



高等学校电子与通信类专业规划教材

# 电路分析基础

主编 李实秋



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>



## 内 容 简 介

本书共7章,内容包括电路的基本概念和基本定律、电路的等效变换、线性电阻电路的基本分析方法和电路定理、动态电路的时域分析、正弦稳态电路分析、耦合电感和理想变压器、电路的频率特性。

本书选材得当,基本概念讲述清晰,语言流畅易懂,每章均配有与正文密切相关的精选典型例题,并对应用的电路分析方法作了实用性的总结归纳,使读者易于掌握。每章末均附有大量的精选习题,书后附有部分习题参考答案。

本书可作为高等工科院校电子、通信、计算机、自控等专业“电路分析基础”课程的教材,也可作为本学科及相近学科的工程技术人员的参考用书。

★ 本书配有电子教案,需要者可登录出版社网站,免费下载。

## 图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/李实秋主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2010.8

高等学校电子与通信类专业规划教材

ISBN 978-7-5606-2435-8

I. ①电… II. ①李… III. ①电路分析—高等学校—教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第109134号

策 划 陈婷

责任编辑 许青青 陈婷

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2010年8月第1版 2010年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 17.5

字 数 417千字

印 数 1~3000册

定 价 28.00元

ISBN 978-7-5606-2435-8/TN·0565

**XDUP 2727001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

# 前 言

“电路分析基础”是高等工科院校电类相关专业的一门重要的专业基础课。近年来，针对该课程，各院校依据国家教育部 1998 年对专业目录的调整和高校学生知识结构的变化，相继修订了新一轮的教学计划，调整了教材内容，以利于培养更能适应迅速发展的现代社会的通用型人才。鉴于此，编者根据多年来长期从事“电路分析基础”、“信号与系统”、“电子电路基础”和“数字电路与逻辑设计”等课程的教学经验及体会，编写了本书。

本书在内容选材上立足于“强化基础，精选内容”的原则，在内容编排、编写和文字叙述上力求做到基本概念讲述清晰，语言流畅易懂，例题讲解透彻，并对应用的电路分析方法作了实用性的总结归纳，以便于教师授课和学生自学。本书各章结合知识点均配有典型例题和大量的精选习题，旨在帮助读者更好地掌握电路的基本概念和分析方法，提高其分析问题和解决问题的能力。

本书共 7 章，着重讲述线性时不变集总参数电路的基本概念、基本理论和基本分析方法。其中，第 1~3 章为直流电阻电路部分，是电路分析的基础，主要阐述了电路分析的基本变量、基本定律、电路的等效变换、线性电阻电路的基本分析方法和电路定理；第 4 章为动态电路的时域分析部分，介绍了一阶电路的零输入响应、零状态响应和全响应，重点讲述了求解直流一阶电路的三要素法；第 5 章为正弦稳态电路分析部分，主要讨论了正弦稳态电路的相量法分析、正弦稳态电路的功率及计算；第 6 章为耦合电感和理想变压器部分，讲述了耦合电感的 VAR 和去耦等效、含耦合电感电路的相量法分析、理想变压器的变换特性；第 7 章为电路的频率特性部分，介绍了网络函数与频率特性的概念，分析了 RLC 串、并联谐振电路的谐振特点，最后讨论了非正弦周期信号激励下电路稳态响应的计算。

本书由李实秋主编。重庆邮电大学移通学院高文文、李文娟、李立分别参与了第 1、2、4 章的编写。

本书的参考教学时数约为 60 学时。考虑到各院校各专业不同的教学要求，对本书目录中标“\*”的小节，可以根据实际情况作适当取舍。

本书在编写过程中得到了重庆邮电大学毛期俭教授与重庆邮电大学移通学院领导的极大鼓励和支持，在此表示感谢。本书的编写也灌注了重庆邮电大学从事电路课程教学的各位老师多年的教学实践成果和辛勤劳动，在此致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大同行和读者批评指正。

