

高校计算机教学系列教材

电路基础 与模拟电子技术

李树雄 主编



北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

34

TM13
L34

电路基础与模拟电子技术

李树雄 主编

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是《高校计算机教学系列教材》之一,将“电路基础”及“模拟电子技术”有机地结合一体。在保证必要的经典内容的同时,力求反映近代理论和先进技术,在理论与应用关系上,以应用为主。

全书共9章。前4章为电路基础部分:电路的基本概念与基本定律;电路的分析方法;正弦交流电路等。后5章为模拟电路部分:半导体二极管及其应用电路;放大电路;负反馈放大电路;集成运放的应用等。文中注意正文、例题和习题之间的分工和配合。各章附有小结。

本书适用于计算机专科专业,非电类本科专业教学使用,也可供专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路基础与模拟电子技术/李树雄等编著. —北京:
北京航空航天大学出版社,2000.8
ISBN 7-81012-997-X

I.电... II.李... III.①电路理论②模拟电路 电
子技术 IV.①TM13 ②TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第32948号

电路基础与模拟电子技术

李树雄 主编

责任编辑 史 东

责任校对 李宝田

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市学院路37号(100083) 发行部电话:82317024 传真:82328026

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: pressell@publica.bj.cninfo.net

北京宏文印刷厂印刷 全国书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:18.5 字数:474千字

2000年8月第1版 2002年2月第3次印刷 印数:10001~15000册

ISBN 7-81012-997-X/TN·033 定价:25.00元

总前言

科教兴国,教育先行,在全国上下已形成共识。在教育改革过程中,出现了多渠道、多形式、多层次办学的局面。同时,政府逐年加大教育的投入力度。教育发展了,才能有效地提高全民族的文化、科学素质,使我们中华民族屹立于世界民族之林。

计算机科学与技术的发展日新月异,其应用领域迅速扩展,几乎无处不在。社会发展的需求,促使计算机教育生气蓬勃。从普通高校的系统性教学,到远距离的电视、网上教学;从全面讲述,到不同应用领域的、星罗棋布的培训班;从公办的到民办的;从纸介教材到电子教材等等,可以说计算机教学异彩纷呈。要进行教学,就必须有教材。

面对我们这么大的国家和教学形势,在保证国家教学基本要求的前提下,应当提倡教材多样化,才能满足各教学单位的需求,使他们形成各自的办学风格和特色。为此,我们组织北京工业大学、北京航空航天大学、北京理工大学、南开大学、天津工业大学等高校的有丰富教学经验的教师编写了计算机教学的系列教材,将陆续与师生见面。

系列教材包括以下各项:

(一) 基础理论:离散数学。

(二) 技术基础:电路基础与模拟电子技术;数字逻辑基础;计算机组成与体系结构;计算机语言(拼盘、选择使用):包括C++程序设计基础、Visual Basic 程序设计基础、Matlab 程序设计基础、Java 程序设计基础、Delphi 语言基础、汇编语言基础等;数据结构;计算机操作系统基础;计算方法基础;微机与接口技术;数据库技术基础等。

(三) 应用基础:计算机控制技术;网络技术;软件工程;多媒体技术等。

(四) 技术基础扩展:编译原理与编译构造;知识工程——网络计算机环境下的知识处理。

(五) 应用基础扩展:计算机辅助设计;单片机实用基础;图像处理基础;传感器与测试技术;计算机外设与接口技术。

本系列教材主要是针对计算机专科教学编写的,供普通高校、社会民办大学、高等职业学校、业余大学等计算机专科使用。其中一部分教材也适合计算机本科教学或非计算机专业本科教学使用。在这部分教材的内容简介或前言中对使用范围均作了说明。

本系列教材在编写时,注重以下几点:(1)面对计算机科学与技术动态发展的现实,在内容上应具有前瞻性;(2)面对学以致用,既有系统的基础知识,又有应用价值的实用性;(3)具有科学性、严谨性。另外,力求排版紧凑,使有限的版面具有最大的信息量,以使读者得到实惠。

能否实现这些愿望,只有师生在教学实践中评价。我们期望得到师生的批评和指正。

高校计算机教学系列教材编委会

高校计算机教学系列教材编委会成员

主 任:赵沁平

副主任(常务):陈炳和

顾 问:麦中凡

委 员(以姓氏笔划为序):

吕景瑜(北工大教授)

乔少立(社长,副教授)

麦中凡(北航教授,教育部工科计算机基础教学指导委员会副主任、中专计算机教学指导委员会顾问)

