向，电流的正负没有意义，因此，这两种表示方法是不正确的。

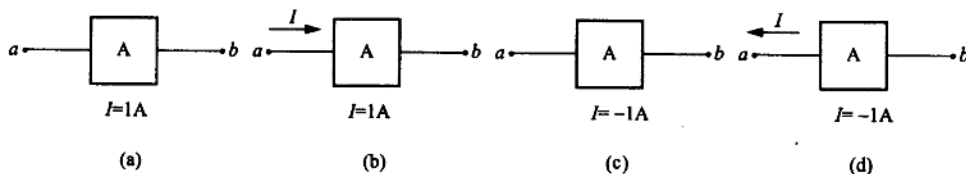


图 1.2.2 例 1.2.1 图

1.2.2 电压、电动势及其正方向

在图 1.2.3 中, a 和 b 是电源的两个电极, a 带正电, b 带负电, a 与 b 间的电场方向由 a 指向 b 。若将 a 和 b 用导体联接起来, 电极 a 上的正电荷在电场力的作用下就会经导体移向电极 b , 电场力对电荷就做了功。电场力对电荷做功的能力用电压来表示。

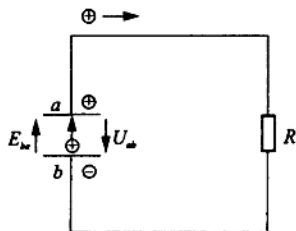


图 1.2.3 电荷的回路

在电场中, a 与 b 两点间的电压在数值(大小)上等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功。

设电场力将正电荷 dq 从 a 点移到 b 点所做的功为 dw , 则 a, b 之间的电压为

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1.2.3)$$

如果 $\frac{dw}{dq} = \text{常数}$, 则这种电压称为恒定电压或直流电压。直流电压常用大写字母表示, 式 (1.2.3) 可改写为

$$U_{ab} = \frac{W}{q} \quad (1.2.4)$$

式中, W 是电场力将正电荷 q 从 a 点移到 b 点所做的功。

在电场中 a, b 两点间的电压也常称为两点间的电位差, 即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1.2.5)$$

式中, V_a 为 a 点的电位, V_b 为 b 点的电位。

为了维持导体中的电流恒定, 电源力把经导体移向电极 b 的正电荷从电源内部拉回电极 a , 电源力对电荷就做了功。电源力对电荷做功的能力用电动势表示。

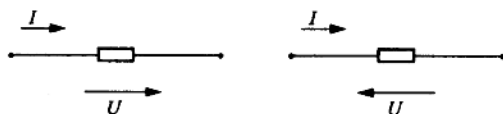
电源的电动势 E_m 在数值(大小)上等于电源力把单位正电荷从 b 点经电源内部移到 a 点所做的功。

电压和电动势的实际方向: 习惯上电压的实际方向规定为由高电位端指向低电位端, 即为电位降低的方向。电源电动势的实际方向规定为在电源内部由低电位端指向高电位端, 即为电位升高的方向。同电流一样, 电压和电动势的实际方向也是客观存在的。

电压的正方向: 同电流一样, 在分析和计算电路时, 先任意选定某一方向作为电压的正方向(参考方向), 根据正方向对电路进行计算, 结果是一代数量。电压的正、负表示电压的实际方向与所选定的正方向一致或相反。因此, 只有在选定正方向之后, 电压的正负才是有意义的。

同电流一样, 电路图上所标的电压和电动势的方向都是正方向。电动势的方向也常

用极性“+”和“-”表示。电压的方向也可用下标表示。



(a) 正方向一致

(b) 正方向相反

图 1.2.4 电流、电压正方向

正方向一致（关联参考方向）：对于同一个电路元件上的电流和电压的正方向可以分别独立地任意选定，但为了方便，常常采用正方向一致或关

联参考方向，如图 1.2.4 (a) 所示。这时在电路图上只需标出电流正方向或电压正方向中的任何一种即可。图 1.2.4 (b) 所示为正方向相反或非关联参考方向。

