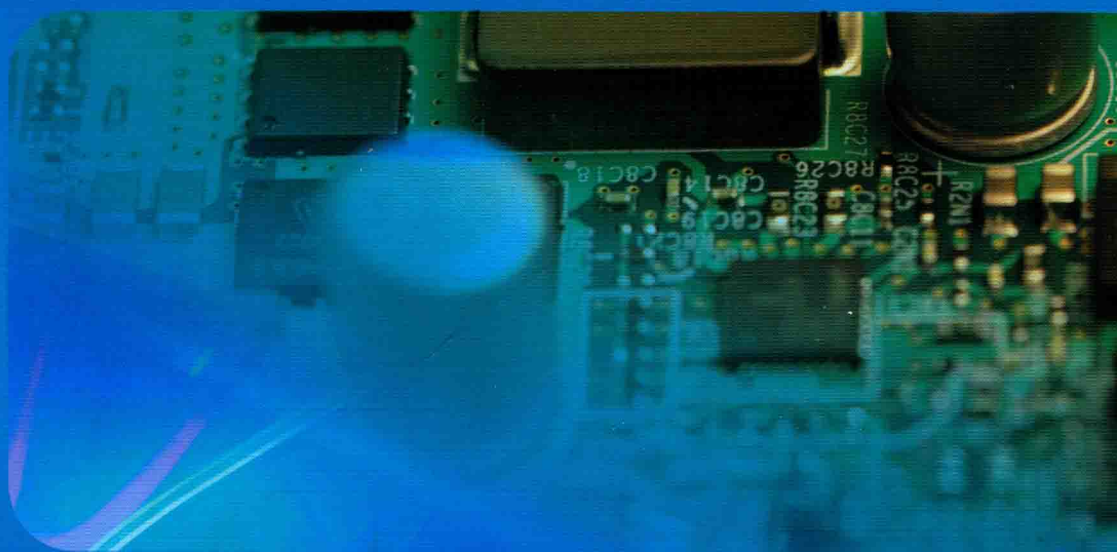




普通高等教育“十三五”规划教材
(电工电子课程群改革创新系列)

电路理论

主 编 李 飞 李中华
副主编 宋学瑞 陈 宁



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十三五”规划教材

电路理论

主 编 李 飞 李中华

副主编 宋学瑞 陈 宁



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

• 北京 •

内 容 提 要

本书主要介绍“电路理论基础”课程的内容,全书共13章,主要内容包括:电路的基本概念和定律、电路的等效变换、电路分析的基本方法、电路分析的基本定理、相量法、正弦稳态分析、耦合电感电路、三相电路、非正弦周期电流电路、动态电路、复频域分析、二端口网络和非线性电路等。

本书在每章的开头设有内容提要,每章结束后对本章知识点进行了回顾和总结。全书内容完整、深入浅出、可读性强。同时,各章配有较丰富的典型例题和习题。

本书可作为电气工程、控制科学与工程、计算机科学与技术等各专业的本科生教材,也可作为自学考试和成人教育的自学教材,同时还可作为电工电子技术人员学习的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路理论 / 李飞, 李中华主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017.1
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5170-5022-3

I. ①电… II. ①李… ②李… III. ①电路理论—高等学校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第001098号

责任编辑: 周益丹 李 炎

封面设计: 李 佳

书 名	普通高等教育“十三五”规划教材 电路理论 DIANLU LILUN
作 者	主 编 李 飞 李中华 副主编 宋学瑞 陈 宁
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×227mm 16开本 24.5印张 457千字
版 次	2017年1月第1版 2017年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

普通高等教育“十三五”规划教材

(电工电子课程群改革创新系列)

编审委员会名单

主 任：施荣华 罗桂娥

副主任：李 飞 宋学瑞

成 员：(按姓氏笔画排序)

