



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

机械控制基础

(模具设计与制造专业)

主编 赵德申 苏海滨



高等教育出版社

中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

机械控制基础

(模具设计与制造专业)

主 编	赵德申	苏海滨
责任主审	张世昌	
审 稿	姜文兰	刘治平

高等教育出版社

内容简介

本书是中等职业教育国家规划教材,是根据教育部 2001 年颁发的中等职业学校模具设计与制造专业教学指导方案中主干课程机械控制基础教学基本要求,并参照有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级考核标准编写的。

本书主要包括:电工技术、模拟电子技术、数字电子技术、继电器及可编程控制器、液压传动、气压传动和机、电、液联合控制应用实例等。本书以能力培养为主,基础知识以够用为度,内容涵盖面广,综合性强。

本书可作为中等职业学校模具设计与制造专业及相关专业教材,也可作为有关行业的岗位培训教材或自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

机械控制基础/赵德申、苏海滨主编 —北京:高等教育出版社,2002.2 (2006重印)

本书适用于模具设计与制造专业

ISBN 7-04-010277-3

I 机… II 赵… III 机械工程-控制系统-专业学校-教材 IV TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 008717 号

责任编辑	王瑞丽	封面设计	王 唯	责任绘图	李维平
版式设计	马静如	责任校对	康晓燕	责任印制	韩 刚

机械控制基础
赵德申 苏海滨 主编

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010—58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800—810—0598
邮政编码	100011	网 址	http / / www hep edu cn
总 机	010—58581000		http / / www hep com cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http: / / www landraco. com
印 刷	北京市鑫霸印务有限公司		http: / / www landraco. com. cn
		畅想教育	http: / / www widedu com
开 本	787×1092 1/16	版 次	2002 年 3 月第 1 版
印 张	16.5	印 次	2006 年 6 月第 5 次印刷
字 数	400 000	定 价	20 10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究
物料号 10277—00

中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神,落实《面向21世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划,根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》(教职成[2001]1号)的精神,我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和80个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写,从2001年秋季开学起,国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和80个重点建设专业主干课程的教学大纲(课程教学基本要求)编写,并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想,从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发,注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本,努力为教材选用提供比较和选择,满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材,并在使用过程中,注意总结经验,及时提出修改意见和建议,使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

二〇〇一年十月

前 言

本书是中等职业教育国家规划教材,是根据教育部 2001 年颁发的中等职业学校模具设计与制造专业教学指导方案中主干课程机械控制基础教学基本要求,并参照有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级考核标准编写的。

随着科学技术的飞速发展,各学科内容不断增加相互渗透。以 3 年制为主中等职业教育的总课时与教学要求的矛盾日益突出,课程综合化正成为中等职业教育课程改革的必然趋势。教材是实现课程综合化的核心环节之一,并在课程综合化实施过程中不断创新、深化和完善。本书是在职业分析和教学分析的基础上,以职业所需的知识和技能为主线,将电工、电子、电机与控制、液压传动与气压传动、工厂供电、检测等技术有机地融为一体的综合性较强的教材,在满足实际需要的同时,达到提高课时效益的目的。

针对中等职业教育的特点,本书的内容注重基本概念、定性分析、基本计算方法和实际应用,本书的文字通顺易懂,图文并茂。为了便于教学和学生自学,每章后附有小结和习题。本书根据教学基本要求,教学时数建议不少于 140 学时,其中有 * 号的部分可灵活掌握,各章的学时(包括实验)分配可参考下表。

内 容	建议学时数	内 容	建议学时数
第一章	22	第五章	26
第二章	26	第六章	8
第三章	24	第七章	4
第四章	28	机动	2

本书由河南工业职业技术学院赵德申、苏海滨主编。全书共分七章,其中,第一、二章由黄耘萍、赵德申、苏海滨共同编写,第三章由李玉华编写,第四章由王本轶编写,第五、六章由于兴芝编写,第七章由苏海滨编写。在编写过程中得到了河南工业职业技术学院的大力支持,唐建生老师对“液压传动与气压传动技术”的编写给予指导,高等教育出版社聘请王庭才老师审阅全书。

本书通过全国中等职业教育教材审定委员会审定,天津大学张世昌教授任责任主审,姜文兰、刘治平副教授审稿。他们对提高书稿质量起了重要作用,在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,编写时间短,书中不妥之处,恳请批评指正。

