

电工技术概论

DIANGONG JISHU GAILUN

李 创 储春华 于 涛 张 玲 刘晓梅 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

电工技术概论

DIANGONG JISHU GAILUN

李 创 储春华 于 涛 张 玲 刘晓梅 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书对电工技术的知识进行了总结,主要介绍了电路的基本概念与基本定律、电路的分析方法、电路的暂态分析、磁路、电路的频率特性、正弦交流电路、三相交流电路、变压器、电动机、继电器接触器控制系统、可编程控制器的原理及应用、工业企业供电与安全用电以及电工测量。

本书的内容知识体系丰富,语言简明流畅,重点应用知识突出,例题都有解答过程,便于读者学习和掌握。本书可供从事电子技术的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术概论/李创等编著. --北京:中国水利
水电出版社,2015.7

ISBN 978-7-5170-3459-9

I. ①电… II. ①李… III. ①电工技术—概论 IV.
①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 174709 号

策划编辑:杨庆川 责任编辑:陈 洁 封面设计:崔 蕾

书 名	电工技术概论
作 者	李 创 储春华 于 涛 张 玲 刘晓梅 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:mchannel@263.net(万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话:(010)68367658(发行部)、82562819(万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京厚诚则铭印刷科技有限公司
印 刷	三河市佳星印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 18 印张 438 千字
版 次	2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	56.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

电工技术的发展和应用已经实现跨越式发展,并且渗透到我国现代化建设的各个领域。本书在编撰时尽量做到内容的系统性、完整性、科学性和适用性的完整结合,力求深入浅出,从具体知识抽象到理论层次,从物理概念到数学模型的推导尽可能符合人们的思维认知过程,使读者便于认知理解并加以掌握。

本书共 13 章,分为电路、电动机、安全用电以及电工测量四个部分。电路部分包括 1~7 章,主要介绍了电路的基本概念、原理、电路的分析、电磁现象、正弦交流电路、三相交流电路以及电路的频率特性;电动机部分包括 8~11 章,主要介绍变压器、电动机、继电接触器,以及可编程控制器;安全用电部分为第 12 章,主要介绍工业企业供电以及安全用电;电工测量部分为第 13 章,主要介绍了电工测量的基本知识以及常用的测量工具。

本书具有以下特点:

(1)内容涵盖广泛,对电工技术的基础知识进行了详细的介绍,命题的提出以及分析思路、推导过程等都有介绍,读者可以充分根据自身实际情况有选择的进行,以便提高学习效率,打下坚实的基础理论知识。

(2)便于读者进行实践,本书既介绍了电路的基本知识,也提供动手实践的机会,例如第 13 章电工测量中,读者可以依据本书进行实际测量,以便对知识的掌握更加清晰。

(3)加入实用的常识技术应用知识,比如本书第 9 章电动机中就加入了步进电机等一些较为实用的应用知识介绍,实现理论与实践的相互结合。

(4)本书的例题大多源于科研和工程实践,具有实用价值,提高读者的分析计算能力。

全书由李创、储春华、于涛、张玲、刘晓梅编撰,并由李创、储春华、于涛负责统稿,具体分工如下:

第 1 章、第 9 章:李创(海南大学);

第 2 章、第 13 章:储春华(海南大学);

第 4 章、第 5 章、第 7 章、第 8 章:于涛(海南大学);

第 3 章、第 10 章、第 12 章:张玲(海南大学);

第 6 章、第 11 章:刘晓梅(海南大学)。

本书在编撰过程中,以适用社会实际需求为目标,旨在使读者通过本门课程的学习,能够获得电工技术方面必备的基本理论、基本知识和基本技能,掌握简单的电气设备、电子方面的知识,为以后学习工作研究做铺垫。本书在编撰过程中还参考了大量的文献资料,在此向参考文献的作者表示衷心的感谢!