刘子建 刘曼玲 吕向阳 寻小惠 吴显金

宋学瑞 张亚鸣 张晓丽 张静秋 李 飞

李力争 李中华 陈 宁 陈明义 陈革辉

罗 群 罗桂娥 罗瑞琼 姜 霞 胡燕瑜

彭卫韶 覃爱娜 谢平凡

秘 书：雷 皓

前 言

电路理论是教育部规定的电子信息类专业的专业基础课与专业主干课，也是电气工程、控制科学与工程、计算机科学与技术等各专业必修的专业基础课或专业主干课。根据工科电路课程教学指导委员会指定的“电路”课程教学基本要求，结合我们多年的教学实践经验，编写了《电路理论》这本教材。

为了使教材条理清晰和重点突出，全书共分为13章。第1~4章主要介绍理想电路元件和电路定律，电路的等效变换，电阻电路的一般分析方法和电路基本定理等内容；第5~8章详细描述了正弦交流电路相量法，正弦交流电路的分析，含有耦合电感电路的分析和三相电路；第9章重点阐述了非正弦周期电流电路的计算和分析；第10~11章主要介绍一阶电路、二阶电路和复频域分析；第12~13章重点阐述二端口网络和非线性电阻电路的分析。本教材内容的选择与编排力求与有关专业的前设和后续课程有良好的衔接，各专业可根据本专业的特点取舍教学内容，教材计划教学时数为64~80学时。

本次编写工作得到了电路课程群其他老师的大力支持和帮助，可以说本书是电路课程群老师集体劳动的成果。本书编写大纲经过了电路课程群老师及电工电子课程群改革创新系列教材编委会的多次讨论，吸收了许多合理的建议，在此一并表示诚挚的感谢。

本书由李飞、李中华任主编，宋学瑞、陈宁任副主编。李飞编写第1章、第2章、第3章和第4章，宋学瑞编写第7章、第9章和第10章，陈宁编写第5章、第6章和第13章，李中华编写第8章、第11章和第12章。全书由李飞负责修改和统稿。本书在编写过程中，还得到了赖旭芝、覃爱娜、罗桂娥、刘献如、毛先柏等老师的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中的疏漏和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2016年10月

目 录

前言

第1章 电路的基本概念与电路定律	1
1.1 电路及电路模型	1
1.1.1 实际电路	1
1.1.2 电路模型	2
1.2 电路的基本物理量	3
1.2.1 电流	3
1.2.2 电压	4
1.2.3 功率和能量	5
1.3 无源电路元件	7
1.3.1 电阻元件	7
1.3.2 电容元件	10
1.3.3 电感元件	13
1.4 独立电源	16
1.4.1 电压源	16
1.4.2 电流源	17
1.5 受控源	17
1.6 基尔霍夫定律	19
1.6.1 基尔霍夫电流定律	19
1.6.2 基尔霍夫电压定律	20
1.7 电路的图	24
1.7.1 支路、结点和回路	25
1.7.2 树、树支、连支和基本回路组	26
1.7.3 平面图与非平面图	29
本章小结	29
习题一	30
第2章 电路的等效变换	36
2.1 等效变换的概念	36
2.2 电阻的串联、并联、混联及等效电阻	37

2.2.1 电阻的串联	37
2.2.2 电阻的并联	38
2.2.3 电阻的混联	39
2.3 电阻的 Y 形连接和 Δ 形连接的等效变换	40
2.3.1 电桥电路	40
2.3.2 Y- Δ 等效变换	41
2.4 电压源、电流源的串联和并联	44
2.4.1 电压源串联	44
2.4.2 电流源并联	45
2.5 实际电源的两种模型及其等效变换	46
2.6 输入电阻	49
2.6.1 输入电阻定义	49
2.6.2 求输入电阻的方法	49
本章小结	50
习题二	51
第 3 章 电路分析的基本方法	55
3.1 支路电流法	55
3.2 网孔电流法和回路电流法	57
3.2.1 网孔电流法	57
3.2.2 回路电流法	60
3.3 结点电压法	65
本章小结	71
习题三	72
第 4 章 电路分析的基本定理	78
4.1 叠加定理和齐性定理	78
4.2 替代定理	81
4.3 戴维宁定理和诺顿定理	82
4.3.1 含源一端口网络的开路电压 u_{oc} 和等效电阻 R_{eq}	82
4.3.2 戴维宁定理	83
4.3.3 诺顿定理	87
4.3.4 最大功率传输	90
4.4 特勒根定理	92
4.5 互易定理	95
本章小结	98

