



电路基础教程

张永瑞 王松林 编著



科学出版社
www.sciencep.com



电路基础教程

张永瑞 王松林 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是根据国家教育部教学指导委员会新修订的《高等工业学校电路分析基础基本要求》，并充分考虑各院校新教学计划学时数及现代电子科技的发展趋势，为电子类各专业本科生编写的教材。

全书由电路的基本概念与定律、电阻电路分析、动态电路时域分析、正弦稳态电路分析、电路频率响应、二端口网络、非线性电阻电路分析、MATLAB 工具软件用于电路计算等 8 章内容组成。全书基本概念讲述透彻；基本分析方法归类恰当，思路清晰，步骤明确；结合工程实际举例类型多；引入 MATLAB 工具软件用于电路计算，对读者学习、掌握运用软件工具辅助计算电路问题非常有益。

本书可作为通信工程、电子信息工程、计算机科学与技术、测控技术与仪器、微电子学等专业“电路”或“电路分析基础”课程的本科生教材，也可供电子类专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路基础教程/张永瑞,王松林编著. —北京:科学出版社,2005
(中国科学院规划教材——电子信息与通信系列)
ISBN 7-03-015825-3

I. 电… II. ①张… ②王… III. 电路理论-高等学校-教材 IV. TM13
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 071800 号

责任编辑:匡 敏 姚庆爽 / 责任校对:李奕莹
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 9 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005 年 9 月第一次印刷 印张:24 1/2

印数:1—3 000 字数:468 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

培养深基础、宽专业口径、适应社会需求的通用型人才,是各高等院校新教学计划共同的培养目标之一,而改革课程体系、科学地整合课程内容,使用现代化的教学手段与方法,则是更深层次的、具体的教育改革内容。基于这样的时代背景,并考虑电工电子系列课程改革趋势、潮流及取得的新成果,编者特为通信工程、电子信息工程、计算机科学与技术、测控技术与仪器、微电子学等专业的本科生编写了这本《电路基础教程》教材。

本书编写的主要特点有:

(1) 根据国家教育部教学指导委员会新修订的《高等工业学校电路分析基本要求》,考虑学生的认知规律,规划本书的内容和体系。

(2) 加强基本概念,筛选经典内容,突出常用的电路分析方法。

(3) 概念讲述力求简练、准确,问题讨论重视从物理概念上讲道理,多作定性分析,对于必要的定量数学推导,交代清楚思路,过程简捷,结论明确醒目。举例力求联系工程实际,具有典型性。

(4) 注重教学方法。作为教材,应使教师教学实施方便,学生容易自学,本书融入编者几十年在本课程教学中的经验、心得和体会。在结构安排上注重逻辑性和条理性,文字表述方面力求通俗易懂。

(5) 引入 MATLAB 工具软件辅助计算电路问题。

本书由电路的基本概念与定律、电阻电路分析、动态电路时域分析、正弦稳态电路分析、电路频率响应、二端口网络、非线性电阻电路分析、MATLAB 工具软件用于电路计算等 8 章内容组成。各章均有数量较多的习题供选用。使用本教材的教学参考学时为 60~70 学时。张永瑞编写第 1、4、5、6 章,王松林编写第 2、3、7、8 章。全书由张永瑞负责统稿。

本书吸收了我校从事电路课程教学的各位老师多年来教学实践的成果,得到他们许多的帮助,在这里表示衷心的感谢。还要感谢我们参阅的所有文献的作者们,是他们编著的好教材为我们提供了丰富的资料。

限于编者水平,书中定有不少错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2005 年 5 月于西安电子科技大学

