

中国通信学会普及与教育工作委员会推荐教材



21世纪高职高专电子信息类规划教材·移动通信系列
21 Shiji Gaozhi Gaozhuan Dianzi Xinxilei Guihua Jiaocai

电路与信号 基础

汪英 主编

吴泳 刘军华 副主编

- 理论够用，能力为本，面向应用性技能型人才培养
- 采用模块化内容结构，全面介绍基本概念、理论和
分析方法
- 先直流后交流、先稳态后瞬态、先时域后变换域



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

中国通信学会普及与教育工作委员会推荐教材



21世纪高职高专电子信息类规划教材·移动通信系列
21 Shiji Gaozhi Gaozhuān Diānzi Xīnxīlei Guihuā Jiāocai

电路与信号 基础

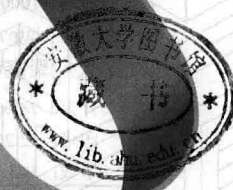
汪英 主编

吴泳 刘军华 副主编

*Electronic
Information*

人民邮电出版社

北京



图书在版编目 (C I P) 数据

电路与信号基础 / 汪英主编. — 北京 : 人民邮电出版社, 2013.8
21世纪高职高专电子信息类规划教材
ISBN 978-7-115-32696-6

I. ①电… II. ①汪… III. ①电路分析—高等职业教育—教材②信号分析—高等职业教育—教材 IV.
①TM133②TN911.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第178111号

内 容 提 要

本书系统地介绍了电路与信号分析的基本概念、基本理论和基本分析方法。全书采用模块化的内容结构,共分7个模块,内容包括电路的基本概念和基本定律、直流电路的基本分析方法、正弦稳态电路分析、互感与理想变压器、信号的频谱分析、瞬态电路的复频域分析、电路与信号实验。

本书内容全面,紧密结合相关理论与实践应用,实用性强,模块1~6均配有大量典型例题和一定数量的精选习题,可适合不同层次读者的需求。

本书可作为通信、电子、电气、自动化、计算机类高等职业技术学院及其他大专院校的教材,也可供电类各专业自学者使用,还可供有关工程技术人员和高校教师参考。

-
- ◆ 主 编 汪 英
副 主 编 吴 泳 刘军华
责任编辑 刘 博
责任印制 彭志环 杨林杰
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 12.25 2013年8月第1版
字数: 302千字 2013年8月河北第1次印刷
-

定价: 32.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第0021号

前言



为了适应现代电路与信号理论的发展和高等职业教育课程体系改革的需要,我们在总结多年教学实践经验的基础上,组织专业教师编写了《电路与信号基础》一书。本书采用模块化的内容结构,全面介绍了电路与信号分析的基本概念、基本理论和基本分析方法,全书共分7个模块:模块1重点对电路的基本概念和基本定律进行了介绍;模块2详细介绍了直流电路的基本分析方法;模块3详细介绍了正弦稳态电路分析;模块4介绍了互感与理想变压器;模块5系统地介绍了信号的频谱分析;模块6介绍了瞬态电路的复频域分析;模块7是电路与信号实验。

本书较好地体现了“理论够用,能力为本,面向应用性技能型人才培养”的职业教育培训特色。在内容上,力求做到基本理论以够用为度,不片面追求理论推导的严密性,省略了不必要的数学推导和证明,而着重体现了理论的针对性和应用性;在教材内容的安排上,既遵循电路与信号理论本身的系统和结构,又注意适应学生的认知规律,采取了先直流后交流、先稳态后瞬态、先时域后变换域的顺序,使之符合由浅入深、循序渐进的认知规律;在内容叙述上,力求做到概念清晰,论述简明,注重分析问题和解决问题的方法。本书作为专业教材,根据专业需要,课时为60~90课时。本书精选了较多的例题和思考题,便于自学,可作为大专院校的教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员使用。

本书由湖南邮电职业技术学院的5位教师共同编写,模块1、2由吴泳老师编写,模块3、4由汪英老师编写,模块5、6由胡湘炎老师编写,模块7由毕敏安、刘军华老师编写。汪英老师负责全书的统稿工作并担任主编,吴泳、刘军华老师担任副主编。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者指正。