习题四	99
第5章 相量法	105
5.1 正弦量的基本概念	105
5.1.1 正弦量的三要素	105
5.1.2 正弦量的相位差	106
5.1.3 正弦量的有效值	109
5.2 正弦量的相量表示	110
5.2.1 复数及运算	110
5.2.2 相量运算	114
5.3 相量法的分析基础	117
5.3.1 电路元件伏安关系的相量形式	117
5.3.2 电路定律的相量形式	120
本章小结	122
习题五	122
第6章 正弦稳态电路	125
6.1 阻抗和导纳	125
6.1.1 阻抗概念	125
6.1.2 导纳概念	126
6.2 阻抗和导纳的串联和并联	129
6.3 电路的相量图法	132
6.4 正弦稳态电路分析	135
6.5 正弦稳态电路的功率	141
6.6 功率因数的提高	147
6.7 正弦稳态最大功率传输条件	150
6.8 正弦电路的谐振	153
6.8.1 串联谐振	153
6.8.2 并联谐振	160
本章小结	163
习题六	164
第7章 耦合电感电路	172
7.1 耦合电感	172
7.1.1 耦合电感	172
7.1.2 耦合电感的电压、电流关系	173
7.2 含有耦合电感电路的计算	177

7.2.1 耦合电感的受控源 (CCVS) 等效分析法	177
7.2.2 耦合电感的 T 型去耦分析法	180
7.3 空芯变压器电路的分析	183
7.4 理想变压器	186
本章小结	192
习题七	192
第 8 章 三相电路	197
8.1 三相电路	197
8.1.1 三相电源	197
8.1.2 三相电路的结构	199
8.1.3 电压 (电流) 的线相关系	200
8.2 对称三相电路的计算	203
8.3 不对称三相电路的概念	207
8.4 三相电路的功率	212
本章小结	217
习题八	217
第 9 章 非正弦周期电流电路	222
9.1 非正弦周期信号傅里叶级数展开	222
9.2 有效值、平均值和平均功率	229
9.3 非正弦周期电流电路的计算	233
9.4 对称三相电路中的高次谐波	239
本章小结	241
习题九	242
第 10 章 动态电路	245
10.1 动态电路的过渡过程及初始条件	245
10.1.1 动态电路的过渡过程	245
10.1.2 动态电路初始条件及换路定律	246
10.2 一阶电路的零输入响应	250
10.2.1 RC 电路的零输入响应	250
10.2.2 RL 电路的零输入响应	255
10.3 一阶电路的零状态响应	259
10.3.1 RC 电路的零状态响应	260
10.3.2 RL 电路的零状态响应	261
10.4 一阶电路的全响应及三要素法	265