电压的单位：在国际单位制中，电压的单位是伏特 (V)，即电场力把 1 库仑 (C) 的电荷量从一点移到另一点所做的功为 1 焦耳 (J) 时，则该两点间的电压为 1V。电压的辅助单位有千伏 (kV)，毫伏 (mV)，微伏 (μV)。

电动势的单位也是伏特 (V)。

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

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

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

例 1.2.2 如图 1.2.5 中， $U_{ab}=-5\text{V}$ ，试问 a, b 两点哪点电位高？

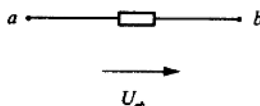


图 1.2.5 例 1.2.2 图

解： $U_{ab}=-5\text{V}$ 表示 a, b 两点间电压的实际方向与正方向相反。正方向是由 a 指向 b 、实际方向便是由 b 指向 a ，即 a, b 两点之间电压的实际方向是由 b 点指向 a 点。因此， b 点电位高。

1.2.3 功率与能量

功率也是电路分析中一个重要的物理量。不同的电路元件有吸收（消耗）功率和释放（产生）功率之别。

功率定义为单位时间能量的变化率。设在极短的时间 dt 内元件所吸收的能量为 $d\omega$ ，则元件吸收的功率为

$$p = \frac{d\omega}{dt} \quad (1.2.6)$$

如果 p 不随时间变化，即 $\frac{d\omega}{dt} = \text{常数}$ ，如直流电路的功率，则式 (1.2.6) 可改写为

$$P = \frac{W}{t} \quad (1.2.7)$$

在图 1.2.6 中，电压、电流为关联参考方向。根据式 (1.2.6) 可推导出功率的一般

表达式为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = ui \quad \text{即} \\ p = ui \quad (1.2.8)$$

式 (1.2.8) 表明, 元件所吸收的功率等于关联参考方向下电压与电流的乘积。

在非关联参考方向下, 功率表达式应为

$$p = -ui \quad (1.2.9)$$

若分析计算结果 $p < 0$, 表明元件释放功率; 若 $p > 0$, 则表明元件吸收功率。对于一个完整的电路来说, 总功率等于零, 表明释放功率和产生功率相等。

在国际单位制中, 功率的单位是瓦特 (W)。

以上关于功率的定义和结论是从元件得出的, 但不难推广到一段电路中。

元件在某一时间段 (t_0, t) 内所吸收的能量等于该元件吸收的功率对时间的积分。根据功率公式 $p = \frac{dw}{dt}$, 在 t_0 至 t 时间内, 元件吸收的能量为

$$w(t) - w(t_0) = \int_{t_0}^t p dt,$$

或

$$w(t) - w(t_0) = \int_{t_0}^t u idt.$$

若选 $t_0 = -\infty$, 且假定 $w(-\infty) = 0$, 则 $w(t) = \int_{-\infty}^t u idt$

在国际单位制中, 能量的单位是焦耳 (J)。

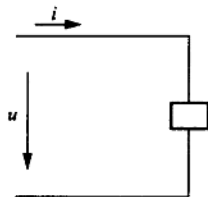


图 1.2.6 元件的功率

1.3 电路负载中的电阻元件

对于导体, 它的电阻不仅和材料的种类有关, 而且还和导体的尺寸有关。实验证明, 长直金属导体的电阻

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.3.1)$$

式中, l 为导体的长度, m; S 为导体的横截面积, mm^2 ; ρ 为导体的电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; R 的单位是欧姆 (Ω)。电阻的辅助单位有千欧 (k Ω), 兆欧 (M Ω)。

