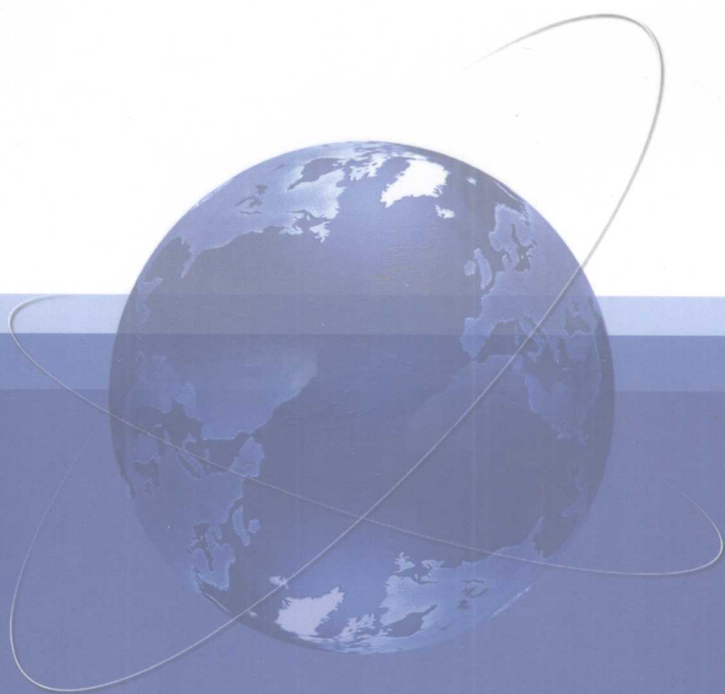




21世纪高职高专规划教材

电工电子技术

(非电类专业用)



杨静生 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



教育部《中等职业学校公共基础课程》

电工电子技术

(非电类专业用)

机械工业出版社

机械工业出版社

21 世纪高职高专规划教材

电工电子技术

(非电类专业用)

主 编	辽宁石化职业技术学院	杨静生
副主编	安徽水利水电职业技术学院	彭 伟
	黑龙江省佳木斯大学	任 莲
参 编	太原理工大学长治学院	原凌燕
	河北机电职业技术学院	汪 斌
	佛山职业技术学院	李诚义
	安徽水利水电职业技术学院	熊业文
	洛阳大学机电学院	李素芳
主 审	辽宁工学院	王艳秋



机械工业出版社

本书是针对2年制和3年制高等职业技术教育的特点,根据编者多年的教学和实践工作经验编写的。全书共分11章,包括直流电路、交流电路、磁路和变压器电动机、电气测量技术、供配电技术、电气控制技术、可编程序控制器、模拟电子与数字电子等应用技术。

本书在内容编写上突破了原来的教学体系,形成模块化结构模式,拓宽应用范围,加强实践能力的培养。教学内容以必需、够用为原则,减少理论推导,课程内容结合技术应用。

本书适用于机械设计、机械制造、机械电子工程、汽车与机械工程等以及材料、化工、过程装备等高职非电类专业学生使用,也是相关工程技术人员很好的实用技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术/杨静生主编. —北京:机械工业出版社,
2004.8

21世纪高职高专规划教材. 非电类专业用

ISBN 7-111-14971-8

I. 电… II. 杨… III. ①电工技术—高等学校:
技术学校—教材②电子技术—高等学校:技术学校—教材
IV. ①TM②TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第073690号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:余茂祚

责任编辑:余茂祚 版式设计:冉晓华 责任校对:魏俊云

封面设计:饶薇 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004年9月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm $1/16$ ·16.5印张·404千字

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

21 世纪高职高专规划教材

编 委 会 名 单

编 委 会 主 任 王文斌 郝广发

编委会副主任 (按姓氏笔画为序)

马元兴	王茂元	王明耀	王胜利	王锡铭
田建敏	刘锡奇	杨文兰	杨 飒	李兴旺
李居参	杜建根	余元冠	沈国良	沈祖尧
陈丽能	陈瑞藻	张建华	茆有柏	徐铮颖
符宁平	焦 斌			

编 委 会 委 员 (按姓氏笔画为序)

王志伟	付丽华	成运花	曲昭仲	朱 强
齐从谦	许 展	李茂松	李学锋	李连邨
李超群	杨克玉	杨国祥	杨翠明	吴诗德
吴振彪	吴 锐	肖 珑	何志祥	何宝文
陈月波	陈江伟	张 波	武友德	周国良
宗序炎	俞庆生	恽达明	娄 洁	晏初宏
倪依纯	徐炳亭	唐志宏	崔 平	崔景茂

