



新世纪本科生系列教材

电工技术

杨振坤 刘晓晖 刘 晔 编著

西安交通大学出版社

新世纪本科生系列教材

电 工 技 术

杨振坤
刘晓晖 编著
刘 晔

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书是在近年来面向 21 世纪教学内容和课程体系改革研究的基础上,依据原国家教育委员会 1995 年颁布的“电工技术”和“电子技术”两门课程的教学基本要求编写的。并列入西安交通大学 2000 年重点教材出版规划。全套书分为《电工技术》和《电子技术》共二册,每册均配有完整的多媒体课件。

《电工技术》内容包括电路的基本概念与分析方法、电路的暂态分析、电路的正弦稳态分析、磁路与变压器、电机、电气自动控制、可编程控制器原理及应用、电气测量、安全用电共 9 章。各章配有丰富的例题、习题、练习题与思考题。章前有概述,章后有小结。

本书可作为高等学校工科非电类专业本科生、大专生及成人教育相关专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术/杨振坤等编著. —西安:西安
交通大学出版社,2002.3
ISBN 7-5605-1482-0

I. 电… II. 杨… III. 电工技术—高等学校—教
材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001) 第 091237 号

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市兴庆南路 25 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668315)

陕西宝石兰印务有限责任公司印装

各地新华书店经销

开本:727 mm×960 mm 1/16 印张:27 字数:445 千字

2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷

印数:0 001~3 000 定价:39.00 元

发行科电话:(029)2668357,2667874

前 言

本书是西安交通大学电工、电子教学实验中心在多年进行电工、电子系列课程教学改革,面向本科生、研究生先后开出“非电量电测技术”、“可编程序控制器原理及应用”、“高级电工电子技术实验”课程的基础上,并进行“全国普通高校电工学(电子技术)试题库”的研制以及开发制作“电工技术”、“电子技术”授课型多媒体课件的同时,为了适应 21 世纪教学内容、教学体系改革发展的需要而编写的。本书已列入西安交通大学 2000 年重点教材出版规划。全套书分为《电工技术》和《电子技术》共二册。参考学时为 120~150。

《电工技术》在满足非电类电工技术课程教学基本要求的基础上,还具有以下特点:

(1) 贯彻少而精的原则,精选内容。教材份量适中,与教学学时相符。

(2) 注意反映电工技术领域中的新技术和发展方向,把“可编程序控制器原理及应用”单独作为一章内容加以介绍。同时还介绍了“非电量电测技术”、“智能仪器”、“变频调速”等知识。

(3) 为了便于教与学,各章均配有较丰富的例题、练习题、思考题和习题,每章前面有概述,后面有小结。

(4) 在例题和习题的编排上注重综合实例的分析,便于读者应用和创新能力的培养。

(5) 本书配有整套的多媒体课件,有利于减少授课学时,提高教学质量。

本书由杨振坤教授组织和统稿。第 1,2,8 章由刘晓晖副教授编写,第 3,6,9 章由杨振坤教授编写,第 4,5 章由刘晔副教授编写,第 7 章由陈国联副教授编写。

在编写过程,作者借鉴了有关参考资料。在此,对参考资料的作者以及帮助此书出版的单位和同志一并表示感谢。

由于编者的水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请批评指正。

编者

2001 年 12 月

目 录

第一章 电路的基本概念与分析方法

1.1 电路的基本概念	(1)
1.1.1 电路及其分类	(1)
1.1.2 电流、电压及其正方向	(2)
1.1.3 路中的功率	(4)
1.2 基尔霍夫定律	(5)
1.2.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	(6)
1.2.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	(6)
1.3 无源电路元件	(8)
1.3.1 电阻元件	(8)
1.3.2 电感(自感)元件	(11)
1.3.3 电容元件	(13)
1.4 有源电路元件	(14)
1.4.1 电压源	(15)
1.4.2 电流源	(16)
1.4.3 电压源与电流源的等效互换	(17)
1.4.4 受控源	(19)
1.5 电气设备的额定值及电路的工作状态	(21)
1.5.1 电气设备的额定值	(21)
1.5.2 电路的工作状态	(22)
1.6 电路中电位的概念和计算	(25)
1.7 支路电流法	(27)
1.8 节点的电压法	(30)
1.9 叠加原理	(35)
1.10 戴维南定理与诺顿定理	(37)
1.10.1 戴维南定理	(38)
1.10.2 诺顿定理	(42)
1.10.3 戴维南定理用于含受控源线性二端网络	(44)
本章小结	(47)
习题	(49)