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

电阻的电路符号如图 1.3.1 所示。

电阻的倒数定义为电导，用 G 表示，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.3.2)$$

在国际单位制中，电导的单位为西门子 (S)。

如果电阻是一个常数，这样的电阻称为线性电阻。

通常所说的电阻都是指线性电阻。

电阻是一种标准元件，有国家规定的各种精度的标准系列产品。

在电路分析中所指的电阻元件，不仅指专门设计制造的电阻器，而且也指灯泡、电炉等实际器件的理想化模型。它们的共同特点是对电流呈现阻力作用，当电流通过时将有能量消耗。

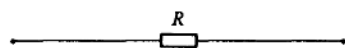


图 1.3.1 电阻符号

1.4 电路的基本规律

电路是由一些电路元件相互连接构成的总体。电路各类元件中流过的电流和元件两端的电压受到两类约束。一类是每个元件自身特性给每个元件上流过的电流和元件两端电压之间带来的约束，属于元件参数性约束，这类约束关系表现为不同形式的欧姆定律。另一类约束是元件相互连接给各个电流之间和各个电压之间带来的约束，属于电路结构性约束，这类约束关系表现为基尔霍夫定律。欧姆定律和基尔霍夫定律是分析电路问题的基本依据和规律。

1.4.1 欧姆定律

通常流过电阻的电流与电阻两端的电压成正比，这就是欧姆定律。如图 1.4.1 所示，电流、电压正方向一致时，欧姆定律的表示式为

$$U = IR \quad (1.4.1)$$

如果电流、电压正方向相反，如图 1.4.2 所示，欧姆定律则应表示为

$$U = -IR \quad (1.4.2)$$

在电流、电压正方向一致时，电阻所消耗的功率为

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1.4.3)$$

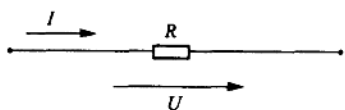


图 1.4.1 电流、电压正方向一致

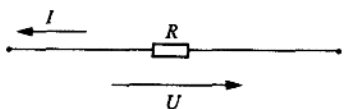


图 1.4.2 电流、电压正方向相反

例 1.4.1 应用欧姆定律, 求图 1.4.3 中的电阻 R 。

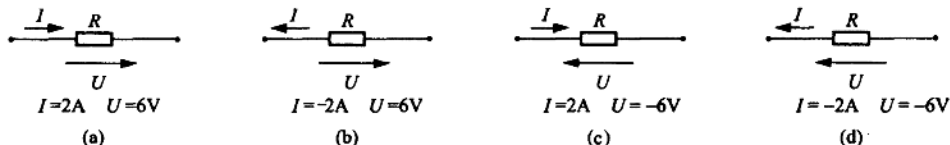


图 1.4.3 例 1.4.1 图

解: 图 1.4.3 (a) $U=IR \quad R=\frac{U}{I}=\frac{6}{2}=3\Omega$

图 1.4.3 (b) $U=-IR \quad R=-\frac{U}{I}=-\frac{6}{-2}=3\Omega$

图 1.4.3 (c) $U=-IR \quad R=-\frac{U}{I}=-\frac{-6}{2}=3\Omega$

图 1.4.3 (d) $U=IR \quad R=\frac{U}{I}=\frac{-6}{-2}=3\Omega$

1.4.2 基尔霍夫定律

以图 1.4.4 电路为例, 此电路由 5 个元件连接构成, 各元件中电流和元件两端的电压的方向。为了介绍基尔霍夫定律, 先介绍几个专用术语。

支路: 同一电流所流经的路径, 如图中电流 I_1, I_2, I_3 所流经的路径都是支路。

节点: 3 条或 3 条以上支路的连接点, 如图中的节点 a 和节点 b 。

回路: 由支路所构成的闭合路径。如图中的回路 $abca$, $abda$, $adbca$ 。

网孔: 闭合路径内部不含有支路的回路, 如图中的回路 $abca$ 和 $abda$ 便是网孔, 而回路 $adbca$ 不是网孔。

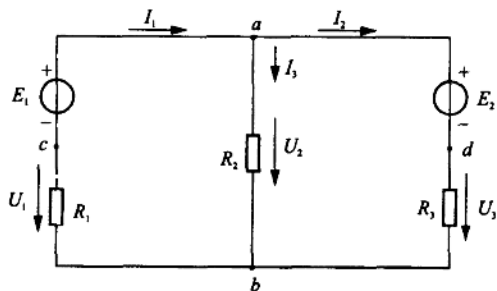


图 1.4.4 电路图

描述电路中各支路电流之间关系的基本规律称为基尔霍夫电流定律 (KCL); 描述电路中各元件两端电压之间关系的基本规律称为基尔霍夫电压定律 (KVL)。

1. 基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律描述的是电路中任一节点上各支路电流之间的关系。因此, 在表述基尔霍夫电流定律之前先要设定各支路上的已知或未知电流。