总 策 划 余茂祚
策 划 助 理 于奇慧

前 言

电工电子技术是一门实践性应用较强的技术,随科学技术的发展,电工电子技术已渗透到了现代科学的各个领域。课程也是高等工业院校必修的一门技术基础课。本书是根据教育部教高[2002]2号文件精神,由中国机械工业教育协会、机械工业出版社组织全国80多所高等院校编写的21世纪高职高专规划教材之一。内容适合3年制和5年制高等职业院校、高等工程专科院校、成人高等学校、职工大学非电类专业师生阅读,也可供工业企业有关工程技术人员参考。

为了达到培养应用人才的目的,在内容取舍上注重体现能力的培养,突出实际、实用、实践的原则,贯彻重概念、重结论、重技术应用的指导思想,注重内容的典型性、针对性,加强理论联系实际。全书共分11章,主要介绍直流电路、交流电路、磁路、电动机与变压器、低压供配电技术、电气控制技术、可编程控制技术、模拟电子技术、数字电子技术等内容。

全书由杨静生担任主编并统稿,并编写本书前言、第1章和第9章;彭伟担任副主编,编写了第7章;任莲担任副主编,编写了第4章和第6章;汪斌编写了第2章和第3章;原凌燕编写了第11章;李素芳编写了第10章;李诚义编写了第5章;熊业文编写了第8章。全书由辽宁工学院王艳秋教授担任主审。

由于编者经验不足,水平有限,书中难免有不当或错误之处,恳请有关专家和广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 直流电路	1	3.4 三相电功率	57
1.1 电路和电路模型	1	本章小结	59
1.2 电路变量及其参考方向	3	复习思考题	59
1.3 电路基本定律	5	第4章 磁路与铁心线圈电路	61
1.4 电路的工作状态	7	4.1 磁路及基本物理量	61
1.5 负载获得最大功率 的条件	9	4.2 磁性材料与磁化曲线	62
1.6 电路的等效变换及应用	10	4.3 磁路定律与计算	63
1.7 电路中电位的概念 及计算	13	4.4 交流铁心线圈电路	66
1.8 支路电流法	15	本章小结	68
1.9 叠加原理	17	复习思考题	68
1.10 戴维南与诺顿定理	19	第5章 电气测量技术	69
1.11 电桥电路	22	5.1 概述	69
本章小结	24	5.2 直读式指示仪表	71
复习思考题	24	5.3 电流、电压和功率 的测量	75
第2章 单相交流电路	27	5.4 万用表	79
2.1 正弦交流电的基本概念	27	5.5 非电量测量	84
2.2 正弦交流电的表示与 计算	30	本章小结	89
2.3 单一参数正弦交流电路	31	复习思考题	90
2.4 RLC 串联电路	35	第6章 变压器和电动机	92
2.5 正弦交流电路的分析 方法	38	6.1 变压器的概述	92
2.6 电路的谐振	41	6.2 变压器的工作原理	93
2.7 电感性负载与电容器并联 的电路	43	6.3 额定值与运行特性	95
本章小结	46	6.4 特种变压器	96
复习思考题	47	6.5 三相异步电动机	97
第3章 三相交流电路	49	6.6 三相异步电动机的运行	103
3.1 三相正弦交流电源	49	6.7 单相异步电动机	106
3.2 三相负载的星形联结	51	6.8 直流电动机	107
3.3 三相负载的三角形联结	54	6.9 特种电机	109
		本章小结	110
		复习思考题	111
		第7章 低压供配电技术	113
		7.1 电气设备中的电弧问题	113

7.2 低压电器设备	115	10.2 直流稳压电源	194
7.3 互感器	123	10.3 单管交流放大电路	196
7.4 低压供电线路	126	10.4 多级放大电路	202
7.5 低压供电系统	131	10.5 直流放大器	206
7.6 安全用电	140	10.6 LC 振荡器	207
7.7 电气照明	144	10.7 集成运算放大器及其 应用	210
本章小结	148	本章小结	215
复习思考题	148	复习思考题	216
第 8 章 电气控制技术	150	第 11 章 数字电子技术	221
8.1 继电器	150	11.1 脉冲与数字概述	221
8.2 主令电器	155	11.2 基本逻辑电路	224
8.3 电动机的基本控制电路	158	11.3 计数器	234
8.4 电气控制电路实例	161	11.4 寄存器	235
本章小结	165	11.5 译码与数码显示	237
复习思考题	166	11.6 模拟量与数字量的转换	239
第 9 章 可编程序控制器	168	11.7 数字式仪表的应用	244
9.1 概述	168	本章小结	246
9.2 PLC 的结构与工作原理	168	复习思考题	247
9.3 PLC 系统配置与编程	171	附录	249
9.4 指令系统	175	附录 A 复数	249
9.5 PLC 控制系统的应用	185	附录 B 导线或电缆及照明常用 资料	250
本章小结	188	参考文献	254
复习思考题	189		
第 10 章 模拟电子技术	191		
10.1 基本电子元件与特性	191		

