

73.113
ZYR

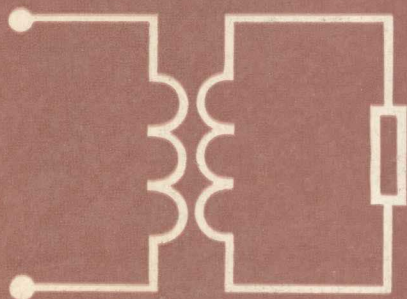
DIAN LU FEN XI JI CHU

73.113
ZYR

电路分析基础

张永瑞 杨林耀 编

29-1



西北电讯工程学院出版社

内 容 简 介

本书讨论了集总参数线性时不变电路的基本理论和基本分析方法。全书共分六章，其内容大致可以分为三部分：电阻电路分析；时域分析和正弦稳态分析。为了便于自学，全书除了有较丰富的例题，练习题和习题以外，还配有《电路分析基础》实验与题解。

本书可作为大专计算机应用专业教材，也可作为大学本科计算机专业和电类有关专业的教学参考书。

电路分析基础

张永瑞 杨林耀 编

西北电讯工程学院出版社出版发行

西北电讯工程学院印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 17 字数 419 千字

1987年4月第1版 1987年4月第1次印刷 印数 1-5 000

ISBN7-5606-0013-1/TM·0001

统一书号：15322·85

定价：2.85 元

前 言

本书是参照 1980 年 6 月审订的高等工业学校四年制无线电技术类专业试用的《电路分析基础教学大纲(草案)》，并根据大学专科的特点，为计算机应用专业编写的教材。

本书讨论了集总参数线性时不变电路的基本理论和基本分析方法。全书共分六章，其内容大致可以分为三部分：电阻电路分析；时域分析和正弦稳态电路分析。其中时域分析中的卷积积分一节作为选学内容，以“*”号标记。全课程大约需用 60 学时。

在编写中，我们力求做到每章的内容由浅入深，全书各章紧密衔接。既重视基本概念和基本定律的物理意义的阐述，又注意基本分析方法的归纳与总结。考虑到学生以自学为主的特点，我们在教材编写中特别注意了下列几个方面：(1) 全书配合理论列举了较多的例题，以利于学生掌握电路的分析和计算方法。(2) 每章后面有小结，对全章内容作比较系统的、完整的归纳，使学生能更深入地理解和掌握全章内容。(3) 每章中配置了大量的习题，便于学生选择和练习。其中许多习题是经过多年的教学实践而精选的。(4) 每章最后有自检题，便于学生学完本章内容后，进行自我检查。(5) 配合全书内容，我们编写了《电路分析基础》实验与题解一书，以便于指导学生实验和做习题时参考。本教材在 1986 年完成初稿，已供 85 级学生使用。在教学实践的基础上，我们又作了一次修订。

本书可作为大专计算机应用专业的教材，也可作为大学本科计算机专业和电类有关专业的教学参考书。

本书第一、二、三、六章由张永瑞同志编写，第四、五章由杨林耀同志编写。本教材由吴大正副教授主审，并且提出了许多宝贵意见，在此谨表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中缺点和错误定有不少，恳请读者批评，指正。

编 者

1986.11

目 录

第一章 电路的基本概念和定律

§ 1.1 电路模型	1
一、实际电路的组成	1
二、电路模型	1
§ 1.2 电路中的基本描述量	3
一、电流	3
二、电压	4
三、电功率	6
练习题	8
§ 1.3 理想电源	8
一、理想电压源	8
二、理想电流源	9
练习题	10
§ 1.4 理想电阻元件	11
一、欧姆定律	11
二、电阻元件上的功率	12
练习题	13
§ 1.5 理想电容元件	13
一、电荷与电压约束关系	13
二、电压与电流约束关系	14
三、电容的贮能	15
练习题	16
§ 1.6 理想电感元件	17
一、电流与磁链约束关系	17
二、电压与电流约束关系	18
三、电感的贮能	19
练习题	22
§ 1.7 基尔霍夫定律	22
一、基尔霍夫电流定律(KCL)	23
二、基尔霍夫电压定律(KVL)	24
练习题	26
§ 1.8 元件的串联与并联	27
一、电阻的串、并联	27
二、电感的串、并联	31
三、电容的串、并联	33
练习题	36
§ 1.9 实际电源的模型及其互换	37
一、实际电源的模型	37

二、电压源、电流源模型互换	38
练习题	40
§ 1.10 受控源	40
练习题	42
小结	43
习题一	45
自检题一	49
第二章 电路的基本分析方法	
§ 2.1 支路电流法	51
一、支路电流法	51
二、独立方程的列写	53
三、支路电流法的简要步骤	54
练习题	55
§ 2.2 网孔分析法	56
一、网孔电流	56
二、网孔电流法	56
练习题	61
§ 2.3 节点电位法	63
一、节点电位	63
二、节点电位法	63
练习题	69
附录 2-A 电路几何	70
一、线状图的基本概念	70
二、几个定理	72
三、未知变量的选择与独立方程的存在性	72
小结	73
习题二	74
自检题二	78
第三章 电路的等效变换与定理	
§ 3.1 电路的等效变换	79
一、电路等效的一般概念	79
二、T- Π 变换	80
三、理想电源转移	82
练习题	86
§ 3.2 叠加原理	87
练习题	91
§ 3.3 置换定理	92