第二章 电路的暂态分析

2.1 换路定则及电路初始值的确定	(57)
2.2 一阶电路的暂态分析	(59)
2.2.1 零输入响应	(59)
2.2.2 零状态响应	(64)
2.2.3 全响应	(67)
2.3 三要素法	(69)
2.4 RC 电路的脉冲响应	(72)
2.4.1 由电阻两端输出	(72)
2.4.2 由电容两端输出	(74)
2.5 RLC 电路的暂态分析	(76)
本章小结	(79)
习题	(80)

第三章 电路的正弦稳态分析

3.1 正弦量的相量表示法	(86)
3.1.1 正弦量的三要素	(86)
3.1.2 正弦量的相量表示法	(90)
3.2 电阻、电感、电容元件的正弦稳态电路	(95)
3.2.1 电阻电路	(95)
3.2.2 电感电路	(97)
3.2.3 电容电路	(100)
3.3 正弦稳态电路的分析和计算	(104)
3.3.1 基尔霍夫定律的相量形式	(104)
3.3.2 R, L, C 串联电路及复阻抗	(106)
3.3.3 R, L, C 并联电路及复导纳	(117)
3.3.4 功率因数的提高	(123)
3.4 交流电路的频率响应及谐振	(129)
3.4.1 RC 串联电路的频率响应	(129)
3.4.2 电路中的谐振	(132)
3.5 三相电路	(140)
3.5.1 三相电源	(140)
3.5.2 三相负载	(143)

3.5.3 三相电路的功率	(152)
3.6 非正弦周期电流电路	(153)
3.6.1 非正弦周期信号的分析	(154)
3.6.2 非正弦周期量的平均值、有效值和平均功率	(155)
3.6.3 非正弦周期电流、电路的计算	(158)
本章小结	(159)
习题	(161)

第四章 磁路与变压器

4.1 磁路	(171)
4.1.1 磁路基本概念	(171)
4.1.2 磁性材料的磁性能	(172)
4.1.3 磁路欧姆定律	(173)
4.2 交流铁芯线圈电路	(176)
4.2.1 电磁关系	(176)
4.2.2 功率损耗	(178)
4.2.3 等效电路	(180)
4.3 电磁铁	(183)
4.3.1 直流磁路和交流磁路的工作特点	(183)
4.3.2 直流电磁铁	(184)
4.3.3 交流电磁铁	(185)
4.4 变压器	(188)
4.4.1 概述	(188)
4.4.2 变压器的工作原理	(189)
4.4.3 变压器的额定值与运行特性	(197)
4.4.4 变压器绕组的极性	(202)
4.4.5 三相变压器与特殊变压器	(203)
本章小结	(209)
习题	(211)

第五章 电机

5.1 概述	(214)
5.1.1 电机的分类	(214)
5.1.2 电机的用途	(215)

5.1.3 电机的发展趋势	(216)
5.2 三相异步电动机的结构与原理	(217)
5.2.1 三相异步电动机的结构	(217)
5.2.2 三相异步电动机的旋转磁场	(219)
5.2.3 三相异步电动机的作用原理	(222)
5.3 三相异步电动机的电磁转矩与机械特性	(223)
5.3.1 三相异步电动机的电路分析	(223)
5.3.2 电磁转矩	(225)
5.3.3 机械特性	(226)
5.4 三相异步电动机的使用	(230)
5.4.1 铭牌和额定值	(230)
5.4.2 起动	(232)
5.4.3 制动	(238)
5.4.4 调速	(240)
5.5 单相异步电动机	(248)
5.5.1 一相定子绕组通电时的机械特性	(248)
5.5.2 各种类型的单相异步电动机	(249)
5.6 控制电机	(253)
5.6.1 伺服电动机	(254)
5.6.2 步进电动机	(259)
本章小结	(265)
习题	(267)

第六章 电气自动控制

6.1 常用控制电器	(270)
6.1.1 手动控制电器	(270)
6.1.2 自动控制电器	(273)
6.2 三相异步电动机直接起动控制	(276)
6.3 三相异步电动机正反转控制	(281)
6.4 行程控制	(284)
6.5 时间控制	(286)
6.5.1 时间继电器	(286)
6.5.2 时间控制电路举例	(287)
6.6 继电器接触器控制电路图的阅读	(289)