苏开娜(北工大教授)

陈炳和(北工大教授)

张鸿宾(北工大博导)

郑玉明(北工大副教授)

金茂忠(北航博导)

赵沁平(北航博导,国务院学位办主任)

前 言

多年来“电路基础”及“模拟电子技术”都以独立形式各成一书。由于其涉及面广,内容庞杂,主要适用于高校电类有关专业的学习。而计算机专科专业及本科非电类专业,在选用这些教材时不得不做一些内容的取舍或增补,以满足教学的需要。

我们编写这本书,力图将两部分内容有机地结合一体,在保证传统的基本内容同时,加强基础理论,注意反映近代理论和先进技术,形成较为明显特色的教材。在编写本书时考虑到计算机专业的需要,并明确为后续课程“数字逻辑基础”、“微机技术”及“传感器与测试技术”等服务的宗旨及培养对象的层次,书中对理论的阐述以够用为度,精简理论推导和讲课时数,重点放在应用上。注意运用正文、例题、习题之间的分工和配合,以达到掌握概念、强化应用的目的。在每章结尾处附有小结,以帮助读者归纳和总结。

本书第1~4章为电路基础部分。第5~9章为模拟电路部分。在电路基础部分中,编入的内容绝大部分仍然属于经典内容,主要包括直流电阻电路、正弦稳态电路及电路的过渡过程。目的是让学生掌握电路理论的一些最基本内容。考虑到专业的需要和学时限制,将受控源、谐振、互感及三相电路等内容都以一节形式写入相应章中,但在基本概念、基本分析法上都作了详尽的阐述。在模拟电路部分中,尽量精简涉及半导体物理的内容,压缩分立元件放大电路等比较陈旧的内容,重点放在建立放大的基本概念、反馈概念,贯彻以集成电路为主的指导思想,将负反馈放大电路、运算放大电路、电压比较器、波形发生电路以及直流电源等内容尽量结合在集成电路中介绍。同时,列举了集成运放多方面应用的实例,以适应当前电子技术发展的现状及需要。

本书第1,2,3,4章及第8,9章由李树雄编写,第5,6,7章由林俊桂编写。李树雄担任主编,负责对各章内容的修改、统稿和定稿。

本书承蒙南开大学牛文成教授主审。北京工业大学刘明亮教授对大纲的制订提出了许多宝贵意见。南开大学郭银伏副教授、天津大学刘常澍副教授参加了审阅,提出了改进建议。书稿最后的文字润色工作由张鸿珍负责,对本书质量提高大有裨益。另外,左敏书老师为本书编写提供了大量参考资料和文献。王朝东等四人绘制了书中的插图。对以上各位教授和专家的指导及提供帮助的同志一并表示感谢。

限于编者水平以及成书仓促,书中难免有错误和不妥之处,诚望读者不吝指正。

编 者

2000年2月

常用符号

电路基础部分

I	直流电流, 正弦电流有效值
I_L	三相电路线电流
I_P	三相电路相电流
i	交流电流, 正弦交流电流
\dot{I}_m	正弦电流最大值相量
\dot{I}	正弦电流有效值相量
I_S	电流源电流
I_{SC}	短路电流
U	直流电压, 正弦电压有效值
U_L	三相电路线电压
U_P	三相电路相电压
u	交流电压, 正弦交流电压
U_m	正弦电压最大值
\dot{U}_m	正弦电压最大值相量
\dot{U}	正弦电压有效值相量
U_S	电压源电压
U_{OC}	开路电压
V	电位
P	直流电阻电路功率, 正弦交流电平均功率
P_L	负载功率
P_{Lmax}	负载最大功率
$p(t)$	瞬时功率
R_S	电源内阻
R_0	戴维南等效电阻
R, G	电阻, 电导
Z, Y	阻抗, 导纳
Z_{ref}	反映阻抗
X_L, X_C	感抗, 容抗
B_L, B_C	感纳, 容纳
L, C	电感, 电容
M	互感系数
K	耦合系数, 积分常数
$w(t)$	瞬时能量
W	平均能量
q	电荷量

φ	相位差
Ψ	磁链、磁通量
ω	角频率
ω_0	谐振角频率
ω_d	阻尼振荡角频率
f	频率
f_0	谐振频率, 截止频率
T	周期
θ	初相角, 阻抗角
Q	二端电路无功功率, 品质因数
Q_L, Q_C	电感无功功率, 电容无功功率
S	视在功率, 特征根
$S(t)$	单位阶跃响应
$\varepsilon(t)$	单位阶跃函数
$\varepsilon(t - t_0)$	延时单位阶跃函数
ρ	特性阻抗
τ	时间常数
α	衰减常数

