

全国高职高专水利水电类专业规划教材

电工与电气设备

盛国林 高中义 樊新军 主编
夏敏静 主审



黄河水利出版社

DIANGONG YU DIANQI SHEBEI

组稿编辑 王路平
马 翀
责任编辑 张豫媛
封面设计 谢 萍
责任校对 王晓燕
责任监制 常红昕

ISBN 978-7-80734-690-6



9 787807 346906 >

定 价：25.00 元

全国高职高专水利水电类专业规划教材

电工与电气设备

主 编 盛国林 高中义 樊新军

副主编 黄才光 王 维 王 莹

郑 静

主 审 夏敏静

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书是全国高职高专水利水电类专业规划教材,是根据全国水利水电高职教研会制定的电工与电气设备课程教学大纲编写完成的。全书共分十一章,主要包括直流电路、磁与电磁、单相正弦交流电路、三相正弦交流电路、变压器、三相异步电动机、常用低压电器、高压开关电器、照明电路、电工仪表与测量及安全用电常识。

本书既可作为高职高专院校水利水电类专业的教学用书,也可作为相关专业技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电工与电气设备/盛国林,高中义,樊新军主编. —郑州:
黄河水利出版社,2009.8

全国高职高专水利水电类专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 80734 - 690 - 6

I. 电… II. ①盛…②高…③樊… III. ①电工技术 -
高等学校:技术学校 - 教材②电气设备 - 高等学校:技术学
校 - 教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 131932 号

组稿编辑:王路平 电话:0371 - 66022212 E-mail:hhsllwp@163.com

马 翀

66026749

machong2006@126.com

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsllcbs@163.com

承印单位:河南新华印刷集团有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:14

字数:330 千字

印数:1—4 100

版次:2009 年 8 月第 1 版

印次:2009 年 8 月第 1 次印刷

定价:25.00 元

前 言

本书是根据《教育部、财政部关于实施国家示范性高等职业院校建设计划,加快高等职业教育改革与发展的意见》(教高[2006]14号)、《教育部关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》(教高[2006]16号)等文件精神,由全国水利水电高职教研会拟定的教材编写规划,在中国水利教育协会指导下,由全国水利水电高职教研会组织编写的第二轮水利水电类专业规划教材。第二轮教材以学生能力培养为主线,具有鲜明的时代特点,体现出实用性、实践性、创新性的教材特色,是一套理论联系实际、教学面向生产的高职高专教育精品规划教材。

本书立足高职教育的需要,课程内容以“必需、够用”为原则,体现了职业教育的性质、任务和培养目标;符合职业教育的课程教学基本要求及有关岗位资格和技术等级要求;具有思想性、科学性以及教学适应性和适合国情的先进性;符合职业教育的特点和规律,具有明显的职业教育特色;符合国家有关部门颁发的技术质量标准。

本书结合我国水利水电行业的实际情况,紧密联系生产实际,注重知识内容的前瞻性,内容通俗、简要、易学、易懂,图文并茂,突出了新知识、新技术、新方法、新工艺的引进与运用。

本书编写人员及编写分工如下:重庆水利电力职业技术学院黄才光(第一、二章),山西水利职业技术学院王莹(第三、四章),三峡电力职业学院盛国林(第五章)、樊新军(第六、八章),吉林白城职业技术学院高中义(第七章),四川水利职业技术学院郑静(第九、十一章),沈阳农业大学高等职业技术学院王维(第十章)。全书由盛国林、高中义、樊新军担任主编,由黄才光、王维、王莹、郑静担任副主编,由三峡电力职业学院夏敏静担任主审。

本书在编写过程中得到了许多同行的帮助与支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,欢迎广大读者批评指正。