目 录

前言

第 1 章 电路的基本概念与定律	1
1.1 电路模型	1
1.1.1 实际电路组成与功能	1
1.1.2 电路模型	2
1.2 电路变量	4
1.2.1 电流	4
1.2.2 电压	6
1.2.3 电功率	8
1.3 电阻元件与欧姆定律	11
1.3.1 电阻元件	11
1.3.2 欧姆定律	12
1.3.3 电阻元件上消耗的功率与能量	13
1.4 理想电源	14
1.4.1 理想电压源	14
1.4.2 理想电流源	17
1.5 基尔霍夫定律	19
1.5.1 基尔霍夫电流定律	20
1.5.2 基尔霍夫电压定律	21
1.6 电路等效	25
1.6.1 电路等效的一般概念	25
1.6.2 电阻的串联等效与并联等效	26
1.6.3 理想电源的串联等效与并联等效	33
1.7 实际电源的模型及其互换等效	34
1.7.1 实际电源的模型	34
1.7.2 电压源、电流源模型互换等效	36
1.8 电阻 Δ 形、Y 形电路互换等效	38
1.8.1 Δ 形电路等效变换为 Y 形电路	38
1.8.2 Y 形电路等效变换为 Δ 形电路	40
1.9 受控源及含受控源电路的等效	42
1.9.1 受控源	42

1.9.2 含受控源电路的等效	44
习题一	47
第2章 电阻电路分析	55
2.1 图与电路方程	55
2.1.1 图的基本概念	55
2.1.2 KCL 和 KVL 的独立方程	59
2.2 $2b$ 法和支路电流法	61
2.2.1 $2b$ 法	61
2.2.2 支路电流法	62
2.3 回路法与网孔法	64
2.4 节点法	70
2.5 齐次定理和叠加定理	77
2.5.1 齐次定理	77
2.5.2 叠加定理	79
2.6 替代定理	83
2.7 等效电源定理	86
2.7.1 戴维南定理	86
2.7.2 诺顿定理	88
2.7.3 等效电源定理应用举例	91
2.7.4 最大功率传输定理	95
2.8 特勒根定理	97
2.9 对偶性	101
习题二	102
第3章 动态电路时域分析	111
3.1 动态元件	111
3.1.1 电容元件	111
3.1.2 电感元件	115
3.1.3 电容与电感的串、并联等效	118
3.2 动态电路的方程及其解	121
3.2.1 动态电路方程的建立	121
3.2.2 微分方程的经典解法	123
3.3 电路的初始值	125
3.3.1 独立初始值	125
3.3.2 非独立初始值	128
3.4 一阶电路的零输入响应与时常数	130
3.5 一阶电路的零状态响应	134

3.6 一阶电路的全响应——三要素公式	138
3.7 一阶电路的阶跃响应	145
3.7.1 阶跃函数	145
3.7.2 阶跃响应	147
3.8 二阶电路分析	148
3.8.1 零输入响应	149
3.8.2 阶跃响应	151
3.9 正弦激励下一阶电路的响应	152
习题三	154
第4章 正弦稳态电路分析	163
4.1 正弦交流电的基本概念	163
4.1.1 正弦交流电的三要素	163
4.1.2 相位差	166
4.1.3 有效值	168
4.2 正弦交流电的相量表示法	170
4.3 基本元件 VCR 的相量形式和 KCL、KVL 的相量形式	175
4.3.1 R 、 L 、 C 电压电流关系的相量形式	175
4.3.2 KCL、KVL 的相量形式	179
4.4 阻抗与导纳	182
4.4.1 阻抗与导纳	182
4.4.2 阻抗和导纳的串、并联	184
4.4.3 阻抗串联模型和并联模型的等效互换	185
4.5 正弦稳态电路相量分析法	192
4.5.1 串、并、混联电路的分析	193
4.5.2 网孔、节点分析法用于正弦稳态电路的分析	195
4.5.3 等效电源定理用于正弦稳态电路的分析	197
4.6 正弦稳态电路的功率	198
4.6.1 基本元件的功率和能量	198
4.6.2 一端口网络的功率	203
4.7 正弦稳态电路中的功率传输	212
4.7.1 减小损耗、高效传输问题	213
4.7.2 最大功率传输问题	213
4.8 耦合电感元件	217
4.8.1 耦合电感的基本概念	217
4.8.2 耦合电感元件上的电压、电流关系	219
4.8.3 耦合电感的去耦等效	224