编 者

2013年5月



模块 1 电路的基本概念和基本定律 1

任务 1 电路与信号的基本概念 1

1. 电路 1
2. 信号 2

任务 2 电路的基本变量 3

1. 电流及其参考方向 4
2. 电压及其参考极性 4
3. 关联参考方向 5
4. 电功率及其正、负号的意义 6

任务 3 电路的基本元件 7

1. 电阻元件 7
2. 电容元件 10
3. 电感元件 11

任务 4 电源 13

1. 独立源 13
2. 受控源 15

任务 5 基尔霍夫定律 15

1. 基尔霍夫电流定律 (KCL) 16
2. 基尔霍夫电压定律 (KVL) 17

过关训练 19

模块 2 直流电路的基本分析方法 21

任务 1 直流电路的等效转换分析 21

1. 电阻串联、并联及混联的等效转换 21
2. 实际电源的两种模型及其等效转换 24

任务 2 复杂电路的一般分析法 29

1. 支路电流法 29
2. 网孔电流法 30
3. 节点电位法 32

任务 3 线性电路常用的两个基本定理 36

1. 叠加定理 36
2. 戴维南定理 37

过关训练 40

模块 3 正弦稳态电路分析 45

任务 1 正弦信号的相量表示 45

1. 正弦信号的表示方法和特征量 45
2. 正弦信号的相量表示法 48
3. 正弦信号的运算 49

任务 2 电路定律的相量形式 51

1. 基尔霍夫定律的相量形式 51
2. 电路基本元件伏安关系的相量形式 52
3. 无源滤波电路 56

任务 3 阻抗和导纳 57

1. 阻抗 57
2. 导纳 59
3. 阻抗与导纳的等效转换 61

任务 4 正弦稳态电路的分析 62

1. 正弦稳态电路分析的基本原则 62
2. 用相量法分析正弦稳态电路的步骤 63



3. 相量分析法举例	63	1. 三角形式的傅里叶级数	95
任务 5 正弦稳态电路的功率	66	2. 余弦形式的傅里叶级数	96
1. 瞬时功率 $p(t)$	67	3. 指数形式的傅里叶级数	96
2. 平均功率	67	任务 3 非正弦周期信号的频谱 分析	97
3. 无功功率	68	任务 4 非周期信号的频谱分 析——傅里叶变换	99
4. 视在功率	68	1. 傅里叶变换	100
5. 复功率	68	2. 傅里叶变换的引出	100
任务 6 谐振电路	70	3. 几种常见信号的频谱	101
1. 串联谐振电路	70	任务 5 傅里叶变换性质的应用	103
2. 并联谐振电路	74	1. 傅里叶变换频移性(调制)	103
过关训练	75	2. 尺度变换性的应用	106
模块 4 互感与理想变压器	79	任务 6 电路无失真传输信号的 条件	107
任务 1 互感元件的基本模型及 伏安关系	79	过关训练	109
1. 耦合电感	79	模块 6 瞬态电路的复频域分析	111
2. 耦合系数	82	任务 1 拉普拉斯变换	111
3. 耦合电感的相量模型	82	1. 拉普拉斯变换的定义	112
任务 2 理想变压器	83	2. 常见信号的拉氏变换	113
1. 理想变压器的电路模型	83	任务 2 拉普拉斯变换的性质	115
2. 理想变压器的变换特性	84	1. 时域微分性	115
3. 含理想变压器的电路 分析举例	85	2. 拉氏反变换	116
过关训练	85	任务 3 瞬态过程的一般概念与 电容、电感元件初始值 的计算	117
模块 5 信号的频谱分析——傅里 叶分析	87	1. 瞬态过程的产生	117
任务 1 常见信号	87	2. 换路定律	118
1. 单边指数衰减信号	87	3. 电容、电感元件的初始值 $u_c(0_+)$ 、 $i_L(0_+)$ 的确定	118
2. 单位斜变信号	88	任务 4 瞬态电路的复频域分析法	119
3. 单位阶跃信号	88	1. 复频域电路模型	119
4. 单位冲激信号	91		
5. 正负号信号	94		
任务 2 非正弦周期信号的分 解——傅里叶级数	95		



2. 复频域分析法举例	121
过关训练	122
模块 7 电路与信号实验	124
任务 1 实验须知	124
1. 实验课目的	124
2. 实验课进行方式	125
3. 几个问题的说明	126
任务 2 常用电工电子仪表的 使用	127
1. TH-TD 型通用电工电子实验 装置的使用	127
2. GOS-6021 型双踪示波器的 使用	133
3. DA-16 型晶体管交流毫伏 表的使用	142
4. 500 型指针式万用表的 使用	143
5. UT51 型数字万用表的 使用	147
任务 3 电路与信号实验	150
1. 基本电工电子仪表的使用 ..	150
2. 电路元件伏安特性的测试 ..	155
3. 叠加定理的验证	159
4. 戴维南定理的验证	161
5. RLC 串联谐振电路的测试 ..	165
6. RC 选频网络特性测试	168
附录 1 示波器原理	171
附录 2 用万用表对常用电子元器件 检测	174
附录 3 电阻器的标称值及精度 色环标志法	178
附录 4 三相交流电路的基本知识 ..	180
附录 5 常见信号及其频谱函数 ..	186
参考文献	188