第1章 直流电路

主要内容与教学目标：介绍电路模型与工作状态、电路的基本定律和定理以及电路分析的基本方法。同时，引入了电路变量的参考方向、电源的等效变换以及等效电路等重要概念。本章以直流电路为研究对象，所涉及的原理与方法可推广应用于以后章节，本章是全书的理论基础。

通过对本章的学习，要求掌握电路基本变量之间的关系，利用电路定律与定理分析电路，具有电路基本分析计算的能力，利用电路理论解决实际相关问题。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路

1. 电路的定义 电是能量和信息的良好载体。为了实现电能和电信号的产生、传输及使用，人们往往将若干电气元件按照特定的要求连接起来，构成“电路”。因此，电路是为了实现一定目的而连接起来的若干电气元件的集合，电路是电流的流通过径。在复杂的网状电路中或讨论电路的某一普遍规律时，又将电路称为网络，电路和网络这两个术语在电路中是通用的。

2. 电路的组成 实际电路的形式是多种多样的，以功能分类，电路由电源、负载和中间环节三部分组成，如图 1-1 所示。

(1) 电源：电源是产生电能或电信号的设备。将各种非电能（如热能、化学能、光能和原子能等）转换成电能的设备称为电源；将各种物理量转变为电信号的装置称为信号源，信号源也是电源的一种。

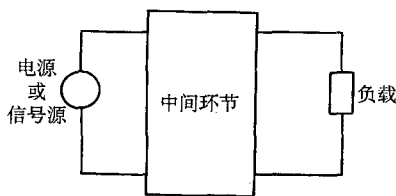


图 1-1 电路的组成

另外，将某种电能转换成特殊需要的电能装置也称为电源。例如，广泛应用于计算机网络、办公自动化、通信、航空航天等中的 UPS 不间断电源，将质量较差的市电转换成电压、频率稳定的高质量的交流电源，而且一旦市电供电中断，它能保持一段时间（一般为 15~30min）的供电。

(2) 负载：负载是使用电能或接收电信号的设备。与电源相反，负载将电能转换成其他形式的能量。在现代日趋复杂的各种电路中，负载和电源都被视为广泛而相对的概念。例如，电视接收机中，某一级放大电路对于它的前一级放大电路而言可看作为负载，而对于它的后一级电路则又可被看作为电源。

(3) 中间环节：中间环节是把电能或信号从电源传输到负载的设备。它可以很简单（如二根导线），也可以是一个具有极其复杂的控制功能的传输网。

虽然电路的种类繁多，具体功能各异，但是从电路的基本功能上分，可以分为两类：一类是信号的产生和处理电路；另一类是功率（或能量）的产生和处理电路。各种物理量的测量电路、放大电路、声音、图像或文字处理电路等即属于前者；各种整流电路、变频电路、

逆变电路及直流变换电路等属于后者。

1.1.2 电路模型

电路理论是在电路模型的基础之上建立起来的。只要电路模型建立得足够正确，则通过电路模型的研究所获得的结论就能足够正确地反映出实际电路中所出现的情况。

实际电路中器件的种类很多、功能各异，其中涉及到的物理过程也多种多样，涉及到声、光、热、化、电、磁等多方面问题，本课程只注重其中的电磁过程。为了便于进行分析，常常在一定条件下对实际电路器件加以理想化，抽象出反映单一电磁性质的理想化电路元件，简称理想元件。由这些理想元件组合构成的电路为实际电路的电路模型，这是研究实际电路的常用方法。电路理论研究的对象是电路模型而不是实际电路，人们习惯上也将电路模型简称为电路。

在对实际电路研究过程中，用理想电阻元件来模拟电路对电能的不可逆消耗；用理想电容元件模拟电场能的存储；用理想电感元件来模拟磁场能的存储。此外，电压源元件、电流源元件、受控源元件、耦合电感元件和理想变压器元件等，它们都有精确的数学定义式和相应的电路符号，所以便于分析计算，图 1-2 给出三种基本元件电路模型的图形符号。

一个实际的电路元件在电路中的作用往往不是单一的。例如，电感线圈，一方面它会储存磁场能，另一方面会发热（耗能）。在高频场合，它还会有电容效应。因此，在建立电路模型时必须抓住其主要性质。在低频时，使用电感与电阻的串联组合来模拟电感线圈，如图 1-3 所示。