4.9 用相量法分析含互感的正弦稳态电路	227
4.9.1 用方程法分析含互感电路	228
4.9.2 用等效法分析含互感电路	229
4.10 理想变压器与全耦合变压器	233
4.10.1 理想变压器的三个理想条件	234
4.10.2 理想变压器的主要性能	234
4.10.3 全耦合变压器	238
4.10.4 实际变压器的模型	242
4.11 三相交流电路的分析	243
4.11.1 对称三相电源	243
4.11.2 Y-Y形三相电路分析	245
4.11.3 Y- Δ 形三相电路分析	247
4.12 多频周期稳态电路分析	249
4.12.1 多频周期电路的稳态响应	249
4.12.2 多频周期信号的有效值	251
4.12.3 多频周期电路的平均功率	252
习题四	254
第5章 电路频率响应	263
5.1 网络函数与频率响应	263
5.1.1 网络函数	263
5.1.2 网络频率特性	264
5.2 常用RC一阶电路的频率特性	266
5.2.1 RC一阶低通电路的频率特性	266
5.2.2 RC一阶高通电路的频率特性	270
5.3 常用RLC串联谐振电路	273
5.3.1 串联谐振	274
5.3.2 频率特性	279
5.3.3 通频带	283
5.4 实用RLC并联谐振电路的频率特性	285
5.4.1 并联谐振	286
5.4.2 频率特性	289
5.4.3 通频带	291
习题五	295
第6章 二端口网络	301
6.1 互易定理	301
6.1.1 互易性	301

6.1.2 互易定理	303
6.2 常用的二端口网络方程及其参数	307
6.2.1 Z 方程与 z 参数	308
6.2.2 Y 方程与 y 参数	310
6.2.3 A 方程与 a 参数	311
6.2.4 H 方程与 h 参数	313
6.3 二端口网络的网络函数与特性阻抗	317
6.3.1 策动函数	317
6.3.2 转移函数	320
6.3.3 特性阻抗	323
6.4 二端口网络的级联	326
习题六	328
第 7 章 非线性电阻电路分析	333
7.1 非线性电阻元件	333
7.1.1 非线性电阻定义及分类	333
7.1.2 静态电阻和动态电阻的概念	336
7.2 非线性电阻的串联和并联	337
7.2.1 非线性电阻的串联	337
7.2.2 非线性电阻的并联	339
7.3 非线性电阻电路分析	341
7.3.1 图解法	341
7.3.2 分段线性化法	343
7.3.3 小信号分析法	345
习题七	347
第 8 章 MATLAB 工具软件用于电路计算	352
8.1 MATLAB 语言简介	352
8.1.1 MATLAB 语言的特点	352
8.1.2 MATLAB 使用入门	352
8.1.3 MATLAB 基本语法	354
8.1.4 获得 MATLAB 在线帮助	359
8.2 MATLAB 用于电路计算举例	359
8.2.1 电阻电路计算	359
8.2.2 时域电路计算	364
8.2.3 正弦稳态电路计算	369
参考文献	373
习题参考答案	374

第 1 章 电路的基本概念与定律

电路理论是当代电子科学技术的重要理论基础之一。学习本课程主要是掌握电路的基本规律和基本分析方法。本章从建立电路模型、认识电路变量等最基本的问题出发，重点讨论理想电源、欧姆定律、基尔霍夫定律、电路等效等重要概念。本章最后介绍受控源。

1.1 电路模型

“模型”是现代自然科学、社会科学分析研究问题时普遍使用的重要概念，如没有宽窄厚薄的“直线”是数学学科研究的一种模型；不占空间尺寸却有一定质量的“质点”是物理学科研究的一种模型。人们在分析、设计某一实际系统时，几乎都采用模型化的方法，即先建立能反映该系统基本特征的模型，使问题得到合理简化，然后对该模型进行定量分析，以求得该系统的某些分析研究结果。研究电路问题也是如此，首先要建立电路模型（circuit model），然后进行定量分析。

1.1.1 实际电路组成与功能

人们在现代工农业生产、国防建设、科学研究以及日常生活中，使用着各种各样的电器设备，如电动机、雷达导航设备、计算机、电视机、手机等，广义上来说，这些电器设备都是实际中的电路。

