

高等学校教材

电路分析基础

(第二版)

张永瑞 杨林耀 张雅兰

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书包括电路的基本概念与定律、电路的基本分析方法、常用的电路定理、动态电路的时域分析、正弦电路的稳态分析、互感与理想变压器等6章内容。

该书基本概念讲述清楚，易于读者接受理解；基本分析方法讲解透彻，步骤明确，读者容易掌握；思考与练习、习题、自我检查题配置齐全，难易度适中，方便学生自学和教师施教。

本书可作为应用电子技术、通信工程、电子工程、计算机应用等专业的全日制、夜大、函大、自学考试的大专生教材，也可作为电子机械、应用物理、科技英语等该课程少学时专业的本科生教材。本书对一般电子类工程技术人员也有重要的参考价值。

高等学校教材 电路分析基础 (第二版)

张永瑞 杨林耀 张雅兰
责任编辑 夏大平

西安电子科技大学出版社出版发行

地址：西安市太白南路2号 邮编：710071

西安长青印刷厂印刷

各地新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张：18 字数：424千字

1987年5月第1版 1998年5月第2版 1998年5月第12次印刷 印数：66 051~76 051

ISBN 7-5606-0607-5/TM·0011

定价：18.00元

前 言

《电路分析基础》一书自 1987 年出版以来，经应用电子技术、通信工程、电子工程、计算机应用等专业教学使用十余年，深受师生们的欢迎。他们普遍反映教材内容对大学专科的学生实用、够用，编写思想紧扣专科这一层次的教学要求，基本概念讲述清楚，对问题的讨论注重物理概念阐述、分析透彻，举例有典型性且有工程实际观点。每章后有归纳小结，练习题、习题、自我检查题配置齐全，方便自学，易于教学。

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，面对 21 世纪电工电子系列课程改革的潮流，在听取部分使用本书师生意见的基础上，我们对该书进行了修订，力争使修订版（即第二版）更为完善。修订版保留了原版书的基本体系与风格，在以下几个方面作了修编：

1. 考虑大专层次学生的基础和学制短、教学时数有限的实际情况，修订版本删去了原版书的第二章附录 2—A 电路几何、第三章 § 3.7 电路的对偶性。

2. 遵照教学规律先易后难、循序渐进的原则，采纳了使用原版书部分老师提出的中肯意见，将原书第一章 § 1.5 理想电容元件、§ 1.6 理想电感元件移至第四章第一节。这样安排，使动态电路元件与动态电路时域分析的内容衔接紧凑、自然，有利于教学实施。

3. 对原版书的保留内容也作了较大的改写或重写。如讲述电路等效概念时，修改版书首先着重讲清什么是电路等效，电路等效需要满足的条件，电路等效的对象，电路等效的目的性；接着讨论两种简单的具体电路等效变换方法：电阻串、并联等效与电源串、并联等效。在讲述电阻串并联等效时，作为重点，对串、并联的判别方法做了较详细的说明，以便于初学者掌握使用。类似的重写或做较大改写的内容还有许多，这里不一一列举。

4. 更新了原版书约 1/3 的练习题、习题。将原版书每节后的“练习题”修改为“思考与练习”，增加了利于学生加深概念理解的思考题，删去了原版书中超出大专层次要求的难度大的习题，增加了利于基本概念、基本分析方法练习的习题。

