

高等医药院校规划教材

供医学影像技术及相关专业使用

# 影像电子学基础

主编 何文



科学出版社

高等医药院校规划教材  
供医学影像技术及相关专业使用

# 影像电子学基础

主 编 何 文

副主编 贺德春 常淑香 李文静

编 委 (以姓氏汉语拼音为序)

常淑香 南阳医学高等专科学校

常耀敏 白城医学高等专科学校

陈夏玲 河西学院医学院

何 文 河西学院医学院

贺德春 河西学院物理与机电工程学院

李文静 商丘医学高等专科学校

马 侦 河西学院医学院



科 学 出 版 社

北 京

· 版权所有 侵权必究 ·

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303 (打假办)

## 内 容 简 介

本书由电工学基础、模拟电路基础和数字电路基础三大部分组成,其内容包括直流电路、正弦交流电路、变压器与电动机、常用控制电器、半导体器件、交流放大电路、反馈和振荡、集成运算放大电路、直流稳压电源、门电路及逻辑电路、触发电路及时序逻辑电路、模数与数模转换器等。

本书注重培养学生的基本理论和基本技能,突出基础性,强调实用性,为培养学生的职业技能奠定良好的基础,是医学影像技术专业学生的基础教材之一。本书可作为高校医学影像技术专业的教学用书,也可作为从事医疗影像技术专业人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

影像电子学基础/何文主编,一北京:科学出版社,2017.1

高等医药院校规划教材

ISBN 978-7-03-050906-2

I. 影… II. 何… III. 影像诊断-医用电子学-医学院校-教材 IV. R445

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第287151号

责任编辑:丁海燕 / 责任校对:张怡君

责任印制:赵博 / 封面设计:铭轩堂

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

保定市中华美凯印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2017年1月第一次印刷 印张:23

字数:545 000

定价:69.80元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

本书是医学影像技术专业的规划教材，主要供高等职业院校影像技术专业学生使用。为了高质量地编写本教材，编写人员认真学习贯彻编委会议精神，深入研究培养目标，科学规划课程体系，紧紧围绕医学影像技术专业培养任务，密切联系我国医学技术发展和职业教育改革的形势，按照行业要求和职业教育发展的实际需要完成此书。

本书注重基本知识、基本理论、基本技能的培养和训练，把理论和实践紧密联系起来，运用具体的例题加深对理论知识的理解，使抽象问题具体化，便于读者理解掌握。在每章后附有练习题，有助于读者巩固所学的知识。重点理论都有相应的实验配合，使知识的理解和掌握更加直观。教材合理把握深度和广度，坚持理论知识实用为主、够用为度，难易适中，以适应和满足各院校的教学需要。本书深入浅出，重点突出，文字叙述简洁，具有一定的先进性、实用性和可读性。

本书第一、二、五章由何文编写，第三章由常耀敏编写，第四章由李文静编写，第六章由陈夏玲编写，第七章由马侦编写，第八、十章由常淑香编写，第九、十二章及实验部分由贺德春编写。

由于编者水平有限，不妥之处恳请读者批评指正。

编 者  
2016年8月

# 目 录

第一章 直流电路	1
第一节 电路的基本概念	1
第二节 电路的基本定律	7
第三节 电路的等效变换	10
第四节 电路的基本分析方法	16
第五节 电路的基本定理	18
第六节 电容器	22
第二章 正弦交流电路	30
第一节 正弦交流电的基本概念	30
第二节 单相正弦交流电路	38
第三节 电阻、电容、电感串并联交流电路及谐振电路	46
第四节 三相交流电路	54
第五节 安全用电常识	58
第三章 变压器与电动机	62
第一节 磁路	62
第二节 铁芯线圈和电磁铁	68
第三节 变压器	73
第四节 三相异步电动机	79
第五节 单相异步电动机	85
第六节 直流电动机	88
第七节 控制微电机	90
第四章 常用控制电器	93
第五章 半导体器件	108
第一节 半导体基本知识	108
第二节 半导体二极管	114
第三节 晶体三极管	119
第四节 场效应管	125
第五节 单结晶体管 and 晶闸管	132
第六章 交流放大电路	137
第一节 基本交流放大电路	137
第二节 放大电路的静态分析	141