10.4.1	一阶电路的全响应	265
10.4.2	一阶电路的三要素法	270
10.5	阶跃响应和冲激响应	274
10.5.1	阶跃函数和阶跃响应	274
10.5.2	冲激函数和冲激响应	279
10.6	二阶电路的零输入响应	283
10.7	二阶电路的零状态响应和全响应	294
10.7.1	二阶电路的零状态响应	294
10.7.2	二阶电路的全响应	296
10.8	二阶电路的阶跃响应和冲激响应	298
10.8.1	二阶电路的阶跃响应	298
10.8.2	二阶电路的冲激响应	299
10.9	状态方程	301
10.9.1	状态变量与状态方程	302
10.9.2	状态方程的直观编写法	303
	本章小结	306
	习题十	308
第 11 章	复频域分析	316
11.1	拉普拉斯变换及基本性质	316
11.2	拉普拉斯反变换的部分分式展开	319
11.3	电路元件和电路定律的复频域形式	322
11.4	应用拉普拉斯变换法分析线性电路	325
11.5	网络函数	330
	本章小结	334
	习题十一	335
第 12 章	二端口网络	341
12.1	二端口网络的基本概念	341
12.2	二端口网络的参数和方程	342
12.3	二端口的等效电路	351
12.4	二端口的连接	354
12.5	回转器和负阻抗变换器	356
	本章小结	359
	习题十二	360

第 13 章 非线性电路	364
13.1 非线性电阻	364
13.2 非线性电阻电路的串联和并联	367
13.3 小信号分析法	370
13.4 分段线性化方法	373
本章小结	376
习题十三	376
参考文献	380

第1章 电路的基本概念与电路定律



内容提要

电路分析的主要变量是电流、电压和功率，本章首先提出电流和电压的基本概念；接着讲解吸收、发出功率的表达式和计算方法；然后介绍常用的电路元件、反映电路连接关系的基尔霍夫定律以及简单的拓扑概念。

1.1 电路及电路模型

电路分为实际电路和电路模型，在电路分析中所讨论的电路主要是电路模型。

1.1.1 实际电路

电在日常生活、生产和科学研究工作中得到了广泛应用。如：在收录机、电视机、录像机、音响设备、计算机、通信系统和电力网络中都可以看到各种各样的电路。这些电路的特性和作用各不相同。虽然电路功能不同，实际电路也千差万别，但不同的电路都遵循着同样的基本电路规律。

实际电路按其作用和功能可分为两种，一种电路是实现电能传输和分配，并将电能转换成其他形式的能量，如电力系统或通信系统；而另一种电路是对信号进行处理，通过电路对输入的信号（又称为激励）进行变换或加工变为所需要的输出（又称为响应），如放大电路把微弱信号进行放大——收音机、电视机的放大电路，调谐电路，存储电路，整流滤波电路等。

为了实现电能的产生、传输及使用的任务把所需要的电路元件按一定的方式连接起来，即构成电路。所以电路是由电气设备构成的总体。它提供了电流流通的路径，在电路中随着电流的通过，进行着能量的转换、传输、分配的过程。一个完整的电路有三个基本组成部分。第一个组成部分是电源，它是产生电能或信号的设备，是电路中的信号或能量的来源，在工作时将其他形式的能量变为电能——例如发电机、干电池等，同时电源又被称为激励。第二个组成部分是负载，它是用电设备，是消耗电能的装置，在工作时将电能变为其他形式的能量，例如电动机、电阻器等。第三个组成部分是电源与负载之间的连接部分，这部分除连接导线外，还可能有控制、保护电源用的开关和熔断器等。

由电阻器、电容器、线圈、变压器、晶体管、运算放大器、传输线、电池、发电机和信号发生器等一些电气器件和设备按一定的方式连接而成的电流的通路，称为实际电路。实际电路是为完成某种预期的目的而设计、安装、运行的。如果实际电路中的器件和部件的外形尺寸，较之电路工作时通过其中的电磁波的波长来说非常小，以致可以忽略不计，这种元件就称为集总元件。由集总元件构成的电路叫集总电路，一般这种电路中的元件是理想化的，是不占有空间尺寸的。实际电路的电路模型是由理想电路元件相互连接而成，理想电路元件是组成电路模型的最小单位，是具有某种确定的电磁性质的假想元件，它是一种理想化的模型并具有精确的数学定义。在一定假设条件下，可以用足以反映其电磁性质的理想电路元件或它们的组合来模拟实际电路中的器件。

