



GH 高等学校工科电子类教材

电路分析

张永瑞 杨林耀 编著

西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

高等专科学校教材

电 路 分 析

张永瑞 杨林耀

西安电子科技大学出版社

1999

(陕)新登字 010 号

内 容 简 介

本书主要讨论线性非时变集总参数电路的基本理论和基本分析方法。全书共分 7 章,其内容大致分 4 个部分:电阻电路分析,时域分析,正弦稳态分析,双口网络和谐振电路。为便于教和学,本书配置有难易度适中的练习题、习题、自检题与这些题目的参考答案。

本书可作为应用电子技术、通信工程、电子工程等专业的大学专科学学生使用的教材,亦可作为计算机应用等电类少学时专业本科生使用的教材。对电类工程技术人员也有参考价值。

高等专科学校教材

电 路 分 析

张永瑞 杨林耀

责任编辑 徐德源

西安电子科技大学出版社出版

地址:西安市太白南路 2 号 邮编:710071

西安长青印刷厂印刷

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 20.5 字数 485 千字

1995 年 10 月第 1 版 1999 年 10 月第 3 次印刷 印数:14 001~20 000

ISBN 7-5606-0372-6/TN·0094(课) 定价:16.50 元

前 言

本教材按机械电子工业部的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由大专应用电子技术教材编审委员会电路分析编审小组征稿并推荐出版。责任编委为唐兴吉。

本教材由西安电子科技大学张永瑞担任主编,西安交通大学邱关源教授担任主审。

本课程的参考学时为 72 学时,其主要内容为:基本概念和定律、电阻电路分析、一阶、二阶电路的时域分析、正弦稳态电路分析、互感和理想变压器、双口网络、谐振电路共 7 章内容。书稿编写中参照国家教委电工课程指导小组 1993 年修订的“电路分析基础”课程基本要求,遵照应用电子技术专业教材(大专)编审委员会制订的“电路分析基础”编写要求,并充分考虑大学专科层次的教学特点,力求编写的教材内容够用、实用为度,不贪多求全面俱到。使用本教材时应注重物理概念阐述,对于不可避免的数学推导,交待清楚思路,结论要明确醒目方便读者掌握。对于分析电路的方法,要讲清楚步骤,举例要结合实际并具有典型性。本课程教学中要辅以足够的练习题、作业题,更要注重课程实验,培养学生分析问题解决问题的能力。

本教材由张永瑞同志编写一、二、五、六、七章,由杨林耀同志编写三、四章,主审人邱关源教授对书稿初稿提出中肯的宝贵意见。书稿编辑中得到了责任编辑徐德源同志热情的帮助,在此一并表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1995.5

目 录

第一章 基本概念和定律	1	二、电源	40
§ 1.1 电路模型	1	三、基本定律	41
一、实际电路组成与功能	1	四、电路等效	42
二、电路模型	2	习题一	44
§ 1.2 电路变量	3	自检题一	47
一、电流	3	第二章 电阻电路分析	49
二、电压	5	§ 2.1 支路电流法	49
三、电功率	7	一、支路电流法	50
思考与练习	9	二、独立方程的列写	51
§ 1.3 理想电源	9	思考与练习	54
一、理想电压源	9	§ 2.2 网孔分析法	54
二、理想电流源	10	一、网孔电流	54
思考与练习	11	二、网孔电流法	55
§ 1.4 欧姆定律	11	思考与练习	60
一、欧姆定律	12	§ 2.3 节点电位法	61
二、电阻元件上消耗的功率与能量	12	一、节点电位	61
思考与练习	14	二、节点电位法	61
§ 1.5 基尔霍夫定律	15	思考与练习	67
一、基尔霍夫电流定律(KCL)	15	§ 2.4 叠加定理	68
二、基尔霍夫电压定律(KVL)	17	思考与练习	72
思考与练习	19	§ 2.5 置换定理	72
§ 1.6 电路等效	20	思考与练习	75
一、电路等效的一般概念	20	§ 2.6 戴维南定理与诺顿定理	76
二、电阻的串联与并联	21	一、戴维南定理	76
三、理想电源的串联与并联	27	二、诺顿定理	78
思考与练习	29	思考与练习	82
§ 1.7 实际电源的模型及其互换	29	§ 2.7 最大功率传输定理	82
一、实际电源的模型	29	思考与练习	85
二、电压源、电流源模型互换	30	§ 2.8 互易定理	85
思考与练习	32	思考与练习	89
§ 1.8 电阻 Δ 、Y 电路互换与理想电源转移等效	32	§ 2.9 电路的对偶性	90
一、电阻的 Y 形连接与 Δ 形连接互换等效	32	一、对偶特性	90
二、理想电源转移等效	34	二、对偶方法	93
思考与练习	36	小结	93
§ 1.9 受控源	37	习题二	95
思考与练习	39	自检题二	98
小结	40	第三章 一阶、二阶电路的时域分析	100
一、电路模型与电路中基本变量	40	§ 3.1 电容元件和电感元件	100