练习题	95
§ 3.4 等效电源定理	96
一、代文宁定理	96
二、诺顿定理	98
三、应用举例	99
练习题	102
§ 3.5 最大功率传输定理	103
练习题	105
§ 3.6 互易定理	105
练习题	109
§ 3.7 电路的对偶性	110
一、对偶特性	110
二、对偶方法	113
小结	113
习题三	113
自检题三	117

第四章 动态电路的时域分析

§ 4.1 电路的微分方程及其解	118
练习题	123
§ 4.2 初始值计算	123
练习题	127
§ 4.3 三要素法	128
练习题	135
§ 4.4 零输入响应与零状态响应	136
一、零输入响应	136
二、零状态响应	139
练习题	142
§ 4.5 单位阶跃函数和单位冲激函数	142
一、单位阶跃函数	143
二、单位冲激函数	144
练习题	146
§ 4.6 电路的冲激响应与阶跃响应	147
一、冲激响应	147
二、阶跃响应	148
练习题	150
§ 4.7 卷积积分	150
一、任意函数表示为冲激函数的积分	151
二、卷积积分	152
三、卷积的图解	153
四、卷积的性质	157
练习题	158

§ 4.8 正弦激励下线性时不变电路 的完全响应	159
练习题	160
小结	161
习题四	162
自检题四	167

第五章 正弦激励下稳态电路的分析

§ 5.1 正弦交流电的基本概念	169
一、正弦交流电的三要素	169
二、相位差	170
练习题	172
§ 5.2 利用相量表示正弦交流电	172
一、利用相量表示正弦交流电	173
二、几个定理	174
练习题	176
§ 5.3 正弦交流电的有效值	177
练习题	179
§ 5.4 基本元件上的相量关系及基尔霍夫 定律的相量形式	179
一、电阻元件的相量关系	179
二、电感元件的相量关系	180
三、电容元件的相量关系	182
四、基尔霍夫定律的相量形式	183
练习题	185
§ 5.5 阻抗与导纳	185
一、阻抗与导纳	185
二、RLC 串联电路	186
三、GLC 并联电路	189
四、阻抗和导纳的串、并联	191
练习题	194
§ 5.6 R、L、C 元件的功率和能量	195
练习题	199
§ 5.7 正弦稳态电路中的功率	199
一、无源二端网络的功率	199
二、无功功率和复功率	201
练习题	206
§ 5.8 正弦稳态电路中的最大功率传输	206
练习题	209
§ 5.9 正弦稳态复杂电路分析	209
一、网孔法	209
二、节点法	210
三、等效电源定理	211

练习题	216	练习题	239
§ 5.10 三相电路概述	216	§ 6.3 含耦合电感电路的正弦稳态分析	239
一、三相电源的联接	217	一、含耦合电感电路的方程法分析	240
二、三相电路的计算	218	二、含耦合电感电路等效法分析	241
练习题	221	练习题	246
小结	221	§ 6.4 理想变压器	247
习题五	224	练习题	251
自检题五	229	§ 6.5 实际变压器模型	252
第六章 互感和理想变压器		一、无耗全耦合非理想变压器模型	252
§ 6.1 耦合电感元件	231	二、无耗非理想变压器的模型	253
一、耦合电感基本概念	231	三、三个理想条件均不满足的非理想 变压器模型	255
二、耦合电感线圈上的电压、电流关系	232	练习题	257
练习题	235	小结	258
§ 6.2 耦合电感的去耦等效	236	习题六	259
一、耦合电感的串联等效	236	自检题六	262
二、耦合电感的并联等效	237	参考文献	264
三、耦合电感的 T 型等效	238		

第一章 电路的基本概念和定律

学习《电路分析基础》主要是掌握电路的基本规律和分析计算方法。本章从最基本的问题出发，建立电路的模型、讨论描述元件电特性的关系(伏安关系)以及电路定律(基尔霍夫定律)。

§ 1.1 电路模型

人们在分析研究某一实际装置时，常采用模型化的方法，即先建造能反映该装置基本特性的模型，使问题得到合理简化，然后对该模型进行定量分析，以求得该装置的某些分析研究结果。譬如，为了分析子弹或人造卫星等的运动状况，可以把它们看做是“质点”(它们不占有空间尺寸)，进而用运动学的原理分析它们运动状况(速度、加速度、运动轨迹等)。研究电路问题也是如此，我们首先要建立电路模型，然后进行定量分析。

一、实际电路的组成

图 1.1-1 是最简单的一种照明电路。它由三部分组成：①是提供电能的能源，简称电源，它的作用是将其它形式的能量转换为电能(如电池是将化学能转换为电能，发电机将机械能转换成电能等)；②是用电装置，统称为负载，它将电能转换为其它形式的能量(如灯泡将电能转换为光和热能，电动机将电能转换为机械能等)；③是联接电源与负载传输电能的金属线，简称导线。

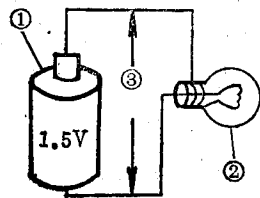


图 1.1-1 手电筒电路

收音机、电视机、计算机等的电路比较复杂，它们的功能主要不是传输电能，而是用以产生、传输、处理和贮存电信号。

在各种场合所用的电路，其形式、功能等虽然各不相同，但它们都遵循一些基本规律。通过本课程的学习，将使读者掌握电路的基本规律，并学会运用它们分析解决实际电路问题的方法。现在，我们就从模型入手，讨论电路的基本理论。