对于独立源，当忽略他们的内部损耗时，可以用理想电压源和理想电流源两种模型表示。

1. 理想电压源 理想电压源是一个二端元件，其端电压在任一瞬间与通过它的电流无关，或者恒定不变（直流情况）；或者按某一固定函数规律变化。理想电压源又称为电压源。

电压源的图形符号如图 1-4a

所示。图 1-4b 是理想干电池的图形符号。直流电压源的电压电流特性，如图 1-5 所示，电压电流特性也称为伏安特性，它的端电压恒定不变，流经它的电流的大小和方向均由外部电路决定，理想电压源可以输出无穷大的电流和无穷大的功率。

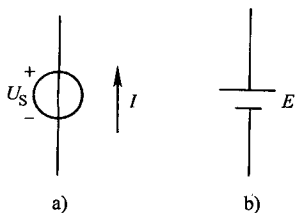


图 1-4 电压源图形符号
a) 通用图形符号 b) 干电池符号

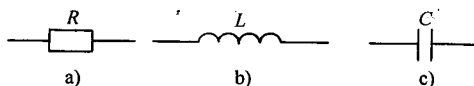


图 1-2 三种基本理想元件的图形符号
a) 电阻元件 b) 电感元件 c) 电容元件

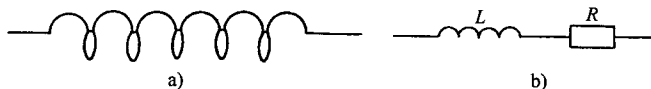


图 1-3 用电感与电阻的串联组合模拟电感线圈
a) 电感线圈 b) 电路模型

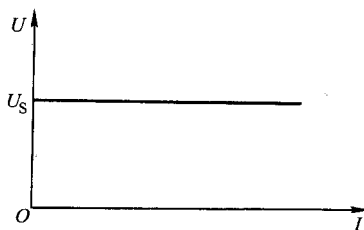


图 1-5 直流电压源伏安特性

2. 理想电流源 理想电流源是一个二端元件, 它发出的电流与两端的电压无关, 或者恒定不变 (直流情况), 或者按某一固定函数规律随时间而变化。理想电流源又称为电流源。理想电流源的图形符号如图 1-6 所示。直流电流源的电压电流特性如图 1-7 所示。它所发出的电流恒定不变, 它的端电压的大小与方向由外部电路决定, 可以是无穷大电压, 也可以是无穷大功率。

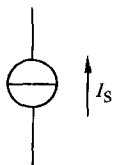


图 1-6 电流源图形符号

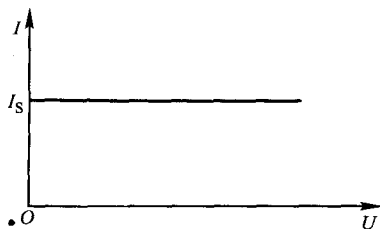


图 1-7 直流电压源伏安特性

由于实际电源内部都有损耗, 因此, 理想电压源和理想电流源是不存在的。实际电压源当负载变化时端电压会随之变化, 相当于理想电压源与电阻相串联, 当负载变化时实际电流送出的电流也会随之变化。本书中以后所涉及到的电路元件均指理想电路元件, 所设计的电路除特殊说明外, 均指电路模型。电路中的连接导线为既无电阻又无电感和电容效应的理想导线。

1.2 电路变量及其参考方向

电路中的主要物理量有电流、电压、功率和能量, 在电路分析计算中经常用到的变量是电流和电压。

1.2.1 电流及其参考方向

电流是带电粒子 (电子、离子等) 的定向运动。电流的大小等于单位时间内流过导体横截面的电荷量, 用符号 i 表示, 即

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

式中 Δq —— Δt 时间内通过导体横截面的电荷量。

电流的实际方向为正电荷的运动方向。当电流的大小和方向不随时间变化时, $dq/dt =$ 定值, 这种电流为直流电流 (DC), 用大写英文字母 I 表示, 则式 (1-1) 可以写成

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

式中 q ——时间 t 内通过导体横截面的电荷量。

在国际单位制中, 电流的主要单位是安培, 符号为 A, 常用的单位还有: 千安 (kA), 毫安 (mA) 和微安 (μA) 等, 其换算关系为

$$1A = 10^3mA = 10^6\mu A$$

在复杂的电路分析过程中, 一段电路电流的实际方向很难预先判断出来, 在电路中就无法标明电流的实际方向。为了计算方便, 在电路分析中引入电流参考方向的概念。

电流的参考方向是人为设定的电流运动的正方向, 在电路中用实线箭头表示。在电流参

考方向一定的情况下, 电流为代数量, 其数值可正可负。若电流的真实方向与参考方向一致, 则电流为正值; 若电流的真实方向与参考方向相反, 则电流为负值。图 1-8 表明了电流的参考方向与实际电流方向之间的关系。注意, 电流是一种物理现象, 电流方向是客观存在的, 电流的参考方向仅仅是为了计算方便而人为引进的概念。