模块 1

电路的基本概念和基本定律

【本模块问题引入】我们在日常的生产、生活中要接触和使用各种各样的电路系统，而理论意义上的“电路”是实际电路的高度近似和抽象，能客观全面地反映实际电路系统的主要特性并得出科学的结论，那么“电路”用什么样的元件符号来描述各种实际的元器件？这些元件符号又表征什么样的电学特性？“电路”中用什么样的变量来描述元件和系统的电学特征？“电路”是处理“信号”的，信号是如何分类的？用什么方式来描述信号及信号的变化？这都是我们必须知道的基本内容。

【本模块内容简介】本模块共分 5 个任务，包括电路与信号的基本概念、电路分析中的基本变量、电路的基本元件、电源、基尔霍夫定律。

【本模块重点难点】重点掌握电路与信号的基本概念、3 个基本元件 (R 、 L 、 C) 的伏安关系、基尔霍夫定律；难点是电流、电压的参考方向及关联参考方向的意义，电源的分类及性质。

任务 1 电路与信号的基本概念

【问题引入】电路的应用与我们的生产、生活密不可分，“电路”的定义到底是什么？如何构成？功能怎样？电路中包含哪些基本元件模型？电路中传输和处理的“信号”又该如何定义？如何表示？就让我们从这些基本的概念开始本课程的学习吧。

【本任务要求】

1. 识记：电路的概念、信号的概念、基本元件模型。
2. 领会：电路的组成和作用。
3. 应用：准确判断电路中的支路、节点、回路和网孔。

1. 电路

电路就是电流通过的路径。实际电路是由若干电气元器件(如电阻器、电容器、电感线圈、变压器、电源和开关等)按照一定的方式组合起来并能完成某种特定功能的整体。

图 1.1.1 (a) 所示为一个简单的实际电路，这是一个由干电池和小灯泡通过两根连接导线组成的照明电路。本书讨论的对象不是实际电路而是实际电路的电路模型。什么是实际电路的电路模型呢？我们将组成实际电路的元器件加以理想化和模型化，保留元器件主要的电磁性能，忽略其微不足道的性能，并用一个抽象的模型元件来表征其主要性能，这

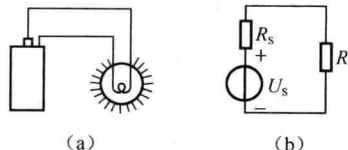


图 1.1.1 实际电路与电路模型图



就是理想元件，实际电路的电路模型就是由理想元件相互连接而成的。图 1.1.1 (a) 所示电路的电路模型如图 1.1.1 (b) 所示。图中的电阻元件 R 作为小灯泡的模型，反映了将电能转换为热能和光能这一物理现象；干电池用电压源 U_s 和电阻元件 R_s 的串联组合作为模型，分别反映了电池内储化学能转换为电能以及电池本身耗能的物理过程。

今后，我们在电路分析中所涉及的各种元件均指理想元件。理想元件是组成电路模型的最小单元，是具有某种确定电磁性质并有精确数学定义的基本结构。

最常用的 3 种理想元件为：只表示消耗电能并转变成热能特性的电阻元件；只表示存在和储存磁场能量特性的电感元件；只表示存在和储存电场能量特性的电容元件。根据元件对外端子的数目，理想元件可分为二端、三端、四端元件等。

图 1.1.2 所示是电路中几种基本理想元件的符号图形。

由理想元件组成的电路称为电路模型或电路图。电路分析的对象就是电路模型，图 1.1.1 (b) 及图 1.1.3 所示均为电路模型。

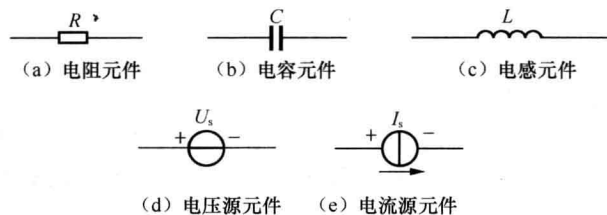


图 1.1.2 几种基本的理想元件

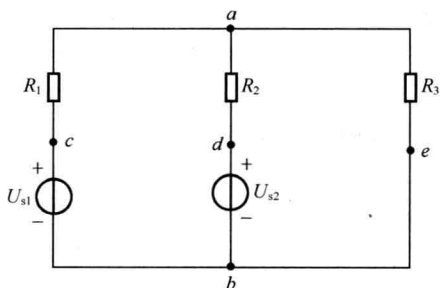


图 1.1.3 电路的名词定义

接下来，让我们了解有关电路图几个名词。

(1) 支路：电路中通过同一电流的分支叫作支路，图 1.1.3 中的 acb 、 adb 和 aeb 都是支路，其中支路 acb 和 adb 是由两个元件串联组成的。支路 acb 、 adb 中有电源，称为含源支路；支路 aeb 中没有电源，则称为无源支路。

(2) 节点：3 条或 3 条以上支路的连结点叫作节点，如图 1.1.3 中的 a 点和 b 点。

(3) 回路：电路中的任一闭合路径称为回路，如图 1.1.3 中的 $adbca$ 、 $aebda$ 和 $aebca$ 都是回路，该电路共有 3 个回路。显然，闭合电路至少有一个回路，只有一个回路的最简单的电路叫单回路电路。