编 者

2010 年 4 月

# 目 录

<b>第 1 章 电路的基本概念和基本定律</b> .....	1
1.1 电路和电路模型 .....	1
1.1.1 电路的组成与功能 .....	1
1.1.2 电路模型 .....	2
1.2 电路分析的基本变量 .....	3
1.3 基尔霍夫定律 .....	9
1.4 电阻元件 .....	12
1.5 理想电源 .....	15
1.6 受控源 .....	18
1.7 电路中电位的概念及计算 .....	21
习题 1 .....	23
<b>第 2 章 电路的等效变换</b> .....	29
2.1 单口电路等效的概念 .....	29
2.2 实际电源的两种模型及其等效互换 .....	32
2.2.1 实际电源的两种模型 .....	33
2.2.2 两种电源模型的等效互换 .....	34
2.3 不含独立源单口电路的等效 .....	36
2.4 含独立源单口电路的等效 .....	41
* 2.5 电阻 Y 形连接与 $\Delta$ 形连接的 等效变换 .....	45
2.6 理想电源的等效转移 .....	48
习题 2 .....	51
<b>第 3 章 线性电阻电路的基本分析方法和     电路定理</b> .....	57
3.1 支路电流法 .....	57
3.2 节点分析法 .....	59
3.2.1 节点电压 .....	59
3.2.2 节点方程 .....	60
3.2.3 特殊电路节点方程的处理方法 .....	63
3.3 回路分析法 .....	65
3.3.1 回路电流 .....	66
3.3.2 回路方程 .....	66
3.3.3 特殊电路回路方程的处理方法 .....	68
3.4 叠加定理 .....	72
3.5 置换定理 .....	75
3.6 戴维南定理与诺顿定理 .....	78
* 3.7 互易定理 .....	85
3.8 电路的对偶性 .....	89
习题 3 .....	90
<b>第 4 章 动态电路的时域分析</b> .....	97
4.1 电容元件和电感元件 .....	97
4.1.1 电容元件 .....	97
4.1.2 电感元件 .....	101
4.2 换路定律及初始值的计算 .....	104
4.2.1 动态电路的过渡过程 .....	104
4.2.2 换路定律 .....	105
4.2.3 初始值的计算 .....	106
4.3 一阶电路的零输入响应 .....	108
4.4 一阶电路的零状态响应 .....	112
4.5 一阶电路的全响应 .....	116
4.6 求解一阶电路的三要素法 .....	120
4.7 一阶电路的阶跃响应 .....	127
4.7.1 阶跃函数 .....	127
4.7.2 阶跃响应 .....	129
* 4.8 二阶电路的时域分析 .....	134
4.8.1 RLC 串联电路的零输入响应 .....	134
4.8.2 RLC 串联电路的零状态响应 .....	139
习题 4 .....	140
<b>第 5 章 正弦稳态电路分析</b> .....	148
5.1 正弦信号的基本概念 .....	148
5.1.1 正弦信号的三要素 .....	148
5.1.2 相位差 .....	151
5.1.3 周期信号的有效值 .....	153
5.2 正弦信号的相量表示 .....	154
5.2.1 复数的相关知识 .....	155
5.2.2 用相量表示正弦信号 .....	155
5.3 三种基本电路元件 VAR 的 相量形式 .....	157
5.4 基尔霍夫定律的相量形式和电路的 相量模型 .....	160
5.4.1 基尔霍夫定律的相量形式 .....	160
5.4.2 电路的相量模型 .....	161
5.5 阻抗与导纳 .....	161
5.5.1 阻抗 .....	161

5.5.2 导纳 .....	162	6.3 空芯变压器 .....	211
5.5.3 无源单口正弦稳态电路的等效阻抗 与导纳计算 .....	163	6.4 理想变压器 .....	214
5.6 正弦稳态电路的相量法分析 .....	165	6.4.1 理想变压器的电路模型和 变换特性 .....	214
5.6.1 相量分析法的一般步骤 .....	166	6.4.2 实现理想变压器的条件 .....	219
5.6.2 电路的基本分析法和电路定理在 正弦稳态电路中的应用 .....	167	*6.5 铁芯变压器模型 .....	220
5.6.3 正弦稳态电路的相量图分析 .....	171	习题6 .....	223
5.7 正弦稳态电路的功率 .....	173	<b>第7章 电路的频率特性</b> .....	229
5.7.1 单口网络的功率 .....	173	7.1 网络函数与频率特性 .....	229
5.7.2 最大功率传输定理 .....	180	7.2 RC电路的频率特性 .....	231
*5.8 三相电路 .....	183	7.3 RLC串联谐振电路 .....	236
5.8.1 三相电源 .....	183	7.4 RLC并联谐振电路 .....	246
5.8.2 对称三相电路的计算 .....	186	7.5 非正弦周期信号激励下电路的 稳态响应 .....	254
习题5 .....	192	7.5.1 周期信号分解为傅里叶级数 .....	254
<b>第6章 耦合电感和理想变压器</b> .....	200	7.5.2 非正弦周期信号激励下电路的 稳态响应的计算 .....	255
6.1 耦合电感 .....	200	7.5.3 非正弦周期信号的有效值及 电路的平均功率 .....	258
6.1.1 耦合电感的基本概念 .....	200	习题7 .....	261
6.1.2 耦合电感的伏安关系 .....	202	<b>附录 部分习题参考答案</b> .....	266
6.1.3 互感线圈的同名端 .....	203	<b>参考文献</b> .....	274
6.1.4 耦合电感的串联和并联 .....	204		
6.2 含互感电路的分析 .....	206		
6.2.1 耦合电感的去耦等效 .....	207		
6.2.2 含互感电路的相量法分析 .....	209		

# 第1章 电路的基本概念和基本定律

电路理论分析的对象是电路模型，而不是实际电路。本章将首先介绍电路模型的概念、电路分析的基本变量(电流、电压和电功率)，并引入参考方向的概念；接着重点阐述基尔霍夫定律、电阻元件和理想电源的定义及其伏安特性；最后介绍受控源及电位的计算。

## 1.1 电路和电路模型

若干电气设备或器件按照一定方式组合起来，构成电流的通路，叫做电路，有时也称为网络。实际电路一般是比较复杂的。为了便于分析，人们常采用模型化的方法，即在一定条件下将实际器件理想化，抽象为能表征其主要性能的理想化模型，然后对模型进行定量分析，求得分析结果。

### 1.1.1 电路的组成与功能

在现代工农业生产、科研、国防等领域以及日常生活中，使用着各种各样的电器设备，如机电设备、计算机、电子测量仪器、家用电器等，这些电器设备中都包含有电路。日常生活中使用的手电筒其电路就是一个最简单的电路，如图 1.1-1 所示。手电筒电路由电池、开关、导线和灯泡组成。电池是提供电能的器件，称为电源，它将其其他形式的能量转换为电能；灯泡是用电器件，称为负载，它将电能转化为光能、热能等其他形式的能量；导线称为中间环节，它连接电源和负载，起着传输电能的作用。可见，一个照明电路由电源、中间环节和负载三部分组成。