图 1.1.1 是最简单的一种实际照明电路。它由三部分组成：①是提供电能的能源，简称电源（source），它的作用是将其他形式的能量转换为电能（图中干电池电源是将化学能转换为电能）；②是用电装置，统称为负载（load），它将电源供给的电能转化为其他形式的能量（图中白炽灯将电能转换成光能和热能）；③是连接电源与负载传输电能的金属导线，简称导线（lead）。图 1.1.1 中 S 是为了节约电能所加的控制开关，需要照明时将开关 S 闭合，不需要照明时将 S 打开。电源、负载与连接导线是任何实际电路都不可缺少的三个组成部分。

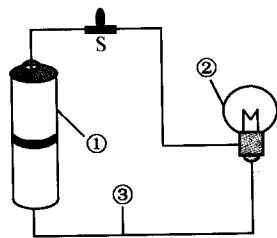


图 1.1.1 手电筒电路

实际电路种类繁多，但就其功能来说可概括为两个方面。其一，是进行能量

的产生、传输、分配与转换。典型的例子是电力系统中的发电、输电电路。发电厂的发电机组将其他形式的能量（热能、水的势能、原子能、太阳能等）转换成电能，通过变压器、输电线输送给各用户负载，在那里又把电能转换成机械能（如负载是电动机）、光能（如负载是照明工具）、热能（如负载是电炉、电烙铁等），为人们生产、生活所利用。其二，是实现信号的产生、传播、变换、处理与控制。这方面典型的例子有电话、收音机、电视机电路。如图 1.1.2 所示，接收天线把载有语言、音乐、图像信息的电磁波接收后，通过收音机电路把输入信号（又称激励，excitation）变换或处理为人们所需要的输出信号（又称响应，response），送到扬声器或显像管，再还原为语言、音乐或图像。



图 1.1.2 接收机电路

1.1.2 电路模型

在实际电路中使用着各种电气、电子元器件（又统称为电路部件），如电阻器、电容器、电感器、照明工具、电池、晶体管、变压器等。实际的电路部件虽然种类繁多，但在电磁方面却有许多共同的地方，如电阻器、照明工具、电炉等，它们主要是消耗电能，这样可用一个具有两个端子的理想电阻来反映其消耗电能的特征，其模型符号如图 1.1.3 (a) 所示；类似的，各种实际电容器主要是存储电能，用一个理想的二端电容来反映其储存电能的特征，理想电容元件的模型符号如图 1.1.3 (b) 所示；各种实际电感器主要是储存磁能，用一个理想的二端电感元件反映其储存磁能的特征，其模型符号如图 1.1.3 (c) 所示。

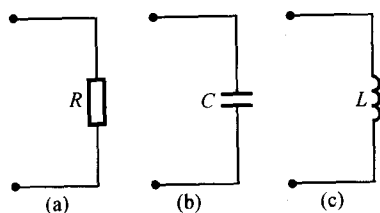


图 1.1.3 理想电阻、电容、电感元件模型

有了上述定义的理想电阻、理想电容、理想电感元件模型，任何一个实际的电阻器、电容器、电感器部件，都能用足以反映其电磁性能的一些理想元件模型或其组合来表示，构成实际部件的电路模型，如照明工具、电炉、电阻器，它们的主要电磁性能都是消耗电能，在低频应用时，它们所储存的电能、磁能比起它们消耗的电能来说很微小，可以忽略不计，这些实际部件的电路模型都可用

图 1.1.3 (a) 中的理想电阻 R 来表示。这样, 就忽略了这些实际部件的外形、尺寸的差异性, 而抓住了它们所表现出来的共性的东西即消耗电能。再如一个实际电感器, 它是在一个骨架上用金属导线绕制而成的, 如图 1.1.4 (a) 所示。如果应用在低频电路里, 它所表现出的电磁性能主要是储存磁能, 它所消耗的电能与储存的电能都很小, 与储存的磁能相比可以忽略不计, 在这种应用条件下的实际电感器, 它的模型可视作图 1.1.4 (b) 所示的理想电感。如果应用在高频电路中, 绕制该线圈的导线所消耗的电能需要考虑, 它储存的电能仍可忽略, 那么, 这种情况的实际电感器的模型就可用体现电能消耗的理想电阻 R 与体现磁能储存的理想电感 L 相串联, 如图 1.1.4 (c) 所示。如果这个实际电感器应用在更高频率的电路中, 它储存的电能也需要考虑, 那么这种情况下的实际电感器的电路模型可用图 1.1.4 (d) 来表示。