修订版包括：电路的基本概念与定律，电路的基本分析方法，常用的电路定理，动态电路的时域分析，正弦电路的稳态分析，互感与理想变压器等 6 章内容。

实施本课程全部内容大约需 72 学时。

为了便于读者自学，便于读者自检本人学习效果和解题能力，同时与此书配套出版了《〈电路分析基础〉实验与题解》（第二版）一书，欢迎大家选读。

吴大正教授指导了本书的修编工作，审阅了全书并提出了许多宝贵意见。西安交通大学江慰德教授、西北工业大学范世贵教授、西安理工大学崔杜武教授、空军电讯工程学院

目 录

第一章 电路的基本概念和定律	1	思考与练习	48
1.1 电路模型	1	1.10 小结	49
1.1.1 实际电路组成与功能	1	1.10.1 电路模型与电路中基本变量	49
1.1.2 电路模型	2	1.10.2 电源	50
1.2 电路变量	4	1.10.3 基本定律	50
1.2.1 电流	4	1.10.4 电路等效	50
1.2.2 电压	5	习题一	53
1.2.3 电功率	8	自检题一	58
思考与练习	10	第二章 电路的基本分析方法	60
1.3 欧姆定律	10	2.1 支路电流法	60
1.3.1 欧姆定律	11	2.1.1 支路电流法	61
1.3.2 电阻元件上消耗的功率与能量	11	2.1.2 独立方程的列写	62
思考与练习	13	思考与练习	66
1.4 理想电源	14	2.2 网孔分析法	66
1.4.1 理想电压源	14	2.2.1 网孔电流	66
1.4.2 理想电流源	16	2.2.2 网孔电流法	67
思考与练习	18	思考与练习	72
1.5 基尔霍夫定律	19	2.3 节点电位法	73
1.5.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	20	2.3.1 节点电位	73
1.5.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	21	2.3.2 节点电位法	74
思考与练习	25	思考与练习	80
1.6 电路等效	25	2.4 小结	81
1.6.1 电路等效的一般概念	26	2.4.1 方程法分析	81
1.6.2 电阻的串联与并联	26	2.4.2 方程通式	82
1.6.3 理想电源的串联与并联	34	习题二	83
思考与练习	36	自检题二	86
1.7 实际电源的模型及其互换等效	37	第三章 常用的电路定理	88
1.7.1 实际电源的模型	37	3.1 叠加定理和齐次定理	88
1.7.2 电压源、电流源模型互换等效	38	3.1.1 叠加定理	88
思考与练习	40	3.1.2 齐次定理	92
1.8 电阻 Π 、T 电路互换等效	40	思考与练习	93
1.8.1 Π 形电路等效变换为 T 形电路	41	3.2 置换定理	93
1.8.2 T 形电路等效变换为 Π 形电路	43	思考与练习	97
思考与练习	44		
1.9 受控源	45		

3.3 戴维南定理与诺顿定理	98	第五章 正弦电路的稳态分析	171
3.3.1 戴维南定理	98	5.1 正弦电压和电流	171
3.3.2 诺顿定理	100	5.1.1 正弦量的三要素	171
思考与练习	104	5.1.2 相位差	173
3.4 最大功率传输定理	105	5.1.3 有效值	175
思考与练习	108	思考与练习	176
3.5 互易定理	109	5.2 利用相量表示正弦信号	176
思考与练习	114	5.2.1 利用相量表示正弦信号	177
3.6 小结	115	5.2.2 几个定理	179
习题三	116	思考与练习	181
自检题三	122	5.3 R 、 L 、 C 元件 VAR 的相量形式 和 KCL、KVL 的相量形式	181
第四章 动态电路的时域分析	123	5.3.1 R 、 L 、 C 元件 VAR 的 相量形式	182
4.1 动态元件	123	5.3.2 KCL、KVL 的相量形式	186
4.1.1 电容元件	123	思考与练习	188
4.1.2 电感元件	126	5.4 阻抗与导纳	188
4.1.3 电感、电容的串、并联	127	5.4.1 阻抗与导纳	188
思考与练习	131	5.4.2 RLC 串联电路	190
4.2 动态电路的方程	132	5.4.3 GCL 并联电路	192
4.2.1 方程的建立	132	5.4.4 阻抗和导纳的串、并联	194
4.2.2 电路量的初始值计算	133	思考与练习	197
思考与练习	136	5.5 电路基本元件的功率和能量	198
4.3 一阶电路的零输入响应	136	思考与练习	203
思考与练习	140	5.6 正弦稳态电路中的功率	204
4.4 一阶电路的零状态响应	141	5.6.1 二端电路的功率	204
思考与练习	144	5.6.2 无功功率和复功率	205
4.5 一阶电路的完全响应	145	思考与练习	210
思考与练习	150	5.7 正弦稳态电路中的最大功率传输	211
4.6 一阶电路的单位阶跃响应	151	思考与练习	213
4.6.1 单位阶跃函数	151	5.8 正弦稳态电路的相量分析法	214
4.6.2 一阶电路的单位阶跃响应	152	5.8.1 网孔法	214
思考与练习	155	5.8.2 节点法	215
4.7 二阶电路分析	156	5.8.3 等效电源定理	215
4.7.1 零输入响应	157	思考与练习	219
4.7.2 阶跃响应	160	5.9 三相电路概述	219
思考与练习	161	5.9.1 三相电源的连接	220
4.8 正弦激励下一阶电路的响应	161	5.9.2 三相电路的计算	222
思考与练习	163	思考与练习	225
4.9 小结	163	5.10 小结	226
习题四	164	习题五	228
自检题四	169		