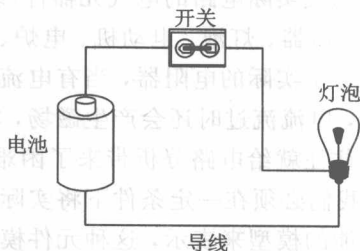
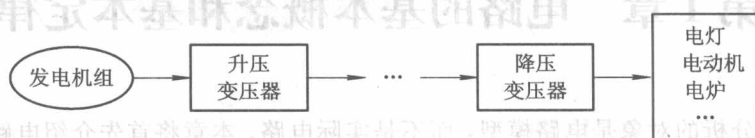


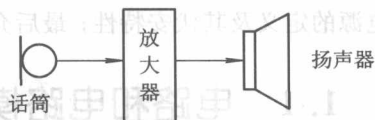
图 1.1-1 手电筒实际电路

电路的结构形式多种多样，大至长距离的电力输电线、通信网和计算机网等，小至芯片上的集成电路，但就其功能来说可归纳为两个方面：一是实现电能的传输、分配和转换功能；二是实现信号的传递与处理功能。电力系统是实现电能传输、分配和转换的典型例子，其组成框图如图 1.1-2(a)所示。图中，发电厂的发电机组是电源，是供应电能的设备，它将其其他形式的能量(热能、水能等)转换成电能；变压器和输电线是中间环节，它们将电能输送给各用电负载；电灯、电动机、电炉等是用电负载，它们把电能转换为光能、机械能和热能等。扩音器是实现信号的传递和处理功能的典型例子，其电路示意图如图 1.1-2(b)所示。图中，话筒将声音转换为相应的电压和电流(称为电信号)，相当于电源，称为信号源；而后通过电路传递到扬声器，扬声器将处理后的电信号还原为声音，是一种负载；由于由话筒输出的电信号比较微弱，不足以推动扬声器发音，因此中间要用放大器放大。又如，收音机和电视机的接收天线(信号源)把载有语音、音乐、图像信息的电磁波接收后转换为相应的电信号，而后通过电路对信号进行传

递和处理, 送到扬声器或显像管(负载), 还原出声音、图像等原始信息。因此, 任何实际电路都可看成是由电源(或信号源)、中间环节和负载三部分组成的。



(a) 电力系统组成框图



(b) 扩音器电路框图

图 1.1-2 电路示意图

不论电能的传输和转换, 还是信号的传递和处理, 其中电源或信号源的电压或电流都称为激励, 它推动电路工作; 由激励在电路中任一部分产生的电压和电流都称为响应。所谓电路分析, 就是在已知电路结构和元件参数的条件下, 研究电路的激励和响应之间的关系。

### 1.1.2 电路模型

构成实际电路的电气元器件(统称为电路部件)种类繁多, 如电阻器、电容器、电感线圈、变压器、灯泡、电动机、电炉、电池、晶体管等, 它们的电磁性能一般是比较复杂的。例如一个实际的电阻器, 当有电流流过时, 一方面对电流呈现电阻性质, 消耗电能; 另一方面, 电流流过时还会产生磁场, 将电能转变为磁场能储存起来, 因而还兼有电感的性质。这样往往就给电路分析带来了困难。因此, 为了便于对实际电路进行分析和用数学方法描述, 我们必须在一定条件下将实际器件理想化, 忽略它的次要性质, 用一个足以表征其主要性能模型来表示, 这种元件模型称为理想电路元件, 简称为电路元件。这些理想电路元件能够反映实际电路中的电磁现象, 表征其电磁性质。电路分析中常用的三种最基本的理想电路元件模型符号如图 1.1-3 所示。其中, 电阻元件只表示消耗电能的特征, 当电流通过它时, 它把电能转换为其他形式的能量; 电感元件只表示储存磁场能量的特征; 电容元件只表示储存电场能量的特征。此外还有理想电压源、理想电流源、受控源、耦合电感等理想电路元件, 以后将陆续介绍。

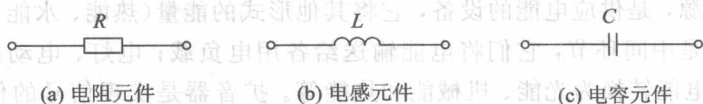


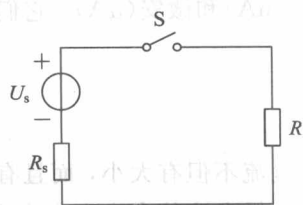
图 1.1-3 三种最基本的理想电路元件模型符号

各种实际电路部件都可以用理想电路元件来近似表征其性能。譬如, 电阻器、灯泡、电炉的主要电磁性能是消耗电能, 其电路模型可用图 1.1-3(a)所示的理想电阻元件  $R$  来表示。又如, 一个实际的电感器是金属导线在一个骨架上盘绕而成的。在低频条件下工作



时,可以不考虑线圈的匝间分布电容,它表现出的电磁性能主要是储存磁能,以及绕制线圈的导线所消耗的电能,这种情况下的实际电感器的模型可用体现电能消耗的电阻  $R$  与体现磁能储存的电感  $L$  相串联来表示。随着工作频率的升高,分布电容的效应将逐渐表现出来。在高频条件下工作时,必须考虑分布电容的影响,这种情况下的实际电感器的电路模型可在  $RL$  串联电路的基础上并联一个电容  $C$  来表示。对于其他实际电路部件,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。需强调说明的是,不同的实际电路部件,只要具有相同的主要电磁性能,在一定条件下就可用同一个理想电路元件模型表示。同一个实际电路部件在不同的应用条件下,其模型也可以有不同的形式。