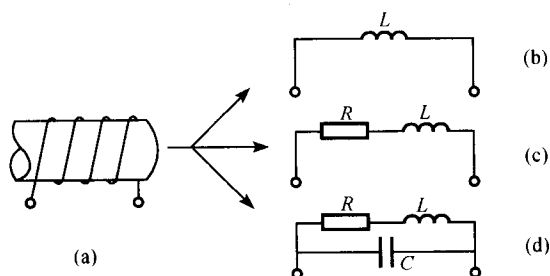


图 1.1.4 实际电感元件在不同应用条件下的模型

其他的实际电路部件都可类似地将其表示为某种特定应用条件下的模型, 这里不一一列举, 关于电路部件的模型概念这里再强调说明几点:

(1) 理想电路元件是具有某种确定的电磁性能的理想元件: 理想电阻元件只消耗电能 (既不储存电能, 也不储存磁能); 理想电容元件只储存电能 (既不消耗电能, 也不储存磁能); 理想电感元件只储存磁能 (既不消耗电能, 也不储存电能)。理想电路元件是一种理想化的模型并具有精确的数学定义, 在实际中并不存在, 但是不能说所定义的理想电路元件模型理论脱离实际, 是无用的。这就如在实际中并不存在“质点”, 但“质点”这种理想模型在物理学科的运动学原理分析与研究中举足轻重一样, 人们所定义的理想电路元件模型在电路理论问题分析与研究中同样充当着重要角色。

(2) 不同的实际电路部件, 只要具有相同的主要电磁性能, 在一定条件下可用同一个模型表示, 如上所述的照明工具、电炉、电阻器这些不同的实际电路部件在低频电路里都可用理想电阻 R 表示。

(3) 同一个实际电路部件在不同的应用条件下, 它的模型也可以有不同的形式, 如图 1.1.4 所示的实际电感器为在各种应用条件下的模型。将实际电路中各

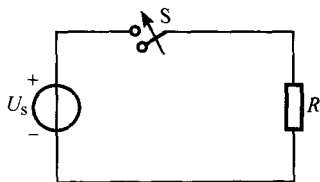


图 1.1.5 图 1.1.1 实际
电路的模型图

个部件用其模型符号表示，这样画出的图称为实际电路的电路模型图，亦称为电原理图，例如，图 1.1.5 就是图 1.1.1 实际电路的电路模型。

还应指出，实际电路中使用的电路部件一般都和电能的消耗现象及电能、磁能的储存现象有关，它们交织在一起并发生在整个部件中。这里所述的“理想化”是指：假定这些现象可以分别研究，并且这些电磁过程都分别集中在各元件内部进行。这样的元件称为集总 (lumped) 参数元件，简称为集总元件。由集总元件构成的电路称为集总参数电路 (lumped circuit)。众所周知，电荷激发电场，电流激发磁场，一切电磁现象的本质都应是电场、磁场的问题。集总参数电路问题是一定条件下的电场、磁场问题的简化问题，即用集总参数电路模型来近似地描述实际电路是有条件的，它要求实际电路的尺寸 l (长度) 要远小于电路工作时的电磁波的波长 λ ，即

$$l \ll \lambda \quad (1.1.1)$$

集总参数电路的突出特点：电流在集总参数电路中流动不需要时间；没有任何电、磁能量辐射，电磁能量的消耗、储存都集中在元件内部进行。

若不能满足式 (1.1.1) 的条件，实际电路便不能按集总参数电路模型来处理。本书只讨论集总参数电路。

1.2 电路变量

在电路问题分析中，人们主要关注的物理量是电流、电压和功率，有时也涉及能量、电荷、磁通 (或磁链) 变量。在具体展开分析、讨论电路问题之前，首先建立并深刻理解一些重要物理量的相关基本概念是非常必要的。