由于作者的水平和经验有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者

2015 年 4 月

目 录

前言

第 1 章 电路的基本概念与基本定律	1
1.1 电路概述	1
1.2 电路的基本状态	5
1.3 基尔霍夫定律	9
1.4 电路的基本元件	12
第 2 章 电路的分析方法	20
2.1 电压源与电流源及其等效变换	20
2.2 电阻的连接及其等效变换	25
2.3 支路电流法	30
2.4 网孔电流法	31
2.5 节点电压法	34
2.6 叠加定理	36
2.7 等效电源定理	38
2.8 含受控电源的电路分析	43
2.9 非线性电阻电路的分析	45
第 3 章 电路的暂态分析	50
3.1 电路的暂态及换路定则	50
3.2 RC 电路的响应	53
3.3 RC 电路的脉冲响应	58
3.4 一阶线性电路暂态分析的三要素法	61
3.5 RL 电路的响应	62
第 4 章 磁路	69
4.1 磁路的基本概念和基本定律	69
4.2 铁磁材料	72
4.3 铁心线圈	76
第 5 章 正弦交流电路	81
5.1 正弦交流电的基本概念	81

5.2	相量法	83
5.3	正弦交流电路中的元件	86
5.4	电阻、电感与电容元件串联的交流电路	94
5.5	正弦交流电路的分析	97
第 6 章	电路的频率特性	101
6.1	非正弦周期电流电路	101
6.2	RC 串联电路的频率特性	113
6.3	RC 串/并联电路的频率特性	116
6.4	RLC 串联电路的频率特性与串联谐振	117
6.5	并联电路的频率特性	123
第 7 章	三相交流电路	127
7.1	三相交流电源	127
7.2	三相负载的连接	130
7.3	三相功率	137
第 8 章	变压器	139
8.1	变压器的基本结构和原理	139
8.2	变压器的运行特性	143
8.3	变压器的额定值	144
8.4	特殊变压器	146
第 9 章	电动机	150
9.1	三相异步电动机	150
9.2	单相异步电动机	166
9.3	直流电动机	170
9.4	控制电动机	180
第 10 章	继电器接触器控制系统	188
10.1	常用的低压电器	188
10.2	电动机继电器接触器的基本控制电路	194
10.3	控制系统的线路图与原理图的绘制规则	205
第 11 章	可编程控制器的原理及应用	210
11.1	可编程控制器的组成及原理	210
11.2	PLC 编程语言以及常用指令	215
11.3	PLC 的设计与应用	226

第 12 章 工业企业供电与安全用电	238
12.1 工业企业供电	238
12.2 安全用电知识	241
第 13 章 电工测量	253
13.1 电工测量的基本知识	253
13.2 电工测量仪表的基本结构和工作原理	256
13.3 电流、电压和功率的测量	261
13.4 电阻、电容和电感的测量	267
13.5 万用表	270
13.6 兆欧表	275
参考文献	279

第1章 电路的基本概念与基本定律

1.1 电路概述

1.1.1 电路

1. 电路的组成及作用

电路是电流的通路,是根据不同需要由某些电工设备或元件按一定方式组合而成的,包括电源或信号源、中间环节和负载,如图 1-1 电路所示。

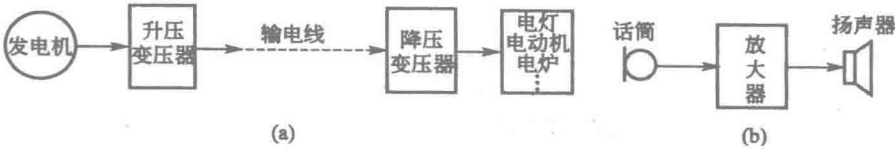


图 1-1 电路示意图

(a)电力系统;(b)收音机电路

电路的构成形式多种多样,其作用可归纳为以下两大类。

①电能的传输和转换,如图 1-1(a)所示的电力系统。

②信号的传递和处理,如图 1-1(b)所示的收音机电路。

发电机是电源,是供应电能的,它可以将热能、水能或核能转换为电能。电池也是常用的电源,可将化学能或光能转化为电能。电压和电流是在电源的作用下产生的,因此,电源又称为激励源,也称输入。用电设备称为负载,如电灯、电炉、电动机和电磁铁等用电器取用电能,是负载,它们分别将电能转换成光能、热能、机械能和磁场能等。由激励源在电路中(包括负载)各处产生的电流和电压称为响应,也称为输出。变压器和输电线路是中间环节,连接电源和负载,起传输和分配电能的作用。