6.6.1 阅读方法与步骤	(289)
6.6.2 读图举例	(291)
本章小结	(292)
习题	(293)

第七章 可编程序控制器原理及应用

7.1 可编程序控制器的组成和工作原理	(299)
7.1.1 可编程序控制器的硬件组成	(299)
7.1.2 可编程序控制器的工作原理	(303)
7.1.3 可编程序控制器的分类与特点	(310)
7.2 OMRON C 系列可编程序控制器的编程指令	(313)
7.2.1 C 系列微型 PLC 的主要性能	(313)
7.2.2 C 系列微型 PLC 的逻辑编程元件	(317)
7.2.3 C 系列 PLC 的逻辑编程指令	(323)
7.2.4 C 系列 PLC 的数据处理及特殊功能指令	(340)
7.3 可编程序控制器应用举例	(357)
7.3.1 PLC 应用的设计步骤	(357)
7.3.2 异步电动机 Y— Δ 启动、正反转控制	(359)
7.3.3 装载式机械手的控制	(363)
本章小结	(369)
习题	(370)

第八章 电气测量

8.1 测量的基本概念	(376)
8.1.1 测量仪表的基本性能	(376)
8.1.2 测量误差	(379)
8.2 模拟式基本电工仪表	(383)
8.2.1 磁电式仪表	(384)
8.2.2 电磁式仪表	(386)
8.2.3 电动式仪表	(388)
8.3 电压、电流及功率的测量	(390)
8.3.1 电流测量	(390)
8.3.2 电压测量	(391)
8.3.3 功率测量	(391)

8.4 电阻及阻抗测量	(395)
8.4.1 电阻测量	(395)
8.4.2 阻抗测量	(398)
8.5 万用表	(399)
8.5.1 模拟式万用表	(399)
8.5.2 数字式万用表	(402)
8.6 非电量电测技术	(403)
8.6.1 电位器式位移传感器	(404)
8.6.2 电阻应变式传感器	(405)
8.6.3 热电偶传感器	(406)
8.6.4 光电转速表	(406)
8.7 智能仪表	(407)
本章小结	(409)
习题	(411)
 第九章 安全用电	
9.1 触电及其预防	(412)
9.1.1 电流对人体的危害	(412)
9.1.2 触电分析	(413)
9.1.3 触电急救及触电预防	(414)
9.2 电气设备的保护接地和保护接零	(416)
9.2.1 保护接地	(416)
9.2.2 保护接零	(416)
9.3 静电防护和电气设备的防火防爆	(418)
9.3.1 静电防护	(418)
9.3.2 电气设备的防火防爆	(419)
本章小结	(419)
习题	(420)
 参考文献	 (421)

第一章

电路的基本概念与分析方法

本章在工科大学物理课程电学内容的基础上,结合电路的基本物理量,即电流、电压及电动势引入了正方向的概念,讲述了最基本的电路定理——基尔霍夫电压定律及电流定律,给出了理想电路元件的模型及它们的特性。同时阐述了支路电流法、节点电压法、叠加原理和截维南定理等几种电路分析的基本方法。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路及其分类

电路是电气设备或器件为了某种需要按一定的方式组成的总体,它为电流提供了通路。

电路的结构形式是多种多样的,从电路的作用上来看,可将其分为两大类。一类是用来进行电能的传输和转换的,此类电路的典型例子是电力系统。一般电力系统包括发电厂、输变电环节和负载 3 个组成部分。在各类发电厂中,发电机分别把热能(热电厂)、水能(水电厂)以及原子能(核电厂)转换为电能,并通过输变电环节将电能经济、安全地输送给用户,用户的电灯、电动机、电炉等用电设备作为负载,再把电能转化为其它所需的能量。由于在这一类电路中,电压一般比较高,电流比较大,所以有时也把此类电路称为强电系统。另一类电路是用来传递和处理信号的,如电视机电路、计算机电路以及各类测量电路等。就测量电路而言,它包括了以下 3 个环节:把被测量转化为相应电信号的信号转换环节,对信号进行放大、转换、滤波等处理的信号放大处理环节和显示环节。由于这一类电路所涉及的电压和电流都比较小,所以,此类电路可称为弱电系统。