编者

2001 年 12 月

目 录

第一章 电工技术	1
第一节 直流电路	1
第二节 正弦交流电的基本概念	9
第三节 单相交流电路	13
第四节 三相交流电路	21
第五节 磁路 变压器	26
第六节 工厂供电	31
习题	37
第二章 模拟电子技术	40
第一节 半导体二极管	40
第二节 半导体三极管	43
第三节 单管共射电压放大电路	46
第四节 射极输出器	53
第五节 多级放大电路	54
第六节 集成运算放大器简介	56
第七节 放大电路中的负反馈	59
第八节 运算放大器的应用	62
第九节 整流电路	65
第十节 晶闸管	72
* 第十一节 交流调压及变频	77
* 第十二节 检测与转换	80
习题	84
第三章 数字电子技术	88
第一节 概述	88
第二节 逻辑门电路	90
第三节 组合逻辑电路的分析和设计	98
第四节 加法器	102
第五节 编码器	104
第六节 译码器和数字显示电路	106
第七节 触发器	110
第八节 计数器	115
第九节 寄存器	120
第十节 555 定时器的工作原理及应用	122
习题	126
第四章 继电器及可编程控制器控制技术	129

第一节	电动机	129
第二节	常用低压电器	135
第三节	继电器 - 接触器控制电路	143
第四节	可编程控制器概述	149
第五节	F1 系列 PLC 及其软继电器的功能和编号	154
第六节	F1 系列 PLC 的指令及其使用	161
第七节	PLC 的程序设计和控制系统设计	169
	习题	174
第五章	液压传动	177
第一节	液压传动的基础知识	177
第二节	液压泵、液压马达和液压缸	184
第三节	液压控制阀及辅助元件	192
第四节	液压基本回路	207
第五节	典型液压传动系统	215
第六节	液压系统的故障分析	220
	习题	222
第六章	气压传动	225
第一节	气压传动的基础知识	225
第二节	气源装置及其辅助元件	226
第三节	气动执行元件	229
第四节	气动控制元件	230
第五节	气动基本回路	233
第六节	气动系统实例	235
	习题	236
第七章	机、电、液(气)联合控制实例	237
第一节	HT - 350 注塑机液压、电气控制系统	237
第二节	电磁阀式真空吸盘搬运控制系统	245
第三节	推杆式送料机构电气控制系统	248
第四节	组合机床电气控制系统	250
	主要参考文献	255

第一章 电工技术

第一节 直流电路

一、电路的组成和功能

电路是电流所通过的路径,它是由某些电工、电子设备或元器件按照一定方式连接而成的。图 1-1 是最简单的照明电路。它是由电池、白炽灯、开关和导线连接而成。

电路的功能是实现能量的传输和转换或信号的传递与处理。

电路不论简单还是复杂,一般都由三个部分组成。

(1) 电源 产生电能或电信号的装置,如电池、发电机和信号发生器等。

(2) 负载 取用电能的设备,或者接收处理电信号的装置,如白炽灯、电动机、扬声器等。

(3) 中间环节 连接电源和负载的部分,如导线、开关、熔断器,检测仪表等。

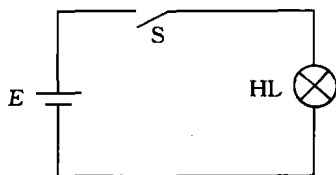


图 1-1 最简单的照明电路

二、电路的主要物理量

1. 电流

带电粒子有规律的定向运动形成电流。电流的大小用单位时间内通过导体横截面的电荷量来表示。若在 t 时间内通过导体截面的电荷量为 q ,则电流 I 为

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

如果电流随时间变化,则电流 i 为

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

电流的方向习惯上规定为正电荷定向移动的方向。在电路构成后,电流的实际方向就被客观地确定了,但在分析较复杂的电路时,往往难于直观判定电流的实际方向,需要人为地假定一个参考方向,称为电流的参考方向,并用箭头表示。参考方向是任意选定的,并不一定与实际方向一致。当电流的参考方向与实际方向一致时,规定电流取正值($I > 0$),如图 1-2a 所示。反之,电流取负值($I < 0$),如图 1-2b 所示。因此,在引入参考方向后,电流就成为有正、有负的代