基尔霍夫电流定律有两种表述方式, 这两种表述方式是完全等价的。

表述方式 1: 对于电路中的任一节点, 在任一时刻, 流出该节点的电流之和等于流入该节点的电流之和, 即

$$\sum I_{\text{流出}} = \sum I_{\text{流入}} \quad (1.4.4)$$

以图 1.4.5 节点 P 为例, KCL 方程为

$$I_2 + I_4 = I_1 + I_3$$

表述方式 2: 如果流入节点的电流前面取“+”号, 流出节点的电流前面取“-”号, 则任一瞬间, 电路中任一节点上电流的代数和恒等于零, 即

$$\sum I = 0 \quad (1.4.5)$$

仍以图 1.4.5 节点 P 为例, KCL 方程又可写为

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

建议采用表述方式 1, 流入流出方式不易出错。

KCL 通常用于节点, 也可以推广应用于电路中的任一闭合曲面, 即任一瞬间, 通过任一闭合曲面的电流代数和也恒等于零。

对于图 1.4.6 中的闭合曲面 S , KCL 方程为

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

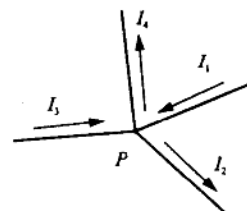


图 1.4.5 KCL 用于节点

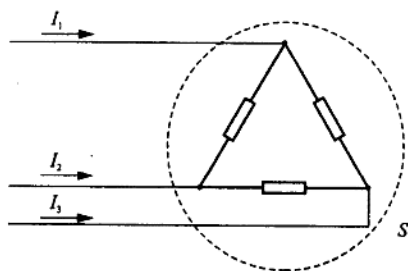


图 1.4.6 KCL 用于闭合曲面

例 1.4.2 如图 1.4.7 的节点 M , 已知 $I_1 = 0.2\text{A}$, $I_2 = -0.3\text{A}$, $I_3 = -0.1\text{A}$, $I_4 = -0.7\text{A}$, 求 $I_5 = ?$

解: 由 KCL, 有

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

得

$$\begin{aligned} I_5 &= I_1 - I_2 + I_3 + I_4 \\ &= 0.2 - (-0.3) + (-0.1) + (-0.7) \\ &= -0.3\text{A} \end{aligned}$$

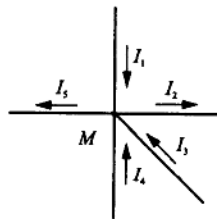


图 1.4.7 例 1.4.2 图

2. 基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律描述的是电路中任一回路上各元件两端电压之间的关系, 因此, 在表述基尔霍夫电压定律之前先要设定各元件两端的已知或未知电压。又因为基尔霍夫电

易出错。

KVL 通常用于全部由支路组成的完整的封闭回路，也可以推广应用于支路不封闭的假想封闭回路，即沿假想回路绕行一周，在绕行方向上，电压的代数和等于零。

对于图 1.4.9 中的假想回路 $aboa$ ，KVL 方程为

$$U_{ab} + U_2 - U_1 = 0$$

例 1.4.3 如图 1.4.10 的电路，已知 $U_1 = 10\text{V}$ ， $U_2 = -2\text{V}$ ， $U_3 = 3\text{V}$ ， $U_7 = 2\text{V}$ ，求 U_5 ， U_6 ， U_{cd} 。

解：对回路 $acba$ ，有

$$U_3 - U_5 - U_1 = 0$$

即

$$\begin{aligned} U_5 &= U_3 - U_1 \\ &= 3 - 10 \\ &= -7\text{V} \end{aligned}$$

对于回路 $adeba$ ，有

$$U_6 + U_7 - U_2 - U_1 = 0$$

即

$$\begin{aligned} U_6 &= U_2 + U_1 - U_7 \\ &= (-2) + 10 - 2 \\ &= 6\text{V} \end{aligned}$$