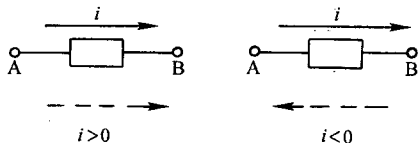


图 1-8 电流的参考方向

1.2.2 电压及其参考方向

当导体中存在电场时, 电荷在电场力的作用下运动, 电场力对运动的电荷做功, 运动电荷的电能将减少, 电能转化为其他形式的能量。电路中 A、B 两点之间的电压 u_{AB} 是单位正电荷在电场力的作用下由点 A 移动到点 B 所减少的电能, 即

$$u_{AB} = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta W_{AB}}{\Delta q} = \frac{dW_{AB}}{dq} \quad (1-3)$$

式中 Δq ——点 A 移动到点 B 的电荷量;

ΔW_{AB} ——移动过程中电荷所减少的电能。

电压的实际方向是使正电荷电能减少的方向, 也是电场力对正电荷做功的方向。

在国际单位制中, 电压的单位是伏特, 单位符号为 V。常用的单位还有: 千伏 (kV)、毫伏 (mV) 和微伏 (μV) 等。

对于直流电压, 用大写字母 U 表示。

在电路分析中电压的参考方向有三种表示方式:

1) 采用正 (+)、负 (-) 极性表示, 称为参考极性, 如图 1-9a 所示。电压的参考方向从正极端指向负极端。

2) 采用实线箭头表示, 如图 1-9b 所示。

3) 采用双下标表示。如 U_{AB} , 表示电压的参考方向由 A 指向 B。

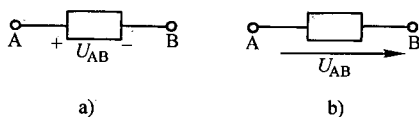


图 1-9 电压的参考方向

电压的参考方向指定之后, 电压为代数量。当

电压的实际方向与参考方向一致时, 电压为正值; 当电压的实际方向与参考电压方向相反时, 电压为负值。

1.2.3 电压、电流的关联参考方向

同一元件电压与电流参考方向的选择是任意的, 可以相同, 也可以相反。为了分析问题方便, 常将电压与电流的参考方向选得相同, 称为关联参考方向, 如图 1-10a 所示。图 b 为非关联参考方向。采用关联参考方向可以简化参考方向的标注, 只标出电压或电流的参考方向, 另一个电量的参考方向由关联一致来确定。

某一元件如采用关联参考方向, 则该元件功率关系式为 $P = UI$ 。在此关联参考方向下, 元件耗散或释放的功率由 P 的符号决定。

$P > 0$ 元件耗散功率 (负载)。

$P < 0$ 元件释放功率 (电源)。

$P = 0$ 元件既不吸收也不释放功率 (无耗元件)。

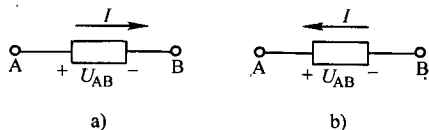


图 1-10 关联与非关联参考方向

a) 关联参考方向 b) 非关联参考方向

1.3 电路基本定律

当构成电路元件及电路本身的尺寸远小于电路工作时的电磁波的波长时，称这些元件为集中元件或集中参数元件。由集中参数元件连接而成的电路，称为集中参数电路。欧姆定律、克希荷夫定律和焦耳定律是电路的三个基本定律。欧姆定律体现了电阻元件自身的经过理想化了的物理特征；克希荷夫定律揭示出电路元件在互相连接之后发生的电压电流之间所遵循的规律。

先介绍几个有关电路结构的名词。

支路。由单个电路元件或几个电路元件串联而成的电路分支称为支路，如图 1-11 中 abc、ac、adc 等，其中 a、c 之间有三条支路。

节点。三条或三条以上支路的连接点称为节点。图 1-11 中的 a、c 都是节点。

回路。电路中任意一个由若干支路组成的闭合路径称为回路。图 1-11 中的 abca、adca、abcda 都是回路。

1.3.1 克希荷夫电流定律(KCL)

克希荷夫电流定律 (KCL) 又称为克希荷夫第一定律。在集中参数电路中，任何时刻，流出（或流入）一个节点的所有支路电流的代数和恒等于零。

对图 1-11 所示电路的节点 a 应用 KCL 有

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1-4)$$

式 (1-4) 中电流流出节点电流取“-”，电流流入节点电流取“+”，而电流是流出还是流入节点均按电流的参考方向来判定。写出一般式为

$$\sum I = 0 \quad (1-5)$$

将式 (1-4) 改写成

$$I_3 = I_2 + I_1 \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表明，在集中参数电路中，任意时刻，流入节点的电流之和等于流出该节点电流之和。