1.1.2 电流、电压及其正方向

电路中的基本物理量是电流、电压和电动势,不论是电能的传输和转换,还是信号的传递和处理,都要通过电流、电压和电动势来实现。由于这些基本概念物理课已学过,这里只稍加复习。本节,我们将根据电工技术课程的特点和需要,引入电流、电压和电动势的正方向或参考方向。

1. 电流

电荷的定向流动形成电流,习惯上把电流看成是正电荷流动形成的,并且规定正电荷流动的方向为电流方向。在导体中电流的方向总是沿着电场的方向,从高电位流向低电位。

我们用电流 i 来描述电流的强弱。电流定义为单位时间通过导体任一横截面的电量。设在极短的时间 dt 内,通过导体任一横截面的微小电量为 dq ,则电流 i 为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

电流是 SI 基本单位之一,单位名称为:安[培],单位符号为:A。

2. 电压、电动势

在电场中把单位正电荷从 a 点移至 b 点,电场力所作的功定义为 a, b 两点的电位差,或称为 a, b 间的电压,用 u_{ab} 表示,即

$$u_{ab} = \int_a^{b \rightarrow} \vec{E} d\vec{l} \quad (1.2)$$

式中 电压的单位为伏(V)。

直流电路中电流、电压的大小方向都不随时间变化, $i(t) = I$, $U(t) = U$ 。

电源的电动势 E 定义为在电源内部把单位正电荷由负极移至正极,非静电力作的功。在非静电力的作用下,电源不断地把其它形式的能量转换为电能。电源的电动势是表征电源本身的特征量,与外电路的性质没有关系。电动势的单位与电压的单位相同,为伏(V)。

3. 电流、电压的正方向

对于简单的电路,如单回路电路,或者虽然有多个回路,但是用元件串并联的方法可化简为单回路的电路,由于在这些电路中,各元件两端的电压以及流经各元件电流的方向可直接看出。所以,在分析时,只计算大小,也就是说,只把它们作为算术值来考虑。

对于复杂电路(多回路电路,并无法通过元件的串并联化简为单回路的电路)情况却不同。这些电路的某些电压和电流的方向是未知的,必需

经过一定的分析和计算才能判定。而这类电路的计算往往需要以电流、电压为变量对电路列方程,求解电路的各变量。但是列电路方程又要考虑到电压、电流的方向,这就要求对电压、电流的方向进行假设。此外,在分析交流电路时,由于电流、电压的实际方向是随时间变化的,为了能够简捷地用一个函数,或者一个波形来描述它们随时间的变化规律,因而也需要假设电流、电压的方向。

我们先来讨论电流问题。在图 1.1 所示的电路中,如果不知道电流的真实方向,可以先假设电流的方向是由左向右,这个假设的方向就称为电流的正方向,或者电流的参考方向。由于正方向是可以依习惯或方便任意



图 1.1 电流的正方向

选定的,所以它既可能与电流的真实方向相同,也可能与电流的真实方向相反。当电流的正方向与电流的真实方向一致时,电流取正值;反之,电流取负值。在电路中如规定了某一电流的正方向,并在此规定下求得了该电流的值(大于零或小于零),那么它的真实方向就可由此确定了。在图 1.1 所示的电路中,如果算出的电流大于零,表明电流的真实方向与电流的正方向一致也是由左向右;相反,如果算出的电流值小于零,则表明电流的真实方向与电流的正方向相反,应是由右向左。可见,利用电流值(大于零或小于零)并结合正方向,就能够确定电流的真实方向。

同理,当电路中某两点电压的真实方向未知时,也可对电压的方向进行假设。只有在规定了电压的正方向后,才能代入方程计算,最后再根据电压值(大于零或小于零)来确定电压的真实方向。

在以后的电路分析中,所涉及到的电流、电压的方向(除特殊说明以外),一般都指的是正方向,电压、电流的值均为代数值。

在电路分析中,人们一般习惯于把同一元件或同一部分电路的电压和电流的正方向取为一致,这样设定的正方向称为关联正方向或关联方向。采用关联正方向可以使我们在电路分析中,省去由于电流、电压正方向不一致所带来的许多有关正、负号的麻烦,使电路的分析过程更加简捷、明了,也不容易出错。