二、电路模型

在实际电路中使用着各种部件，如：灯泡、电阻器、电感线圈、电容器、电池等等。实际的电路部件虽然种类繁多，但在电磁现象方面却有许多共同的地方。譬如，电阻器、灯泡、电炉等等，它们主要是消耗电磁能量的，这样，我们可以用一个具有两个端钮的理想电阻来反映消耗能量的特征，当电流通过它时，在它内部进行着把电磁能转换为其他形式能量的过程。电阻的模型符号如图 1.1-2(a) 所

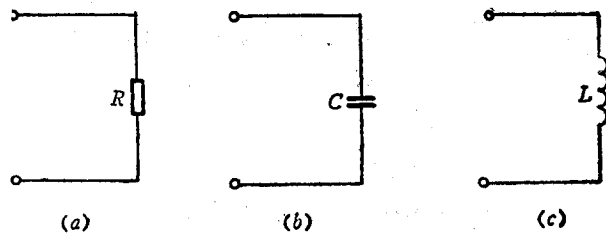


图 1.1-2 理想电阻、电容、电感元件模型

示。类似地，各种电容器主要是贮存电能的，我们用一个理想的二端电容来反映贮存电能的特征，电容的模型符号如图 1.1-2(b) 所示。用一个理想二端电感来反映贮存磁能的特征，用图 1.1-2(c) 的模型符号表示。

有了电阻、电容、电感这三种元件模型，任何一个部件就能用足以反映其电磁性能的一些理想元件或其组合来表示。譬如：灯泡、电炉、电阻器等，它们的主要物理特性都是消耗电能，它们中贮藏的电能、磁能比起它们消耗的电能来说很微小，可以忽略不计。那么，这些实际部件的模型图都可用图 1.1-2(a) 电阻 R 来描述。这样，就抽掉了这些实际部件的外形、尺寸等的差异性，而抓住了它们所表现出来共性的东西即消耗电能。再如一个实际的电感器，它是在一个骨架上用金属导线绕制而成，如图 1.1-3(a) 所示。如果频率很低，它所表现出的主要物理特性是贮藏磁能，它消耗的电能与贮藏的电能都很小，与贮藏的磁能比可以忽略。在这种情况下实际的电感器，它的模型可视作为图 1.1-3(b) 所示的理想电感 L 。如果绕制该线圈的导线所消耗的电能需要考虑，电能的贮藏仍然可忽略，那么，这个实际电感器的模型图就可用体现电能消耗的电阻 R 与体现磁能贮藏的电感 L 相串联来表示，如图 1.1-3(c) 所示。如果这个实际电感器应用在频率较高的场合，它贮藏的电能也需要考虑，那么这种情况下的实际电感器可用图 1.1-3(d) 来表示。

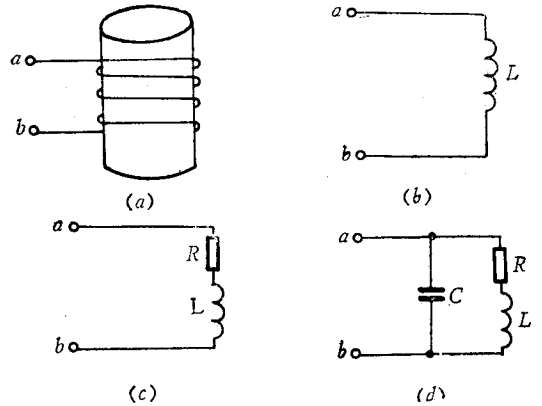


图 1.1-3 实际电感元件在不同应用条件下之模型

其他的一些实际部件都可类似地将其表示为应用条件下的模型图，这里不一一列举。关于部件模型概念还需要说明两点：(1) 不同的实际部件，在一定条件下可用同一个模型表示，如上所述的灯泡、电炉、电阻器都可用电阻 R 表示。(2) 同一个实际部件在不同的应用条件下，它的模型图也可以有不同的形式，如图 1.1-3 所示实际电感器在各种应用条件下之模型。

将实际电路中各个部件用其模型符号表示，这样画出的图就称作实际电路的电路模型图，亦称作电原理图。如图 1.1-4 就是图 1.1-1 实际电路的电路模型图。还要指出，实际部件的运用一般都和电能的消耗现象及电磁能的贮存现象有关，它们交织在一起并发生在整个部件中。这里所谓的“理想化”指的是：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。这些元件(电阻、电容、电感)称为集总参数元件，简称集总元件。每一种集总元件只表征一种基本电磁现象(消耗能量、贮存电能、贮存磁能)。由集总元件构成的电路称为集总参数电路。

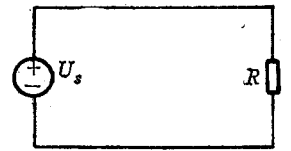


图 1.1-4 图 1.1-1 电路之模型图

用集总参数电路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要远小于电路工作时电磁波的波长。如果不满足这个条件，实际电路便不能按集总电路来处理。本书只讨论集总参数电路。

§ 1.2 电路中的基本描述量

在电路问题分析中，人们所关心的物理量是电流、电压和功率。在具体展开分析、讨论电路问题之前，首先弄清并建立与这些物理量有关的基本概念是很重要的。

一、电流

电荷有规则的定向运动，形成电流。众所周知，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作无规则地热运动，如图 1.2-1(a) 所示。在这种情况下，金属导体内虽有电荷运动，但由于电荷移动是杂乱无规则的，因而不形成电