数量。

在国际单位制中,电流的单位是安[培](A)。常用的电流单位还有千安(kA),毫安(mA)和微安(μA)。它们的换算关系为

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

2. 电位和电压

单位正电荷在电场中某点所具有的电势能称为该点的电位。用符号 V 表示,如 A 点的电位记作 V_A 。

电压是描述电场力做功能力的物理量。电场力把正电荷从 A 点移到 B 点所做的功 W_{AB} 与被移动电荷的电量 q 的比值,称为 A、B 两点间的电压 U_{AB} ,即

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

因为电场力把正电荷从 A 点移到 B 点所做的功等于正电荷从 A 点移到 B 点时所减少的电势能,所以有 $W_{AB} = q(V_A - V_B)$,则

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} = V_A - V_B \quad (1-4)$$

上式表明电路中某两点间的电压就是这两点的电位之差,因此,电压也称为电位差。

电位和电压的国际单位都是伏[特](V)。常用的单位还有千伏(kV),毫安(mV)和微伏(μV)。

电压的实际方向规定为高电位端指向低电位端的方向,即电位降低的方向。分析电压时,也需选定其参考方向,电压值是正值还是负值,视选定的参考方向与实际方向的关系而定,与电流正负的规定相同。因此,引入参考方向后,电压也成为代数量。电压的参考方向用双下标或“+”、“-”极性表示,如 U_{ab} 表示电压参考方向由 a 点指向 b 点,用极性表示时,电压正方向由“+”极端指向“-”极端。

在电子电路中,电位的应用比电压多。为了表示电路中各点的电位值,必须在电路中选择一点作为零电位(参考点)。在实际电路中常以机壳或大地作为零电位的参考点。零电位的参考点用符号 $\perp$ 或 $\equiv$ 表示,由于参考点的电位规定为零,所以电路中某点的电位值就等于该点与参考点之间的电压(方向由该点指向参考点)。电路中各点电位的大小和正负与参考点的选择有关,但任意两点间的电压值不会随参考点的改变而改变。

3. 电动势

电动势是表示电源将其他形式的能转换成电能能力的物理量。在电源内部,非静电力将正电荷从负极移到正极所做的功 W 与被移送电荷量 q 的比值,定义为电源的电动势,即

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

电动势的实际方向规定为沿电源内部由低电位端指向高电位端,即由电源的负极指向正极。在国际单位制中,电动势的单位也是伏[特](V)。

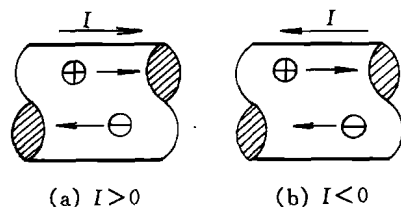


图 1-2 电流的正方向

4. 电能与电功率

根据能量守恒定律和式(1-3)电能的表示式为

$$W = Uq = UIt \quad (1-6)$$

单位时间内所做的功(如负载所消耗的电能)称为电功率 P , 即

$$P = \frac{W}{t} = UI \quad (1-7)$$

在国际单位制中,电能的单位为焦[耳](J),电功率的单位为瓦[特](W)。实际应用中常以千瓦[小]时(kW·h)作单位(俗称为度)。它与焦[耳]之间的换算关系为

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

三、欧姆定律

欧姆定律是电路的基本定律之一,用来确定电路中各部分的电压与电流关系。

1. 部分电路欧姆定律

实验表明:一段电路中电流的大小与电路两端的电压 U 成正比,与电路的电阻 R 成反比。这一关系称为部分电路欧姆定律,又称一段电阻电路的欧姆定律。

如果电压与电流取关联参考方向,如图 1-3a、b 所示,则欧姆定律的表达式为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-8)$$

如果电压与电流取非关联参考方向,如图 1-3c、d 所示,则欧姆定律的表达式为

$$I = -\frac{U}{R} \quad (1-9)$$

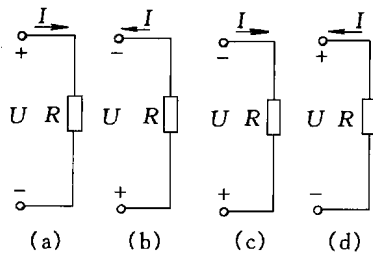


图 1-3 部分电路欧姆定律

在国际单位制中,电阻的单位是欧[姆](Ω),常用的单位还有千欧(k Ω)和兆欧(M Ω),它们的换算关系为

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

2. 全电路欧姆定律

同样可以用实验证明:在一个闭合电路中,电流的大小与电源的电动势成正比,与全电路的总电阻成反比。这个结论是对全电路而言的,称为全电路欧姆定律。最简单的全电路如图 1-4 所示。它由电动势为 E 、内阻为 R_0 的电源和总电阻为 R 的外电路组成。 U 为电源的端电压。