模拟电路部分

U_{CC}	三极管集电极直流电源电压
U_{BB}	三极管基极直流电源电压
U_S	信号源电压
U_i	输入电压
U_o	输出电压
U_D	二极管电压
U_{BE}	双极型三极管发射结电压
U_{CB}	双极型三极管集电结电压
U_{CE}	双极型三极管集电极-发射极间电压
U_P	单结管峰点电压
U_V	单结管谷点电压
U_{DD}	场效应管漏极直流电源电压
U_{GG}	场效应管栅极直流电源电压
U_{BO}	晶闸管正向转折电压
U_{AA}	晶闸管阳极所加电压
U_g	晶闸管触发电压
U_{DRM}	晶闸管断态重复峰值电压
U_{Icm}	集成运放最大共模电压
U_{Idm}	集成运放最大差模电压

U_N, U_P	集成运放反相端、同相端电压
U_f	反馈电压
U_R	参考电压
U_X, U_Y	模拟乘法器输入电压
U_T	温度电压当量, MOS 管开启电压, 门限电压
ΔU_T	回差电压
U_Z	稳压管电压
U_{OM}	锯齿波、三角波幅值
I_N, I_P	集成运放反相端、同相端电流
I_f	反馈电流
I_o	输出电流
I_i	输入电流
i_D	二极管电流, 场效应管漏极电流
I_S	二极管反向饱和电流
β	三极管电流放大系数
T	周期
V	三极管符号
VD	二极管符号
VD_Z	稳压二极管符号
A_{Uf}	有反馈电压放大倍数
A	增益, 放大倍数
F	反馈系数
A_c	共模电压放大倍数
A_d	差模电压放大倍数
P_o	输出功率
P_{om}	输出最大功率
P_V	电源提供的直流功率
η	效率, 单结管分压比
C_D	扩散电容
C_T	势垒电容
BW	通频带
f_L	放大电路下限频率
R_f	反馈电阻
R_g	栅极电阻
R_o	输出电阻
R_L	负载电阻
R_w	电位器

目 录

第 1 章 电路的基本概念与基本定律	(1)
1.1 电路和电路元件	(1)
1.2 元件的电流、电压和功率	(2)
1.2.1 电流、电压及其参考方向	(2)
1.2.2 功率和能量	(4)
1.3 基尔霍夫定律	(5)
1.3.1 基尔霍夫电流定律	(6)
1.3.2 基尔霍夫电压定律	(7)
1.4 无源二端元件	(7)
1.4.1 电阻元件	(7)
1.4.2 电容元件	(9)
1.4.3 电感元件	(11)
1.5 无源电路的等效化简	(13)
1.5.1 电阻的串联和并联	(13)
1.5.2 电阻的 Y- Δ 的等效变换	(17)
1.5.3 电容、电感的串联和并联	(19)
1.6 有源二端元件	(21)
1.6.1 电压源	(21)
1.6.2 电流源	(23)
1.7 含独立源电路的等效化简	(24)
1.7.1 理想电源的串联、并联	(24)
1.7.2 两种实际电源的等效互换	(25)
小 结	(27)
习 题	(30)
第 2 章 电路的分析方法	(33)
2.1 简单电路的分析方法	(33)
2.2 复杂电路的分析方法	(35)
2.2.1 支路电流法	(35)
2.2.2 网孔分析法	(35)
2.2.3 节点分析法	(38)
2.3 叠加定理、等效电源定理	(41)
2.3.1 叠加定理	(41)
2.3.2 等效电源定理	(43)
2.4 受控源和含受控源电路的分析	(50)