1.2.1 电流

电荷有规则地定向运动，形成传导电流 (current)。一段金属导体内含有大量的带负电荷的自由电子，通常情况下，这些自由电子在其内部做无规则的热运动，并不形成电流；若在该段金属导体两端连接上电源，那么带负电荷的自由电子就要逆电场方向运动，于是在该段金属导体中便形成了电流。在其他场合，如电解溶液中的带电离子做规则定向运动也会形成传导电流。

电流，虽然人们看不见它，但可通过电流的各种效应 (如磁效应、热效应) 来感知它的客观存在，即电流是客观存在的物理现象。单位时间内通过导

体横截面的电荷量定义为电流,如图 1.2.1 所示。电流表示为

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1.2.1)$$

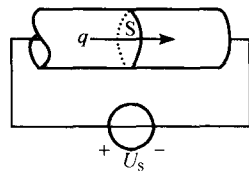


图 1.2.1 电流定义
说明图

式中 $q(t)$ 为通过导体横截面的电荷量,若 $dq(t)/dt$ 为常数,即是直流电流 (direct current, 简记为 DC 或 dc), 常用 I 表示。电流的单位是安 [培] (Ampère, 符号 A), 电力系统中嫌安培单位小,有时取千安 (kA) 为电流的单位,而无线电接收系统中又嫌安培这个单位太大,常用毫安 (mA)、微安 (μA) 作为电流单位。它们之间的换算关系是

$$1\text{kA} = 10^3 \text{ A}$$

$$1\text{mA} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1\mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

在电路问题分析中,电流是经常使用的物理量,所以“电流”一词不仅表示一种物理现象,而且也代表一个物理量。电流不但有大小,而且有方向性。规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。在一些很简单的电路中,如图 1.1.5 所示,电流的实际方向是显而易见的,它是从电源的正极流出,流向电源负极的。但在一些稍微复杂的电路里,如图 1.2.2 所示桥形电路中, R_5 上的电流实际方向就不是一看便知的。不过, R_5 上电流的实际方向只有三种可能:①从 a 流向 b;②从 b 流向 a;③既不从 a 流向 b,也不从 b 流向 a (R_5 上电流为零)。所以说,对电流这个物理现象可以用代数量来描述它。简言之,电流是代数量,当然可以像研究其他代数量问题一样选择正方向,即本书中所述的参考方向。假定的正电荷运动的方向为电流的参考方向 (reference direction), 用箭头标在电路图上。今后若无特殊说明,就认为电路图上所标的箭头是电流的参考方向。对电路中电流设参考方向还有另一方面的原因,那就是在交流电路中电流的实际方向分时间段在交替改变,因此很难在这样的电路中标清楚电流的实际方向,而引入电流的参考方向也就解决了这一难题。在对电路中电流设出参考方向以后,若经计算得出电流为正值,说明所设参考方向与实际方向一致;若经计算得出电流为负值,说明所设参考方向与实际方向相反。电流值的正与负,只有在设定参考方向的前提下才有意义。

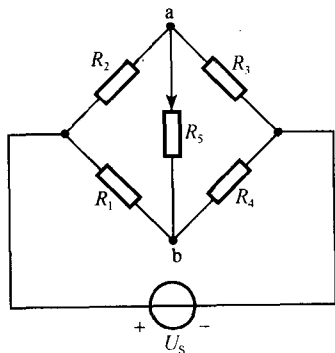


图 1.2.2 桥形电路

在直流电路中,测量电流时要根据电流的实际方向将电流表串联接入待测支

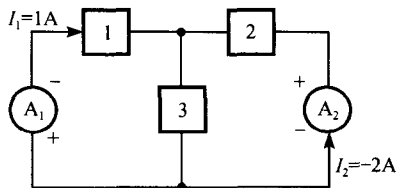


图 1.2.3 直流电流测试电路

路里，使电流的实际方向从直流电流表的正极流入，即如图 1.2.3 所示那样接入电路。电流表 A_1 和 A_2 两旁所标“+”、“-”号是直流电流表的正、负极。

1.2.2 电压

物理学中已经知道，将单位正电荷自某一点 a 沿任意路径移动到参考点（物理学中习惯选无穷远处作参考点），电场力做功的大小称为 a 点的电位（potential），记为 u_a 。在电路中，电位的物理意义同物理静电场中所讲电位概念是一样的，只不过电路中某点电位是将单位正电荷沿任一电路所约束的路径移至参考点（习惯选电路中某点而不选无穷远处），电场力所做功的大小。