(4) 网孔：内部不含有支路的回路叫作网孔。图 1.1.3 中的回路 $adbca$ 、 $aebda$ 就是网孔，而回路 $aebca$ 就不是网孔。

电路分析是在电路结构和元件参数已知的情况下，确定电路输入（又称激励）与输出（又称响应）之间的关系，本书重点讨论线性、时不变、集总参数电路的基本理论和分析方法，对于非线性、时变、分布参数电路不研究。

2. 信号

在我们的生产、生活中，信息可以用语言、文字或图像等来表示，而信号是一种带有信息的随时间变化的物理量。信息可以转变成相应的随时间变化的电压或电流，这种携带着信息的随时间变化的电压或电流，就是电信号。本书所说的信号就是这种电信号。信号是运载信息的工具，而电路起着传递、处理信号的作用。





信号分为规则信号与不规则信号。规则信号(又称确定信号)是指按一定规则变化的、可以用一个确定的数学函数式或波形来描述的信号。因此本书认为“规则信号”、“函数”这两个名词具有相同的含义。否则称为不规则信号(又称随机信号)。规则信号据其变化时有无重复性的特点可分为周期信号和非周期信号;按它的存在时间是否为连续的特点又可分为连续时间信号和离散时间信号,如图 1.1.4 所示。

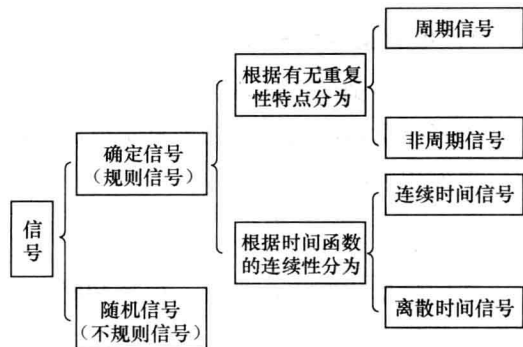


图 1.1.4 信号的分类

图 1.1.5 给出了几种常见信号的波形图。

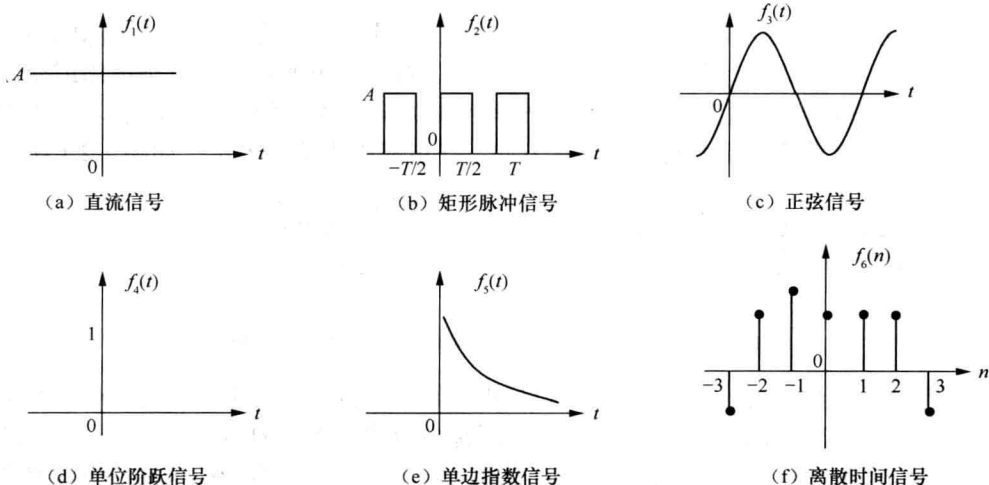


图 1.1.5 常见信号

信号的特性首先表现为它随时间变化的规律,即“时间特性”;另外也可以表现为它所包含的频率成分的分布规律,即“频率特性”。不同的信号有不同的时间特性与频率特性,其时间特性与频率特性之间又有着密切的联系。信号分析即分析信号的时(间)域特性与频(率)域特性以及两者之间的内在关系。

任务2 电路的基本变量

【问题引入】任何一个物理系统的描述和分析都离不开物理变量,电路分析中常用的基本变量有哪些?这些变量的大小如何定义?方向如何确定?这些抽象化的变量又对应着实际电路系统的哪些物理特征呢?这就是本任务要和大家一起来解决的问题。

【本任务要求】

1. 识记: 电流、电压、电功率。
2. 领会: 电流的参考方向、电压的参考方向。
3. 应用: 准确判断元件上的电压、电流参考方向是否为关联;对元件上的电功率进行准确计算并判断该元件是吸收功率还是释放功率。