信号的传递和处理过程也类似。接收装置感应的电信号是电源,传输导线和放大器是中间环节,扬声器将电信号还原成声音信号,是负载。

2. 电路模型

电路理论讨论的电路不是实际电路,而是它们的电路模型。为了便于对实际电路进行分析和用数学描述,将实际电路元件理想化(或称模型化),用理想电路元件(电阻、电感、电容等)及其组合模拟替代实际电路中的器件,则这些由理想电路元件组成的电路即实际电路的电路模型。在电路模型中,各理想元件的端子用“理想导线”(其电阻为零)连接起来。

用理想电路元件及其组合模拟替代实际器件即为建模。电路模型要把给定工作条件下的主要物理现象及功能反映出来。例如白炽灯,当其通有电流时,除主要具有消耗电能的性质

(电阻性)外,还产生磁场,即也具有电感性,但电感微小到可忽略不计,因此白炽灯的模型可以是一电阻元件。又如一个线圈,在直流情况下的模型可以是一电阻元件,在低频情况下其模型要用电阻和电感的串联组合代替。可见在不同的条件下,同一实际器件可能要用不同的电路模型。

模型选取得恰当,电路的分析计算结果就与实际情况接近,反之误差会很大,甚至出现矛盾的结果。本书不讨论建模问题。本书所说的电路一般均指实际电路的电路模型,电路元件也是理想电路元件的简称。

一个简单的手电筒电路的实际电路元件有干电池、电珠、开关和筒体,电路模型如图 1-2 所示。干电池是电源元件,用电动势 E 和内电阻(简称内阻) R_0 的串联来表示;电珠是电阻元件,用参数 R 表示;筒体和开关是中间环节,连接干电池与电珠,开关闭合时其电阻忽略不计,认为是一无电阻的理想导体。

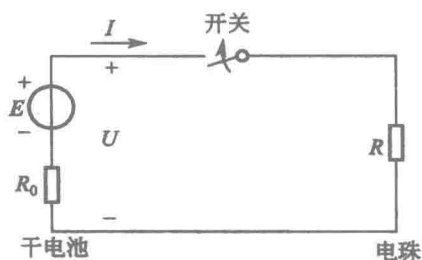


图 1-2 实际电路与电路模型示例

3. 电路基本术语

电路中流过同一电流的一段路径称为支路,一条支路可能是两个元件或几个元件的串联组合,中间没有其他的分支。3 条或 3 条以上支路的连接点称为节点。回路是指由一条或多条支路构成的闭合路径。内部不含其他支路的回路称为网孔,网孔只在平面电路中涉及。如图 1-3 的电路中 $abcda$ 是一个回路,但不是网孔,在它内部有一条支路 bd 。所以图 1-3 的电路中共有 6 条支路,4 个节点(e 点不是节点),7 个回路,3 个网孔。

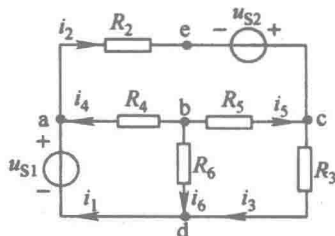


图 1-3 支路、节点和回路

1.1.2 电流、电压及其参考方向

电路中的物理量主要有电流 $i(I)$ 、电压 $u(U)$ 、电动势 $e(E)$ 、功率 $p(P)$ 、电能量 $w(W)$ 、电荷 $q(Q)$ 、磁通 Φ 和磁链 Ψ 。在分析电路时,要用电压或电流的正方向导出电路方程,但电流或电压的实际方向可能是未知的,也可能是随时间变动的,故需要指定其参考方向。

1. 电流及其参考方向

电流是电荷有规则地定向运动形成的,在数值上电流等于单位时间内通过导体横截面的电荷量。

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \left(i = \frac{dq}{dt} \right)$$

若电流 i 不随时间而变化,则称为直流电流,常用大写字母 I 表示。习惯上规定正电荷运动的方向为电流的实际方向,它是客观存在的。但电流的实际方向往往是未知的或变动的,故在分析计算电路时,先任意选定(假定)某一方向为电流的正方向,这一方向即电流的参考方向,从而电流就可看成代数量。当电流的参考方向与其实际方向相同时,电流为正值,即 $i > 0$;反之电流为负值,即 $i < 0$ 。如图 1-4 所示。