I 与 E 参考方向相同时,全电路欧姆定律的表达式为

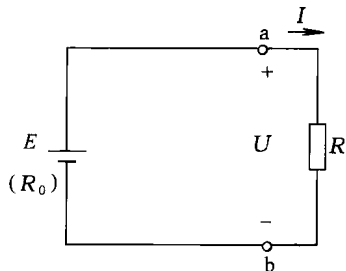


图 1-4 全电路

$$I = \frac{E}{R_0 + R} \quad (1-10)$$

I 与 E 的参考方向相反时,全电路欧姆定律的表达式为

$$I = -\frac{E}{R_0 + R} \quad (1-11)$$

四、电阻的连接

1. 串联

电路中几个电阻一个接一个地顺序连接称为电阻的串联。如图 1-5 所示的电路为三个电阻的串联电路。

串联电路有如下特点:

- (1) 流过串联电路中各电阻上的电流都相同。
- (2) 串联电路的总电压等于各电阻两端电压之和,即

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (1-12)$$

- (3) 串联电路的总电阻 R (又称等效电阻) 等于各个电阻之和,即

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1-13)$$

- (4) 串联电路中各电阻两端的电压与它们的阻值成正比,即

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} U = \frac{R_1}{R} U \\ U_2 &= \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} U = \frac{R_2}{R} U \\ U_3 &= \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} U = \frac{R_3}{R} U \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

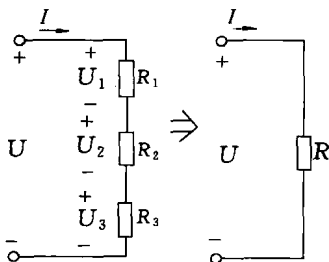


图 1-5 电阻的串联

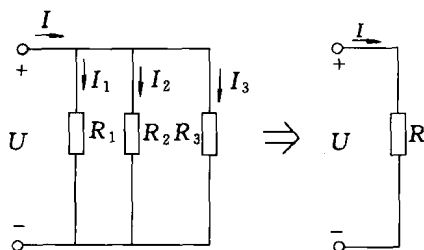


图 1-6 电阻的并联

2. 并联

电路中几个电阻并行连接在共同的两端之间,使每个电阻承受同一电压称为电阻的并联。如图 1-6 所示为三个电阻的并联电路。

电阻并联电路有如下特点：

(1) 并联各电阻两端的电压相同。

(2) 并联电路中的总电流等于各并联电阻中的电流之和,即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (1-15)$$

(3) 并联电路的总电阻 R (即等效电阻) 的倒数等于各并联电阻的倒数之和,即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (1-16)$$

显然,当只有两个电阻并联时, $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ 。

(4) 流过并联电路中各电阻的电流与它们的阻值成反比,即

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1} = \frac{R}{R_1} I \\ I_2 &= \frac{U}{R_2} = \frac{R}{R_2} I \\ I_3 &= \frac{U}{R_3} = \frac{R}{R_3} I \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

3. 混联

电路中既有电阻串联又有电阻并联称为电阻混联电路。这种电路在实际中应用较多,计算时要分清串、并联关系,分别按串联电路和并联电路的特点进行分析。

例 1-1 图 1-7 所示电路。已知线路电压 $U = 230$ V, 输电线电阻 $R' = 1 \Omega$, 照明负载的总电阻 $R_1 = 74 \Omega$, 电炉的电阻 $R_2 = 110 \Omega$, 求线路的供电电流 I 和电压 U_2 。

$$\text{解 } R_{12} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{74 \times 110}{74 + 110} \Omega \approx 44 \Omega$$

$$R = 2R' + R_{12} = (2 \times 1 + 44) \Omega = 46 \Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{230}{46} \text{ A} = 5 \text{ A}$$