1. 电流及其参考方向

电荷有规则的运动称为电流。

用来衡量电流大小的物理量是电流强度，其定义是：在单位时间内通过导体横截面的电量。电流用 i 表示，即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.1)$$

在国际单位制中，电流、电荷和时间的单位分别为安培 (A) (简称安)、库仑 (C) (简称库) 和秒 (s)。

电流不仅有大小，而且有方向。大小和方向均不随时间而变化的电流称做直流电流，用大写字母 I 表示，即 $I = \frac{q}{t}$ 。

习惯上规定正电荷在电路中运动的方向为电流的真实方向。在仅含一个电源的简单电路中，根据上面的规定很容易判断电流的真实方向，但对多个电源组成的复杂电路或交流电路中 (电流的方向随时间不断变化)，无法标出其实际方向。为了便于计算，引入了“参考方向”，这是个任意假设的电流方向，又称正方向，在电路中用箭头表示，如图 1.2.1 所示。

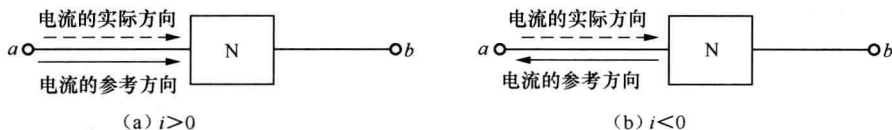


图 1.2.1 电流的参考方向 (图中方框 N 代表一个元件或一段电路)

当参考方向标定后，就以参考方向作为分析计算的依据。这时电流已是一个代数量，根据计算结果，若电流 i 为正值，即 $i > 0$ ，表明所标电流的参考方向与真实方向一致；若电流 i 为负值，即 $i < 0$ ，表明所标电流参考方向与真实方向相反。显然，在未标注电流参考方向的情况下，电流的正负是没有意义的，也是没办法计算的，所以在分析电路时，必须首先标注电流的参考方向，且一经标注，在计算过程中就不能再改变了。

电流的参考方向除用箭头表示外，也可以用双下标表示，图 1.2.1 (a) 中的电流 i 可表示为 i_{ab} ，它表示电流 i 的参考方向由 a 指向 b 。而图 1.2.1 (b) i_{ba} 则表示电流从 b 流向 a 。对于同一真实电流而言，标注的参考方向不同，计算结果相差一个“-”号，即

$$i_{ab} = -i_{ba} \quad \text{或} \quad I_{ab} = -I_{ba} \quad (1.2.2)$$

2. 电压及其参考极性

电路中 a 、 b 两点间的电压等于单位正电荷由 a 点移到 b 点所获得或失去的能量。电压也称电位差，用字母 u 表示。

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1.2.3)$$

其中，能量的单位为焦耳 (J)，电压的单位为伏特 (V)。

电压不仅有大小，而且有方向，大小和方向均不随时间而变化的电压称做直流电压，用大写字母 U 表示，即 $U = \frac{w}{q}$ 。





式(1.2.3)中,如果正电荷由 a 移动到 b 获得能量,则 a 点为低电位,即负极; b 点为高电位,即正极,由 a 到 b 为电压升(电位升)。如果正电荷由 a 移动到 b 失去能量,则 a 点为高电位,即正极; b 点为低电位,即负极,由 a 到 b 为电压降(电位降)。这说明式(1.2.3)的电压 u 可正可负,和电流一样,也是一个代数量,因此也和电流一样需要给电压标注参考极性。参考极性用“+”、“-”号表示,标注在支路或元件的两端,其中“+”号表示高电位,“-”号表示低电位,如图1.2.2所示。

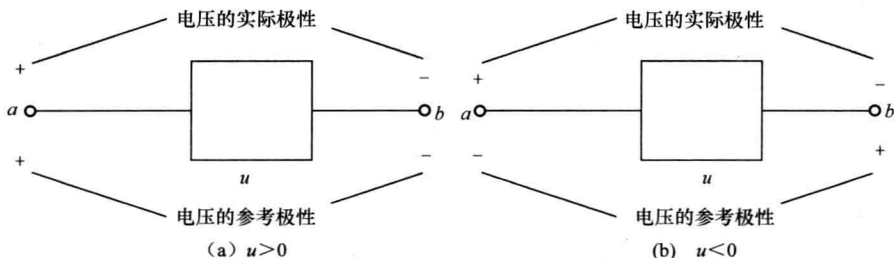


图 1.2.2 电压的参考方向(图中方框代表一个元件或一段电路)

当选定了电压的参考极性后,就可以分析计算了。当计算结果的电压 u 为正值时,即 $u > 0$ 时,表明电压的真实极性与参考极性一致;当电压 u 为负值,即 $u < 0$ 时,表明电压的真实极性与参考极性相反。显然,在未标注电压参考极性的情况下,电压的正负是没有意义的,也是没办法计算的。今后在求解电压时,必须首先标注电压的参考极性,且一经标注,在计算过程中就不可再改变了。