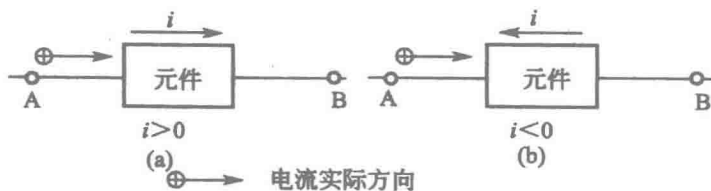


图 1-4 电流的参考方向

电流的参考方向可以用箭标表示,如图 1-4 所示;也可用双下标表示,如图 1-4(a)中,按所选电流参考方向可写作 i_{AB} ,表示电流参考方向由 A 指向 B。在图 1-4(b)中,按所选电流参考方向可写作 i_{BA} 。对同一段电路, $i_{AB} = -i_{BA}$, $i_{BA} = -i_{AB}$ 。在国际单位制中,电流的基本单位是安[培](A),计量微小电流时也用毫安(mA)或微安(μA)作单位。 $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$, $1\mu A = 10^{-6}\text{A}$ 。

2. 电压及其参考方向

电压是两点间电势差(电位差)。 $u_{ab} = V_a - V_b$ 。 a 、 b 两点的电位分别用 V_a 、 V_b 表示。电压体现电场力推动单位正电荷做功的能力。电压 u_{ab} 数值上等于电场力推动单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功。为方便分析计算,习惯上规定电压的实际方向为由高电位端(正极性端)指向低电位端(负极性端),即电位降低的方向。

电源电动势(以后“电源”二字常略去)体现电源力推动单位正电荷做功的能力,用 e 表示任意形式的电动势, E 表示直流电动势。电动势的实际方向规定为由电源低电位端(负极性端)指向其高电位端(正极性端),即电位升高的方向。

与电流一样,也要假定电压的参考方向(电动势的实际方向一般都给出)。电压指定了参考方向后,电压值即成代数值。如图 1-5 所示。

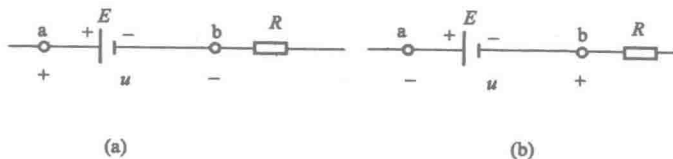


图 1-5 电压的参考方向

(a) $u > 0 (u = E)$; (b) $u < 0 (u = -E)$

通过一个元件的电流和其两端的电压的参考方向都可随意规定。当两者参考方向一致时,称电流、电压参考方向关联,否则称为非关联。电压和电动势的国际单位是伏特(V),其次还可用千伏(kV)、毫伏(mV)或微伏(μ V)作单位。

1.1.3 电位

在分析电子电路时,常用电位这个概念。例如二极管,只有当它的阳极电位高于阴极电位时,管子才导通,否则截止。分析三极管的工作状态,也常要分析各个极的电位高低。

两点间的电压表明了两点间电位的相对高低和相差多少,但不表明各点的电位是多少。要计算电路中某点的电位,就要先设立参考点。参考点的电位称参考电位,通常设其为零。其他各点电位与它比较,比它高的为正电位,比它低的为负电位。电路中各点电位就是各点到参考点之间的电压,故电位计算即电压计算。