自检题五	234	思考与练习	256
第六章 互感与理想变压器	236	6.4 理想变压器	257
6.1 耦合电感元件	236	6.4.1 理想变压器的三个理想条件	257
6.1.1 耦合电感的基本概念	236	6.4.2 理想变压器的主要性能	258
6.1.2 耦合电感线圈上的电压、 电流关系	238	思考与练习	263
思考与练习	243	6.5 实际变压器模型	264
6.2 耦合电感的去耦等效	244	6.5.1 空芯变压器	264
6.2.1 耦合电感的串联等效	244	6.5.2 铁芯变压器	267
6.2.2 耦合电感的 T 型等效	245	思考与练习	270
思考与练习	248	6.6 小结	271
6.3 含互感电路的相量法分析	249	习题六	272
6.3.1 含互感电路的方程法分析	250	自检题六	277
6.3.2 含互感电路的等效法分析	251	参考文献	279

第一章

电路的基本概念和定律

学习“电路分析基础”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、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。

1.1.1 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（图中干电池电源是将化学能转换为电能）；② 是用电装置，统称其为负载，它将电源供给的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，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

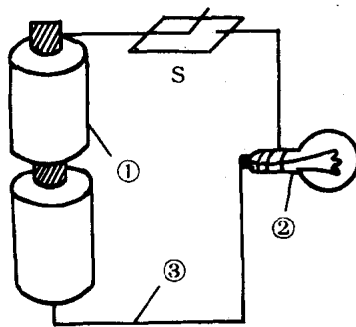


图 1.1-1 手电筒电路

少的 3 个组成部分。

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)、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。这方面典型的例子有电话、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础上,形成电路理论这一学科。

1.1.2 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、电感器、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。

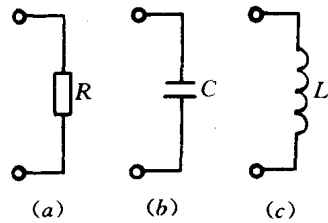


图 1.1-2 理想电阻、电容、电感元件模型

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。

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,它们的主要电磁性能都是消耗电能,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,它所表现出的电磁性能主要是贮藏磁能,它所消耗的电能与贮藏的电能都很小,与贮藏的磁能相比可以忽略,在这种应用条件下的实际电感器,它的模型可视作图 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,这种情况的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。

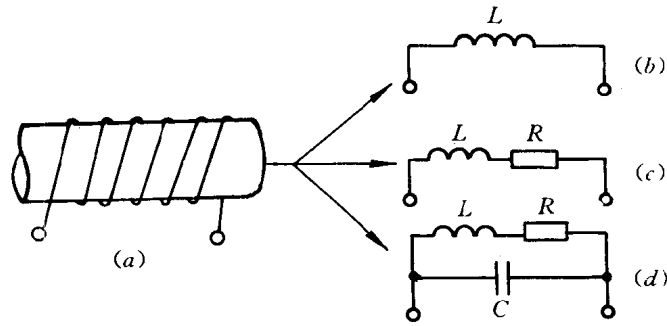


图 1.1-3 实际电感元件在不同应用条件下之模型

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能的理想元件；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，如上述的灯泡、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。

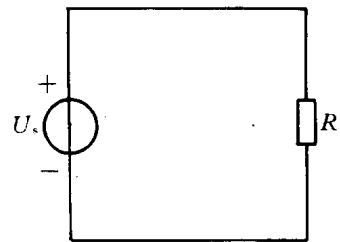


图 1.1-4 图 1.1-1 电路之模型图

还应指出，实际电路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。

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电磁波的波长 λ ，即

$$l \ll \lambda \quad (1.1-1)$$

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。

1.2.1 电流

电荷有规则的定向运动,形成传导电流。我们知道,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也会形成传导电流。