式 (1-6) 写成一般式为

$$\sum I_i = \sum I_o \quad (1-7)$$

式中 I_i ——流入的电流；

I_o ——流出的电流。

KCL 还可以运用于任意假设的封闭面，这种封闭面也称作“广义节点”。如图 1-12 所示电路。对于点画线封闭面所包围的电路，也可以列出其对外连接的三条支路电流的 KCL 方程

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

KCL 反映了电流连续性这一基本规律。

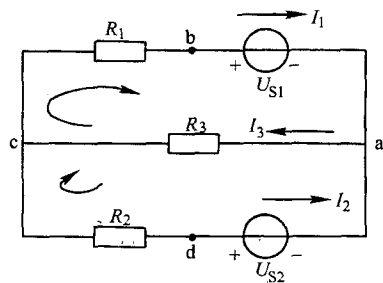


图 1-11 支路、节点、回路示例

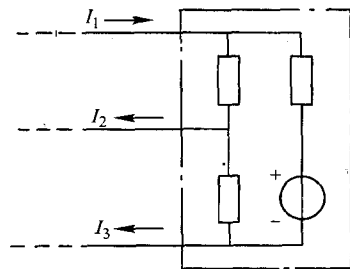


图 1-12 对封闭面的 KCL

1.3.2 克希荷夫电压定律 (KVL)

克希荷夫电压定律 (KVL) 又称为克希荷夫第二定律。在集中参数电路中, 任何时刻, 沿着一个回路的所有支路电压的代数和恒等于零。KVL 的数学表达式为

$$\sum U = 0 \quad (1-8)$$

在写出式 (1-8) 时, 先要任意规定回路的绕行方向, 凡支路电压的参考方向与回路绕行方向一致者, 此电压前面取 “+” 号, 支路电压的参考方向与回路绕行方向相反者, 此电压前面取 “-” 号。回路的绕行方向可用箭头表示, 也可以用闭合节点序列来表示, 如图 1-11 所示。回路 $acba$ 的绕行方向如图中箭头所示, 应用 KVL 有

$$U_{S1} + I_3 R_3 + I_1 R_1 = 0$$

所以, 在集中参数电路中, 任意时刻, 沿任意闭合节点序列, 全部电压升之和等于电压降之和, 是 KVL 的另一种形式。

如果一个闭合节点序列不构成回路, 节点之间有开路电压, KVL 同样适合。由此可见, 电路中任意两点间的电压与计算路径无关, 是单值的。克希荷夫电压定律是能量守恒定律在电路中的具体表现。

KCL 和 KVL 只与电路中元件互相连接的方式有关, 而与元件的性质无关。不论电路中的元件是线性的还是非线性的, 时变的还是非时变的 (定常的), 只要是集中参数电路, KCL 和 KVL 总是成立的。

例 1 图 1-13 所示电路, 已知 $U_{S1} = 2V$, $U_{S2} = 6V$, $U_{S3} = 4V$, $R_1 = 1.5\Omega$, $R_2 = 1.6\Omega$, $R_3 = 1.2\Omega$ 。按图示电流参考方向, 若 $I_1 = 1A$, $I_2 = -3A$ 。试求电流 I_3 ; 电压 U_{AC} 和 U_{CD} 。

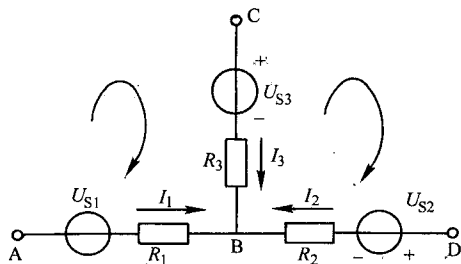


图 1-13 例 1 电路

解 根据 KCL

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

所以

$$I_3 = -I_1 - I_2 = -1A - (-3A) = 2A$$

图 1-13 电路中虽未形成闭合回路, 但 A、B、C 三点中任意两点间的电压可以利用 KVL 定律加以确定, 由 KVL 定律可以写出

$$U_{AC} - U_{S3} + I_3 R_3 - I_1 R_1 + U_{S1} = 0$$

$$U_{CD} + U_{S2} + I_2 R_2 - I_3 R_3 + U_{S3} = 0$$

因此得

$$U_{AC} = U_{S3} - I_3 R_3 + I_1 R_1 - U_{S1} = 4V - 2 \times 1.2V + 1 \times 1.5V - 2V = 1.1V$$

$$U_{CD} = -U_{S2} - I_2 R_2 + I_3 R_3 - U_{S3} = -6V - (-3) \times 1.6V + 2 \times 1.2V - 4V = -2.8V$$