参考点在电路图中标以“接地”(⊥)符号。所谓“接地”,并非真正与大地相接。如图 1-6 所示。

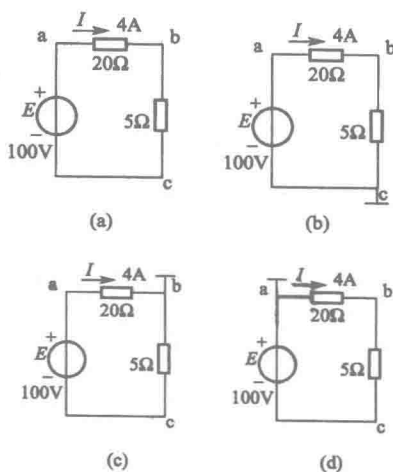


图 1-6 电位计算电路举例

在图 1-6(a)中,由于无参考点,电位 V_a 、 V_b 、 V_c 无法确定。

图 1-6(b)中选 c 为参考点,则 $V_c = 0$,同时可得

$$V_a = U_{ac} = V_a - V_c = E = +100\text{V}$$

$$V_b = U_{bc} = V_b - V_c = 5 \times 4 = +20\text{V}$$

图 1-6(d)中选 a 为参考点,则 $V_a = 0$,而

$$V_b = U_{ba} = -4 \times 20 = -80\text{V}$$

$$V_c = U_{ca} = -100\text{V}$$

由以上结果可以看出:电路中各点的电位随参考点选择的不同而改变,其高低是相对的;而任意两点间的电压是不变的,与参考点无关,是绝对的。

图 1-6(b)、(d)还可简化为图 1-7(a)、(b)表示。电源的另一端标以电位值,使电路图得以简化。

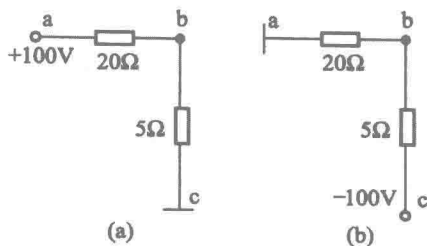


图 1-7 直流电源的简化电位表示

1.2 电路的基本状态

实际电路在使用过程中,可能处于有载、开路或短路三种不同的基本状态。

1.2.1 有载状态

简单直流电路如图 1-8 所示,其中,由电动势为 E 的理想电压源与电阻 R_0 串联表示实际电源, R_L 表示负载电阻。

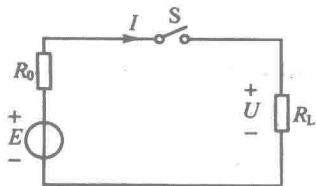


图 1-8 简单直流电路

若开关 S 闭合,就会有电流 I 通过负载电阻,电路就处于有载状态。此时,电路中的电流 I 为

$$I = E / (R_0 + R_L) \tag{1-1}$$

电源的端电压就是负载电压,为

$$U = E - IR_0 \tag{1-2}$$

式(1-2)表明了电源的端电压与其电流的关系,即电源的端电压等于电源的电动势与其内阻上电压降之差。当电流 I 增加时,电源的端电压 U 将随之下降。若将式(1-2)用曲线表示,则称此曲线为电源的伏安特性或电源的外特性。在图 1-9 中,用纵坐标表示电源的端电压 U ,横坐标表示电流 I 。显然,当电源的电动势 E 与其内阻 R_0 为常数时,电源的伏安特性为一向下倾斜的直线。当 $R_0 \ll R_L$ 时,则 $U \approx E$,表明当负载变化时,电源的端电压变化不大,即带负载能力强。

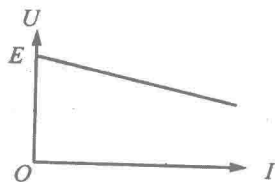


图 1-9 实际电压源的伏安特性

如果电压源的内阻 R_0 为 0, 则有 $U=E$, 即电压源的端电压等于电源的电动势, 为一恒定值, 这时的电源就是理想电压源, 简称电压源。电压源是一个理想电路元件, 它的端电压可以保持为恒定值, 也可以随时按某一规律变化, 如按正弦规律变化。

在公式 $U=E-IR_0$ 的两端同乘以 I 得到

$$UI=EI-I^2R_0, P=P_E-\Delta P$$

式中, P 为负载消耗功率; P_E 为电源产生功率; ΔP 为内阻消耗功率, 这就是功率平衡。电源输出的功率由负载决定。负载大小的概念是: 在电压一定时, 负载增加指负载的电流和功率增加。

电路处于有载工作状态时, 电源向负载提供功率和输出电流。对电源来讲, 一般希望它尽可能多地向负载供给功率和电流, 那么, 它提供给负载的功率和电流有无限制? 另外, 对于负载而言, 它能承受的电压、允许通过的电流以及功率又如何确定? 因此, 为了表明电气设备的工作能力与正常工作条件, 在电气设备铭牌上标有额定电流(I_N)、额定电压(U_N)和额定功率(P_N)。额定值是根据绝缘材料在正常寿命下的允许温升, 考虑电气设备在长期连续运行或规定的工作状态下允许的最大值, 同时兼顾可靠性、经济效益等因素规定的电气设备的最佳工作状态。