2.4.1	受控源	(50)
2.4.2	用等效概念分析含受控源的电路	(52)
小 结		(55)
习 题		(57)
第3章	正弦交流电路	(60)
3.1	正弦交流电压和电流	(60)
3.1.1	正弦交流电的三要素	(60)
3.1.2	正弦交流电的相位差和有效值	(61)
3.2	相 量	(63)
3.2.1	复数和复数的四则运算	(63)
3.2.2	正弦量的相量表示	(65)
3.3	基尔霍夫定律的相量形式	(67)
3.4	电阻、电感和电容元件的正弦电流	(68)
3.4.1	电 阻	(68)
3.4.2	电 感	(70)
3.4.3	电 容	(72)
3.5	阻抗与导纳、相量模型	(75)
3.5.1	阻抗与导纳	(75)
3.5.2	用相量法分析无源二端电路的等效阻抗	(76)
3.6	复杂正弦电路的分析计算	(80)
3.7	正弦交流电路的功率和功率因数	(82)
3.7.1	二端电路平均功率和功率因数	(83)
3.7.2	二端电路的无功功率	(84)
3.8	谐振电路	(86)
3.8.1	串联谐振	(87)
3.8.2	并联谐振	(89)
3.9	互感电路	(91)
3.9.1	耦合电感及其伏安关系	(91)
3.9.2	具有互感线圈的串联与并联	(94)
3.9.3	去耦等效电路	(96)
3.9.4	空芯变压器	(96)
3.10	三相交流电路	(98)
3.10.1	三相电路	(99)
3.10.2	线电压(电流)与相电压(电流)的关系	(100)
3.10.3	三相电路的计算	(101)
3.10.4	三相电路的功率	(104)
小 结		(105)
习 题		(109)

第4章 电路中的过渡过程	(112)
4.1 换路定律及初始值的计算	(112)
4.1.1 换路定律	(112)
4.1.2 初始值的计算	(113)
4.2 一阶电路的零输入响应	(114)
4.2.1 RC电路的零输入响应	(114)
4.2.2 RL电路的零输入响应	(117)
4.3 一阶电路的零状态响应	(120)
4.4 一阶电路的完全响应	(123)
4.4.1 完全响应	(123)
4.4.2 一阶电路的三要素分析法	(124)
4.5 阶跃函数与阶跃响应	(128)
4.5.1 阶跃函数	(128)
4.5.2 阶跃响应	(130)
4.6 二阶电路的零输入响应	(131)
小 结	(133)
习 题	(135)
第5章 半导体二极管及其应用电路	(138)
5.1 半导体基础知识	(138)
5.1.1 本征半导体	(138)
5.1.2 掺杂半导体	(139)
5.1.3 PN结特性	(140)
5.2 半导体二极管	(141)
5.2.1 二极管的构成与特性	(142)
5.2.2 二极管的主要参数	(143)
5.3 单相整流滤波电路	(144)
5.3.1 单相半波整流电路	(144)
5.3.2 单相桥式整流电路	(145)
5.3.3 倍压整流电路	(146)
5.3.4 滤波电路	(146)
5.4 稳压二极管及其稳压电路	(149)
5.4.1 稳压二极管	(150)
5.4.2 稳压管稳压电路	(150)
小 结	(153)
习 题	(154)
第6章 放大电路基础	(156)
6.1 半导体三极管	(156)
6.1.1 三极管的工作状态	(157)
6.1.2 三极管的特性曲线	(159)

6.1.3	三极管的微变等效电路	(160)
6.1.4	三极管的主要参数	(161)
6.2	共射放大电路	(162)
6.2.1	放大电路的基本概念	(162)
6.2.2	共射放大电路	(163)
6.3	共集放大电路	(170)
6.4	多级放大电路	(173)
6.4.1	多级放大电路的耦合	(173)
6.4.2	多级放大电路的动态分析	(174)
6.5	功率放大器	(175)
6.5.1	互补对称双电源功率放大器(OCL 电路)	(175)
6.5.2	单电源互补对称电路(OTL 电路)	(177)
6.6	场效应管和场效应管放大电路	(177)
6.6.1	结型场效应管	(178)
6.6.2	绝缘栅型场效应管	(180)
6.6.3	场效应管的主要参数	(181)
6.6.4	场效应管的微变等效电路	(182)
6.6.5	共源放大电路	(182)
6.7	直流放大电路的主要问题与差动放大电路	(184)
6.7.1	零点漂移的产生和抑制	(185)
6.7.2	差动式放大电路	(186)
6.8	集成运算放大器	(191)
6.8.1	集成运放的组成	(191)
6.8.2	集成运放的主要参数与类型选择	(192)
6.8.3	理想运放的条件及重要结论	(194)
6.9	晶闸管及其应用	(195)
6.9.1	晶闸管的组成与工作原理	(196)
6.9.2	晶闸管的伏安特性及主要参数	(197)
6.9.3	单相桥式可控整流电路	(198)
6.9.4	单结管触发电路	(199)
小 结	.....	(201)
习 题	.....	(202)
第 7 章 负反馈放大电路	.....	(205)
7.1	反馈的基本概念	(205)
7.1.1	反馈的概念	(205)
7.1.2	反馈的四种组态	(206)
7.2	负反馈放大电路的表示方法	(208)
7.3	负反馈电路组态及深负反馈计算	(209)
7.3.1	电压串联负反馈	(210)