电压的参考极性还可用双下标表示,图1.2.2(a)中的电压 u 可表示为 u_{ab} ,它表示电压参考极性为 a “+”、 b “-”。而图1.2.2(b)中可用 u_{ba} 表示 b “+”、 a “-”。对于同一真实电压极性而言,标注的参考极性不同,计算结果相差一个“-”号,即

$$u_{ab} = -u_{ba} \quad \text{或} \quad U_{ab} = -U_{ba} \quad (1.2.4)$$

把电路中任一点与参考点(规定电位能为零的点)之间的电压,称为该点的电位。也就是单位正电荷在该点对参考点所具有的电位能。参考点的电位为零可用符号“ $\perp$ ”表示,也可用符号“ $\perp$ ”表示:前者表示用大地作为参考点,后者表示用若干导线连接的公共点或机壳作为参考点。电位的单位与电压相同,用V(伏特)表示。

电路中两点间的电压也可用两点间的电位差来表示。

$$u_{ab} = u_a - u_b \quad (1.2.5)$$

电路中两点间的电压是不变的,电位随参考点(零电位点)选择的不同而不同。

3. 关联参考方向

在电路分析中,原则上电流与电压的参考方向是可分别地任意选定,但是为了分析上的方便起见,电流与电压的参考方向往往选得一致,即电流的参考方向从电压参考极性的“+”极性端流入,如图1.2.3(a)所示。参考方向的这种选择,称为关联参考方向。在电流、电压参考方向选择一致的情况下,电路图中往往只要标出其中任一个参考方向即可认为另一个参考方向已确定而可省略不标,如图1.2.3(b)、(c)所示。

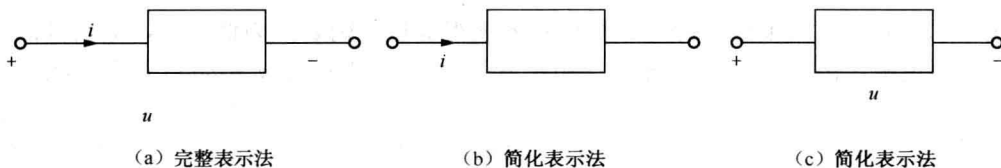


图 1.2.3 关联参考方向

4. 电功率及其正、负号的意义

单位时间里一段电路所吸收的能量，称作该段电路吸收的电功率，简称功率，用字母 p 表示，即

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1.2.6)$$

功率的单位为瓦特，简称瓦 (W)。

电路吸收的功率可用电压与电流表示。在一段电路上，若电压与电流采用关联参考方向，该段电路吸收的功率为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1.2.7)$$

在直流情况下有

$$P = UI \quad (1.2.8)$$

因电流、电压都是代数量，所以功率也是代数量。若计算结果的功率为正值，即 $p > 0$ ，则表明这段电路吸收功率；反之，若功率为负值，即 $p < 0$ ，表明这段电路产生功率。

若电压与电流为非关联参考方向时，则该段电路吸收的功率应改为

$$p = -ui \quad (1.2.9)$$

在直流情况下为

$$P = -UI \quad (1.2.10)$$

按上两式计算结果，仍然是当 p (或 P) > 0 ，电路吸收功率；当 p (或 P) < 0 ，电路产生功率。

例 1.2.1 已知图 1.2.4 所示电路中，有电流 $I_1 = I_2 = 2\text{A}$ ， $I_3 = 3\text{A}$ ， $I_4 = -1\text{A}$ ，电压 $U_1 = 3\text{V}$ ， $U_2 = -5\text{V}$ ， $U_3 = -8\text{V}$ ， $U_4 = 8\text{V}$ ，试计算各段电路的功率，并说明它们实际是吸收功率还是产生功率。