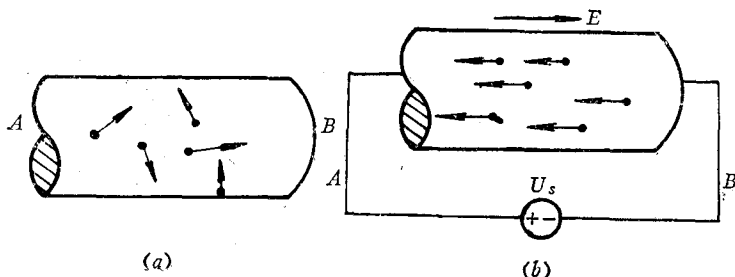


图 1.2-1 电流形成示意图

流。如果在 AB 段金属导体的两端联接上电源，那么带负电荷的自由电子就要逆电场方向运动，这样， AB 段金属导体内就有电荷作规则的定向运动，于是就形成电流，如图 1.2-1(b) 所示，图中 E 为电场强度。在其他场合，如在电解溶液中的带电离子作规则运动也会形成电流。

电流，虽然人们看不见摸不着它，但可通过电流的各种效应来感觉到它的客观存在。日常生活中，闭合开关灯就亮，表明有电流流经电灯；关断开关灯就灭，又表明没有电流流经电灯，这是人们所熟悉的常识。所以，毫无疑问，电流是客观存在的物理现象。

电流有大小之分，为了从量的方面量度电流的大小，引入电流强度的概念。我们把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度，如图 1.2-2 所示。电流强度用符号 i 表示，即

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (1.2-1)$$

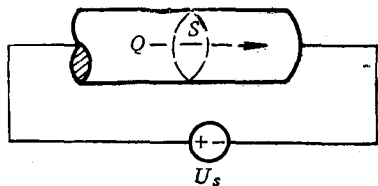


图 1.2-2 电流强度定义说明图

若 dQ/dt 为常数，即是直流电流，常用大写字母 I 表示。电流强度的单位是安培 (A)，简称“安”。有时安培这个单位嫌小，如电力系统中常取千安 (kA) 为电流强度的单位。而有时又嫌安培这个单位太大，如晶体管电路中常用毫安 (mA)、微安 (μA) 作电流强度单位。它们之间的换算关系是：

$$\begin{aligned} 1 \text{ kA} &= 10^3 \text{ A} \\ 1 \text{ mA} &= 10^{-3} \text{ A} \\ 1 \mu\text{A} &= 10^{-6} \text{ A} \end{aligned}$$

在电路问题分析中，电流强度是经常使用的物理量，为了简便，简称为电流。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。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 1.1-1，电流的实际方向是显而易见的，它是从电源正极流出，流向电源负极。但在一些稍复杂的电路里，如图 1.2-3 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 上电流实际流向只有三种可能：(1) 从 a 流向 b ；(2) 从 b 流向 a ；(3) R_5 上电流为零。所以说对电流这个物理现象从量的方面指述它可以用代数量。简言之，电流是代数量。当然可以象研究其他代数量问题一样选择正方向，即参考方向，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箭头是电流的参考方向。经计算得电流为正值，说明所设参考方向与实际方向一致；若计算得电流为负值，说明所设参考方向与实际方向相反。电流值的正与负是在设定参考方向的前提下才是有意义的。在直流电路中，测量

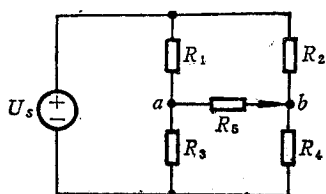


图 1.2-3 桥形电路

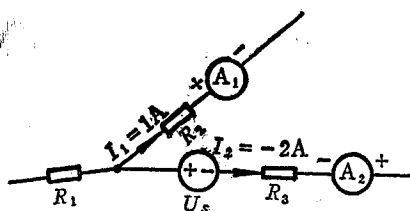


图 1.2-4 直流电流测试电路

电流要根据电流的实际方向将电流表串联接入待测支路里，如图 1.2-4 所示，直流电流表 A_1 、 A_2 两旁所标“+”“-”号是电流表的极性。

二、电压

物理学中我们已经知道，将单位正电荷自电场中某一点 a 移动到参考点（物理中习惯选无穷远处作参考点）电场力做功的大小称作 a 点的电位。在电路中，电位的物理意义同物理静电场中所讲电位是一样的，只不过电路中某点之电位是将单位正电荷沿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）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。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电路中另一点电场力所做功的大小，如图 1.2-5 所示。用数学式表示，即为

$$u = \frac{dW}{dQ} \quad (1.2-2)$$

式中 dQ 为由 a 点移至 b 点的电荷量，单位为库仑(C)； dW 是为转移电荷 dQ 电场力所做的功，单位为焦耳(J)。电位、电压的单位都是伏特(V)，1V 电压相当于为移动 1C 正电荷电场力所做的功为 1J。在电力系统中伏特单位嫌小，常用千伏(kV)。在无线电电路中有时又嫌伏特单位太大，常用毫伏(mV)、微伏(μ V)作电压单位。

从电位、电压定义知，它们都是代数量，因而也有参考方向问题。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 1.2-3 中 R_5 两端电压的实际方向是不易判别的，或在时间变动电路里，两点间电压的实际方向是经常改变的，这给实际电