任何一个实际电路都能用上面的理想元件模型通过适当连接组合而构成。例如,图 1.1-1 所示的手电筒实际电路可用图 1.1-4 所示的电路作为它的电路模型。图中,理想电压源  $U_s$  与电阻元件  $R_s$  串联组合作为电池的电路模型;电阻元件  $R$  为灯泡的电路模型;连接导线的电阻忽略不计,认为是理想导体,用线段表示。



今后所提到的电路,除特别指明外,均指电路模型。电路分析的对象是电路模型,而不是实际电路。

此外还应指出,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储存现象有关,它们交织在一起并发生在整个部件之中。这里的“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、电容和电感)称为集总参数元件,简称为集总元件。每一种集总参数元件只表示一种基本现象,即认为电能消耗、电场储能和磁场储能这三种现象分别集中在电阻元件、电容元件和电感元件这三种元件之中。由这种理想的集总参数元件构成的电路称为集总参数电路。

一个实际电路要能用集总参数电路去近似,需满足如下条件:实际电路的几何尺寸  $l$  (长度)远小于电路正常工作频率所对应的电磁波的波长  $\lambda$ ,即

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

其中

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1-2)$$

式中,  $c$  为光速,  $c = 3 \times 10^8$  m/s;  $f$  为电路的工作频率。例如,我国电力用电的频率为 50 Hz,对应的电磁波波长为 6000 km,对于以此为工作频率的电路来说,其尺寸与这一波长相比可以忽略不计,因而可用集总参数这一概念。然而,对远距离输电线来说,则不满足上述条件,必须考虑电场、磁场沿线分布的现象,不能按集总参数电路来处理。本书只讨论集总参数电路。

## 1.2 电路分析的基本变量

电路分析使我们能够得出给定电路的电性能。电路的电性能可以用电荷、磁链、电流、电压、功率和能量这一组时间函数的变量来描述。电路分析的任务在于解得这些变量。这些变量中最常用到的是电流、电压和功率。本节将阐述这三个变量的基本概念,着重说明

电流、电压的参考方向和功率正、负号的意义,为后续电路问题的分析奠定基础。

## 1. 电流

带电粒子有规则地定向运动形成电流。电流的大小用电流强度衡量,电流强度简称为电流,用符号  $i(t)$  表示。电流强度定义为:单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

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

式中,  $q$  代表电荷量。在国际单位制中,电荷量的单位是库仑(C),电流的单位是安培(A)(简称安),时间  $t$  的单位是秒(s),因此,1安=1库/秒。电流常用的单位还有千安(kA)、毫安(mA)和微安( $\mu$ A),它们之间的换算关系是

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

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

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

电流不但有大小,而且有方向。习惯上规定正电荷运动的方向为电流的真实方向。

如果电流的大小和方向不随时间变化,则这种电流称为恒定电流,简称直流(Direct Current,简称为 dc 或 DC),常用大写字母  $I$  来表示。如果电流的大小和方向都随时间变化,则称为时变电流,变化为周期性的称为交变电流,简称交流(Alternating Current,简称为 ac 或 AC)。

在一些很简单的直流电路(见图 1.2-1)中,根据电源电压的极性,电流的真实方向为从电源正极流出,流向电源负极,因此很容易判断出各支路电流的真实方向;在较复杂的直流电路中,电流(如图 1.2-2 中  $4 \Omega$  电阻支路的电流)的真实方向就难以判断。此外,当电路中的电流为交流时,电流的真实方向不断改变,因此不可能在电路中用一个固定的箭头标明电流的真实方向。也就是说,当电路比较复杂或电路中的电流为交流时,电流的真实方向往往难以在电路图中标出。为了解决上述问题,我们引入参考方向这一概念。

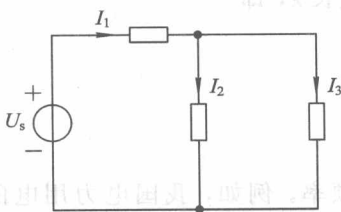


图 1.2-1 简单的直流电路

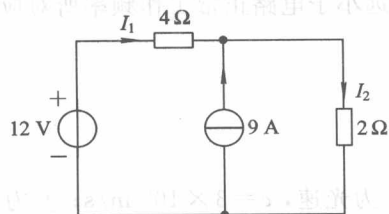


图 1.2-2 较复杂的直流电路

电流的参考方向可以任意选定,并用箭头标在电路图上。我们规定:如果电流的真实方向与参考方向一致,则电流为正值;如果电流的真实方向与参考方向相反,则电流为负值。这样,电流的真实方向便可由电路图中标示的电流参考方向与计算所得电流值的正、负来表明。例如图 1.2-2 所示的电路,任意选定各支路电流参考方向标示于图中,应用物理学中的电学知识,列方程如下

$$I_1 + 9 = I_2$$

$$4I_1 + 2I_2 = 12$$

解得

或为0, 此时则为短路。即  $I_1 = -1 \text{ A}$ ,  $I_2 = 8 \text{ A}$

由此可知,  $I_1$  支路电流的真实方向与参考方向相反,  $I_2$  支路电流的真实方向与参考方向一致。显然, 在未标示电流参考方向的情况下, 电流的正负毫无意义, 所以在求解电路时, 必须首先选定电流的参考方向。