对电动势来说,同样可以设定它的正方向。但是应当注意到,电动势的真实方向是由电源的低电位端指向高电位端,恰好与电压的真实方向相反。所以对于一个处于开路状态的电源(或虽不处于开路状态,但电源内阻上的压降可以忽略)来说,当电压的正方向与电动势的正方向设定为相反时(如图 1.2 所示),则

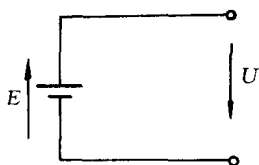


图 1.2 电压与电动势的正方向

$$U = E$$

当电压的正方向与电动势的正方向设定为一致时,则

$$U = -E$$

1.1.3 路中的功率

根据物理学中功率的定义,电路中某一元件或某一部分电路的功率为

$$p = ui \quad (1.3)$$

式中 u 是此元件或这一部分电路的端电压, i 是流经此元件或电路的电流。

当电压 u 和电流 i 随时间 t 变化时,功率 $p = ui$ 也随时间变化。在工程中则更关心平均功率,如果电压 u 和电流 i 是时间 t 的周期函数,则平均功率

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt \quad (1.4)$$

式中 T 是电压、电流的变化周期。

在直流情况下,电压和电流都是常数,则

$$P = UI \quad (1.5)$$

还有一个问题需要明确的是,这个功率是表示吸收功率呢? 还是表示发出功率呢? 对图 1.3 所示电路中的电源来说,很明显它发出功率 P , 电压和电流的方向相反。但对电阻来说, P 是吸收的功率, 电阻的电压和电流方向相反。所以 P 对我们所考虑的电路来说, 究竟表示的是吸收功率还是发出功率, 关键是看电压和电流的正方向。如果电压和电流的正方向为关联方向, 则 $P = UI$ 表示吸

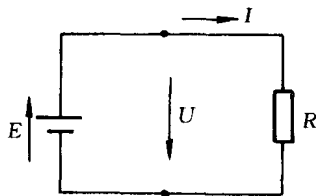


图 1.3 电路中的功率

收功率(如图 1.3 中电阻 R 的情况)。这时

$$P > 0 \quad \text{吸收功率}$$

$$P < 0 \quad \text{发出功率}$$

如果电压和电流的正方向为非关联方向,则 $P = UI$ 表示发出功率(如图 1.3 中电源的情况),即

$$P > 0 \quad \text{发出功率}$$

$$P < 0 \quad \text{吸收功率}$$

练习与思考题

题 1.1 为什么在分析电路时通常采用关联方向,如果是非关联方向,试写出欧姆定律的表达式。

题 1.2 电压与电动势有何区别? 对一个电源来说,它的电动势和它的端电压有何关系? 他们的正方向是否可以任意假设?

1.2 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律(Kirchhoff's Law)是电路理论中最基本的定律,是电路分析的基础。它由基尔霍夫电流定律(又称第一定律,缩写为 KCL)及基尔霍夫电压定律(又称第二定律,缩写为 KVL)组成。为了描述基尔霍夫定律,我们先介绍几个术语。

(1) 支路:电路中的每个分支称为支路,同一条支路中各元件流过的电流相同。

(2) 节点:三条或三条以上支路的联接点称为节点。

(3) 回路:电路中的任一闭合路径称为回路。

图 1.4 所示的电路中 bae , be , bc , cf , cdf 都是支路。 e, f 间没有元件,而连线又认为是理想的,所以 e 和 f 是同一个点, ef 不是支路。 b, c 和 $e(f)$ 为 3 个节点。 $abea$, $bcfeb$, $cdfc$, $abcfea$, $bcdfeb$, $abcdfea$ 都是回路。

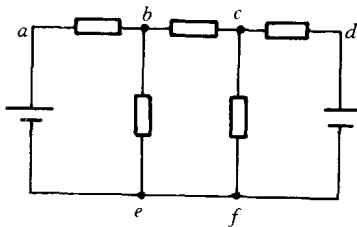


图 1.4 支路、节点和回路

1.2.1 基尔霍夫电流定律(KCL)