编 者

2009年5月

目 录

前 言

第一章 直流电路	(1)
第一节 电路及其基本物理量	(1)
第二节 欧姆定律及其应用	(5)
第三节 电阻的串、并联及其应用	(7)
第四节 基尔霍夫定律	(11)
习 题	(14)
第二章 磁与电磁	(15)
第一节 电流的磁场	(15)
第二节 磁场的基本物理量	(17)
第三节 电磁感应	(18)
第四节 铁磁性物质及其磁化规律	(24)
第五节 磁路欧姆定律	(26)
习 题	(28)
第三章 单相正弦交流电路	(29)
第一节 交流电路概述	(29)
第二节 正弦交流电的三要素	(32)
第三节 正弦交流电的相量表示法	(38)
第四节 电阻、电感、电容串联的交流电路	(44)
第五节 交流电路的复数运算	(59)
第六节 功率因数的提高	(63)
习 题	(65)
第四章 三相正弦交流电路	(68)
第一节 三相交流电源的连接	(69)
第二节 负载的三相连接	(72)
第三节 三相负载的功率	(79)
习 题	(81)
第五章 变压器	(83)
第一节 变压器的工作原理及分类	(83)
第二节 电力变压器的基本结构	(84)
第三节 变压器的铭牌	(97)
第四节 变压器的空载运行	(99)
第五节 变压器的负载运行	(105)

第六节	三相变压器的磁路系统	(111)
第七节	三相变压器的连接组别	(112)
第八节	变压器的并联运行	(116)
习 题		(120)
第六章	三相异步电动机	(121)
第一节	三相异步电动机的基本结构	(121)
第二节	三相异步电动机的工作原理	(124)
第三节	三相异步电动机的铭牌	(127)
第四节	三相鼠笼式异步电动机的起动	(130)
第五节	三相绕线式异步电动机的起动	(134)
第六节	三相异步电动机的调速	(136)
习 题		(140)
第七章	常用低压电器	(141)
第一节	低压熔断器	(141)
第二节	低压开关	(147)
第三节	交流接触器	(159)
第四节	接触器的使用与维护	(165)
习 题		(167)
第八章	高压开关电器	(168)
第一节	概 述	(168)
第二节	油断路器	(170)
第三节	真空断路器	(174)
第四节	SF ₆ 断路器	(176)
第五节	断路器的操动机构	(179)
第六节	隔离开关	(181)
第七节	高压负荷开关	(185)
习 题		(186)
第九章	照明电路	(187)
第一节	白炽灯照明电路	(187)
第二节	日光灯照明电路	(189)
习 题		(191)
第十章	电工仪表与测量	(192)
第一节	电流表及电流的测量	(192)
第二节	电压表及电压的测量	(196)
第三节	功率表及电功率的测量	(198)
第四节	电度表及电能的测量	(202)
第五节	万用表的使用方法	(204)
习 题		(206)

第十一章 安全用电常识 (207)

 第一节 电流对人体的作用 (207)

 第二节 安全电流、安全电压 (208)

 第三节 人体触电的方式 (209)

 第四节 触电急救 (211)

 习 题 (215)

参考文献 (216)

第一章 直流电路

第一节 电路及其基本物理量

一、电路及其组成

(一) 电路的组成

电流通过的闭合路径叫电路。它由电源、负载、连接导线、控制开关和保护装置几部分组成,最简单的电路如图 1-1 所示。

(1)电源是向电路提供能量的设备,它能把其他形式的能转换成电能,如干电池、蓄电池、发电机等。

(2)负载,即用电,是各种用电设备的总称,它把电能转换成其他形式的能,如电灯、电动机、电加热器等。

(3)连接导线是连接电源和负载的中间环节,通过它实现电能的传输和分配,如铜线、铝线。

(4)控制开关和保护装置用于控制电路的通断、保护电路的安全,是使电路能够正常工作的器件,如开关、熔断器、继电器等。

(二) 电路图中常用符号

用标准图形符号和文字符号绘制出的电路模型就是电路图,任何电路都可以用电路图来表示。电路图中常用符号如表 1-1 所示。

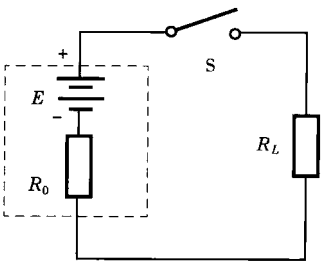


图 1-1 最简单的电路

表 1-1 电路图中常用符号

名称	符号	名称	符号
电阻		电压表	
电池		接地	
电灯		保险丝	
开关		电容	
电流表		电感	

二、电路的基本物理量

(一) 电流

电荷的定向移动形成电流。

大小和方向随时间变化的电流称为交流电流,用符号 i 表示。在许多电器装置上,用符号“AC”或“~”表示交流。

大小和方向不随时间变化的电流称为直流电流,用符号 I 表示。在许多电器装置上,用符号“DC”或“-”表示直流。

电流的大小用电流强度来衡量。单位时间内垂直通过导体横截面的电荷量称为电流强度,简称电流,可表示为

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

在直流电路中,式(1-1)可写为

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

在国际单位制(SI)中,电流的单位是安培(A),以及千安(kA)、毫安(mA)、微安(μ A)等。换算关系为

$$1 \text{ A} = 1 \times 10^{-3} \text{ kA} = 1 \times 10^3 \text{ mA} = 1 \times 10^6 \mu\text{A}$$