1.1.2 电路模型

电路理论讨论的不是实际电路而是它的电路模型。通过对电路模型的分析、计算来预测实际电路的特性，从而改进实际电路的电气特性和设计出新的电路。

在电路分析中，有三种最基本的无源理想电路元件：第一种是消耗电磁能、转换电磁能为其他形式能量的电阻元件；第二种是具有电场现象的电容元件；第三种是具有磁场能量的电感元件。此外，还有电压源、电流源等两种理想电源元件。这些元件都有两个端子与外电路相连，称为二端元件。理想二极管也是二端元件，用于电子器件的模型中。除二端元件外，还有四端元件，如受控源、理想变压器和互感器等。人们从实践中总结出少数几种理想元件，用来构成实际电路的电路模型。以后我们将陆续介绍这些理想电路元件及其特性。

实际电路用电路模型表示后，就可绘出用理想电路元件组成的电路图。每个理想电路元件都有一定的符号表示，如电阻元件用长条形符号表示；电容元件用两根平行的直线表示；理想导线用线段来表示等。如图 1-1 (a) 所示电路是一个简单的手电筒实际电路，干电池可用一个电阻模型与一个电压源模型的组合来构成，而灯泡可用一个电阻模型来替代，则可得它的电路模型如图 1-1 (b) 所示。

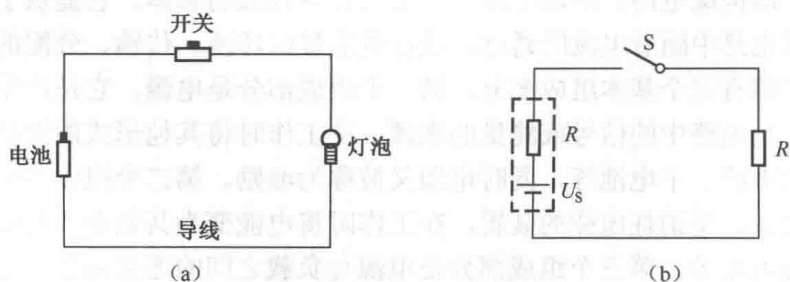


图 1-1 手电筒的实际电路与电路模型

1.2 电路的基本物理量

电路分析的任务是对给定的电路确定其电性能,而电路的电性能通常通过一组物理量来描述,最常用的是电流、电压、功率和能量等。

1.2.1 电流

1. 电流的定义

电流又称为电流强度,定义为单位时间内通过电荷的变化率,用符号 i 表示,即

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

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。如果电流的大小和方向不随时间变化,则这种电流叫做恒定电流,简称直流,可用符号 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化,则称为交变电流,简称交流,一般可用符号 i 表示。在国际单位制中,电流的单位是安培(A)。

2. 电流的参考方向

前面已经提到规定正电荷运动的方向为电流的方向,但在实际问题中,电流的真实方向往往难以在电路图中标出。例如,当电路中的电流为交流时,就不可能用一个固定的箭头来表示真实方向。即使电流为直流,在求解较复杂电路时,也往往难以事先判断电流的真实方向。为了解决这种困难,电路中引入电流参考方向这一概念。

电流参考方向就是假设电路中元件的电流方向。电流参考方向的表示方法有两种,一种是用箭头,如图 1-2 (a) 所示;另一种是用双下标,如图 1-2 (b) 所示。规定:如果电流的真实方向与参考方向一致,电流为正值;如果两者相反,电流为负值。这样,可利用电流的正负值结合参考方向来表明电流的真实方向,例如 $i = -2 \text{ A}$,表示正电荷以每秒 2 库仑的速率逆着参考方向移动。在分析电路时,一般先假设电流的参考方向,并以此为基准进行分析、计算,最后从答案的正负值来确定电流的实际方向。在未标出电流参考方向的情况下,电流的正负是毫无意义的。