一、电容元件	100	思考与练习	160
二、电感元件	102	§ 4.4 阻抗与导纳	161
三、电感、电容的串、并联	104	一、阻抗	161
思考与练习	107	二、导纳	164
§ 3.2 电路的初始值计算	107	三、阻抗和导纳的串、并联	166
思考与练习	111	思考与练习	169
§ 3.3 一阶电路的零输入响应	111	§ 4.5 正弦稳态电路中的功率	170
思考与练习	115	一、 R 、 L 、 C 元件的功率和能量	170
§ 3.4 一阶电路的零状态响应	115	二、二端电路的功率	173
思考与练习	118	三、无功功率和复功率	176
§ 3.5 一阶电路的完全响应	118	思考与练习	178
思考与练习	124	§ 4.6 正弦稳态电路中的最大	
§ 3.6 单位阶跃函数与一阶电路的单位		功率传输	178
阶跃响应	125	思考与练习	183
一、单位阶跃函数	125	§ 4.7 正弦稳态电路的相量分析法	183
二、一阶电路的单位阶跃响应	126	一、网孔法	184
思考与练习	129	二、节点法	184
§ 3.7 二阶电路的零输入响应和阶跃		三、等效电源定理	185
响应	130	思考与练习	188
一、 RLC 串联电路的零输入响应	131	§ 4.8 三相电路概述	189
二、 RLC 串联电路的阶跃响应	134	一、三相电源的连接	189
三、 GCL 并联电路	135	二、三相电路的计算	191
思考与练习	135	思考与练习	194
§ 3.8 正弦激励下一阶电路的		小结	195
完全响应	136	习题四	197
思考与练习	138	自检题四	203
小结	138	第五章 互感和理想变压器	205
习题三	139	§ 5.1 耦合电感元件	205
自检题三	143	一、耦合电感基本概念	205
第四章 正弦稳态电路分析	144	二、耦合电感线圈上的电压、	
§ 4.1 正弦信号的基本概念	144	电流关系	207
一、正弦信号的三要素	144	思考与练习	210
二、相位差	145	§ 5.2 耦合电感的去耦等效	211
三、有效值	147	一、耦合电感的串联等效	211
思考与练习	148	二、耦合电感的 T 型等效	212
§ 4.2 正弦信号的相量表示	148	思考与练习	214
一、正弦信号的相量表示	149	§ 5.3 含耦合电感电路的相量法分析	215
二、复数运算规则	151	一、含互感电路的方程法分析	215
思考与练习	154	二、含互感电路的等效法分析	216
§ 4.3 基本元件 VAR 的相量形式和		思考与练习	221
KCL、KVL 的相量形式	154	§ 5.4 理想变压器	221
一、基本元件 VAR 的相量形式	154	思考与练习	227
二、KCL、KVL 的相量形式	158	§ 5.5 实际变压器模型	227