习惯上将正电荷移动的方向规定为电流的实际方向。但在较复杂的电路中,往往难以判断某支路电流的实际方向,而且在交流电路中电流的方向随时间改变,更难以判断其实际方向。为了分析和计算方便,需要假设一个电流的方向,这个假设的方向称为参考方向,在电路中用箭头表示,如图 1-2 所示。



图 1-2 电流的参考方向

若电流的参考方向与实际方向一致,则电流为正;相反则为负。应该注意,在未规定参考方向时,电流的正负是没有意义的。

如图 1-2(a) 中,电流的大小为 5 A,电流的实际方向与参考方向一致;图 1-2(b) 中,电流的大小仍为 5 A,但电流的实际方向与参考方向相反。

(二) 电压与电位

1. 电压

带电体的周围存在电场,电场对处在其中的电荷有力的作用,我们称这个力为电场力。电压是衡量电场力做功能力大小的一个物理量。

电压的定义为:电路中某两点(a 、 b 两点)的电压 U_{ab} 等于电场力把单位正电荷从一点(a 点)移动到另一点(b 点)所做的功,即

$$U_{ab} = \frac{W_{ab}}{q} \quad (1-3)$$

在国际单位制中,电压的单位是伏特(V),以及千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV)等,其换算关系为

$$1 \text{ V} = 1 \times 10^{-3} \text{ kV} = 1 \times 10^3 \text{ mV} = 1 \times 10^6 \mu\text{V}$$

2. 电位

任意选取电路中某点作为参考点,电路中某点到参考点之间的电压,称为该点的电位。电位的高低与参考点的选择有关,参考点可以任意选择,但在同一电路中只能选择一个参考点。在电力工程中,常选大地为参考点;在电子电路中,常选电路的公共点或机壳为参考点。如电路中 a 点电位,即

$$V_a = U_{ao} = V_a - V_o \quad (1-4)$$

式中 V_o ——人为选定的参考点的电位。

电路中两点之间的电压就是这两点之间的电位差,即

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

参考点不同,电路中各点电位亦随之不同,但任意两点间的电位差不会改变。

3. 电压的方向

电压的实际方向规定为由高电位端指向低电位端,即电位降低的方向。表示方法有三种,如图 1-3 所示。

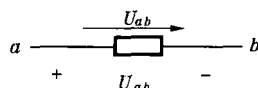


图 1-3 电压的参考

(1)用“+”、“-”符号分别表示高电位端、低电位端。

(2)用箭头的指向表示,箭头由高电位端指向低电位端。

(3)用双下标字母表示,如 U_{ab} 表示 ab 段电路电压的方向是从 a 指向 b 。

对于复杂电路,电压的实际方向有时很难确定,因此也需要假设一个参考方向。若电压为正,说明电压的参考方向与实际方向一致;若为负,则相反。在未规定参考方向时,电压的正负是没有意义的。

需要注意的是,若没有特别指明,在电路图中标出的电流和电压的方向均为参考方向。

(三) 电动势

在电场力的作用下,正电荷从电源的正极经外电路移向负极,为了保证电流的持续不断,就需要非电场力将正电荷从电源的负极移到正极,电源就是提供这种非电场力的设备。电动势是衡量电源内部非电场力做功能力大小的一个物理量。