7.3.2	电流并联负反馈	(211)
7.3.3	电压并联负反馈	(211)
7.3.4	电流串联负反馈	(211)
7.4	负反馈对放大电路性能的影响	(213)
7.4.1	负反馈可提高放大倍数的稳定性	(213)
7.4.2	负反馈对输入电阻和输出电阻的影响	(214)
7.4.3	负反馈可减小非线性失真	(214)
7.4.4	负反馈可展宽频带	(215)
7.4.5	负反馈可抑制干扰和噪声	(216)
小 结	.....	(217)
习 题	.....	(218)
第 8 章	集成运放在信号的运算与处理上的应用	(221)
8.1	比例运算电路	(221)
8.1.1	反相比例运算电路	(221)
8.1.2	同相比例运算电路	(222)
8.1.3	差动输入比例运算电路	(223)
8.2	求和电路	(224)
8.2.1	反相求和电路	(224)
8.2.2	同相求和电路	(225)
8.2.3	差动求和电路	(226)
8.3	积分与微分电路	(227)
8.3.1	积分电路	(227)
8.3.2	微分电路	(228)
8.4	对数与反对数电路	(229)
8.4.1	对数电路	(229)
8.4.2	反对数电路	(230)
8.5	模拟乘法器	(230)
8.5.1	除法运算	(231)
8.5.2	开平方运算	(231)
8.6	电压比较器	(232)
8.6.1	过零比较器	(232)
8.6.2	单门限比较器	(233)
8.6.3	滞回比较器	(234)
8.6.4	窗口比较器	(236)
小 结	.....	(237)
习 题	.....	(238)
第 9 章	集成运放在其它方面的应用	(243)
9.1	正弦波振荡电路	(243)
9.1.1	产生正弦波振荡的条件	(243)

9.1.2	RC 串并联电路选频特性	(244)
9.1.3	RC 串并联振荡电路	(245)
9.2	非正弦波振荡电路	(248)
9.2.1	矩形波发生器	(248)
9.2.2	三角波发生器	(249)
9.2.3	锯齿波发生器	(250)
9.2.4	压控振荡器	(251)
9.3	稳压电源	(252)
9.3.1	串联型稳压电源的基本构成和工作原理	(252)
9.3.2	集成稳压器	(253)
9.4	集成运放应用举例	(256)
9.4.1	低通滤波器	(256)
9.4.2	移相电路	(257)
9.4.3	电压-电流转换电路	(258)
9.4.4	电容量倍增电路	(259)
9.4.5	理想二极管与精密整流电路	(260)
附录表	集成运算放大器国内外型号对照表	(262)
小 结	.....	(277)
习 题	.....	(278)
参考文献	.....	(281)

第 1 章 电路的基本概念与基本定律

电路理论不是研究实际电路,而是研究由理想元件构成的电路模型。本章所讨论的元件都是对实际器件进行近似化、理想化抽象出来的模型。将这些模型元件连接一起,各元件之间电流、电压必然要受到一定约束,这种约束关系就是基尔霍夫定律。

本章将引入等效概念,这是本课程的重要内容。等效变换是分析电路的常用方法之一。

1.1 电路和电路元件

电路都是由实际器件按一定方式连接,以形成电流通路。实际电路种类很多,形式和结构也各不相同。按电路的基本功能可分为两大类:一类是对信号的变换、传输和处理的电路;一类是对能量的转换和传输的电路。前者用来对各种物理量进行测量、放大等等,如收音机、电视接收机将接收的微弱无线电信号经过放大后以满足工作的要求。后者用来把电能转换成所需要的其它形式的能量,如发电厂的发电机把热能或原子能或水能变换成电能,通过变压器、输电线传送给各用电单位。

日常生活中用的手电筒电路就是一个简单的电路:它是由电池、灯泡、连接导线及开关组成,如图 1-1-1(a)所示。电池作为电源,在其正负极间保持一定的电压,为电路提供电能。灯泡是吸收能量的装置,将电能转换成光能、热能,这类电器件称为**负载**。电源与负载通过导线与开关连接,使电流形成通路。