在使用电气设备时, 应严格遵守额定值的规定。如果电流超过额定值过多或时间过长, 由于导线发热、温升过高会引起电气设备绝缘材料损坏, 严重时, 绝缘材料也可能被击穿。当设备在低于额定值下工作, 不仅其工作能力没有得到充分利用, 而且设备不能正常工作, 甚至损坏设备。例如, 一白炽灯的额定电压为 220V, 额定功率为 60W, 这表示该灯泡在正常使用时应把它接在 220V 的电源上, 此时它的功率为 60W, 并能保证正常的使用寿命, 而不能把它接在 380V 的电源上(为什么?)。又如某直流发电机的铭牌上标有 2.5kW、220V、10.9A, 这些都是额定值。发电机实际工作时的电流和其发出的功率取决于负载的需要, 而不是名牌上的标注。通常发电机等电源设备可以近似为电压源, 即其端电压基本不变。负载是与电源并联的, 当负载增加时(指并联负载数目的增加), 负载电流就会增加; 反之, 当负载减小时(指并联负载数目的减小), 负载电流就会减小。一般情况下电气设备有三种运行状态, 即额定工作状态: $I=I_N, P=P_N$ (经济合理安全可靠); 过载(超载): $I>I_N, P>P_N$ (设备易损坏); 欠载(轻载): $I<I_N, P<P_N$ (不经济)。

分析电路, 还要判别哪个元件是电源(或起电源的作用), 哪个元件是负载(或起负载作用)。一般可以用下述方法进行判别:

(1) 根据 U 、 I 的实际方向判别

电源: U 、 I 实际方向相反, 即电流从“+”端流出(发出功率)。

负载: U 、 I 实际方向相同, 即电流从“-”端流出(吸收功率)。

(2) 根据 U 、 I 的参考方向判别

U 、 I 参考方向相同, $P=UI>0$, 为负载; $P=UI<0$, 为电源。

U 、 I 参考方向不同, $P=UI>0$, 为电源; $P=UI<0$, 为负载。

例 1-1 在图 1-10 中, 已知: $U=220V, I=5A$, 内阻 $R_{01}=R_{02}=0.6\Omega$ 。求: ①电源的电动势 E_1 , 和负载的反电动势 E_2 ; ②说明功率的平衡关系。

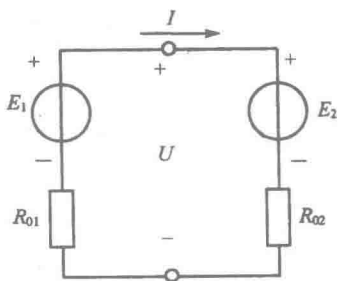


图 1-10 例 1-1 的电路

解:①对于电源 $U = E_1 - IR_{01}$, 即 $E_1 = U + IR_{01} = 220\text{V} + 5 \times 0.6\Omega = 223\text{V}$,

$U = E_2 + IR_{02}$, 即 $E_2 = U - IR_{02} = 220\text{V} - 5 \times 0.6\Omega = 217\text{V}$ 。

②由上面可得, $E_1 = E_2 + IR_{01} + IR_{02}$, 等号两边同时乘以 I , 则得 $E_1 I = E_2 I + I^2 R_{01} + I^2 R_{02}$, 代入数据有 $223\text{V} \times 5\text{A} = 217\text{V} \times 5\text{A} + 25\text{A} \times 0.6\Omega + 25\text{A} \times 0.6\Omega$, $1115\text{W} = 1085\text{W} + 15\text{W} + 15\text{W}$ 。

由此可见, 在一个电路中, 电源产生的功率和负载取用的功率以及内阻所消耗的功率是平衡的。

1.2.2 开路状态

开路状态又称断路状态, 如图 1-11 所示。将开关 S 断开, 其电路特征为:

① $I = 0$, 电流为零。

② $U = U_0 = E$, 电源端电压等于开路电压。

③ $P = 0$, 负载零功率。

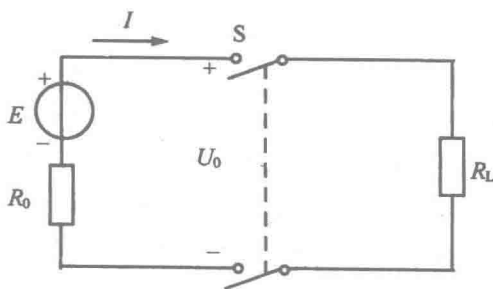


图 1-11 电路开路状态

图 1-12 所示电路中某处断开时的特征:

①开路处的电流 I 等于零。

②开路电压 U 视有源电路情况而定。

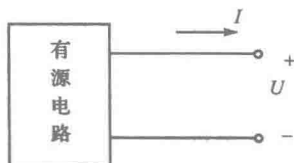


图 1-12 开路状态

1.2.3 短路状态

当两根供电线在某一点由于绝缘损坏而接通时,电源就处于短路状态,如图 1-13 所示。电源短路状态的特征是:

① $I = I_{sc} = \frac{E}{R_0}$, 短路电流很大。

② $U = 0$, 电源端电压为零。

③ $P = 0$, 负载功率为零。

④ $P_E = I^2 R_0$, 电源产生的能量全被内阻消耗掉。

由于电源内阻很小,所以电源短路时将产生很大的短路电流,超过电源和导线的额定电流,如不及时切断,将引起发热而使电源、导线以及仪器、仪表等设备烧坏。

为了防止短路所引起的事故,通常在电路中接入熔断器或断路器,一旦发生短路事故,它能迅速自动切断电路。

必须指出,有时也为了某种需要,将电路的某一部分人为地短接,但这与电源短路是两回事。

如图 1-14 所示,电路中某处短路时的特征是:

① 短路处的电压等于零, $U = 0$ 。

② 短路处的电流 I 视有源电路情况而定。

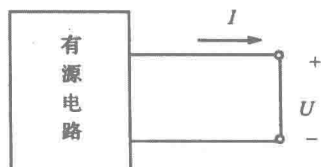


图 1-14 短路状态

例 1-2 测量一节蓄电池的电路如图 1-15 所示。当开关 S 位于位置 1 时,电压表读数为 12.0V;开关 S 位于位置 2 时,电流表读数为 11.6A。已知电阻 $R = 1\Omega$, 电流表内电阻 $r = 0.03\Omega$, 试求蓄电池的电动势 E 与内阻 R_0 。

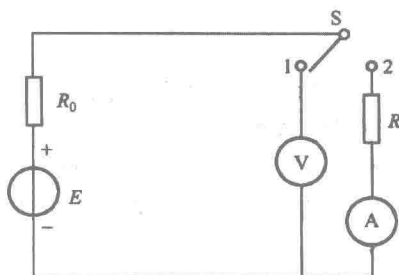


图 1-15 例 1-2 的图

解:当开关 S 位于位置 1 时,由于电压表内阻很大,电路近似处于开路状态,故开路电压

$$U_{oc} = E = 12.0V$$

当开关 S 位于位置 2 时, 电流表有内阻 r , 故电路中电流

$$I = \frac{E}{R_0 + R + r}$$

由此可解得

$$R_0 = E/I - (R + r) = 12.0\text{V}/11.6\text{A} - (1.03\Omega) \approx 0.0045\Omega = 4.5\text{m}\Omega$$

1.3 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是德国物理学家基尔霍夫在 1847 年发表的一篇划时代电路理论论文中提出来的, 它是进行电路分析的基本定律, 基尔霍夫定律又分为基尔霍夫电流定律和电压定律。