电动势为电源力(非电场力)将单位正电荷从电源负极经电源内部移到电源正极所做的功。电动势用符号 E 表示,则

$$E = \frac{W}{q} \quad (1-5)$$

电动势的方向规定为由电源的负极指向正极,即电位升高的方向,电动势的单位也是伏特(V)。

(四) 电能和电功率

接通电路,电源和负载之间就有能量的交换,这表明电流做了功。电功率和电能就是

用来衡量电流做功本领的物理量。

1. 电功率

电功率简称功率,是用来衡量电流做功快慢的物理量,用 P 表示。其大小等于电流在单位时间内所做的功,即

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

在 SI 中,当 W 、 t 的单位分别为焦耳(J)、秒(s)时, P 的单位为瓦特(W)。常用的单位还有千瓦(kW)、毫瓦(mW)等。其换算关系为

$$1 \text{ W} = 1 \times 10^{-3} \text{ kW} = 1 \times 10^3 \text{ mW}$$

由能量守恒原理可知,一个电路中,所有电源发出的功率必然等于所有负载吸收的功率,即所谓的功率平衡。

如果一段电路两端的电压与流过的电流实际方向相同,该电路吸收功率;若电压与电流的实际方向相反,则该电路发出功率。但在电路中,若事先不知道电压和电流的实际方向,应根据参考方向来计算该电路的功率,并由计算结果的正、负来判断电路是发出功率还是吸收功率。具体方法如下:

(1) 当电路电压和电流的参考方向相同时(称之为关联参考方向),功率按下式计算,即

$$P = IU$$

当电路电压和电流的参考方向相反时(称之为非关联参考方向),功率按下式计算,即

$$P = -IU$$

(2) 按上述公式计算,若计算结果 $P > 0$,表示电路吸收功率;若 $P < 0$,表示电路发出功率。

2. 电能

电能是指电流在一段时间内所做的功,用 W 表示。电能的大小与电路中的电压 U 、电流 I 及通电的时间 t 有关,即

$$W = IUt \quad (1-7)$$

在 SI 中,当 U 、 I 、 t 的单位分别为伏特(V)、安培(A)、秒(s)时,则 W 的单位为焦耳(J)。

实际中电能的单位还常采用千瓦时(kWh),即度。

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

【例 1-1】 计算图 1-4 所示各元件吸收或发出的功率。

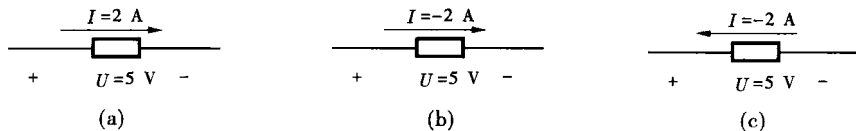


图 1-4 例 1-1 图

解: 图 1-4(a) 中电流 I 与电压 U 是关联参考方向, $P = UI = 5 \times 2 = 10 \text{ (W)} > 0$, 所以元件吸收功率。

图 1-4(b) 中电流 I 与电压 U 是关联参考方向, $P = UI = 5 \times (-2) = -10 \text{ (W)} < 0$, 所

以元件发出功率。

图 1-4(c) 中电流 I 与电压 U 是非关联参考方向, $P = -UI = -5 \times (-2) = 10 \text{ (W)} > 0$, 所以元件吸收功率。

【例 1-2】 某教室将 9 盏 220 V、40 W 的白炽灯, 接在 220 V 的供电线上, 取用电流为多少? 若每天使用 4 h, 一个月(按 30 d 计)共用多少度电?

解: 总功率 $P = 40 \times 9 = 360 \text{ (W)} = 0.36 \text{ kW}$

取用电流 $I = \frac{P}{U} = \frac{360}{220} = 1.636 \text{ (A)}$

总用电时间 $t = 4 \times 30 = 120 \text{ (h)}$

取用电能 $W = Pt = 0.36 \times 120 = 43.2 \text{ (kWh)}$

第二节 欧姆定律及其应用

一、电阻元件及其特性

电阻元件是一种最常见的、用来反映电能消耗的电路元件。在任意时刻, 电阻元件的电压与电流的关系用伏安特性曲线描述, 如图 1-5 所示。

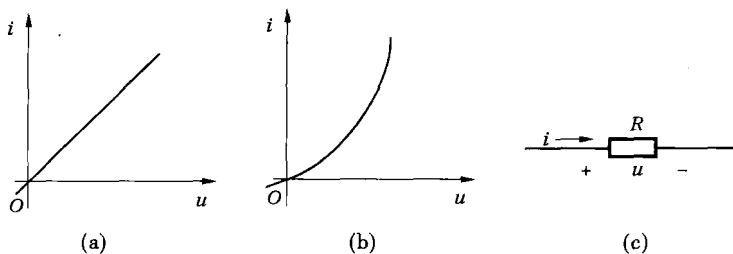


图 1-5 电阻的伏安特性曲线和电路符号

若电阻元件的伏安特性曲线是通过原点的直线, 则称为线性电阻, 如图 1-5(a) 所示; 否则称为非线性电阻, 如图 1-5(b) 所示。

线性电阻常用一个参数(R 或 G) 来描述。如图 1-5(a) 所示, $R = \frac{u}{i}$ 是一个与电压、电流无关的常数, 将该常数定义为线性电阻元件的电阻。在 SI 中, R 的单位为欧姆(Ω), 常用的单位还有千欧($\text{k}\Omega$) 和兆欧($\text{M}\Omega$) 等。