解：A 段电路上， U_1 与 I_1 方向关联，故有

$$P_A = U_1 I_1 = 3 \times 2 = 6\text{W}$$

$P_A > 0$ ，表明 A 为吸收功率。

B 段电路上， U_2 与 I_2 方向非关联，故有

$$P_B = -U_2 I_2 = -(-5) \times 2 = 10\text{W}$$

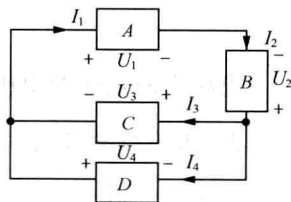


图 1.2.4 例 1.2.1 图



$P_B > 0$, 表明 B 为吸收功率。

C 段电路上, U_3 与 I_3 方向关联, 故有

$$P_C = U_3 I_3 = (-8) \times 3 = -24 \text{ W}$$

$P_C < 0$, 表明 C 为产生功率。

D 段电路上, U_4 与 I_4 方向非关联, 故有

$$P_D = -U_4 I_4 = -8 \times (-1) = 8 \text{ W}$$

$P_D > 0$, 表明 D 为吸收功率。

由于能量守恒, 电路中功率也一定是平衡的, 即整个电路吸收的功率一定是等于它产生的功率, 即有

$$\sum P_{\text{吸收}} = \sum P_{\text{产生}}$$

或者写成为

$$\sum P = 0$$

如上例中, 有

$$\sum P_{\text{吸收}} = 6 + 10 + 8 = 24 \text{ W} = \sum P_{\text{产生}}$$

或者

$$\sum P = 6 + 10 + 8 - 24 = 0$$

任务3 电路的基本元件

【问题引入】电路分析中用理想电路元件(模型元件)来表征实际电路的元器件, 电路中有哪些基本的模型元件? 它们各自的特性是什么? 这种特性如何用数学表达式来表示? 这种特性又描述了实际元器件的哪些物理过程? 本任务中就让我们来认识这些将伴随着我们整个课程学习的“基本元件”吧。

【本任务要求】

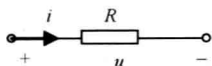
1. 识记: 电阻、电容、电感元件的伏安特性。
2. 领会: 电气设备的额定值、动态元件的功率与储能。
3. 应用: 根据基本元件的伏安特性计算电流值或电压值。

电路元件均指理想元件。理想元件的特性可由其端子上的电压电流关系——VCR (Voltage-Current Relation) 来表征。

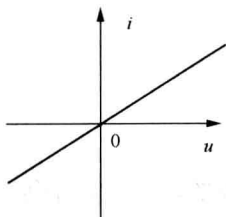
1. 电阻元件

(1) 电阻元件的伏安特性、欧姆定律

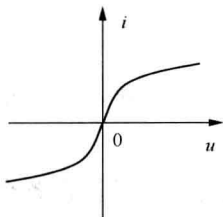
电阻元件是实际电阻器件(如实验室中常用的滑杆电阻器、电灯泡、半导体二极管等所有消耗能量的电路器件)的理想化模型, 是一个二端元件。电阻元件的 VCR 可用 $u-i$ 平面上的一条曲线来表示, 图 1.3.1 (b)、(c)、(d) 所示的分别是滑杆电阻器、电灯泡、半导体二极管电阻的 VCR 曲线。



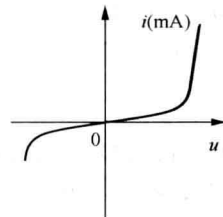
(a) 线性电阻的电路符号



(b) 线性电阻的VCR曲线



(c) 灯泡电阻的VCR曲线



(d) 半导体二极管的VCR曲线

图 1.3.1 电阻元件

图 1.3.1 (b) 所示电阻元件的 VCR 曲线为通过原点的直线, 即该电阻元件上电压与电流成正比, 因而其 VCR 可用数学式表示为

$$u = Ri \quad (1.3.1)$$

式中 R 是表征该电阻元件阻止电流通过能力的参量, 称为电阻量, 也称电阻, 单位为欧姆 (Ω)。式 (1.3.1) 中的关系就称作欧姆定律。凡是符合欧姆定律的电阻称为线性电阻, 其电路符号如图 1.3.1 (a) 所示。

式 (1.3.1) 也可表示为

$$i = Gu \quad (1.3.2)$$

其中 $G = \frac{1}{R}$, 称作电阻元件的电导, 单位为西门子 (s)。

应注意的是, 式 (1.3.1) 与式 (1.3.2) 成立的条件是该电阻元件上电压与电流参考方向是选用关联方向。若电压与电流参考方向非关联, 则式 (1.3.1) 与式 (1.3.2) 前要冠以负号, 即为

$$u = -Ri \quad (1.3.3)$$

$$i = -Gu \quad (1.3.4)$$

例 1.3.1 求图 1.3.2 所示的 4 个电阻元件上的电压 U 或电流 I 。

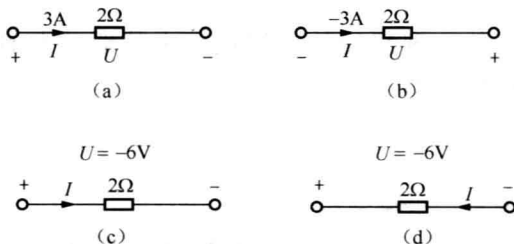


图 1.3.2 例 1.3.1 图

解: 图 1.3.2 (a) 电阻上, U 、 I 方向关联, 所以有

$$U = RI = 2 \times 3 = 6 \text{ V}$$



图 1.3.2 (b) 电阻上, U 、 I 方向非关联, 所以有

$$U = -RI = -2 \times (-3) = 6 \text{ V}$$

图 1.3.2 (c) 电阻上, U 、 I 方向关联, 所以有

$$I = \frac{U}{R} = \frac{-6}{2} = -3 \text{ A}$$

图 1.3.2 (d) 电阻上, U 、 I 方向非关联, 所以有

$$I = \frac{-U}{R} = \frac{-(-6)}{2} = 3 \text{ A}$$

电阻元件是一个只受 $u-i$ 相约束的元件, 因此, 它在任一瞬间的电压 (或电流) 只取决于该瞬间的电流 (或电压), 而与它过去的电流 (或电压) 无关, 所以电阻元件是一个即时的 (或静态的) 无记忆元件。