图 1.2-5 定义电压示意图

路问题的分析计算带来困难。所以也常常对电路中两点间电压设出参考方向(亦称正方向)。所谓电压参考方向,就是假定电位降低之方向,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 表示假设的正极性端,第二个字母 b 表示假设的负极性端。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。若经计算得电压 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 点低。同电流一样,两点间电压的正与负是在设定参考方向的条件才是有意义的。

电压大小、方向均恒定不变时为直流电压,常用大写 U 表示对直流电压的测量,是根据电压的实际方向将直流电压表并联接入电路。若 $U_{ab} = 5\text{V}$, $U_{bc} = -3\text{V}$,要测量这两个电压,电压表应如图1.2-6所示接入电路。图中 V_1 、 V_2 为电压表,两旁的“+”“-”标号分别代表正极性端与负极性端。

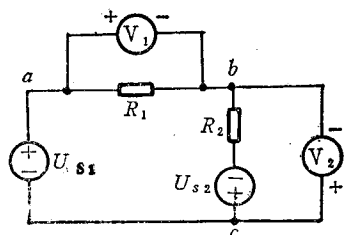


图 1.2-6 直流电压测量电路

例 1.2-1 如图1.2-7(a)所示一段电路,若已知两秒钟内有 2C 正电荷均匀由 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 5J ,由 b 点移动到 c 点电场力做功为 2J 。求(1)标出 a 、 b 、 c 这段电路中电流的参考方向,并求出电流数值。(2)若以 b 点作参考点,求电位 U_a 、 U_b 、 U_c ,电压 U_{ab} 、 U_{bc} 。(3)若以 c 点作参考点,求电位 U_a 、 U_b 、 U_c ,电压 U_{ab} 、 U_{bc} 。

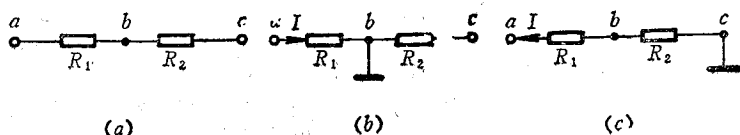


图 1.2-7

解 (1) 设电流参考方向如(b)图所示,则依电流定义得

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{2}{2} = 1\text{A}$$

若设电流参考方向如图(c)所示,则

$$I = -\frac{Q}{t} = -\frac{2}{2} = -1\text{A}$$

两种情况所求电流数值都是正确的。

(2) b 为参考点((b)图中 \perp 表示接地符号)依电压定义得

$$U_a = \frac{W}{Q} = \frac{5}{2} = 2.5\text{V}$$

$$U_b = 0$$

$$U_c = -\frac{2}{2} = -1\text{V}$$

$$U_{ab} = U_a - U_b = 2.5 - 0 = 2.5\text{V}$$

$$U_{bc} = U_b - U_c = 0 - (-1) = 1\text{V}$$

(3) c 为参考点,如(c)图所示,则

$$U_a = \frac{5+2}{2} = 3.5 \text{ V}$$

$$U_b = \frac{2}{2} = 1 \text{ V}$$

$$U_c = 0$$

$$U_{ab} = U_a - U_b = 3.5 - 1 = 2.5 \text{ V}$$

$$U_{bc} = U_b - U_c = 1 - 0 = 1 \text{ V}$$

通过这个例子，我们可以看到：(1) 电路中电流数值的正与负与参考方向密切相关，参考方向设的不同，计算的结果仅差一负号。(2) 电路中某点电位数值随选参考点的不同而改变，但参考点一经选定，那么某点电位就是唯一确定的数值，这就是电位的相对性与单值存在性。(3) 电路中两点之间的电压不因选参考点的不同而改变。今后在分析电路问题中，如只求电压，并不需要知道参考点选在何处，往往电路图上就不标出参考点。而求电位，则必须有参考点，没有参考点，谈论电位大小是没有意义的。

三、电功率

大家知道，做功的速率称作功率。在电路问题中，我们涉及的电功率即是电场力做功的速率，以符号 P 表示，即

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (1.2-3)$$

式中 dW 为 dt 时间内电场力所做的功。功率的单位为瓦(W)。

电路中人们感兴趣的是功率与电路中基本描述量电流、电压之间的关系。以图 1.2-5 所示电路为例来加以讨论。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的组合。电流的参考方向设成从 a 流向 b ，电压的参考方向设成 a 为高电位端， b 为低电位端。这样所设的电流电压参考方向称作参考方向关联(或称作电流电压参考方向一致)。设在 dt 时间内由 a 点转移到 b 点的正电荷量为 dQ ， a 点至 b 点电压 u 意味着单位正电荷从 a 移至 b 电场力所做的功，那么移动 dQ 正电荷，电场力做的功为 $dW = u \cdot dQ$ 。电场力做功说明电能损耗，损耗的这部分电能被 ab 这段电路所吸收。下面具体导出 ab 这段电路消耗的电功率与其上电压电流之间关系。

$$\text{由 } u = \frac{dW}{dQ} \text{ 得 } dW = u \cdot dQ, \quad \text{再由 } i = \frac{dQ}{dt} \text{ 得 } dt = \frac{dQ}{i},$$