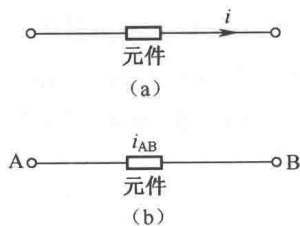


图 1-2 电流参考方向

1.2.2 电压

电荷在电路中流动,就必然有能量的交换发生。电荷在电路的某些部分(如电源处)获得能量而在另外一些部分(如电阻元件处)失去能量。电荷在电源处获得的能量是由电源的化学能、机械能或其他形式的能量转换而来的。电荷在电路某些部分所失去的能量,或转换为热能(电阻元件处),或转换为化学能(电池处),或储藏在磁场中(电感元件处)等。失去的能量是由电源提供的,因此,在电路中间存在着能量的流动,电源可以提供能量,有能量流出;电阻等元件吸收能量,有能量流入。为便于研究这个问题,在分析电路时引用电压这一物理量。

1. 电压的定义

电路中 A、B 两点间的电压表明单位正电荷由 A 点转移到 B 点时所获得或失去的能量,如图 1-3 所示,即

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

其中 q 为由 A 点转移到 B 点的电荷,单位为库仑 (C); w 为转移过程中电荷 q 所获得或失去的能量,单位为焦耳 (J),电压的单位为伏特 (V)。

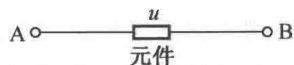


图 1-3 电压的定义

如果正电荷由 A 转移到 B,获得能量,则 A 点为低电位,即负极,B 点为高电位,即正极。如果正电荷由 A 转移到 B,失去能量,则 A 点为高电位,即正极,B 点为低电位,即负极。

2. 电压的参考方向

如同需要为电流规定参考方向一样,同样也需要为电压规定参考方向。电压参考方向的表示方法有三种,第一种方法是用箭头,如图 1-4 (a) 所示;第二种方法是用双下标,如图 1-4 (b) 所示;第三种方法是在元件或电路的两端用“+”“-”符号来表示,“+”号表示高电位端,“-”号表示低电位端,如图 1-4 (c) 所示。

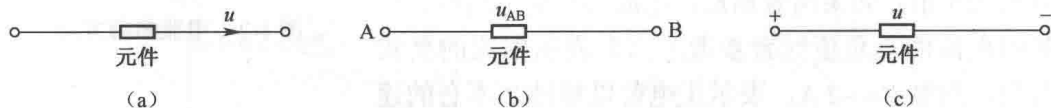


图 1-4 电压的参考方向

根据电压参考方向的规定,当电压为正值时,该电压的实际方向与参考方向相同;当电压为负值时,该电压的实际方向与所标的参考方向相反。在未标出电压参考方向的情况下,电压的正负也是毫无意义的。和电流标出参考方向一样,

在电路图中,对元件所标的电压参考方向也可以任意选定,参考方向不一定代表电压的实际方向,它们配合电压的正值或负值来表明电压的真实极性。

在电路分析中,虽然同一元件的电压和电流的参考方向可以各自选定,不必强求一致。但为了分析方便,常选定元件的电压和电流的参考方向一致,即电流从正极性端流入该元件而从它的负极性端流出,这样假定的电压电流参考方向为关联参考方向,如图 1-5 (a) 所示,这种相关联的参考方向的设定为分析计算带来方便;相反,则为非关联参考方向,如图 1-5 (b) 所示。



图 1-5 关联与非关联参考方向

3. 电位

为了电路分析的方便,常在电路中选某一点为参考点,把任一点到参考点的电压称为该点的电位,参考点的电位为零,所以也称参考点为零电位点;电位一般用 V 表示,单位与电压相同。

图 1-6 (a) 为电子电路的简化电路的习惯画法,图 1-6 (b) 为图 1-6 (a) 的原电路,参考点 e 是电源的公共端;如 a 点电位是 $6V$,就表示为 $V_a = 6V$ 。