一、空心变压器	228	小结	265
二、铁心变压器	231	习题六	266
思考与练习	233	自检题六	269
小结	234	第七章 谐振电路	270
习题五	235	§ 7.1 串联谐振电路	270
自检题五	238	一、串联谐振	271
第六章 双口网络	240	二、频率特性	274
§ 6.1 双口网络的方程与参数	240	三、通频带	277
一、 Z 方程与 Z 参数	240	思考与练习	279
二、 Y 方程与 Y 参数	242	§ 7.2 并联谐振电路	280
三、 A 方程与 A 参数	244	一、并联谐振	280
四、 H 方程与 H 参数	245	二、频率特性	283
思考与练习	247	三、通频带	286
§ 6.2 双口网络的网络函数与		思考与练习	288
特性阻抗	249	§ 7.3 耦合谐振电路	288
一、双口网络的策动函数	250	一、互感耦合谐振电路的谐振	289
二、转移函数	252	二、耦合谐振电路的频率特性	293
三、双口网络的特性阻抗	254	思考与练习	298
思考与练习	255	小结	299
§ 6.3 双口网络的连接与等效	256	习题七	301
一、双口网络的连接	256	自检题七	303
二、双口网络的等效	260	习题参考答案	305
思考与练习	264	参考文献	319

第一章 基本概念和定律

学习电路分析课程主要是掌握电路的基本规律和分析计算方法。本章从建立电路模型概念、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,本章末介绍了受控源。

§ 1.1 电路模型

“模型”是现代各个自然学科、社会学科分析研究中普遍使用的重要概念。如,没有宽窄厚薄的“直线”是数学学科研究中的一种模型;不占空间尺寸却有一定质量的“质点”是物理学学科研究中的一种模型。人们在分析研究某一实际装置时,也常采用模型化的方法,即先建立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。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、实际电路组成与功能

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、电视机等,广义上说,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 3 部分组成:①是提供电能的能源,简称电源,它的作用是将其他形式的能量转换为电能(图中干电池是将化学能转换为电能);②是用电装置,统称其为负载,它将电能转换为其他形式的能量(图中灯泡将电能转换为光和热能);③是连接电源与负载传输电能的金属导线,简称导线。图中 S 是为了节约电能所加的控制开关。电源、负载与连接导线是任何实际电路都不可缺少的 3 个组成部分。

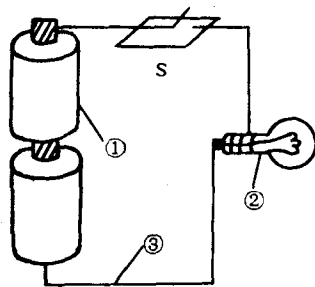


图 1.1-1 手电筒电路

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,是进行能量的传输、分配与转换。典型的例子是电力系统中的输电电路。发电厂的发电机组将其他形式的能量(或热能、或水的势能、或原子能等)转换成电能,通过变压器、输电线等输送给各用户负载,那里又把电能转换成机械能(如负载是电动机械)、光能(如负载是灯泡)、热能(如负载是电炉等),为人们生产、生活所利用。其二,是实现信息的传递与处理。这方面典型例子有电话、收音机、电视机电路。接收天线把载有语言、音乐、图像信息的电磁波接收后,通过电路把输入信号(又称激励)变换或处理为人们所需要的输出信号(又称响应),送到扬声器或显像管,再还原为语言、音乐或图像。

实际电路多种多样,具体的功能也各不相同,但它们有其共性,正是在这种共性的基

基础上,形成电路理论这一学科。

二、电路模型

在实际电路中使用着各种电气元、器件(又统称为电路部件),如电阻器、电容器、电感线圈、灯泡、电池、晶体管、变压器等等。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,它们主要是消耗电能的,这样,我们可用一个具有两个端钮的理想电阻来反映消耗电能的特征,当电流通过它时,在它内部进行着把电能转换为其他形式能量的过程。理想电阻的模型符号如图 1.1-2(a)所示。类似地,各种实际电容器主要是贮存电能的,用一个理想的二端电容来反映贮存电能的特征,理想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,其模型符号如图 1.1-2(c)所示。

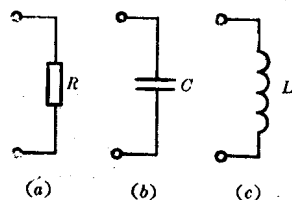


图 1.1-2 理想电阻、电容、电感元件模型

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,就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。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,在低频应用时,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,这些实际部件的电路模型都可用图 1.1-2(a)中的理想电阻 R 来表示。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良金属导线绕制而成的,如图 1.1-3(a)所示,如果应用在低频电路里,它所表现出的主要物理特性是贮藏磁能,它所消耗的电能与