根据功率定义：

$$P = \frac{dW}{dt}$$

得

$$P = u \cdot i \quad (1.2-4)$$

需要强调的是，在电压电流参考方向关联条件下，一段电路所吸收的电功率为该段电路两端电压电流之乘积。 P 为正值，该段电路吸收功率；若 P 为负值，该段电路吸收负功率，即该段电路向外供出功率，或者产生功率。例如，算得 ab 这段电路吸收功率为 -3 W ，那么说成 ab 这段电路产生 3 W 的功率也是正确的。如果遇到电路中电压电流参考方向不关联情

况,如图 1.2-8 所示,在计算吸收功率的公式中需冠以负号,即

$$P = -u \cdot i \quad (1.2-5)$$

根据式(1.2-5)算得 P 为正值仍然是表示该段电路真正吸收功率,算得负值仍然表示该段电路产生功率。要特别注意,根据电压电流参考方向是否关联,来选用相应计算吸收功率的公式。如果计算一段电路产生功率,所用公式与计算吸收功率时恰恰相反。



图 1.2-8 电流电压参考方向不关联

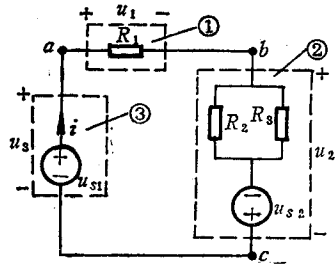


图 1.2-9 例 1.2-2 用图

例 1.2-2 图 1.2-9 所示电路,已知 $i=1\text{ A}$, $u_1=3\text{ V}$, $u_2=7\text{ V}$, $u_3=10\text{ V}$, 求 ab 、 bc 、 ca 三部分电路上各吸收的功率。

解 对 ab 段、 bc 段电路,电压电流参考方向关联,所以

$$P_1 = u_1 \cdot i = 3 \times 1 = 3\text{ W}$$

$$P_2 = u_2 \cdot i = 7 \times 1 = 7\text{ W}$$

对 ca 段电路,电压电流参考方向不关联,所以

$$P_3 = -u_3 \cdot i = -10 \times 1 = -10\text{ W}$$

实际上 ca 这段电路产生功率为 10 W 。

由此例可见: $P_1 + P_2 + P_3 = 0$, 即对一完整的电路来说,它产生的功率与消耗的功率总是相等的,这称为功率平衡,这一点由能量守恒原理是容易理解的。

以上我们阐述了电路分析中常用的三个基本描述量:电流、电压、和功率的基本概念,由于这些描述量可以取不同的时间函数,所以又称它们为变量。这里还需指出,对电路中电流电压设参考方向是必要的,后面我们将会知道,不设电流电压参考方向,电路中基本定律就无法应用,电路问题的分析计算就无法进行下去。本节计算一段电路消耗功率时就遇到此问题,如果不设电流电压参考方向,就不知选用哪种公式形式来计算功率。如何设电路中电流电压参考方向是容易掌握的,原则上可以任意假设,不过为了避免许多计算公式中的负号(负号容易遗漏引起计算差错),习惯上凡是一看便知某支路电流或某两点间电压实际方向的地方,就把这些电流、电压的参考方向设成与实际方向一致,对于不易判别实际方向的,也不必花费时间去判别,对这样一些支路上的电流电压,可以任意假设一个参考方向。还习惯把元件上电流电压参考方向设成关联,有时为了简单起见,一个元件只设出电流或电压一个量的参考方向,另一个量的参考方向就省略不设,意味着参考方向与设出量的参考方向关联。

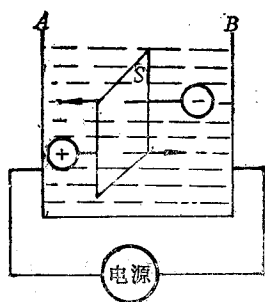
最后谈一下辅助单位,上面我们讲了电流、电压和功率的基本单位为安(A)、伏(V)、瓦(W),也简单介绍了几种电流电压的辅助单位。今后我们在本课程及后续课程里还会遇到其他一些量的单位问题,作为单位换算问题常识,下面给出部分国际制词头表,供读者换算单位时查阅。

表 1-1

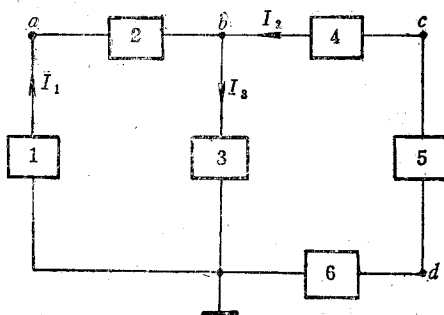
因 数	词 头 名 称		符 号
	原 文(法)	中 文	
10^9	giga	吉	G
10^6	mega	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^{-3}	milli	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳	n
10^{-12}	pico	皮	p

练 习 题

1.2-1 图示电路，电源极性不知，已知 2 秒时间内有 4 库仑正离子和 4 库仑负离子，均匀通过电解液 S 横截面，试标出该电路中电流之正方向，并求出电流的数值。



练习题 1.2-1 图



练习题 1.2-2 图

1.2-2 图示直流电路，各矩形框图泛指元件。已知 $I_1 = 3 \text{ A}$, $I_2 = -2 \text{ A}$, $I_3 = 1 \text{ A}$, $U_a = 8 \text{ V}$, $U_b = 6 \text{ V}$, $U_c = -3 \text{ V}$, $U_d = -9 \text{ V}$ ，求(1)欲验证 I_1 、 I_2 电流数值是否正确，问电流表如何接入电路？标明电流表极性。(2)求电压 U_{ac} 、 U_{db} ，要测量这两个电压，问如何联接电压表？并标明电压表极性。(3)求元件 1、3、5 上所吸收的功率各为多少？