关于电流的参考方向, 需说明以下两点:

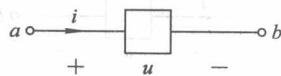
- (1) 电路图中所标示的电流方向均为参考方向, 而不是真实方向。
- (2) 参考方向可任意独立选定, 但一经选定, 在电路分析计算过程中就不再改变。

## 2. 电压

由物理学知识我们已经知道, 电荷在电场中要受到电场力的作用, 在电场力的作用下, 电荷作有规则的定向移动, 形成电流。处在电场中的电荷具有电位(势)能。当电荷由电路中的某一点移至电路中的另一点时, 电场力对电荷作了功, 电荷的能量发生改变, 能量的改变量只与这两点的位置有关, 而与移动的路径无关。为了衡量电场力移动电荷做功的能力, 我们引入“电压”这一物理量。

图 1.2-3 所示的电路中,  $a$ 、 $b$  两点间的电压表明了单位正电荷由  $a$  点移至  $b$  点能量的改变量, 用符号  $u(t)$  表示, 写成数学表达式为

$$u(t) = \frac{dw}{dq} \quad (1.2-2) \quad \text{图 1.2-3 电压定义示意图}$$



式中,  $dq$  为由  $a$  点移至  $b$  点的电荷量, 单位为库仑;  $dw$  为电荷  $dq$  在转移过程中能量的改变量, 单位为焦耳(J); 电压的单位为伏特(V)。这些单位都是国际单位制单位。电压常用的单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏( $\mu\text{V}$ ), 它们之间的换算关系是

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$$

$$1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$$

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

如果正电荷由  $a$  点移到  $b$  点获得能量, 即能量增加, 则  $a$  点为低电位(负极),  $b$  点为高电位(正极), 电压升高, 如图 1.2-4(a) 所示; 如果正电荷由  $a$  点移到  $b$  点失去能量, 即能量减少, 则  $a$  点为高电位(正极),  $b$  点为低电位(负极), 电压降低, 如图 1.2-4(b) 所示。



图 1.2-4 电压极性说明图

与电流一样, 电压不仅有大小, 也有方向。习惯上规定电位降低的方向为电压的真实方向。

如果电压的大小和方向(极性)都不随时间变化, 则称为恒定电压或直流电压, 常用大写字母  $U$  表示。如果电压的大小和方向都随时间变化, 则称为时变电压, 变化为周期性的称为交流电压。

如同需要为电流选定参考方向一样, 也需要为电压选定参考极性。电压的参考极性可以任意选定, 在电路图中用“+”、“-”符号表示, 如图 1.2-4 所示; 或用带下标的电压符

号表示, 如电压  $u_{ab}$  表示电压  $u$  的参考方向为由  $a$  点指向  $b$  点, 即  $a$  点为正极性端,  $b$  点为负极性端, 并且有  $u_{ab} = -u_{ba}$  (1.2-3)

类似地, 我们规定: 如果电压的真实极性与参考极性一致, 则电压为正值; 如果电压的真实极性与参考极性相反, 则电压为负值。这样, 电压的真实极性便可由电路图中标示的电压参考极性与电压值的正、负来表明。再次强调说明, 电路图中所标示的电流、电压方向均为参考方向, 不是真实方向; 参考方向可以任意独立选定, 一经选定, 在电路分析计算过程中不应改变。

综上所述, 在分析电路时, 既要为通过元件的电流选定参考方向, 又要为元件两端的电压选定参考极性, 它们彼此可以独立无关地任意选定。但为了分析方便, 常常采用关联的参考方向: 电流的参考方向与电压降的参考方向一致, 如图 1.2-5(a) 所示。这样, 在关联参考方向下, 在电路图上就只需标出电流的参考方向或电压的参考极性, 如图 1.2-5(b)、(c) 所示。

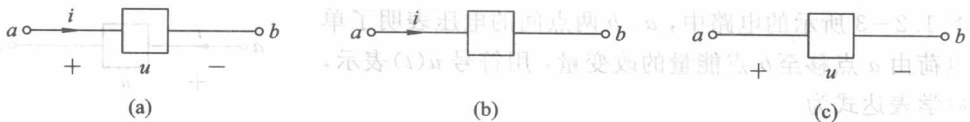


图 1.2-5 电压、电流关联的参考方向

### 3. 电功率

下面以图 1.2-6 所示的  $ab$  段电路来阐述功率的概念。当电路工作时, 电场力推动电荷在电路中定向移动, 电场力对电荷做功。设在  $dt$  时间内由  $a$  点转移到  $b$  点的电荷量为  $dq$ , 且  $a$  点到  $b$  点为电压降, 其值为  $u$ 。根据式 (1.2-2) 电压的数学表达式可知, 电荷  $dq$  在转移过程中失去的能量为

$$d\omega = u dq \quad (1.2-4)$$

电荷失去能量意味着  $ab$  段电路吸收能量。电路在单位时间内吸收的能量称为电路的电功率, 简称功率, 即功率是衡量电路中能量变化速率的物理量, 用符号  $p(t)$  表示。功率的数学定义式为