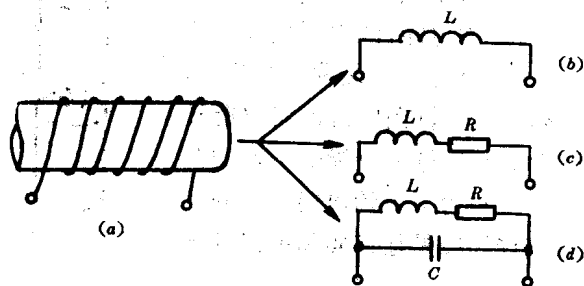


图 1.1-3 实际电感元件在不同应用条件下之模型

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,它的模型可视为图 1.1-3(b)所示的理想电感 L 。如果应用在较高频率的电路中,绕制该线圈的导线所消耗的电能需要考虑,它贮藏的电能仍可忽略,那么,这个实际电感器的模型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更高频率的电路中,它贮藏的电能也需要考虑,那么这种情况下的实际电感器的电路模型可用图 1.1-3(d)来表示。

其他的实际电路部件都可类似地将其表示为应用条件下的模型,这里不一一列举。关于电路部件的模型概念还需强调说明几点:(1)理想电路元件是具有某种确定的电磁性质

的假想元件：理想电阻元件只消耗电能（既不贮藏电能，也不贮藏磁能）；理想电容元件只贮藏电能（既不消耗电能，也不贮藏磁能）；理想电感元件只贮藏磁能（既不消耗电能，也不贮藏电能）。理想电路元件是一种理想的模型并具有精确的数学定义，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，这犹如实际中并不存在“质点”但“质点”这种理想模型在物理学科运动学原理分析与研究中举足轻重一样，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充当着重要角色。（2）不同的实际电路部件，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。（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 1.1-3 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，这样画出的图称为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。

还应指出，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，这样的元件（电阻、电容、电感）称为集总参数元件，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。

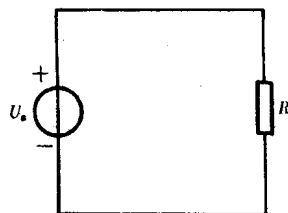


图 1.1-4 图 1.1-1 电路之模型图

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，首先建立并深刻理解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，形成传导电流。大家知道，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的热运动，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，但由于电荷运动是杂乱无规则的，因而不形成传导电流。如果在 AB 段金属导体的两端连接上电源，那么带负电荷的自由电子就要逆电场方向运动，这样， AB 段金属导体内就有电荷作规则的定向运动，于是就形成传导电流，如图 1.2-1(b) 所示，图中 E 为电场强度。在其他场合，如电解溶液中的带电离子作规则定向运动时也会形成传导电流。

电流，虽然人们看不见摸不着它，但可通过电流的各种效应（譬如磁效应、热效应）来感觉它的客观存在，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。单位时间

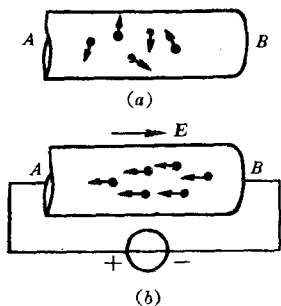


图 1.2-1 电流形成示意图

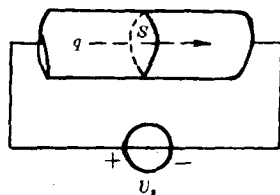


图 1.2-2 电流强度定义说明图

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 $i(t)$ 表示,即

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

式中 $q(t)$ 为通过导体横截面的电荷量。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”。电力系统中嫌安培单位小,有时取千安(kA)为电流强度的单位,而无线电系统中(如晶体管电路中)又嫌安培这个单位太大,常用毫安(mA)、微安(μ A)作电流强度单位。它们之间的换算关系是

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

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

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

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 1.1-4,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_s 上的电流实际方向就不是一看便知的。不过 R_s 上电流的实际流向只有 3 种可能:(1)从 a 流向 b ; (2)从 b 流向 a ; (3) R_s 上电流为零。所以说,对电流这个物理现象可以用代数量,从量的方面描述它。简言之,电流是代数量。当然可以像研究其它代数量问题一样选择正方向,即参考方向。假定正电荷运动的方向为电流的参考方向,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。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在不断地改变,因此很难在这样的电路中标明电流的实际方向,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。电流值的正与负在设定参考方向的前提下才有意义。