§ 1.3 理想电源

任何一种实际电路必需有电源提供能量，可以这么说，没有电源的电路不成为电路。实际中的电源有各种各样，象干电池、蓄电池、光电池、发电机、电子线路中的信号源等等。本节所要讲述的理想电源，是在一定条件下从实际电源抽象出来的一种模型。

一、理想电压源

不管外部电路如何，其端电压总能保持定值或一定的时间函数的电源定义为理想电压源，

其模型如图 1.3-1(a)或(b)所示。

图(a)中圆圈内的“+”“-”号代表端电压的参考方向， $u_s(t)$ 表示端电压数值。若 $u_s(t)$ 是不随时间变化的常数即是直流理想电压源也常用图(b)所示的模型。为了深刻理解理想电压源概念，这里再强调说明以下三点：(1)理想电压源的端电压与流经它的电流方向、大小无关，即便电流为无穷大，其两端电压仍为 $u_s(t)$ 。若理想电压源 $u_s(t) = 0$ ，则该电源两端子间相当

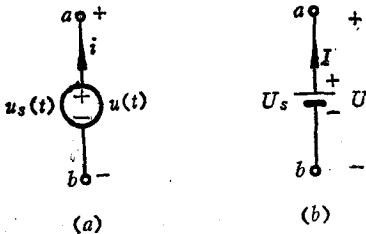


图 1.3-1 理想电压源模型

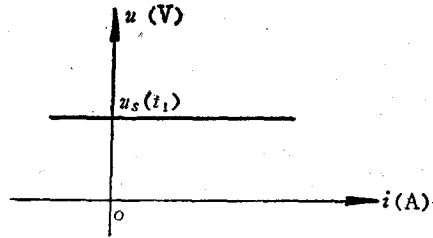


图 1.3-2 理想电压源的伏安特性

短路。(2)理想电压源的端电压由自身决定与外电路无关，而流经它的电流是由它及外电路所共同决定的。电流可以不同的方向流过电源，因此理想压源可以对电路提供电能(起电源作用)，也可以从外电路接受能量(当作其他电源的负载)，这要看流经理想电压源电流的实际方向而定。理论上讲，理想电压源可以供出无穷大能量，也可以吸受无穷大能量。(3)对任意时刻 t_1 ，理想电压源的端电压与输出电流的关系曲线(称伏安特性)是平行于 i 轴、其值为 $u_s(t_1)$ 的直线，如图1.3-2所示。

真正理想的电压源是不存在的。因为按照对它的定义，要求这种电源在其内部贮存着无穷大的其他形式能量，这显然是不可能做到的。然而，新的干电池，或发电机等许多实际的电源，当外电路负载在一定范围之内变化(实际电压源决不可短路!)确实能视为端电压近似为定值。这种情况，把这些实际电源看作理想电压源也是工程计算中允许的。即便外电路变化范围条件限制不存在，也就是说，不能把实际电源看作理想电压源的话，亦可用理想电压源模型串联一适当的电阻，作为表示实际电源伏安关系的模型。关于这个问题将在后面实际电源模型中仔细讨论。由此可见，虽然理想电压源实际中并不存在，但这里所定义的理想电压源模型还是有实际意义的。

二、理想电流源

理想电流源是另一种理想电源，它也是一些实际电源抽象理想化的模型。不管外部电路如何，其输出电流总能保持定值或一定的时间函数的电源定义作理想电流源，其模型用图 1.3-3(a)或(b)表示。模型图中圆圈内的箭头代表输出电流的参考方向。 $i_s(t)$ 表示输出电流的数值。若 $i_s(t)$ 是不随时间变化的常数即是直流理想电流源也常用图(b)所示的模型。为了深刻理解理想电流源概念，这里也再强调说明以下三点：(1)理想

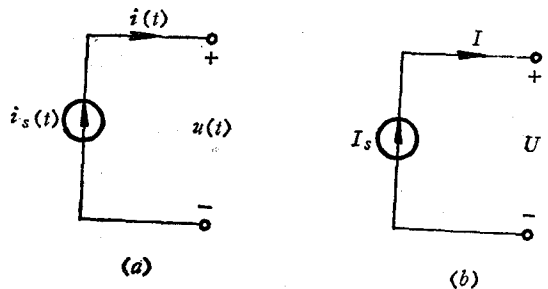


图 1.3-3 理想电流源模型

电流源发出的电流 $i_s(t)$ 与其两端电压大小方向无关, 即使两端电压为无穷大也是如此。如果理想电流源输出电流为零, 则电流源两端子之间相当于开路。(2) 理想电流源的输出电流由它本身决定, 而它两端电压由其本身输出电流及外部电路共同决定。理想电流源两端电压可以有不同的极性, 如同理想电压源一样, 它亦可以向外电路提供电能, 也可以从外电路接受能量, 这要视两端电压的真实极性而定, 并且它供出或接受的能量, 理论上讲也可以无穷大。(3) 对任意时刻 t_1 , 理想电流源的伏安特性是平行于 u 轴其值为 $i_s(t_1)$ 的直线, 如图 1.3-4 所示。