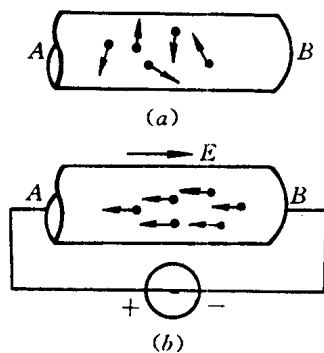


图 1.2-1 电流形成示意图

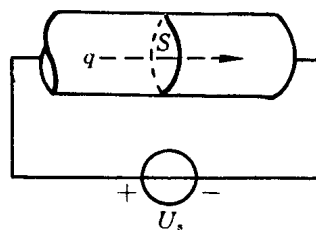


图 1.2-2 电流强度定义说明图

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。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 $dq(t)/dt$ 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

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

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

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

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，流向电源负极的。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 上电流的实际方向只有 3 种可能：(1) 从 a 流向 b ；(2) 从 b 流向 a ；(3) 既不从 a 流向 b ，又不从 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“+”、“-”号是直流电流表的正、负极。

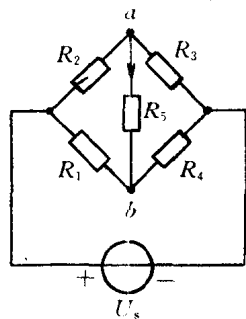


图 1.2-3 桥形电路

参考方向

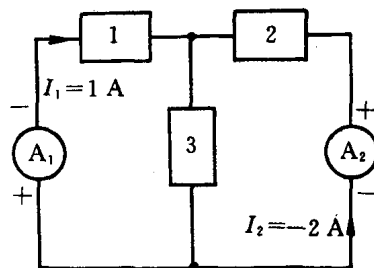


图 1.2-4 直流电流测试电路

1.2.2 电压

物理学中我们已经知道，将单位正电荷自某一点 a 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。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

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

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(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,两点间电压数值的正与负,在设定参考方向的前提下才是有意义的。

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,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 $U_{ab} = 5\text{ V}$, $U_{bc} = -3\text{ V}$,要测量这两个电压,电压表应如图1.2-6所示那样接入电路。图中 V_1 、 V_2 为电压表,两旁的“+”、“-”标号分别为直流电压表的正、负极性端。

例 1.2-1 如图1.2-7(a)所示电路,若已知2 s内有4 C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8 J,由 b 点移动到 c 点电场力做功为12 J。

(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)时相反并求出其值,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

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

由电位定义,得

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

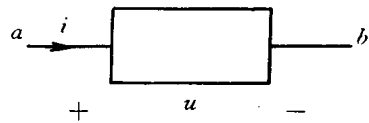


图 1.2-5 定义电压示意图

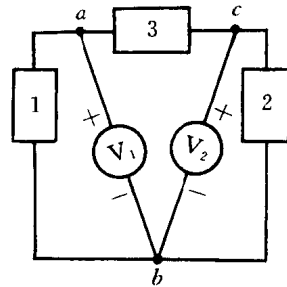


图 1.2-6 直流电压测量电路

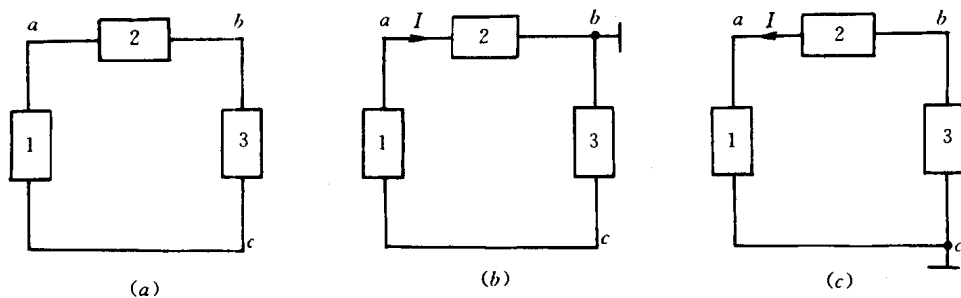


图 1.2-7 例 1.2-1 用电路

$$V_b = 0 \quad (b \text{ 点为参考点})$$

$$V_c = \frac{W_{cb}}{q} = -\frac{W_{bc}}{q} = -\frac{12}{4} = -3 \text{ V}$$

题目中已知 4 C 正电荷由 b 点移动至 c 点电场力做功 12 J, 本问是以 b 为参考点求 c 点电位, 就是说, 若将 4 C 正电荷由 c 点移动至 b 点, 电场力做功应为 -12 J, 所以计算 c 点电位时算式中要用 -12 。利用电压等于电位之差关系, 求得