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路里,即如图 1.2-4 所示那样接入电路。 A_1 、 A_2 两旁所标“+”、“-”号是电流表的正、负极。

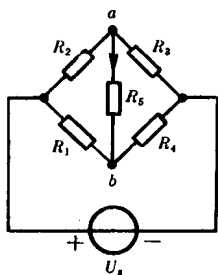


图 1.2-3 桥形电路

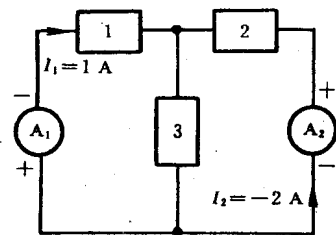


图 1.2-4 直流电流测试电路

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做功的大小,如图 1.2-5 所示。用数学式表示,即为

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \quad (1.2-2)$$

式中 dq 为由 a 点移至 b 点的电荷量,单位为库仑(C);

dw 是为移动电荷 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),1 V 电压相当于为移动

1 C 正电荷电场力所做的功为 1 J。在电力系统中嫌伏特单位小,有时用千伏(kV)。在无线电电路中嫌伏特单位太大,常用毫伏(mV)、微伏(μ V)作电压单位。

从电位、电压定义可知它们都是代数量,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,或在交流电路里,两点间电压的实际方向是经常改变的,这给实际电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。所谓电压参考方向,就是所假设的电位降低之方向,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下才有意义的。

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。若理论计算得 $U_{ab} = 5 \text{ V}$, $U_{ba} = -3 \text{ V}$,要测量这两个电压,电压表应如图 1.2-6 所示那样接入电路。图中 $\textcircled{V}$ 、 $\textcircled{V}$ 为电压表,两旁的“+”、“-”标号分别为直流电压表的正、负极性端。

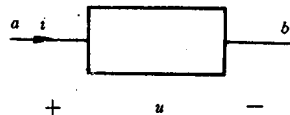


图 1.2-5 定义电压示意图

例 1.2-1 如图 1.2-7(a) 所示电路, 若已知 $2S$ 内有 $4C$ 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 $8J$, 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 V_a 、 V_b 、 V_c , 电压 U_{ab} 、 U_{bc} 。(2) 标电流参考方向与 (1) 相反并求出其值, 若以 c 点作参考点, 再求电位 V_a 、 V_b 、 V_c , 电压 U_{ab} 、 U_{bc} 。

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

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

由电位定义, 得

$$V_a = \frac{W_{ab}}{q} = \frac{8}{4} = 2V$$

$$V_b = 0 \quad (b \text{ 点为参考点})$$

$$V_c = \frac{-12}{4} = -3V$$

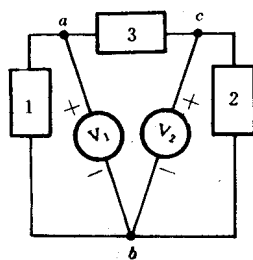


图 1.2-6 直流电压测量电路

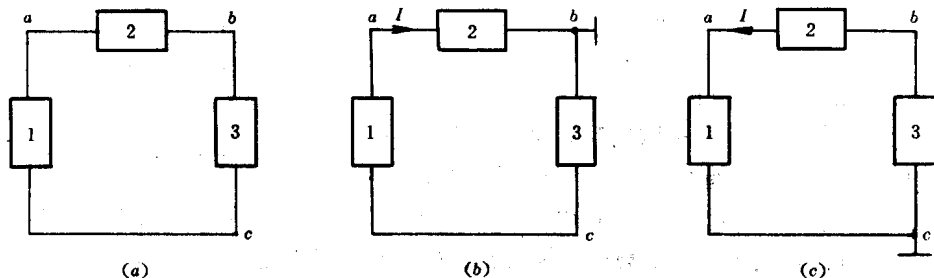


图 1.2-7 例 1.2-1 用电路

题目中告诉 $4C$ 正电荷由 b 移动至 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 点移动至 b 点, 电场力做功应为 $-12J$, 所以计算 c 点电位时算式中要用 -12 。应用电压等于电位之差关系, 求得

$$U_{ab} = V_a - V_b = 2 - 0 = 2V$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = 0 - (-3) = 3V$$