$$1 \text{ M}\Omega = 1 \times 10^3 \text{ k}\Omega = 1 \times 10^6 \Omega$$

$G = \frac{1}{R}$ 称为元件的电导, 在 SI 中, 其单位为西门子(S)。

线性电阻的电路符号如图 1-5(c) 所示。实际中绝大多数电阻在一定工作范围内都非常接近线性电阻的条件, 因此可用线性电阻作为它们的模型。

实验证明, 金属导体的电阻值不仅与导体材料的成分有关, 还与导体的几何尺寸及温度有关。一般来说, 横截面积为 $S(\text{m}^2)$ 、长度为 $L(\text{m})$ 的均匀导体, 其电阻为

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-8)$$

式中 ρ ——电阻率,单位为欧姆米($\Omega \cdot \text{m}$),常用导电材料的电阻率见表 1-2。

表 1-2 常用导电材料的电阻率

材料	$\rho(\Omega \cdot \text{m})$	材料	$\rho(\Omega \cdot \text{m})$	材料	$\rho(\Omega \cdot \text{m})$
银(化学纯)	1.47×10^{-8}	钨	5.3×10^{-8}	铁(化学纯)	9.6×10^{-8}
铜(化学纯)	1.55×10^{-8}	铂	9.8×10^{-8}	铁(工业纯)	12×10^{-8}
铜(工业纯)	1.7×10^{-8}	锰铜	42×10^{-8}	镍铬铁	12×10^{-8}
铝	2.5×10^{-8}	康铜	44×10^{-8}	铝铬铁	120×10^{-8}

【例 1-3】 求长 200 m,截面 16 mm^2 铝导线的电阻。

解:查得铝的电阻率为 $2.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。

$$R = \rho \frac{L}{S} = 2.5 \times 10^{-8} \times \frac{200}{16 \times 10^{-6}} = 0.3125 (\Omega)$$

导体的电阻值还随温度的不同而有所变动。若用 R_1 和 R_2 分别表示温度为 t_1 和 t_2 时导体的电阻值,则

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1-9)$$

式中 α ——电阻温度系数,即导体温度变动 1°C 时,其电阻值变动的百分数。

导体的 α 值愈小,电阻值愈稳定。常用导电材料的电阻温度系数见表 1-3。

表 1-3 常用导电材料的电阻温度系数

材料	$\alpha(1/^\circ\text{C})$	材料	$\alpha(1/^\circ\text{C})$	材料	$\alpha(1/^\circ\text{C})$
银(化学纯)	4.1×10^{-3}	钨	4.8×10^{-3}	铁(化学纯)	6.6×10^{-3}
铜(化学纯)	4.3×10^{-3}	铂	3.9×10^{-3}	铁(工业纯)	6.6×10^{-3}
铜(工业纯)	4.25×10^{-3}	锰铜	0.005×10^{-3}	镍铬铁	0.13×10^{-3}
铝	4.7×10^{-3}	康铜	0.005×10^{-3}	铝铬铁	0.08×10^{-3}