$$U_2 = R_{12} I = 44 \times 5 \text{ V} = 220 \text{ V}$$

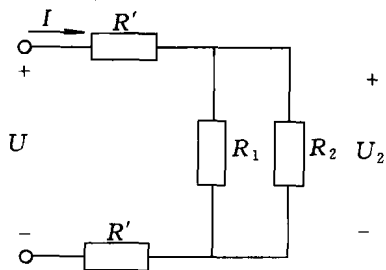


图 1-7 例 1-1 的电路

五、电压源与电流源

1. 电压源

如图 1-4 所示电路中由于 $U = RI$, 所以式(1-10)又可写成为

$$U = E - R_0 I \quad (1-18)$$

式(1-18)所表示的 E 与 R_0 的关系为串联关系, 因此, 电源的电路分析中可以用 E 与 R_0 的串联组合来等效表示。这种串联组合称为电压源, 如图 1-8a 中点画线框内所示。电压源的输出电压 U 和输出电流 I 的关系如式(1-18)所示, 称为电压源的外部伏安特性。一般认为电源的 E 、 R_0 为常数, 则可以作出 U 和 I 的关系曲线, 称为电压源的外特性曲线, 简称外特性, 如

图 1-8b 所示。

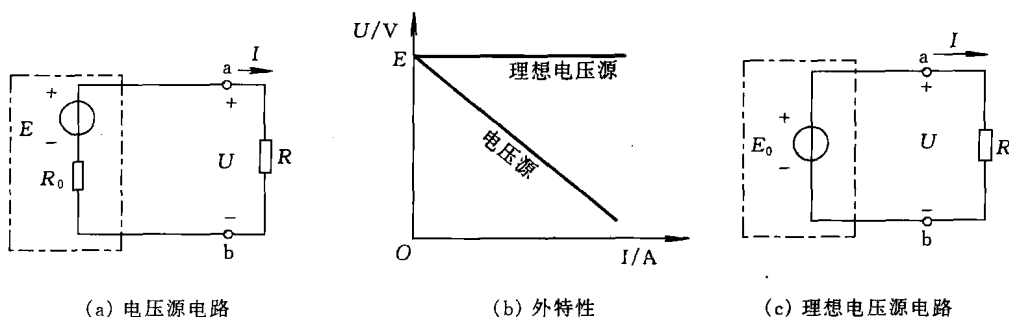


图 1-8 电压源和理想电压源电路及外特性

由图 1-8b 可知,电压源的外特性是一条斜下的直线。当电源向负载输出的电流 I 增大时,输出电压 U 减小,且电源内阻 R_0 越小,电压下降得越少,外特性曲线略有下垂,这种外特性称为硬特性。电源的外特性越硬,带负载能力越强。

理想情况下 $R_0=0$,不管负载变动时电源输出电流如何变化,电源输出的电压恒定不变,即 $U=E$ 。这种电源称为理想电压源,简称恒压源,如图 1-8c 所示。

恒压源实际上并不存在,应用中可以把实际的稳压电源、新的电池以及内阻远小于负载电阻的电源当作恒压源处理。

2. 电流源

电源除了电压源以外,还有一种以提供给外电路较为稳定的电流为主要电特性的电源,如光电池。当它被一定强度的光照激发后将产生恒定电流 I_s ,其中一小部分电流在光电池内部处自行闭合,绝大部分输出给负载,这类电源可以用一个恒定电流 I_s 与内阻 R_0 的并联来表示,称为电流源,如图 1-9a 虚线框内所示。

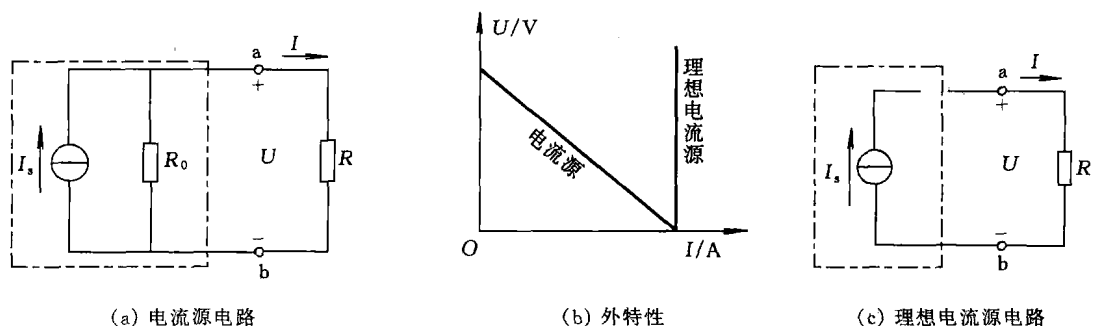


图 1-9 电流源和理想电流源电路及外特性

根据图 1-9a 可知,电流源的输出电压 U 与输出电流 I 之间的关系可表示为

$$I = I_s - \frac{U}{R_0} \quad (1-19)$$

式中 $\frac{U}{R_0}$ 为电源内部的分流电流。电流源的外特性如图 1-9b 所示。

理想情况下 $R_0 = \infty$, 当负载变化时引起电源输出电压 U 变化, 而输出电流 I 恒定不变, 即 $I \equiv I_S$, 这种电源称为理想电流源, 简称恒流源, 如图 1-9c 点画线框内所示。当然恒流源实际也是不存在的, 但在电路分析计算中, 可以把内阻远远大于负载电阻的电源作为恒流源处理。