(2) 按题目中要求设电流参考方向如 (c) 图, 并在 c 点画上接地符号。由电流强度定义, 得

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

电位

$$V_a = \frac{W_{ac}}{q} = \frac{8 + 12}{4} = 5V$$

$$V_b = \frac{W_{bc}}{q} = \frac{12}{4} = 3 \text{ V}$$

$$V_c = 0 \quad (c \text{ 为参考点})$$

所以电压

$$U_{ab} = V_a - V_b = 5 - 3 = 2 \text{ V}$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = 3 - 0 = 3 \text{ V}$$

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

(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，计算结果仅差一负号。(2) 电路中某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，那么某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) 电路中两点之间的电压数值不因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；而求电位，则必须要有参考点，没有参考点，谈论电位大小是没有意义的。

三、电功率

单位时间做功大小称作功率，或者说做功的速率称为功率。在电路问题中涉及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(W)。

在电路中，更关注的是功率与电流、电压之间的关系。以图 1.2-5 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。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 $dw = udq$ 。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 这段电路吸收的电功率与其上电压电流之间的关系。

由 $u = dw/dq$ 得 $dw = udq$ ，再由 $i = dq/dt$ 得 $dt = dq/i$ ，根据功率定义 $p(t) = dw/dt$ ，得

$$p(t) = ui \quad (1.2-4)$$

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； p 为负值，该段电路吸收负功率，即该段电路向外供出功率，或者说产生功率。例如，算得 ab 这段电路吸收功率为 -3 W ，那么说成 ab 段电路产生 3 W 的功率也是正确的。如果遇到电路中电压、电流参考方向非关联情况，如图 1.2-8 所示，在计算吸收功率的公式中需冠以负号，即

$$p = -ui \quad (1.2-5)$$

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的公式恰恰相反。

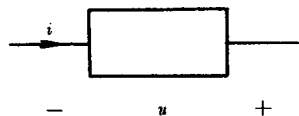


图 1.2-8 电流电压参考方向非关联

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 p_1 、 p_2 、 p_3 。

解 对 ab 段、 bc 段, 电压电流参考方向关联, 所以

$$p_1 = u_1 i = 3 \times 1 = 3\text{ W}$$

$$p_2 = u_2 i = 7 \times 1 = 7\text{ W}$$

对 ca 段电路, 电压电流参考方向非关联, 所以

$$p_3 = -u_3 i = -10 \times 1 = -10\text{ W}$$

实际上 ca 这段电路产生功率 10 W 。

由此例可以看出: $p_1 + p_2 + p_3 = 0$, 即对一完整电路来说, 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电流、电压和功率的基本概念, 由于这些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、电压设参考方向是非常必要的, 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。本节计算一段电路吸收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, 不过为了避免许多公式中的负号(负号容易遗漏而引起计算差错), 习惯上凡是一看便知电流电压实际方向的, 就设参考方向与实际方向一致。对于不易看出实际方向的, 也不必花费时间去判别, 只需在这些支路上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; 有时为了简化, 一个元件只设出电流或电压一个量的参考方向, 意味着省略不设量的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

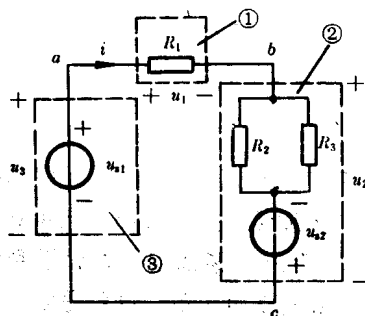


图 1.2-9 例 1.2-2 用图

思考与练习

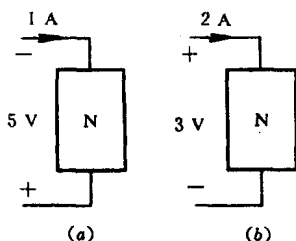
1.2-1 对一个二端电路,若已设出电流、电压参考方向,如何识别是关联参考方向或是非关联参考方向?