$$p(t) = \frac{d\omega}{dt} \quad (1.2-5)$$

将式 (1.2-4) 代入式 (1.2-5), 有

$$p(t) = u \frac{dq}{dt}$$

因

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

故得

$$p(t) = ui \quad (1.2-6)$$

式 (1.2-6) 表明, 在电压、电流参考方向关联的条件下, 一段电路在任一时刻  $t$  吸收的功

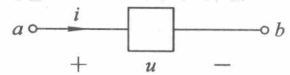


图 1.2-6 电压、电流参考方向关联情况

率等于该时刻这段电路的端电压与端电流的乘积。在国际单位制中,功率的单位是瓦特(W),简称瓦。常用的功率单位还有千瓦(kW)、毫瓦(mW)等。

如果电压、电流的参考方向非关联,如图1.2-7所示,则功率的计算公式应改为

$$p(t) = -ui \quad (1.2-7)$$

因此,在计算功率时,应根据电压、电流参考方向是否关联来选用相应的计算功率的公式。

当运用式(1.2-6)或式(1.2-7)计算一段电路的功率时,若算得的功率为正, $p > 0$ ,则表明该段电路吸收功率;若算得的功率为负, $p < 0$ ,则表明该段电路吸收负功率,亦即该段电路产生功率或提供功率。

**【例 1.2-1】** 元件情况如图 1.2-8 所示。

(1) 若元件 A 吸收的功率为 10 W, 求电压  $u_A$ 。

(2) 若元件 B 产生的功率为 12 W, 求电流  $i_B$ 。

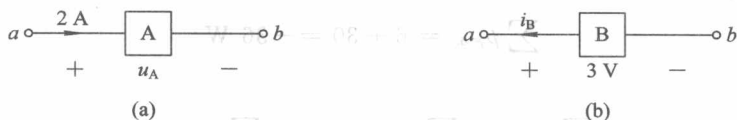


图 1.2-8 例 1.2-1 用图

**解** (1) 对图(a)所示的元件 A 来说,电压、电流参考方向关联,故由式(1.2-6)可得,元件 A 吸收的功率为

$$p_A = u_A i_A$$

将已知数据代入,有

$$10 = u_A \times 2 \rightarrow u_A = 5 \text{ V}$$

(2) 对图(b)所示的元件 B 来说,电压、电流参考方向非关联,故由式(1.2-7)可得,元件 B 吸收的功率为

$$p_B = -u_B i_B$$

将已知数据代入,有

$$-12 = -3i_B \rightarrow i_B = 4 \text{ A}$$

**【例 1.2-2】** 元件情况如图 1.2-9 所示,求两元件吸收或产生的功率。



图 1.2-9 例 1.2-2 用图

**解** 对图(a),元件 C 的电压、电流参考方向关联,由式(1.2-6)得

$$p_C = u_C i_C = (-2) \times 1 = -2 \text{ W}$$

即元件 C 吸收功率 -2 W,或者说元件 C 产生功率 2 W。

对图(b),元件 D 的电压、电流参考方向非关联,由式(1.2-7)得

$$p_D = -u_D i_D = -3 \times (-2) = 6 \text{ W}$$

即元件 D 吸收功率 6 W。

【例 1.2-3】 电路如图 1.2-10 所示, 已知  $i_1=3\text{ A}$ ,  $i_3=-4\text{ A}$ ,  $i_4=-1\text{ A}$ ,  $u_1=10\text{ V}$ ,  $u_2=4\text{ V}$ ,  $u_3=-6\text{ V}$ , 试计算各元件吸收的功率。

解 元件 2、3、4 的电压、电流参考方向关联, 故吸收功率

$$p_2 = u_2 i_1 = 4 \times 3 = 12\text{ W}$$

$$p_3 = u_3 i_3 = -6 \times (-4) = 24\text{ W}$$

$$p_4 = u_4 i_4 = (-6) \times (-1) = 6\text{ W}$$

元件 1 的电压、电流参考方向非关联, 故吸收功率

$$p_1 = -u_1 i_1 = -10 \times 3 = -30\text{ W}$$

由此例可以看出, 电路中各元件吸收功率的总和

$$\sum p_{\text{吸收}} = 12 + 24 = 36\text{ W}$$

而产生功率的总和

$$\sum p_{\text{产生}} = 6 + 30 = -36\text{ W}$$

即

$$\sum p_{\text{产生}} = \sum p_{\text{吸收}} \quad \text{或} \quad \sum p = 0 \quad (1.2-8)$$

式(1.2-8)表明, 电路中产生的总功率等于吸收的总功率, 或者说电路各部分吸收功率的代数和为零, 这称为功率平衡。这一点根据能量守恒定理是很容易理解的。

本节我们阐述了电路分析中常用的电路变量——电流、电压和功率的基本概念, 其中功率又可由电压、电流算得。因此, 电路分析问题往往侧重于求解电流和电压。求解电流、电压时, 必须先选定所求量的参考方向。原则上参考方向可以任意选定, 不过为了避免计算公式中出现较多负号, 习惯上凡是一看便知电流、电压真实方向的, 就选定参考方向与真实方向一致; 对于不易看出真实方向的, 就任意选定参考方向。今后, 在电路图中凡未同时标示电流、电压参考方向的, 均采用关联的参考方向。

前面已经介绍了电流、电压和功率的国际制单位, 也简单提及了它们的几种辅助单位, 今后在学习和实际应用中还会遇到其他量的单位问题。表 1.2-1 给出了部分 SI(即国际单位制)词头, 供读者换算单位时查阅。

表 1.2-1 部分国际单位制词头

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	$\mu$
$10^{-9}$	nano	纳[诺]	n
$10^{-12}$	pico	皮[可]	p