3. 电压源与电流源的等效变换

在图 1-8a 和图 1-9a 中, 若对任意相同的外电路, 两图中的 U 、 I 都分别相等, 则图 1-8a 中的电压源和图 1-9a 中的电流源对外电路来说是等效的。这说明对外电路而言, 一个电压源可等效变换成电流源, 一个电流源也可以等效变换成电压源, 如图 1-10 所示。比较式(1-18)和(1-19), 可得电压源与电流源的等效变换条件为

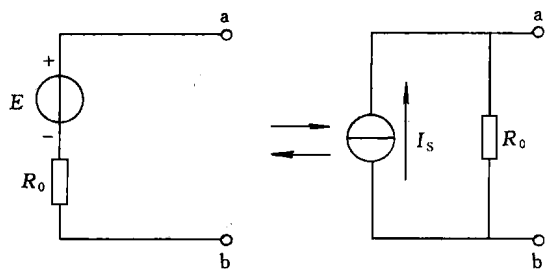


图 1-10 电压源与电流源的等效变换

$$I_S = \frac{E}{R_0} \quad \text{或} \quad E = R_0 I_S \quad (1-20)$$

式(1-20)说明等效电压源与电流源的电阻均相等, 而且 E 与 I_S 参考方向要一致。

电压源与电流源之间可以进行等效变换, 表明一个有内阻的实际电源既可以用电压源等效表示, 也可以用电流源等效表示。

应当指出, 恒压源和恒流源之间是不能互相等效的。但恒压源与某个电阻的串联组合可以等效变换成恒流源和这个电阻的并联组合。

例 1-2 某实际电源, 测得其空载(开路)电压为 230 V, 负载电流为 10 A 时的端电压为 220 V, 试确定该电源的电压源等效电路和电流源等效电路。

解 电压源等效电路为 E 和 R_0 串联电路。

开路时电压为电源电动势, 则有 $E = 230 \text{ V}$ 。

接负载时, 因为 $U = E - R_0 I$; 所以 $R_0 = \frac{E - U}{I} = \frac{230 - 220}{10} \Omega = 1 \Omega$ 。

电流源等效电路为 I_S 和 R_0 并联电路。

根据电压源和电流源等效变换的条件可得电流源的 $R_0 = 1 \Omega$, $I_S = \frac{E}{R_0} = \frac{230}{1} \text{ A} = 230 \text{ A}$ 。

六、基尔霍夫定律及其应用

分析与计算电路的基本定律, 除欧姆定律外, 还有基尔霍夫定律。它包括基尔霍夫第一定律和基尔霍夫第二定律。基尔霍夫第一定律又称电流定律, 应用于节点。基尔霍夫第二定律又称电压定律, 应用于回路。

电路中的每一分支称为支路。流经支路的电流, 称为支路电流。如图 1-11 所示电路中共有三条支路(支路 bad、支路 bd 和支路 bcd)。

电路中三条或三条以上支路的公共连接点称为节点。如图 1-11 所示的电路中共有两个节

点(b点和d点)。

回路是由一条或多条支路所组成的闭合电路。如图 1-11 所示电路中一共有三个回路(abda回路、bcdb回路和 abcda回路)。

1. 基尔霍夫电流定律(KCL)

基尔霍夫电流定律是用来确定连接在同一节点处的各条支路上电流间关系的定律,由于电流的连续性,和电荷不可能在电路中的任一点处产生或消失。因此,即在任一瞬时,对电路中的任一节点,流入节点的电流之和必等于流出节点的电流之和。

如果规定流入节点的电流取正号,流出节点的电流取负号,则基尔霍夫电流定律又可叙述为任一瞬时,在电路的任一节点处,电流的代数和等于零,用数学表达式表示为

$$\sum I = 0 \quad (1-21)$$

例如,在图 1-11 的电路中,对于节点 b,依据基尔霍夫电流定律可得 $I_1 + I_2 = I_3$ 或 $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ 。