1.2-2 简述对电路中电流、电压设参考方向的必要性与可能性。

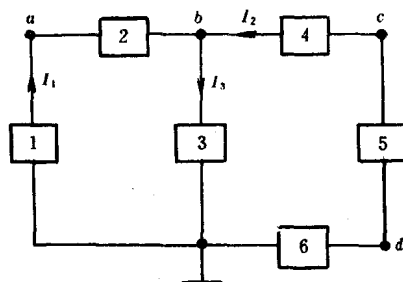
1.2-3 有人说“电路中两点之间的电压等于该两点之间的电位之差,因这两点的电位数值随参考点不同而改变,所以这两点间的电压数值亦随参考点的不同而改变”,你同意他的观点吗?为什么?

1.2-4 求图示电路中二端电路 N 供出(产生)的功率 $P_{N\text{发}}$ 。

1.2-5 图示直流电路中,各矩形框图泛指二端元件或二端电路。已知 $I_1=3\text{ A}$, $I_2=-2\text{ A}$, $I_3=1\text{ A}$, 电位 $V_a=8\text{ V}$, $V_b=6\text{ V}$, $V_c=-3\text{ V}$, $V_d=-9\text{ V}$ 。(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?并标明电流表极性。(2) 求电压 u_{ac} 、 u_{db} , 要测量这两个电压,问如何连接电压表?并标明电压表极性。(3) 求元件 1、3、5 上所吸收的功率为多少?



练习题 1.2-4 图



练习题 1.2-5 图

§ 1.3 理想电源

任何一种实际电路必须有电源提供能量,实际中的电源有各种各样,如干电池、蓄电池、光电池、发电机及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理想模型。

一、理想电压源

不管外部电路如何,其两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)中圆圈外的“+”、“-”号是其参考极性, $u_s(t)$ 为理想电压源的电压。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 3 点:(1) 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。(2) 由伏安特性可进一步看出,理想电压源的端电压与流经它的电流方向、大小无关,即使流经它的电流为无穷大,其两端电压仍为 $u_s(t_1)$ (对 t_1 时刻)。若理想电压源 $u_s(t)=0$,则伏安特性为 $i \sim u$ 平面上的电流轴,它相当于短路。(3) 理

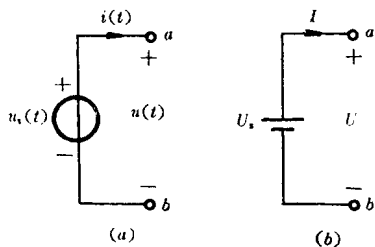


图 1.3-1 理想电压源模型

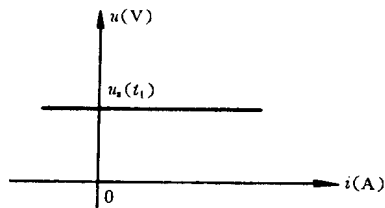


图 1.3-2 理想电压源伏安特性

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，或者说它的输出电流随外电路变化。电流可以不同的方向流过电源，因此理想电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，也可以吸收无穷大能量。

真正理想的电压源是不存在的，因为按照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，对于新的干电池，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!)时，确实能视为端电压近似为定值(直流源)或一定的时间函数(交流源)。这种情况，把这些实际电源看作理想电压源也是工程计算允许的。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内阻，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重要的理论价值和实际意义的。

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。模型图中箭头代表输出电流的参考方向， $i(t)$ 表示理想电流源的输出电流。若 $i_s(t)$ 是不随时间变化的常数，即是直流理想电流源，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 3 点：(1) 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。(2)

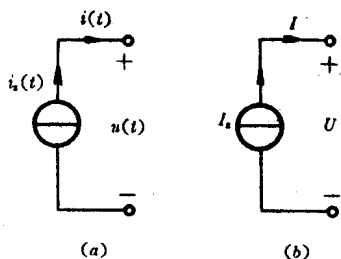


图 1.3-3 理想电流源模型

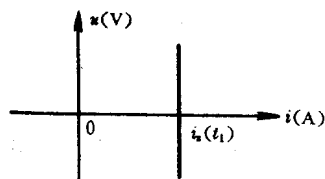


图 1.3-4 理想电流源伏安特性