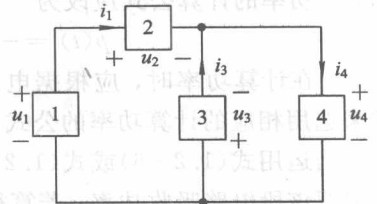


图 1.2-10 例 1.2-3 用图

### 1.3 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律概括了电路中电流和电压分别遵循的基本规律,是分析一切集总参数电路的根本依据。基尔霍夫定律包含两个内容:基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。电路中所有连接在同一节点各支路电流之间要受到基尔霍夫电流定律的约束,任一回路中的各支路(元件)电压之间要受到基尔霍夫电压定律的约束,这种约束关系与电路元件的特性无关,只取决于元件的互联方式,称为拓扑约束。在具体介绍基尔霍夫定律之前,下面先介绍几个表述电路结构的常用术语。

(1) 支路(branch):由一个电路元件或多个电路元件串联构成电路的一个分支,这个分支上通有同一个电流,称为一条支路。图 1.3-1 所示的电路中有 6 条支路( $b=6$ )。

(2) 节点(node):电路中三条或三条以上支路的连接点称为节点。图 1.3-1 所示的电路中有 4 个节点( $n=4$ )。

(3) 回路(loop):电路中由若干支路构成的任一闭合路径称为回路。图 1.3-1 所示的电路中,元件 1、2、3,元件 3、4、5,元件 1、2、4、5 等均构成回路。

(4) 网孔(mesh):对于平面电路而言,其内部不包含支路的回路称为网孔。图 1.3-1 所示的电路中有 3 个网孔( $m=3$ )。网孔一定是回路,但回路不一定是网孔。

#### 1. 基尔霍夫电流定律(KCL)

基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law,简称 KCL)反映了电路中汇合到任一节点的各支路电流间相互制约的关系。它可表述为:对于集总参数电路中的任一节点而言,在任一时刻,流出(或流入)该节点的所有支路电流的代数和恒等于零。用数学式表达为

$$\sum_{k=1}^m i_k(t) = 0 \quad (1.3-1)$$

式中, $i_k(t)$ 为流出(或流入)该节点的第  $k$  条支路的电流, $m$ 为与该节点相连的支路数。式(1.3-1)称为节点电流方程,简称为 KCL 方程。建立 KCL 方程时,要根据各支路电流的参考方向是流出节点或是流入节点来决定在它们前面取“+”号或“-”号。例如,对图 1.3-2 所示电路中的节点  $a$ ,若指定流出节点的电流取正号,则流入节点的电流就取负号,该节点的 KCL 方程为

$$i_3 + i_4 + i_5 - i_1 - i_2 = 0$$

上式可改写为

$$i_3 + i_4 + i_5 = i_1 + i_2$$

可见,流出节点的电流等于流入节点的电流。于是 KCL 又可表述为:对于集总参数电路中的任一节点而言,在任一时刻,流出该节点的支路电流之和等于流入该节点的支路电流之和,即

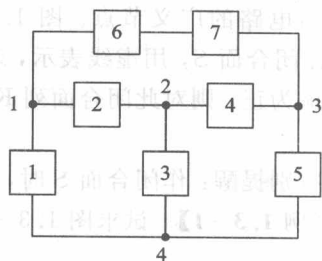


图 1.3-1 说明电路术语用图

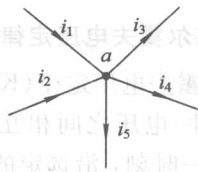


图 1.3-2 基尔霍夫电流定律示例用图

$$\sum i_{\text{出}}(t) = \sum i_{\text{入}}(t) \quad (1.3-2)$$

就其实质来说,基尔霍夫定律是电荷守恒定律在电路理论中的具体表述,它揭示了电路中电流的连续性。电荷在电路中流动,在任一点(包括节点),它既不能创造,也不会堆积和消失。因此,任一时刻流入节点的电荷必等于同一时刻流出节点的电荷,也就是流入节点的电流等于流出节点的电流。

KCL 不仅适用于电路中的任一节点,还可推广应用于电路中任一假设的闭合面,这种闭合面也称为电路的广义节点。图 1.3-3 所示的电路中,作闭合面  $S$ ,用虚线表示,若指定流入闭合面的电流为正,则对此闭合面列 KCL 方程有