两点之间的电位之差即是两点间的电压（voltage）。从电场力做功概念定义，电压就是将单位正电荷从电路中一点移至另一点电场力做功的大小，如图 1.2.4 所示。用数学式表述为

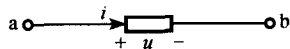


图 1.2.4 定义电压示意图

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq} \quad (1.2.2)$$

式中 dq 为由 a 点移至 b 点的电荷量，单位为库 [仑] (Coulomb, 符号 C)； dw 是移动电荷 dq 电场力所做的功，单位为焦 [耳] (Joule, 符号 J)。电位、电压的单位都是伏 [特] (Volt, 符号 V)，1V 电压相当于移动 1C 正电荷电场力所做的功为 1J。在电力系统中嫌伏单位小，有时用千伏 (kV) 作单位，而在无线电电路中嫌伏单位太大，常用毫伏 (mV)、微伏 (μV) 作电压单位。

从电位、电压定义可知它们都是代数量，因而也有参考方向。电路中，规定电位真正降低的方向为电压的实际方向。但在复杂的电路里，如图 1.2.2 中 R_5 两端电压的实际方向是不易判别的；在交流电路里，两点间电压的实际方向是时间段交替改变的，这给实际电路问题的分析计算带来不便，所以也需要对电路中两点间电压设出参考方向。所谓电压参考方向，就是假设电位降低的方向，在电路图中用“+”、“-”号标出，或用带下脚标的字母表示，如电压 U_{ab} ，脚标中第一个字母 a 表示假设电压参考方向的正极性端，第二个字母 b 表示假设电压参考方向的负极性端。以后如无特殊说明，电路图中“+”、“-”标号就认为是电压的参考方向。在设定电路中电压参考方向以后，若经计算得出电压 U_{ab} 为正值，说明 a 点电位实际比 b 点电位高；若 U_{ab} 为负值，说明 a 点电位实际比 b 点电位低。与电流类似，两点间电压数值的正与负，只有在设定参考方向的条件才是有意义的。

大小、方向均恒定不变的电压称为直流电压 (DC voltage), 常用大写字母 U 表示。测量直流电压, 应根据电压的实际方向将直流电压表并联接入电路, 使直流电压表的正极接所测电压的实际高电位端, 负极接所测电压的实际低电位端, 譬如, 理论计算得 $U_{ab} = 5V$, $U_{bc} = -3V$, 若要测量这两个电压, 电压表应如图 1.2.5 所示那样接入电路。图中 V_1 和 V_2 为电压表, 两旁所标的“+”、“-”号分别为直流电压表的正、负极性端。

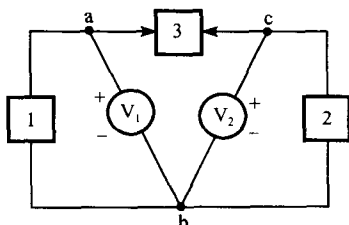


图 1.2.5 直流电压测量电路

例 1.2.1 如图 1.2.6 (a) 所示电路, 若已知 2s 内有 4C 正电荷均匀地由 a 点经 b 点移动至 c 点, 且知由 a 点移动至 b 点电场力做功为 8J, 由 b 点移动到 c 点电场力做功为 12J。

(1) 标出电路中电流参考方向并求出其值, 若以 b 点作参考点 (又称接地点), 求电位 U_a 、 U_b 、 U_c 和电压 U_{ab} 、 U_{bc} 。