第三节	放大电路的动态分析	144
第四节	静态工作点的稳定	151
第五节	射极输出器	154
第六节	多级放大电路及耦合方式	157
第七节	功率放大电路	160
<b>第七章</b>	<b>反馈和振荡</b>	<b>169</b>
第一节	反馈电路	169
第二节	振荡电路	181
<b>第八章</b>	<b>集成运算放大电路</b>	<b>197</b>
第一节	差动放大电路	197
第二节	集成运算放大器	200
第三节	集成运算放大器的应用电路	204
第四节	集成运算放大器使用常识	209
<b>第九章</b>	<b>直流稳压电源</b>	<b>213</b>
第一节	整流电路	213
第二节	滤波电路	219
第三节	稳压电路	223
第四节	开关电源	228
第五节	逆变电路	230
<b>第十章</b>	<b>门电路及逻辑电路</b>	<b>235</b>
第一节	数字电路基础	235
第二节	逻辑代数	238
第三节	基本逻辑门电路	253
第四节	集成门电路	258
第五节	组合逻辑电路	261
<b>第十一章</b>	<b>触发电路及时序逻辑电路</b>	<b>281</b>
第一节	触发器	281
第二节	常用时序逻辑电路	290
<b>第十二章</b>	<b>模数与数模转换器</b>	<b>304</b>
第一节	D/A 转换器	304
第二节	A/D 转换器	308
<b>影像电子学基础实验</b>		<b>311</b>
实验一	几种常用仪器仪表的使用	311
实验二	万用表的使用	313

实验三	电阻元件伏安特性测试 .....	318
实验四	直流电路中电位的测量 .....	320
实验五	叠加定理的验证 .....	321
实验六	常用电器元件 .....	324
实验七	电烙铁的使用 .....	328
实验八	$RLC$ 串联谐振电路 .....	331
实验九	三相异步电动机及其控制电路 .....	333
实验十	变压器测试 .....	334
实验十一	继电器的测试 .....	336
实验十二	晶体管的简单测试 .....	339
实验十三	共发射极单管交流放大电路 .....	341
实验十四	集成运算放大器的应用 .....	346
实验十五	直流稳压电源电路测试 .....	348
实验十六	门电路和组合逻辑电路 .....	351
实验十七	计数译码和显示 .....	354

# 第一章 直流电路

随着科学技术的飞速发展,现代电子设备种类日益增多,规模和结构日新月异,其应用渗透到了各行各业。在医疗行业中先进医疗仪器已被广泛使用,各种现代医学影像设备已普及到各级医疗单位,但无论电器设备怎样制造和更新,每一种电器设备几乎都是由各种基本电路组成的,各种电路都遵循电路的基本规律。因此,学习电路的基础知识,掌握分析电路的规律与方法,是学习电工、电子学的重要内容,也是进一步学习电机、电器和电子技术的基础。对一个未来使用与维护大型医学影像成像设备的高级专业技术人员,更有必要掌握基本的电工、电子学基础知识。本章学习的重点是掌握电路的一些基本概念、基本元件特性和电路遵循的基本定律、定理。

## 第一节 电路的基本概念

### 一、电路和电路模型

1. 电路 电路是电流的通路,是由一些电气设备和元器件按一定的方式连接而构成的整体,它提供了电流流通的路径。实际电路的组成方式多种多样,但通常由电源、负载和中间环节三部分组成。电源是向电路提供电能的装置,它可以将其他形式的能量,如化学能、热能、机械能、原子能等转换为电能。负载是消耗电能的装置,其作用是把电能转换为其他形式的能(如机械能、热能、光能等)。通常在生产与生活中经常用到的电灯、电动机、电炉、扬声器等用电设备,都是电路中的负载。中间环节在电路中起着传递电能、分配电能和控制整个电路的作用。最简单的中间环节即开关和连接导线;一个实用电路的中间环节通常还有一些保护和检测装置。复杂的中间环节可以由许多电路元件组成的网络系统。如果某个电路元器件数很多且电路结构较为复杂,通常又把这些电路称为电路网络。在图 1-1 所示的手电筒照明电路中,电池作电源,灯作负载,导线和开关作为中间环节将灯和电池连接起来。

实际应用电路,按照功能的不同可概括为两大类:一是完成能量的传输、分配和转换的电路。如图 1-1 中,电池通过导线将电能传递给灯,灯将电能转化为光能和热能。这类电路的特点是大功率、大电流;二是实现对电信号的传递、转换、储存和处理的电路,如图 1-2 是一个扩音机的工作过程。话筒将声音的振动信号转换为电信号即相应的电压和电流,经过放大处理后,通过电路传递给扬声器,再由扬声器还原为声音。这类电路特点是小功率、小电流。