二、欧姆定律及其应用

对于线性电阻元件,在关联参考方向时,电压与电流的关系为

$$U = RI \quad (1-10)$$

这就是电路的基本定律之一——欧姆定律。若电压和电流为非关联参考方向时,欧姆定律应当变为

$$U = -RI \quad (1-11)$$

【例 1-4】 如图 1-6 所示电路,分别求各电路的未知量。

解:根据欧姆定律,列出表达式如下。

对于图 1-6(a),有

$$U = RI = 10 \times 2 = 20 (\text{V})$$

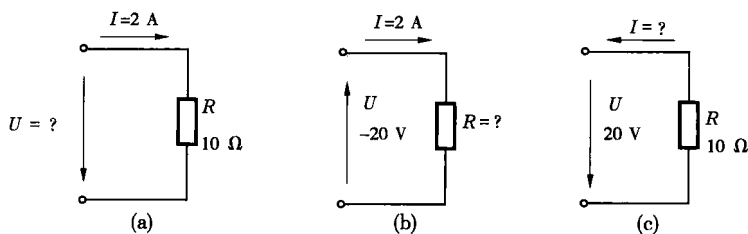


图 1-6 例 1-4 图

对于图 1-6(b), 有

$$U = -RI \quad \text{则} \quad R = -\frac{U}{I} = -\frac{-20}{2} = 10 (\Omega)$$

对于图 1-6(c), 有

$$I = -\frac{U}{R} = -\frac{20}{10} = -2 (\text{A})$$

第三节 电阻的串、并联及其应用

一、电阻的串联

(一) 电阻串联电路的概念

把电路中 n 个电阻元件依次连接成一个无分支电路, 通过这些电阻元件的电流是同一个电流, 这种连接方式称为电阻的串联, 如图 1-7 所示, 由 n 个电阻 $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ 构成一个串联电路。

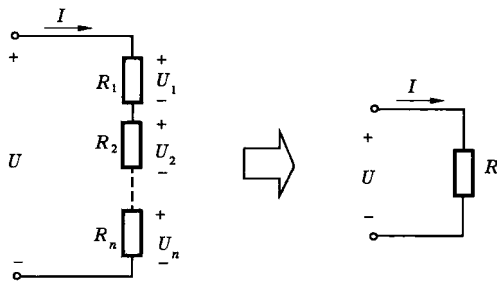


图 1-7 n 个电阻串联电路

(二) 串联电路的基本特点

图 1-8 所示为两个电阻串联电路, 因为流经两个串联电阻的电流相等, 都等于 I , 因此各个电阻的电压分别为

$$U_1 = R_1 I, U_2 = R_2 I$$

所以

$$U = U_1 + U_2 = R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2) I$$

$$\frac{U}{I} = R_1 + R_2 = R$$

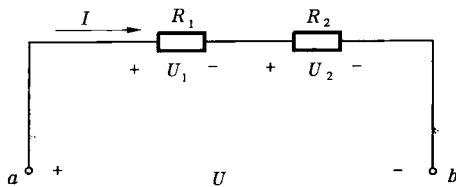


图 1-8 两个电阻串联电路

由此可知,两个电阻串联可以用一个电阻 R 代替, R 的大小为两个串联电阻的电阻值之和。同理而论, n 个电阻串联也可以用一个总电阻 R 替换, R 电阻值的大小为所有串联电阻的电阻值之和。

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i \quad (1-12)$$

所以

$$U_1 = R_1 I = R_1 \frac{U}{R} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \quad (1-13)$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \quad (1-14)$$

由式(1-13)、式(1-14)可知,电阻 R_1 、 R_2 上的电压与电阻成正比,且电阻值越大,分得的电压也越大。

式(1-13)、式(1-14)为两个电阻串联的分压公式。推广到 n 个电阻串联则各电阻上的电压为

$$U_n = R_n I = \frac{R_n}{R} U \quad (1-15)$$

由此可见,各个串联电阻的电压与电阻成正比,即总电压按各个串联电阻值进行分配。式(1-15)即电阻串联时的电压分配公式。

由此可以得出电阻串联具有以下的特点:

(1)通过串联电阻的电流为同一个电流,即电流处处相等。如图 1-8 所示,电阻 R_1 和 R_2 上通过的电流均为 I 。

(2)串联电阻的总电压等于各个电阻上的分电压之和,如图 1-8 所示。

$$U = U_1 + U_2$$

(3)串联的等效总电阻等于各个串联分电阻之和,即

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i$$

(4)各个串联电阻上分配到的电压与其电阻值成正比。

(三)电阻串联电路的应用

串联电阻的分压原理应用十分广泛,如用于扩大电压表的量程。

【例 1-5】如图 1-9 所示,已知电池的内阻(内阻用 r 表示)是 0.3Ω 。电池可提供的电流是有限值(约 5 A)。电流流过电池时,内阻上会有压

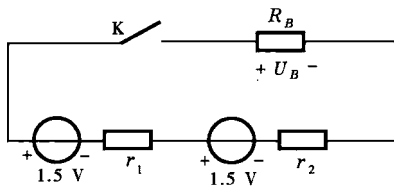


图 1-9 例 1-5 图