电路理论内容包括分析和研究电路中所发生的电磁现象与过程,探讨电路的基本规律和计算方法。

在分析和研究电路时,为突出重点,抓住主要矛盾,是把实际的具体电路抽象为由一些理想元件构成的电路。所谓理想元件,就是对实际电路器件的科学抽象。实际器

件的物理过程十分复杂并且都和电磁有关,因此性能方程也十分复杂。为了简化对器件性能的描述,常略去其次要的物理过程,把它近似化、理想化,使之可以用一个简单的数学式来描述。这种经过简化的器件称为**理想元件或元件模型**。一个实际电路可以由多个理想元件的组合来模拟,这样的电路称为**电路模型**。

有了理想元件和电路模型的概念,对图 1-1-1(a)所示的实际手电筒电路,可以用电阻 R 表示灯泡,用直流电压源 U_S 表示电池,用电阻为零的导线表示金属壳体,如图 1-1-1(b)所示。

本书所涉及的理想元件有:电阻元件、电容元件、电感元件、电压源元件、电流源元件、受控源元件和耦合电感元件。每种元件都将有自己精确的数学形式的定义,这就使得用数学方法分析电路成为可能。为简便起见,今后省略理想二字,所指元件都系对理想元件而言。应该指出,本书主要讨论如何分析已经建立起来的电路模型。关于如何建立一个实际电路的模型问

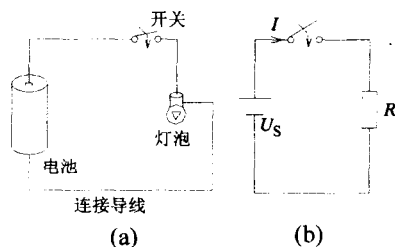


图 1-1-1 实际电路及其模型

题,超出了本书讨论的范围,故本书不涉及这方面的内容。

1.2 元件的电流、电压和功率

元件及电路中的基本物理量有电流、电压、功率和能量。

1.2.1 电流、电压及其参考方向

带电粒子有规则的运动形成了电流。电流是一种客观的物理现象,人们虽然看不见电流,但可以通过它的热效应、磁效应和光效应等来感受到它的存在。

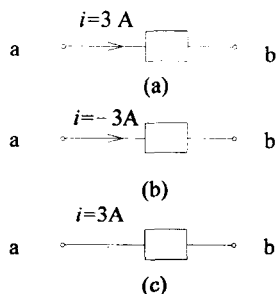
把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为**电流强度**(简称**电流**)。用符号 i 表示,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

习惯上将正电荷的运动方向规定为电流的方向。电流的方向是客观存在的,但在分析较为复杂的直流电路时,往往难于事先判断某支路中电流的实际方向;对交流讲,其方向随时间而变,也无法用一个箭头标示出它的实际方向。为此,在分析计算电路时有必要先任意假定一个电流的参考方向(用箭头表示)。实际方向可能与参考方向相同,也可能相反。因此,电流是一个代数量,可能是正值或是负值。若分析计算的结果电流为正值,则电流的实际方向与参考方向一致。若为负值则表明电流的实际方向与参考方向相反。应当指出,只有当参考方向选定之后,电流之值才有正负之分。

在国际单位制(SI)中,电荷量的单位是库仑(C),时间的单位是秒(s),电流的单位为安培(A)。电流的大小和方向可能随时间变动,也可能不随时间变动。随时间变动的电流用小写字母 i 表示。恒定电流又称为**直流电流**,用大写字母 I 表示。

例 1-1 图 1-2-1 中的方框用来泛指元件,分别指出图 1-2-1 的(a),(b),(c)中电流的实际方向。



解: 图 1-2-1 中电流的实际方向分别为:

(a) 由 a 至 b;

(b) 由 b 至 a;

(c) 不能确定,因为没有给出电流的参考方向。

电荷在电路中流动,就必然有能量的交换。电荷在电路的电源处获得能量,而在另一处(如电阻)失去能量。电荷获得的能量是由电源的化学能、机械能或其它形式的能量转换而来的。电荷失去的能量,转换为热能、光能等等。电荷失去的能量是由电源提供的。电荷在运动过程中能量的得与失是因为电场力的作用。为衡量电场力移动电荷做功的能力,在分析电路中引出“电压”这一物理量,电压又称“电位差”。

我们把单位正电荷由 a 点经任意路径运动到 b 点时,该电荷获得或失去的能量定义为**电压**,用符号 u 表示,即

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-2-2)$$

式中 dq 为通过 ab 段电路的电荷量; dw 为电荷 dq 在该段运动过程中获得或失去的能量。