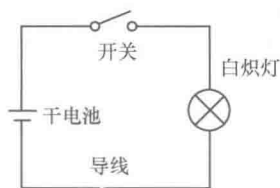


图 1-1 手电筒照明电路

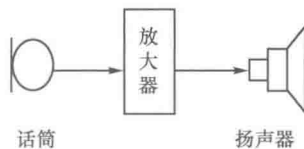


图 1-2 扩音机电路



2. 电路模型 实际电路由各种电路元件组成,每一种电器元件的性能和作用往往是多方面的。在电路理论研究中,为了便于实际电路的分析和计算,通常在实际允许的条件下对实际电路进行模型化(理想化)处理,即突出其主要电磁性能,忽略其次要因素,将实际电路器件抽象为一个只具有某种单一电磁性质的理想电器元件。

例如,白炽灯泡的主要性能是电阻性,即电流通过灯泡,将电能转化为光能和热能,但电流通过灯丝又会产生磁场,因此灯丝同时有电感性;电容器的主要性能是电容性,但同时又有漏电阻和分布电感;电感线圈的主要性能是电感性,同时又具有电阻性和电容性等。我们在研究和分析问题,要抓住其主要因素,忽略其他次要的电磁特性,对整个电路进行分析和运算。例如,忽略白炽灯泡的电感性,把它看成只有电阻特性的理想电阻元件,即纯电阻元件;实际电容器忽略漏电阻和分布电感,即可看成是只有电容特性的纯电容元件;实际电感线圈忽略电阻性和电容性,即可看成是一个只有电感特性的纯电感线圈。

将实际电路器件理想化而得到的元件,称为理想电路元件,简称为电路元件。显然理想电路元件只有单一的电磁性能。常用的有表示将电能转换为热能的电阻元件、表示电场性质的电容元件、表示磁场性质的电感元件及电压源元件和电流源元件等,其电路符号如表 1-1 所示。表 1-2 列出了部分电器图形符号。

表 1-1 部分理想电路元件的图形符号

名称	符号	名称	符号	名称	符号
理想导线		电阻		电感	
连接的导线		可变电阻		受控电压源	
电位参考点		电容		二端元件	
开关		电流源		理想变压器耦合电感	
开路		受控电流源			
短路		电压源			

表 1-2 部分电路图形符号

名称	符号	名称	符号	名称	符号
导线		电阻		可变电阻	
连接的导线		传声器		电池	
接地		熔断器		电容	
接机壳		二极管		稳压二极管	
开关		隧道二极管		线圈	
灯泡		电流表		三极管	
直流发电机		电压表		变压器	

续表

名称	符号	名称	符号	名称	符号
交流发电机		三相发电机		铁芯变压器	
直流电动机		交流电动机		扬声器	

我们把由各种理想电路元件连接组成的电路称为实际电路的电路模型。一个实际电路元件不能简化为理想元件，但可以用理想元件画出等效电路。如图 1-1 中的电池对外提供电压的同时，内部也有内电阻消耗能量，所以电池可用电动势为  $E$  的理想电压源和内阻  $R_0$  串联表示。图 1-3 是图 1-1 的电路模型。

3. 电路工作状态 一般来说，电路有三种状态，第一种是电路处处相通形成回路，此时称为通路；第二种是电路某处断开，负载或电阻没有接入电路，电路中没有电流，称为开路或断路；第三种是电路某一部分原来存在电压的两端意外导通，叫做短路。其中短路可能损坏电源装置和元器件，是很危险的状态，必须加以避免。

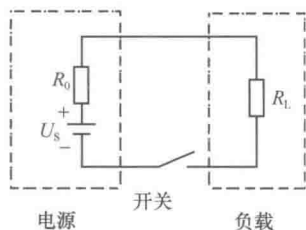


图 1-3 电路模型

## 二、电路的基本物理量

### (一) 电流

1. 电流 电荷的定向移动形成电流。电流的大小用电流强度来表示，电流强度简称为电流。电流强度的大小定义为：单位时间内通过导体横截面的电荷量，规定正电荷移动的方向为电流的方向。

方向不随时间变化的电流称为直流电流，常用 DC 或 dc 表示；大小和方向都不随时间变化的电流称为稳恒电流。电流强度的符号用大写字母  $I$  表示。设在时间  $t$  内通过某导体横截面的电量为  $Q$ ，则电流

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-1)$$

如果电流的大小和方向都随时间而变化，则称为交变电流，简称交流，通常用 AC 或 ac 表示，其电流强度的符号用小写字母  $i$  表示。设在时间  $t$  内通过某导体横截面的电量为  $dq$ ，则有