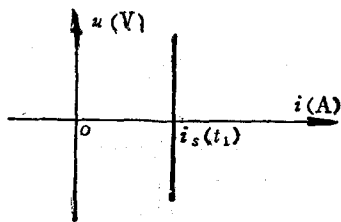
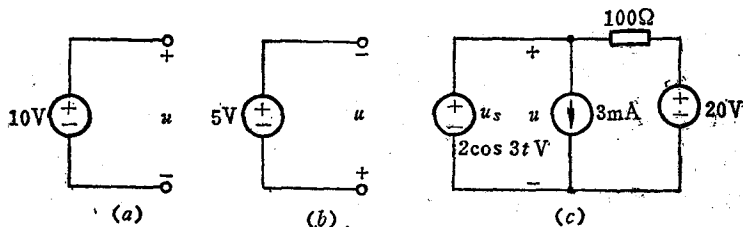


图 1.3-4 理想电流源伏安特性

当然, 真正理想的电流源实际中也是不存在的, 其道理想类同理想电压源情况。但是, 实际中有一些电源, 当外电路负载在一定范围变化时, 它们输出的电流近似为定值, 实际中的光电池电源、电子线路中一些等效信号源电源就是这样的。

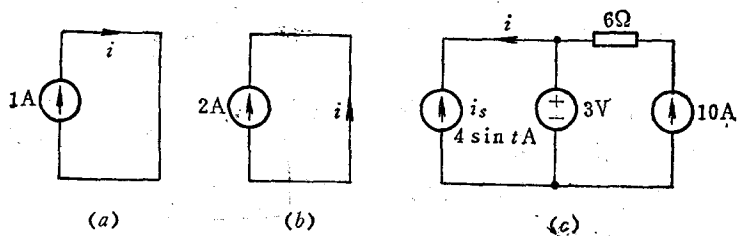
练习 题

1.3-1 求下述图示三种情况的电压 u 。



练习题 1.3-1 图

1.3-2 求下述图示三种情况的电流 i 。



练习题 1.3-2 图

§ 1.4 理想电阻元件

电流在实际电路中流动，并不是畅通无阻的。例如，在金属材料绕制的电阻器中，电流实际是电子的定向移动所形成，如图1.2-1(b)的示意图。图中为了突出说明电子定向移动形成电流，而未画出金属内部存在的许多原子、离子。事实上，电子受电场力作定向运动过程中，必然会碰撞到其金属内部存在的原子、离子，也就是说，对电流要呈现一定的阻力，当然也就有能量损耗。电路参数之一电阻，实际上是表征材料(或器件)对电流呈现阻力、损耗能量的物理实质。

如果在更广泛的意义上定义电阻元件，其定义为：任意时刻 t ，对任何一个二端元件，其伏安关系在 $u-i$ 平面上是一条曲线描述，那么该二端元件称电阻元件。对实际电路中真正耗能元件，电流、电压实际方向总是一致的，因为在电场力作用下正电荷是从真正高电位流向真正低电位。联系到电流、电压实际方向的规定，不难理解这一论断是正确的。如果假定电阻元件上电压电流参考方向关联，显然对真正耗能器件，其伏安关系曲线应在 $u-i$ 平面的一、三象限，其阻值应是正电阻。反之，伏安关系曲线处在 $u-i$ 平面二、四象限的电阻应是负电阻。对负电阻来说，其上电流、电压实际方向总是不一致的。向外供出电能的电源就可以看成一个负电阻。

如果电阻值随其上电压或电流数值变化，则称非线性电阻，反之称线性电阻。如果电阻值随其时间 t 而变化，则称时变电阻，反之称时不变电阻。我们只讨论线性、非时变正电阻。一般实际中用的各种电阻器都可近似看作是这类电阻。今后如无特殊说明，电阻一词就指线性、非时变的正电阻。

一、欧姆定律

图1.4-1(a)是理想电阻模型，设电压、电流参考方向关联，图1.4-1(b)是它的伏安特性曲线，该曲线是处在 $u-i$ 平面一、三象限过原点的直线。由电阻定义，得

$$u(t) = R \cdot i(t) \quad (1.4-1)$$

此式即是著名的欧姆定律(Ohm's Law)公式，简称 OL。在国际单位制中，电阻的单位是欧姆，简称欧 (Ω)。

电阻的倒数称电导，以符号 G 表示，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.4-2)$$

在国际单位制中，电导的单位是西门子，简称西 (S)。从物理概念看，电导是反映电阻元件导电能力强弱的参数。电阻、电导是从相反的两个方面来表征同一电阻元件特性的两个电路参数。所以，定义电导为电阻之倒数是有道理的。应用电导参数来表示电流和电压之间关系时，欧姆定律形式可写为

$$i(t) = Gu(t) \quad (1.4-3)$$

应当明确：(1) 欧姆定律只适用于线性电阻。(2) 如果电阻 R 上的电流电压参考方向不关

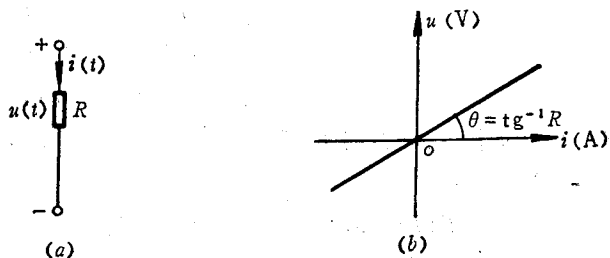


图 1.4-1 理想电阻模型及它的伏安特性