对于电路中任意的一个节点,由于电荷是不会产生、消灭和积累的,所以任意时刻流进节点的电荷一定等于流出节点的电荷,也即流进节点的电流之和一定等于流出节点的电流之和。

如图 1.5 所示,图中的节点有两条支路电流 I_1 和 I_2 是流进节点的,有一条支路电流 I_3 是从节点流出的,所以

$$I_1 + I_2 = I_3$$

如果将上式中 I_3 移到等号左边,则

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

我们把流出节点的电流看做负的,把流进节点的电流看做正的,基尔霍夫电流定律则可以叙述为:流进任一节点的电流的代数和为零。同样,也可以说,流出任一节点的电流的代数和为零,即

$$\sum I = 0 \quad (1.6)$$

基尔霍夫电流定律不仅对任意一个节点来说是成立的,而且还可以推广到包围着多个节点的闭合面(广义节点)。如图 1.6 所示的电路中,闭合面 S 包围着 3 个节点,对这 3 个节点来说,基尔霍夫电流定律总是成立的,即

$$I_1 = I_{12} - I_{31}$$

$$I_2 = I_{23} - I_{12}$$

$$I_3 = I_{31} - I_{23}$$

将上列 3 个式子相加,则有

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

或

$$\sum I = 0$$

可见,基尔霍夫电流定律对闭合面 S 也是适用的。

1.2.2 基尔霍夫电压定律(KVL)

对于电路中的任一个回路,它的各段电压的代数和为零,即

$$\sum U = 0 \quad (1.7)$$

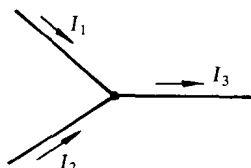


图 1.5 节点的电流关系

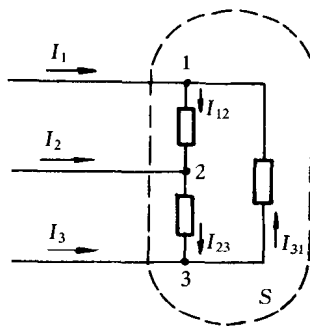


图 1.6 闭合面作为广义节点

上述式子的具体含义是对回路任意选择一绕行方向,规定回路中各段电压,凡是正方向与回路的绕行方向一致的取正号,凡是正方向与回路的绕行方向相反的取负号,在这样的原则下,回路中各段电压的代数和为零。如图 1.7 所示的回路中,选取顺时针方向为回路的绕行方向,根据基尔霍夫电压定律可列出电压方程

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} - U_{AD} = 0 \quad (1.8)$$

其中 U_{AB} , U_{BC} , U_{CD} 的正方向与回路的绕行方向是一致的,所以在式中取正值。而 U_{AD} 的正方向与回路的绕行方向相反,所以在式中取负值。

式(1.8)还可以改写为

$$U_{AB} + U_{BC} = U_{AD} - U_{CD} \quad (1.9)$$

$$\text{等号左边} \quad U_{AB} + U_{BC} = U_{AC}$$

$$\text{等号右边} \quad U_{AD} - U_{CD} = U_{AD} + (-U_{CD}) = U_{AC}$$

式(1.9)的含义是:由路径 ABC 计算得到的 A 点和 C 点之间的电压 U_{AC} ,与由路径 ADC 计算得到的电压 U_{AC} 是一样的,也就是说两点间的电压与计算路径的选取无关。因而,“在电路中任意两点间的电压与计算路径无关”,这一叙述与基尔霍夫电压定律是等同的。

既然电路中任意两点间的电压与计算路径无关,也就是说电压是一个与计算路径无关的确定值。这就意味着我们可以在电路中引入电位的概念。反过来说,如果我们在电路中引入了电位,那么任意两点间的电压也就是电位差,与路径无关,基尔霍夫电压定律也就自动满足了。

练习与思考题

题 1.3 试说明基尔霍夫两个定律对电压或电流的正方向和真实方向都成立。

题 1.4 在图 1.8 中,根据给定的电流,求未知电流 I_1 和 I_2 。

题 1.5 求图 1.9 中的未知电压 U_1 , U_2 和 U_3 。

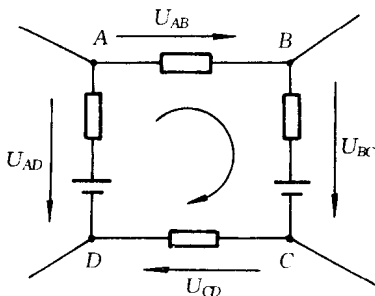


图 1.7 回路的电压关系