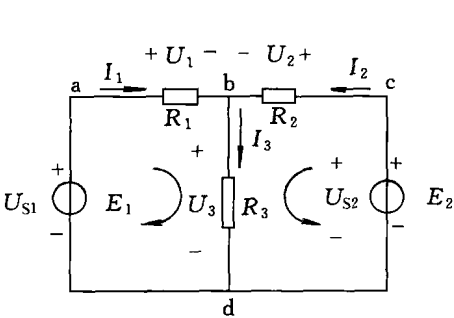


图 1-11 复杂电路

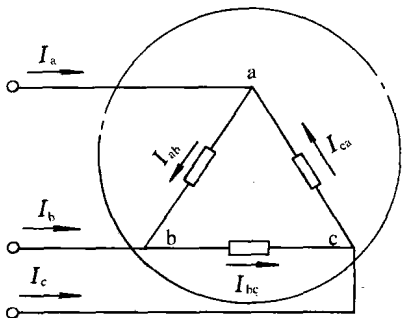


图 1-12 KCL 定律的推广应用

基尔霍夫电流定律通常应用于节点,也可以将其推广应用于电路中任意假设的封闭面,即对电路中任一假设的封闭面,在任一瞬时,通过封闭面的电流的代数和恒等于零。例如,图 1-12 电路中,对点画线所示的假设封闭面 S,就有 $I_a + I_b + I_c = 0$ 。

2. 基尔霍夫电压定律(KVL)

基尔霍夫电压定律是用来确定回路中各段电压间关系的定律,即在任一瞬时,沿任一方向绕行回路一周,在这个方向上回路各段的电位升之和必等于电位降之和。若规定沿绕行方向的电位降取正值、电位升取负值,那么,上述内容又可叙述为在任一瞬时,沿任一方向绕行一周,回路中各段电压的代数和必等于零,用数学表达式表示为

$$\sum U = 0 \quad (1-22)$$

例如,对图 1-11 电路中的 abcda 回路,沿顺时针绕行一周有 $U_1 - U_2 + U_{S2} - U_{S1} = 0$ 。将 $U_1 = R_1 I_1$, $U_2 = R_2 I_2$, $U_{S1} = E_1$, $U_{S2} = E_2$ 代入上式有 $R_1 I_1 - R_2 I_2 = E_1 - E_2$,即

$$\sum (RI) = \sum E \quad (1-23)$$

式(1-23)为基尔霍夫电压定律的又一种表达式。它表示沿回路绕行一周,在绕行方向上各

电阻压降的代数和必等于电动势的代数和(规定电动势方向或电阻压降方向与所选绕行方向一致时取正值,反之取负值)。

基尔霍夫电压定律通常应用于电路中的闭合电路,也可以推广应用于任一开口电路,只需将开口处电压引入方程即可。例如,对图 1-13 所示的开口电路,可根据 KVL 定律列出方程 $U_{ab} - E + RI = 0$,从而有 $U_{ab} = E - RI$ 。

3. 支路电流法

不能用电阻串、并联特点和欧姆定律求解的复杂电路,可以应用基尔霍夫定律求解。最基本的求解方法是支路电流法。支路电流法是以各支路电流为未知量,依据 KCL 和 KVL 定律,列出独立方程,从而解出各支路电流的方法。

对于有 m 条支路、 n 个节点的复杂电路,支路电流法的解题步骤如下:

- (1) 在电路中标出各未知支路电流的参考方向。
- (2) 任选 $(n-1)$ 个节点,依据 KCL 定律,列出 $(n-1)$

个独立的节点电流方程。

(3) 选定回路和回路绕行方向,依据 KVL 定律,列出 $[m - (n-1)]$ 个回路电压方程。为使所列的电压方程相互独立,一般选择单孔(网孔)回路列电压方程。

(4) 联立(2)、(3)步骤中方程组,代入已知数据,解出各未知支路电流。

例 1-3 图 1-11 所示电路,若已知 $E_1 = 9\text{ V}$, $E_2 = 18\text{ V}$, $R_1 = R_2 = 1\ \Omega$, $R_3 = 4\ \Omega$,求各支路电流。