1.3.1 基尔霍夫电流定律

1. 定律内容

基尔霍夫电流定律又称为基尔霍夫第一定律(Kirchhoff Laws), 简称为 KCL。可表述为: 对电路中的任一节点, 在任一时刻流入节点电流的总和等于流出节点电流的总和, 记为

$$\sum I_i = \sum i_o \quad (1-3)$$

基尔霍夫电流定律是对节点电流所加的约束关系, 与元件的性质无关。式中 I_i 表示流入节点的电流, i_o 表示流出节点的电流。如果取流入为正, 流出为负, 则式(1-3)也可以写为

$$\sum i = 0$$

即流入流出节点电流的代数和为零。例如在图 1-15 中对节点 a 可列出 $i_1 + i_4 = i_2$ 或 $i_1 - i_2 + i_4 = 0$ 两种式子, 把它们称为基尔霍夫电流方程, 也叫节点方程。方程中的正负号是根据电流的参考方向确定的, 不管实际方向如何。

2. 基尔霍夫电流定律推广到闭合面

基尔霍夫电流定律不仅适用于电路的节点, 还可以推广应用到电路中任意假设的闭合面。仍以图 1-15 为例, 先对节点列方程如下:

$$\text{节点 } a: \quad i_1 - i_2 + i_4 = 0$$

$$\text{节点 } b: \quad -i_4 - i_5 - i_6 = 0$$

$$\text{节点 } c: \quad i_2 - i_3 + i_5 = 0$$

$$\text{将以上 3 式相加得到: } i_1 - i_3 - i_6 = 0$$

如果把图 1-15 作一闭合面如图 1-16, 会发现 i_1 、 i_3 是出入该闭合面的电流, 由上面推导又知这 3 个电流满足 KCL, 所以可以说 KCL 也适用于电路中任意假设的闭合面一个闭合面可以看做一个广义节点。

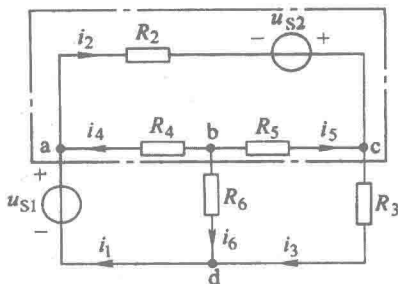


图 1-16 KCL 适用于闭合面

1.3.2 基尔霍夫电压定律

1. 定律内容

基尔霍夫电压定律又称为基尔霍夫第二定律(简称为 KVL)。可表述为:在任一瞬时,沿任一回路绕行一周,回路中各部分电压降的代数和等于零,即

$$\sum u = 0 \quad (1-4)$$

基尔霍夫电压定律是对回路中各支路电压所加的约束关系。按基尔霍夫电压定律列出的方程叫做基尔霍夫电压方程,也叫回路方程。

基尔霍夫电压定律是能量守恒定律在电路中的具体体现。因为能量不能创造也不能消灭,所以单位正电荷在回路中绕行一周又回到原点时,电场力做功的代数和为 0,也就是电压的代数和为 0。也可以理解为电位的参考点选定后,在同一瞬时,某点的电位只能是单值的,从某点出发,绕一周又回到该点,路途中电位有升有降,但升降的代数和应为 0。如在图 1-16 的电路中,当沿回路 a、b、c、d、a 顺时针绕行一周,则有

$$u_{ab} + u_{bc} + u_{cd} + u_{da} = 0$$

如果把各支路电压降具体表示出来则有

$$-R_4 i_4 + R_5 i_5 + R_3 i_3 - u_{S1} = 0$$

由上式可归纳列 KVL 方程时该注意的各部分电压的符号问题。按照绕行方向沿着回路绕行,电压方向凡是与绕行方向一致的取正,相反的取负,其中电压方向以参考方向为准。或者说绕行途中遇到电位降落的为正,电位升高的为负。绕行方向是任取的。就图 1-16 来说,虽然没有标出各电阻电压的参考方向,但电流参考方向已有,默取电压和电流为关联参考方向。

如果把电阻压降的代数和放在左边,而把电源放在右边多于是整理得

$$-R_4 i_4 + R_5 i_5 + R_3 i_3 = u_{S1}$$

写成一般形式记为

$$\sum Ri = \sum u_S \quad (1-5)$$

其含义是沿回路所有电阻上电压降的代数和等于该回路所有源电压的代数和。下面再用基尔霍夫电压定律对图 1-16 电路的 3 个网孔列 KVL 方程,都取顺时针的绕行方向

对 acba 网孔: $R_2 i_2 + R_4 i_4 - R_5 i_5 = u_{S2}$