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

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

(2) 按题目中第 2 问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

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

电位

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

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

$$V_c = 0 \quad (c \text{ 为参考点})$$

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重要结论: (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节 1.5); 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。

1.2.3 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(W)。1瓦功率就是每秒做功1焦耳，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1.2-5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、电压参考方向称为参考方向关联。设在 dt 时间内在电场力作用下由 a 点移动到 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 点移动到 b 点电场力所做的功，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。下面具体推导出 ab 这段电路吸收的电功率与其上电压、电流之间的关系。

$$\begin{aligned} \text{由} & \quad u = \frac{dw}{dq} \\ \text{得} & \quad dw = udq \\ \text{再由} & \quad i = \frac{dq}{dt} \\ \text{得} & \quad dt = \frac{dq}{i} \end{aligned}$$

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、电流参考方向关联的条件下，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。代入 u 、 i 数值，经计算，若 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

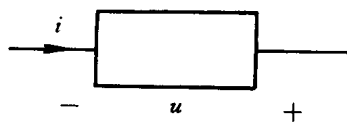


图 1.2-8 电压电流参考方向非关联情况

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

应特别注意根据电压、电流参考方向是否关联，来选用相应计算吸收功率的公式。

有时，要计算一段电路产生功率(供出功率)，无论 u 、 i 参考方向关联或非关联情况，所用公式与计算吸收功率时的公式恰恰相反。即 u 、 i 参考方向关联，计算产生功率用 $-ui$ 计算； u 、 i 参考方向非关联，计算产生功率用 ui 计算。这是因为“吸收”与“供出”二者就是相反的含义，所以计算吸收功率与供出功率的公式符号相反是理所当然的事。

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, 所以吸收功率

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

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

对 ca 段电路, 电压、电流参考方向非关联, 所以这段电路吸收功率

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

实际上 ca 这段电路产生功率为 10 W 。

由此例可以看出: $p_1 + p_2 + p_3 = 0$, 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。这一点通过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, 电路中基本定律就不便应用, 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; 还有时为了简化, 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, 表 1-1 给出部分国际制词头表, 供读者换算单位时查阅(表中[]内文字为可省略的中文词头名称部分)。

表 1-1

因 数	词 头 名 称		符 号
	英 文	中 文	
10^9	giga	吉[咖]	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[诺]	n
10^{-12}	pico	皮[可]	p

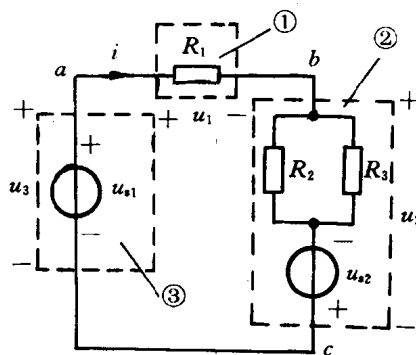


图 1.2-9 例 1.2-2 用图

思考与练习

1.2-1 简述对电路中电流、电压设参考方向的意义。

1.2-2 图示电路，电压 u 、电流 i 参考方向如图中所标。请回答：对 A 部分电路电压、电流参考方向关联否？对 B 部分电路呢？

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？

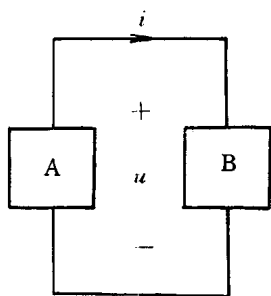
1.2-4 如练习题 1.2-2 图所示电路，试用 u 、 i 分别写出 A、B 两部分电路各自吸收功率 $p_{吸}$ 与产生功率 $p_{产}$ 的表示式。

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 $V_a=8\text{ V}$ ， $V_b=6\text{ V}$ ， $V_c=-3\text{ V}$ ， $V_d=-9\text{ V}$ 。