对于假想回路 $adca$ ，有

$$U_6 - U_{cd} - U_3 = 0$$

即

$$\begin{aligned} U_{cd} &= U_6 - U_3 \\ &= 6 - 3 \\ &= 3\text{V} \end{aligned}$$

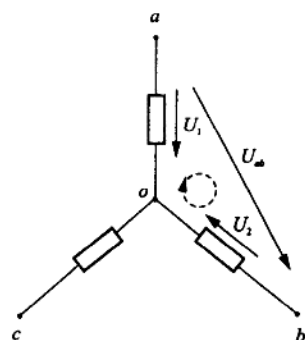


图 1.4.9 KVL 用于假想回路

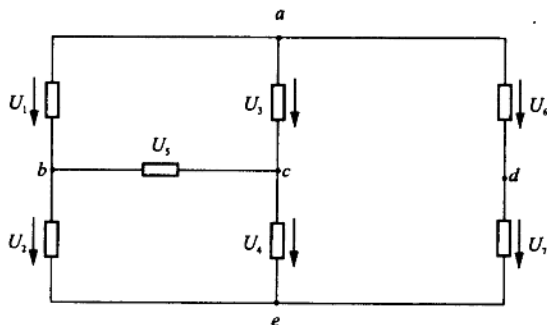


图 1.4.10 例 1.4.3 图

KCL 和 KVL 的物理概念和数学形式十分简单，但都集中反映了各种结构电路和不同性质电路工作的基本规律。

欧姆定律和基尔霍夫定律不仅适用于直流电路，也适用于交流电路；不仅适用于稳态电路，也适用于暂态电路。不仅适用于线性电路，也适用于非线性电路。在下面各章节分析各种电路时，将时时处处见到欧姆定律和基尔霍夫定律的重要作用。

1.5 电阻的串联和并联

在电路中，电阻的联接方式是多种多样的，其中最简单和最常用的是串联和并联。

1.5.1 电阻的串联

电路中如有两个或两个以上的电阻依次首、尾顺序相联构成无分支电路，并且在电阻中通过同一电流，则这样的联接法称为电阻的串联。图 1.5.1 (a) 所示为两个电阻串联的电路。

在图 1.5.1 (a) 中，根据 KVL 和欧姆定律可得

$$U = U_1 + U_2 = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2) = IR$$

即两个电阻串联可以用一个等效电阻 R 来代替，如图 1.5.1 (b)。等效的条件是在同一电压 U 的作用下电流 I 保持不变。等效电阻等于各个串联电阻之和，即

$$R = R_1 + R_2 \quad (1.5.1)$$

若两个阻值相差很悬殊的电阻串联，其等效电阻近似等于阻值较大的电阻。

N 个电阻串联的等效电阻为

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_N \quad (1.5.2)$$

电阻串联可以进行分压。两个电阻串联时，每个电阻上所分得的电压分别为

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= IR_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \\ U_2 &= IR_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \end{aligned} \right\} \quad (1.5.3)$$

可见，串联电阻上所分得的电压与电阻成正比。

电阻串联的应用很多，譬如在负载的额定电压低于电源电压的情况下，通常需与负载串联一个电阻，以分去一部分电压；有时为了限制负载中流过过大的电流，可以与负载串联一个限流电阻以限制流过负载中的电流；通过改变串联电阻的大小可以得到不

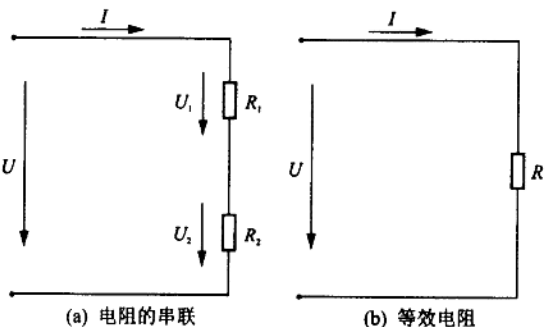


图 1.5.1 电阻的串联