(2) 标出电流参考方向与 (1) 相反时, 若以 c 点作参考点, 再求电位 U_a 、 U_b 、 U_c 和电压 U_{ab} 、 U_{bc} 。

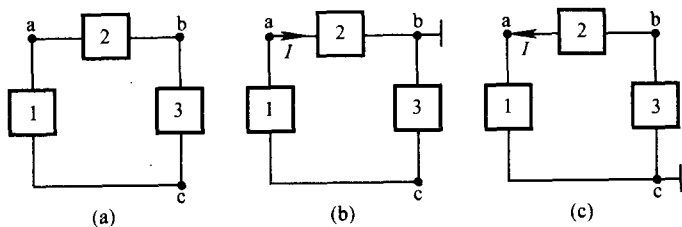


图 1.2.6 例 1.2.1 用图

解 (1) 设电流参考方向如图 1.2.6 (b) 所示, 并在 b 点画上接地符号。依题意并由电流定义得

$$I = \frac{q}{t} = \frac{4}{2} = 2(A)$$

由电位定义, 得

$$U_a = \frac{W_{ab}}{q} = \frac{8}{4} = 2(V)$$

$$U_b = 0 (b \text{ 点为参考点})$$

$$U_c = \frac{W_{cb}}{q} = -\frac{W_{bc}}{q} = -\frac{12}{4} = -3(V)$$

本例题中已知 4C 正电荷由 b 点移至 c 点电场力做功 12J, 本问是以 b 为参考点求 c 点电位, 就是说, 若将 4C 正电荷由 c 点移至 b 点, 电场力做功应

为 -12J (实际为克服电场力做功 12J , 或者说外力(非电场力)做功 12J), 所以计算 c 点电位时算式中要用 -12J 。利用电压等于电位差关系, 求得

$$U_{ab} = U_a - U_b = 2 - 0 = 2(\text{V})$$

$$U_{bc} = U_b - U_c = 0 - (-3) = 3(\text{V})$$

(2) 按题目中要求, 设电流参考方向如图1.2.6(c)中所示, 并在 c 点画上接地符号。由电流定义得

$$I = -q/t = -4/2 = -2(\text{A})$$

电位

$$U_a = W_{ac}/q = (8 + 12)/4 = 5(\text{V})$$

$$U_b = W_{bc}/q = 12/4 = 3(\text{V}), \quad U_c = 0(c \text{ 为参考点})$$

所以电压

$$U_{ab} = U_a - U_b = 5 - 3 = 2(\text{V})$$

$$U_{bc} = U_b - U_c = 3 - 0 = 3(\text{V})$$

通过这个例子, 可以归纳总结出有关电流、电位、电压概念带有共性的几点重要结论:

(1) 电路中电流数值的正、负与参考方向密切相关, 参考方向设得不同, 计算结果仅差负号。

(2) 电路中各点电位数值随所选参考点的不同而改变, 但参考点一经选定, 那么各点电位数值就是唯一的, 这就是电位的相对性与单值存在性。

(3) 电路中任意两点之间的电压数值不因所选参考点的不同而改变。今后在分析电路问题时, 如只求电压, 并不需要知道参考点选在何处, 往往电路图上不标出参考点 (这种情况下两点间电压的计算方法见1.5节); 而求电位, 则必须要有参考点, 没有参考点, 谈论电位数值大小是没有意义的。

1.2.3 电功率

单位时间电场力做功大小称为功率(power), 或者说做功的速率称为功率。在电路中所述的电功率即是电场力做功的速率, 以符号 $p(t)$ 表示。功率的数学定义式可写为

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (1.2.3)$$

式中 dw 为 dt 时间内电场力所做的功。功率的单位为瓦[特](Watt, 符号W)。1W功率就是每秒做功1J, 即 $1\text{W} = 1\text{J/s}$ 。

在电路中, 人们更关注的是功率与电流、电压之间的关系, 以图1.2.4所示电路为例加以讨论, 图中矩形框代表任意一段电路, 其内可以是电阻, 可以是电源, 也可以是若干电路元件组合。电流的参考方向设成从 a 流向 b , 电压的参考