电阻元件的两个极端情况是: 电阻值为零和无穷大, 若 $R=0$, 称为短路; 若 $R=\infty$, 称为开路。

(2) 电阻元件的功率

电阻元件的功率为

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2 \quad (1.3.5)$$

在直流电路中, 记为

$$P = UI = RI^2 = GU^2 \quad (1.3.6)$$

从上式可看出, 电阻元件的功率与通过的电流的平方或端电压的平方成正比, 因此, 其功率恒大于零。这说明电阻元件是一个只消耗电能而不储存电能的元件, 称为耗能元件。电能从电源供给电阻, 并转换成其他形式的能量 (如光能或热能), 而不能再返回电源, 称为能量的不可逆性。

(3) 电气设备的额定值

当电流通过电气设备 (电器或电路元件) 时, 设备内的电阻将消耗一定的能量, 转变为热能, 导致电气设备本身温度增高。对于一个理想的电阻元件, 它的电压、电流及功率可以为任意值, 但实际使用时, 电压、电流及功率均不能超过某个额定值, 否则会因过热而烧坏。所谓额定值, 就是使该设备安全工作所允许的最大值。各种电气设备一般都在铭牌上标明它们的额定值。根据电压、电流和功率间的关系, 额定值不一定全部标出。例如, 电灯泡通常只标出额定电压和额定功率, 而电阻器则只标明电阻值和额定功率。

例 1.3.2 标有 200Ω , $\frac{1}{2} \text{ W}$ 的电阻, 在使用时允许的最大电流、电压为多少?

解: 由

$$P = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

得

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{2}}{200}} = 0.05 \text{ A}$$

$$U = \sqrt{PR} = \sqrt{\frac{1}{2} \times 200} = 10 \text{ V}$$



或

$$U = RI = 0.05 \times 200 = 10 \text{ V}$$

由此可知, 允许加在该电阻上的最大电流、电压分别为 0.05A 与 10V。

2. 电容元件

(1) 电容量 C

实际电容器是由两个极板中间隔以介质所构成。当电容器的两极板间加一定的电压 u 时, 就分别在所加电压的正、负两极板上充得 $+q$ 和 $-q$ 的电荷, 并在两极板间形成电场, 储藏有电场能量。所以实际电容器的主要物理特性是聚集电荷、建立电场、储藏电场能量。为模拟电容器的这种物理特性, 就采用一理想电路元件——电容元件作为其电路模型。电容元件是一个二端元件, 其电路符号如图 1.3.3 (a) 所示。

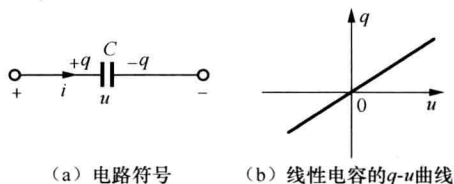


图 1.3.3 电容元件

任一时刻, 电容元件上聚集的电荷 q 与其两极板间的电压 u 有关, 可用 $q-u$ 平面上的一条曲线来表示, 因此电容元件是一个电荷 q 与电压 u 相约束的元件。若约束电容的 $q-u$ 平面上的曲线为一条通过原点的直线, 如图 1.3.3 (b) 所示, 则称它为线性电容, 否则称为非线性电容。

由图 1.3.3 (b) 可知, 对于线性电容

$$q = Cu \quad (1.3.7)$$

式中, C 是表征该线性电容聚集电荷能力的参量, 称为电容量, 也简称为电容, 其单位为法拉 (F)。常用的单位为微法 (μF) 和皮法 (pF), 它们之间的换算关系为: $1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$, $1\text{pF} = 10^{-6}\mu\text{F} = 10^{-12}\text{F}$ 。

(2) 电容元件的 VCR

当电容两端电压 u 变化时, 由式 (1.3.7) 可知, 它所聚集的电荷 q 要随着变化, 从而会在导线上形成电流。设电容上电流 i 与电压 u 的参考方向关联, 如图 1.3.3 (a) 所示, 则有

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.3.8)$$

将式 (1.3.7) 代入上式, 得

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1.3.9)$$

这就是参考方向关联时线性电容元件的 VCR。若电容上电压与电流的方向非关联, 则

$$i = -C \frac{du}{dt} \quad (1.3.10)$$

上式表明:

① 某一时刻通过电容的电流 i 取决于该时刻电容两端电压的变化率 $\frac{du}{dt}$, 与该时刻电容电压的数值无关, 电压变化率越大, 则电容电流也越大;