$$i_1 - i_3 - i_5 = 0$$

特别提醒:作闭合面  $S$  时,闭合面所切割的每一条支路只能被切割一次。

【例 1.3-1】试求图 1.3-4 所示各电路中的未知电流。

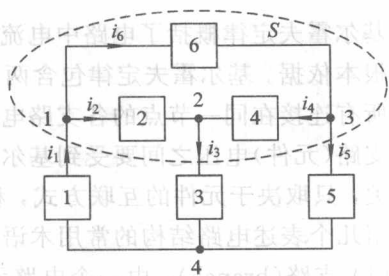


图 1.3-3 KCL 应用于闭合面  $S$

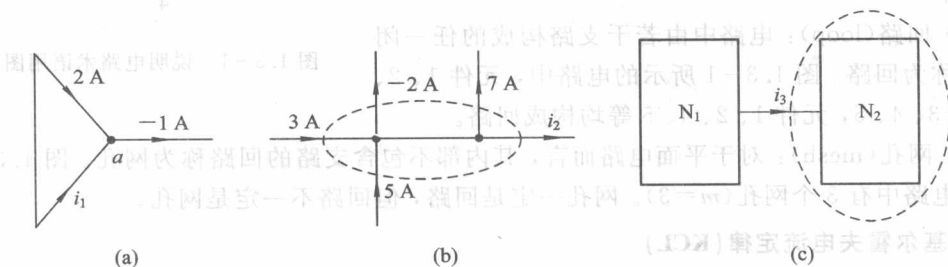


图 1.3-4 例 1.3-1 用图

解 对图(a),对节点  $a$  列 KCL 方程为

$$2 + i_1 = -1 \rightarrow i_1 = -3 \text{ A}$$

对图(b),可作一闭合面,如虚线所示,对闭合面列 KCL 方程有

$$3 + 5 = (-2) + 7 + i_2 \rightarrow i_2 = 3 \text{ A}$$

对图(c),也可以作一闭合面,只有一条支路电流流入闭合面,根据 KCL,有

$$i_3 = 0$$

## 2. 基尔霍夫电压定律(KVL)

基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law,简称 KVL)反映了一个回路中各支路(或各元件)电压之间相互制约的关系。它可表述为:对于集总参数电路中的任一回路而言,在任一时刻,沿选定的回路方向,该回路中所有支路(或元件)电压降的代数和恒等于零。用数学式表达为

$$\sum_{k=1}^m u_k(t) = 0 \quad (1.3-3)$$

式中,  $u_k(t)$  为该回路中第  $k$  条支路(或第  $k$  个元件)上的电压,  $m$  为该回路中所包含的支路数(或元件数)。式(1.3-3)称为回路电压方程,简称为 KVL 方程。建立 KVL 方程时,必



须先对所考虑的回路选定一个绕行方向(称回路方向),并标示在电路图中。凡支路(或元件)电压的参考方向(电压降方向)与回路绕行方向一致的,该电压取正号,反之取负号。例如,对图 1.3-5 所示的电路,选回路的绕行方向为顺时针方向,标示于图中,该回路的 KVL 方程为

$$u_2 - u_3 + u_4 - u_1 = 0$$

上式可写为

$$u_2 + u_4 = u_1 + u_3$$

于是有 KVL 的另一种表述形式:对于集总参数电路中的任一回路而言,在任一时刻,沿选定的回路方向,各支路电压降之和等于各支路电压升之和,即

$$\sum u_{\text{降}}(t) = \sum u_{\text{升}}(t) \quad (1.3-4)$$

基尔霍夫电压定律是能量守恒定律在集总参数定律中的表现。由电压的定义容易理解 KVL 的正确性。单位正电荷从某点(如  $a$  点)出发,沿一回路绕行一周又回到原出发点  $a$ , 即  $u_{aa} = u_a - u_a = 0$ , 由  $u(t) = \frac{dw}{dq}$  可知,单位正电荷的能量变化为零。这说明单位正电荷沿一个闭合回路绕行一周能量的得失总是平衡的,也即获得的能量总和与失去的能量总和相等,或者说回路中各电路部分电压升之和等于电压降之和。

KVL 不仅适用于由电路元件构成的具体回路,也可推广应用于任一假想的闭合回路。

**【例 1.3-2】** 如图 1.3-6 所示的电路,求  $a$ 、 $b$  两点间的电压  $U_{ab}$  和  $b$ 、 $d$  两点间的电压  $U_{bd}$ 。

**解** 先求  $U_{ab}$ 。选回路  $A$  如图所示,列 KVL 方程

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{ca} = 0$$

解得

$$U_{ab} = -U_{ca} - U_{bc} = U_{ac} + U_{cb} = 1 + 2 = 3 \text{ V}$$

再求  $U_{bd}$ 。假设  $b$ 、 $d$  间接有一条支路,选假想回路  $B$  如图所示,其 KVL 方程为

$$U_{bd} + U_{dc} + U_{cb} = 0$$

解得

$$\begin{aligned} U_{bd} &= -U_{cb} - U_{dc} = U_{bc} + U_{cd} \\ &= -2 + 3 = 1 \text{ V} \end{aligned}$$

也可选假想回路  $abdca$ , 对其列 KVL 方程,有

$$U_{bd} + U_{dc} + U_{ca} + U_{ab} = 0$$

解得

$$U_{bd} = -U_{ab} - U_{ca} - U_{dc} = U_{ba} + U_{ac} + U_{cd} = -3 + 1 + 3 = 1 \text{ V}$$

由此例可见:

- (1) 集总参数电路中两点间的电压等于连接这两点间各支路电压的代数和。
- (2) 任意两点间的电压值与计算电压时所选择的路径无关,电压具有单值性。这一结论可按电位的观点来理解,即单位正电荷由一点出发,沿着任意一条路径移至另一点,因

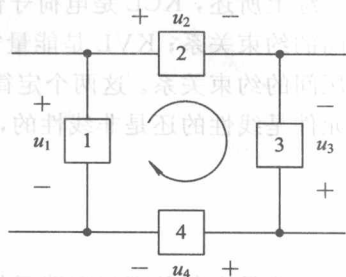


图 1.3-5 基尔霍夫电压定律示意图

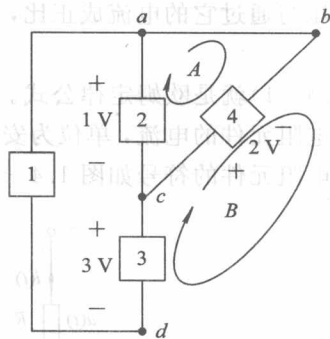


图 1.3-6 例 1.3-2 用图