解 (1) 假定各支路电流参考方向和回路绕行方向如图 1-11 中所示。

(2) 对 b 点列 KCL 方程为 $I_1 + I_2 = I_3$ 。

(3) 对所选的两个单孔回路列出电压方程为

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 = E_1$$

$$R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2$$

(4) 联立上述方程并代入数据得

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ I_1 + 4I_3 = 9 \\ I_2 + 4I_3 = 18 \end{cases}$$

解方程组得

$$I_1 = -3\text{ A}, \quad I_2 = 6\text{ A}, \quad I_3 = 3\text{ A}$$

可知,电流 I_1 实际方向与图示参考方向相反, I_2 和 I_3 实际方向与图示参考方向相同。

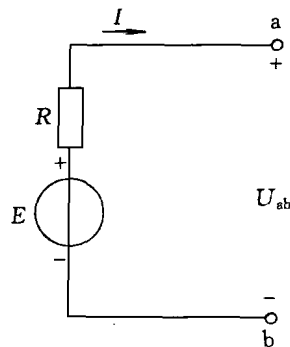


图 1-13 KVL 定律的推广应用

第二节 正弦交流电的基本概念

大小和方向都随时间作周期性变化的电流、电压和电动势统称为交流电。其中随时间按正

弦规律变化的交流电,称为正弦交流电,通常也简称为交流电。本章所讨论的交流电除特别指明外,均指正弦交流电。

一、正弦交流电的基本概念

交流电随时间变化的规律可以用一正弦曲线来表示。如图 1-14 所示为一正弦电流随时间变化的曲线,称为正弦电流的波形图。图中正半周表示参考方向与实际方向相同,负半周表示参考方向与实际方向相反。从波形图中可以看出,交流电变化的特征表现在变化的快慢、大小和变化的状态三个方面,描述这三个方面特征的物理量如下。

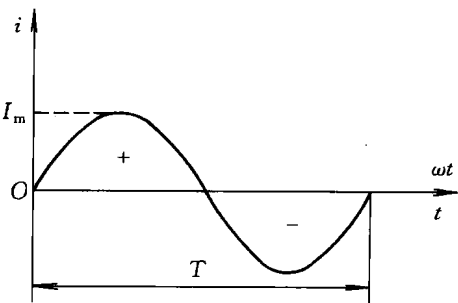


图 1-14 正弦电流的波形图

1. 正弦交流电的特征量

(1) 周期、频率和角频率 交流电完成一次循环变化所需的时间称为周期,用 T 表示,单位为秒(s)。每秒钟内完成循环变化的次数称为频率,用 f 表示,单位为赫[兹](Hz)。可见,频率是周期的倒数,即

$$f = \frac{1}{T} \tag{1-24}$$

周期和频率都是表征交流电变化快慢的物理量。频率愈高、周期愈短,交流电变化就愈快。

我国和许多国家都采用 50 Hz 作为电力标准频率,称为工频。有些国家,如美国、英国等则采用 60 Hz 为电力标准频率。

正弦曲线对应着一个正弦函数,正弦函数循环变化一个周期经历了 2π 弧度电角度的变化。每秒钟内交流电所经历的变化电角度称为角频率 ω ,单位为弧度每秒(rad/s)。角频率愈大,交流电变化就愈快,可见,角频率也是描述交流电变化快慢的物理量。角频率与周期、频率的关系为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \tag{1-25}$$

(2) 瞬时值和最大值 交流电的大小用瞬时值、最大值来描述。交流电在任一瞬间的值称为交流电在该瞬间的瞬时值。用小写字母 i 、 u 、 e 分别表示交流电流、电压和电动势的瞬时值。瞬时值中最大的值称为交流电的最大值,又称为幅值或峰值。用 I_m 、 U_m 、 E_m 分别表示交流电流、电压和电动势的最大值。

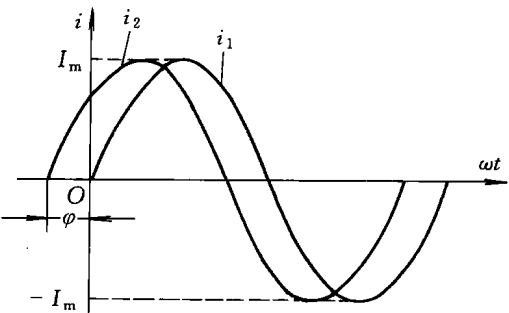


图 1-15 两个初相位不同的电流

(3) 相位、初相位和相位差 如图 1-15 所示为两个同幅值、同频率的正弦电流 i_1 、 i_2 的波形图。图中 i_1 的初始值为零,用函数式表示为