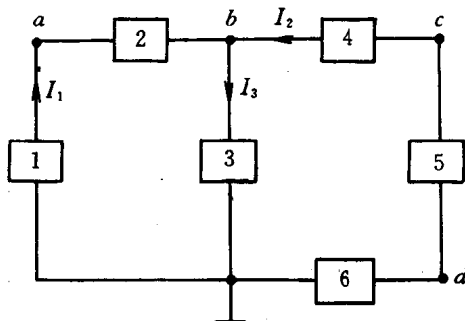
(1) 欲验证 I_1 、 I_2 电流数值是否正确，直流电流表应如何接入电路？并标明电流表极性。

(2) 求电压 u_{ac} 、 u_{db} ；要测量这两个电压，应如何连接电压表？并标明电压表极性。

(3) 求元件 1、3、5 上所吸收的功率。



练习题 1.2-2 图



练习题 1.2-5 图

1.3 欧姆定律

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，电流实际上是由电子的定向移动形成的。图 1.2-1(b) 的示意图中，为了突出说明电子定向移动形成电流，而未画出金属材料内部存在的更大量的原子、离子。事实上，电子在受电场力作用作定向运动过程中，必然会碰撞到金属内部存在的原子、离子，也就是说，这种碰撞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、损耗能量的一种参数。

如果电阻值不随其上电压或电流数值变化，称线性电阻。阻值不随时间 t 变化的线性电阻，称线性时不变电阻。一般实际中使用的诸如碳膜电阻、金属膜电阻、线绕电阻等都可近似看作是这类电阻。今后如无特殊说明，电阻一词就指线性时不变电阻，我们只讨论

这类电阻。

1.3.1 欧姆定律

欧姆定律(Ohm's Law, 简记 OL)是电路分析中重要的基本定律之一,它说明流过线性电阻的电流与该电阻两端电压之间的关系,反映了电阻元件的特性。这里我们联系电流、电压参考方向讨论欧姆定律。图 1.3-1(a)是理想电阻模型,设电压、电流参考方向关联,图 1.3-1(b)是它的伏安特性,为处在 $u \sim i$ 平面一、三象限过原点的直线。写该直线的数学解析式,即有

$$u(t) = Ri(t) \quad (1.3-1)$$

此式就是欧姆定律公式。电阻的单位为欧姆(Ω)。

电阻的倒数称电导,以符号 G 表示,即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.3-2)$$

在国际单位制中,电导的单位是西门子,简称西(S)。从物理概念上看,电导是反映材料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材料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

$$i(t) = Gu(t) \quad (1.3-3)$$

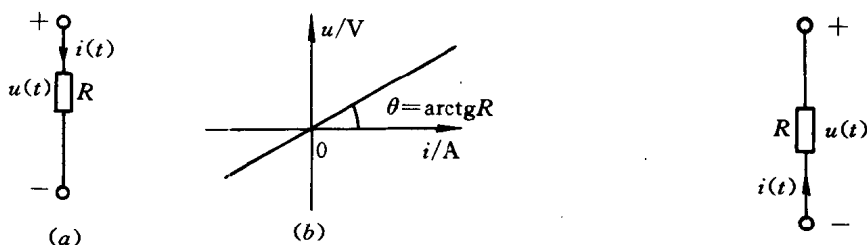


图 1.3-1 理想电阻模型及伏安特性

图 1.3-2 电流电压参考方向非关联

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、电压参考方向非关联,如图 1.3-2 所示,则欧姆定律公式中应冠以负号,即

$$u(t) = -Ri(t) \quad (1.3-4)$$

或

$$i(t) = -Gu(t) \quad (1.3-5)$$

③ 由(1.3-1)、(1.3-3)式或(1.3-4)、(1.3-5)式可见,在参数值不等于零、不等于无限大的电阻、电导上,电流与电压是同时存在、同时消失的。或者说,在这样的电阻、电导上, t 时刻的电压(或电流)只决定于 t 时刻的电流(或电压)。这说明电阻、电导上的电压(或电流)不能记忆电阻、电导上的电流(或电压)在“历史”上(t 时刻以前)所起过的作用。所以说电阻、电导元件是无记忆性元件,又称即时元件。

1.3.2 电阻元件上消耗的功率与能量

将(1.3-1)式代入(1.2-4)式,可得电阻 R 上吸收电功率为