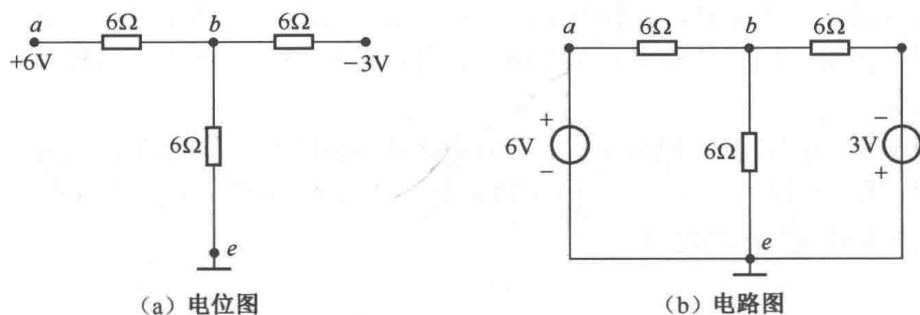


图 1-6 电路图及其对应的电位图

1.2.3 功率和能量

在电路分析中,功率和能量的计算也是非常重要的。因为,尽管在基于系统的电量分析和设计中,电压和电流是有用的变量,但是系统有效的输出经常是非电气的,这种输出用功率和能量来表示比较合适。另外,所有实际器件对功率的大小都有限制。因此,在设计过程中只计算电压和电流是不够的。

元件从 t_0 到 t 时间内吸收的能量 W , 可以根据电压的定义求得为:

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq \quad (1-3)$$

由于 $i = \frac{dq}{dt}$, 把它代入式 (1-3), 有

$$W = \int_{t_0}^t u i dt \quad (1-4)$$

式中 u 和 i 都是时间的函数, 因此, 能量也是时间的函数。元件的功率是单位时间内所做的功, 即:

$$p = \frac{dw}{dt} = ui \quad (1-5)$$

其中, p 是功率, 单位为瓦特 (W), 式 (1-5) 表示基本电路元件的功率等于流过元件的电流和元件两端电压的乘积。根据电压和电流参考方向的定义, 可知电压和电流可能为正, 也可能为负, 因此, 功率也就可正可负。根据功率的正负判断元件是吸收功率还是发出功率时, 电压和电流参考方向是否关联起到重要的作用。

当元件的电压和电流为关联参考方向时, 式 (1-5) 表示元件吸收功率, 即当元件功率大于零时, 元件吸收功率, 在电路中消耗能量, 相当于负载; 当元件功率小于零时, 元件发出功率, 此时, 元件在电路中相当于电源, 并向外提供能量。

当元件的电压和电流为非关联参考方向时, 式 (1-5) 表示元件发出功率, 即当元件功率大于零时, 元件发出功率, 此时, 元件在电路中相当于电源, 并向外提供能量; 当元件功率小于零时, 元件吸收功率, 在电路中消耗能量, 相当于负载。

例 1-1 图 1-7 所示电路中, 各元件电压和电流的参考方向均已设定。已知: $I_1 = 2\text{A}$, $I_2 = -1\text{A}$, $I_3 = -1\text{A}$, $U_1 = 7\text{V}$, $U_2 = 3\text{V}$, $U_3 = 4\text{V}$, $U_4 = 8\text{V}$, $U_5 = 4\text{V}$ 。求各元件吸收或发出的功率。

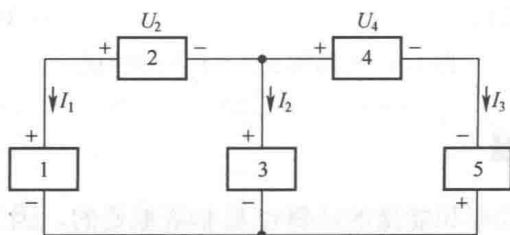


图 1-7 例 1-1 的图

解 元件 1、3、4 为关联参考方向, 有: $P_1 = U_1 I_1 = 7 \times 2 = 14\text{ W}$ (吸收功率,