值得注意的是, 在应用克希荷夫定律时, 方程中各项前的符号由各元件电压的参考方向与绕行方向是否一致而定, 一致取正号, 相反者取负号。

1.3.3 焦耳定律

当用电设备接通电源后, 其中就有电流流过, 并将电能转化为热能、光能、机械能和化学能等非电形式的能量。如果负载电阻 R 两端的电压为 U , 流过的电流为 I , 根据电场力

移动单位正电荷所作的功等于电压 $U = W/q$ 这一关系, 可以得出在单位时间 t 内, 正电荷 q 通过电阻 R 由 a 点移到 b 点电场力所作的功为

$$W = Uq = UI t \quad (1-9)$$

这个功就是电阻 R 所吸收的电能, 电阻将所吸收的电能转换热能, 焦耳首先阐述了这种能量转换关系, 所以又称为焦耳定律。

根据欧姆定律, 电阻吸收电能又可以写成

$$W = UI t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad (1-10)$$

电能的单位为“焦耳”, 记作“J”。经常还以“千瓦时”(kW·h)作为电能单位, 1 千瓦时 (kW·h) 又称为 1 度。

某一元件在单位时间内所吸收(或消耗)的电能为该元件吸收(或消耗)的功率。电路中某一元件或某一部分瞬时功率的计算公式为

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-11)$$

式中 $u(t)$ 为该部件的端电压, $i(t)$ 为流经该部件的电流。

在直流电路中, 功率的计算公式为

$$P = UI \quad (1-12)$$

如果某段电路只含有电阻元件, 则这段电路总是吸收功率, 将电功率转换为热能消耗了。

在分析计算电路时, 结合参考方向和计算出的电压、电流的正、负, 即可判断电流、电压的实际方向。对于电源(电压源或电流源), 如实际电流从实际的正端流出, 表明正电荷在非电场力作用下, 在电源内部从低电位移动到高电位, 克服电场力作功, 电源产生了电功率; 实际电流从实际的正端流入, 表明正电荷在外电场力的作用下, 由高电位移动到低电位, 外电场力作了功, 此时电源作为负载在吸收功率。

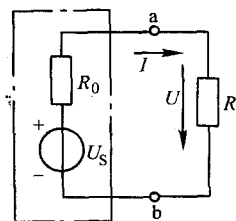
无论电源输出电功率还是吸收电功率, 实际上电流流过电源内部总有一定的能量损耗, 即存在着部分电能转换为热能的过程, 因此, 实际电源可以用理想电压源 U_S 和内阻 R_0 的串联结构来代表, R_0 代表电源内部损耗的等效电阻, 实际电源的等效电路如图 1-14 所示, 如图电路点画线框中既有电源, 又有电阻且对外有两个端头, 称为含源二端网络。电源两端的电压(又称为端电压)为

$$U = U_S - IR_0 \quad (1-13)$$

电源输出的功率

$$P = UI = U_S I - I^2 R_0 \quad (1-14)$$

即电源输出功率可以用电源的端电压与电流的乘积 UI 来计算, 又等于电源产生的功率 $U_S I$ 减去内阻消耗的功率 $I^2 R_0$ 。



等效实际电源

图 1-14 负载电阻与电源连接

1.4 电路的工作状态

实际应用中, 电源与负载不能任意连接, 如果连接不当, 会使电源或负载损坏。为了正确选用电源和负载, 必须知道它们的额定值。

1.4.1 电路的基本状态

了解电路的基本状态及特点,对正确而安全的用电有非常重要的指导作用。综合实际电路的状态,有通路、开路和短路三种基本状态。

1. 通路 如图 1-15a 所示,将开关 S 闭合,电源和负载接通,称为通路或有载状态。通路时,电源向负载提供的电流,电源的端电压与负载端电压相等。

2. 开路 如图 1-15b 所示,将开关 S 打开或由于其他原因切断电源与负载间的连接,称为电路的开路状态。显然,电路开路时,电路中电流 $I=0$,因此负载的电流、电压和得到的功率都为零。对电源来说称为空载状态,不向负载提供电压、电流和功率,但其端电压(开路电压)最大。

3. 短路 由于工作不慎或负载的绝缘破损等原因,致使电源两端电阻值近似为零的导体连通,称为短路,如图 1-15c 所示。

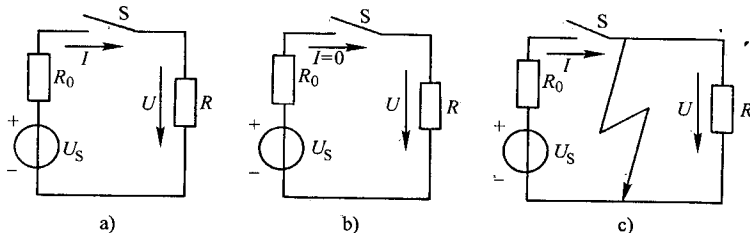


图 1-15 电路的工作状态

电路短路时,电源的端电压,即负载的电压 $U=0$,负载的电流与功率也为零,此时,通过电源的电流最大。对于电源电路的内阻很小,电流相当大,电源产生的功率很大,且全部被内阻所消耗。若不采取防范措施,将会使电源设备烧毁,导致火灾事故的发生。因此,短路一般是一种事故,要尽量避免。严格遵守操作规程和经常检查电气设备及线路的绝缘情况,是避免出现短路事故的重要安全措施。另外,为了防止一旦出现短路而造成严重后果,通常在电路中接入熔断器进行短路保护。

注意,在某些情况下是需要电路短路的,如测量变压器的铜损,则是通过对变压器作短路试验完成的,但必须给变压器施加很小的电压。有时,为了某种需要,也常将电路中的某一部分短路,这种情况常称为“短接”以示区别。

1.4.2 电气设备的额定值

电气设备的额定值是指导用户正确使用电气设备的技术数据。这些技术数据是根据生产过程的要求和条件的需要设计制定的,通常标在设备的铭牌上或在说明书中给出。

电气设备的绝缘材料是根据其额定电压设计选用的。施加的电压太高,超过额定值时,绝缘材料可能被击穿。绝缘材料的绝缘强度随材料的老化变质而降低,温度越高,材料老化的越快,当老化到一定程度时,会丧失绝缘性能。

设备运行时,电流在导体电阻上产生的热量和其他原因产生的热量一起将使设备的温度升高。多数绝缘材料是可燃体,温度过高会迅速炭化燃烧,引起火灾。因此,电气设备的额定值主要有额定电压、额定电流、额定功率和额定温升等。温升是指在规定的冷却方式下高出周围介质的温度(周围介质温度定为 40°C)。本教材中额定值用表示物理量的文字符号加下标“N”表示。例如,额定电压 U_N 和额定电流 I_N 。某些额定值间有着某种确定的、简单

的数学关系,因此,某些设备的额定值并不一定全部标出。例如,电阻上常标出其阻值和额定功率,额定电流可由 $P_N = I_N^2 R$ 关系得出。

电源设备的额定功率标志着电源的供电能力,是其长期运行时允许的上限值。电源在有载状态工作时,供出的功率由其外电路决定,并不一定等于电源的额定功率。电力工程中,电源向负载提供近似恒定的电压,因此,电源的负荷大小可用供出的电流表达。当电流等于额定电流时称为满载;超过额定电流时称为过载;小于额定电流时称为轻载。电源设备通常工作于轻载或满载,只有满载时才能被充分利用。

负载设备通常工作于额定状态。小于额定值时达不到预期效果,超过额定值运行时设备将遭到毁坏或缩短使用寿命。只有按照额定值使用才最安全可靠、经济合理,所以使用电器设备之前必须仔细阅读其铭牌和说明书。

1.5 负载获得最大功率的条件

电源工作时所产生功率,其中一部分为电源内阻所消耗,另一部分输出给负载。在自动控制 and 电工技术中,常常希望负载获得的功率最大。下面根据图 1-14 来讨论负载从电源获得最大功率的条件。

流过负载电阻 R 的电流为

$$I = \frac{U_s}{R_0 + R} \quad (1-15)$$

负载 R 所获得的功率为

$$P = I^2 R = \left(\frac{U_s}{R_0 + R} \right)^2 R \quad (1-16)$$

分析式 (1-16) 可以看出,对于一定的电源,当其内阻不变时,负载得到的功率 P 是负载电阻 R 的函数,即负载电阻 R 不同,它所获得的功率也不同,欲使负载获得最大功率,则必须满足下列条件:

$$\frac{dP}{dR} = 0$$

$$\frac{dP}{dR} = \frac{d}{dR} \left[\frac{U_s^2}{(R_0 + R)^2 R} \right] = U_s^2 \frac{(R + R_0)^2 - 2R(R + R_0)}{(R + R_0)^4} = 0$$

解得

$$(R + R_0) - 2R = 0$$

$$R = R_0$$

由此可知,当负载电阻等于电源内阻时,负载可从电源获得最大的功率,这时称负载和电源之间达到了“匹配”。负载获得的最大功率为

$$P_{\max} = \frac{U_s^2}{4R_0^2} R_0 = \frac{U_s^2}{4R_0} \quad (1-17)$$

图 1-16 画出了负载功率 P 与负载电阻 R 之间的关系曲线。值得注意的是,负载获得最大功率时,电路的效率却较低。效率表示为