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

其中， $i$  表示随时间变化的电流， $dq$  表示在  $dt$  时间内通过导体横截面的电荷量。

在国际制单位中，电量的单位是库仑，用符号 C 表示；时间的单位是秒，用符号 s 表示；电流的单位是安培，简称安，用符号 A 表示，常用的电流单位还有毫安(mA)、微安( $\mu$ A)。它们之间的换算关系是

$$1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$$

在本章的理论分析中都以直流电流为例来讨论。

2. 电流的参考方向 在一个简单的电路中，电流从电源正极流出，经过负载，回到电

源负极, 电流的方向很容易判断; 在分析复杂电路时, 一般难于判断出电流的实际方向, 而列方程、进行定量计算时需要电流有一个约定的方向; 对于交变电流, 电流的方向随时间改变, 无法确定电流的方向。为此, 在分析电路时引入电流的“参考方向”这一概念。电流的参考方向就是在分析电路之前对一段电路中的电流任意假定的正方向, 这个方向称为电流的参考方向。某段电路中可用一个箭头表示某电流的参考方向。当电流的实际方向与参考方向一致时, 电流的数值就为正值(即  $I > 0$ ), 如图 1-4(a) 所示; 当电流的实际方向与参考方向相反时, 电流的数值就为负值(即  $I < 0$ ), 如图 1-4(b) 所示。需要注意的是, 未规定电流的参考方向时, 电流的正负没有任何意义, 如图 1-4(c) 所示。

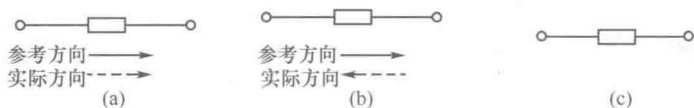


图 1-4 电流及其参考方向

## (二) 电压

1. 电压 电场力把单位正电荷从  $a$  点经外电路(电源以外的电路)移送到  $b$  点所做的功, 叫做  $a$ 、 $b$  两点之间的电压, 记作  $U_{ab}$ 。因此, 电压是衡量电场力做功本领大小的物理量。如图 1-5 所示的闭合电路, 在电场力的作用下, 正电荷要从电源正极  $a$  经过导线和负载流向负极  $b$ (实际上是带负电的电子由负极  $b$  经负载流向正极  $a$ ), 形成电流, 而电场力就对电荷做了功。

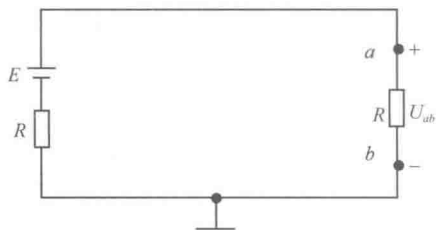


图 1-5 电压

若电场力将正电荷  $q$  从  $a$  点经外电路移送到  $b$  点所做的功是  $W$ , 则  $a$ 、 $b$  两点间的电压为

$$U = \frac{W}{q} \quad (1-3)$$

在国际制单位中, 电压的单位为伏特, 简称伏(V)。实际应用中, 常用的电压的单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏( $\mu\text{V}$ )。它们的换算关系是

$$1\text{kV} = 10^3\text{V} = 10^6\text{mV} = 10^9\mu\text{V}$$

电压也分直流电压与交流电压, 直流电压用大写字母  $U$  表示, 交流电压用小写字母  $u$  表示。

2. 电压的参考方向 电压的方向规定为正电荷在电场力作用下移动的方向, 即电压降低的方向, 因此电压也常称为电压降。在比较复杂的电路中, 往往不能事先知道电路中任意两点间的电压, 为了分析和计算的方便, 与电流的方向规定类似, 在分析计算电路时, 先任意假定电路中两点间电压的方向, 这个方向就称为电压的参考方向。通常电压的参考方向可以用实线箭头表示, 也可以用正负极性表示, 还可以用双下标表示, 如图 1-6 所示。如果采用双下标标记, 元件两端电压记作  $U_{AB}$ , 即表示电压的参考方向从  $A$  指向  $B$ ; 若电压参考方向选  $B$  点指向  $A$  点, 则应写成  $U_{BA}$ , 两者仅差一个负号, 即

$$U_{AB} = -U_{BA}$$

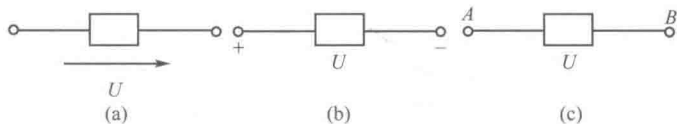


图 1-6 电压及其参考方向

当电压的参考方向选定时,若两点间电压  $U_{AB} > 0$ ,表示电压的实际方向与电压参考方向相同,即电压值为正;若两点间电压  $U_{AB} < 0$ ,表示电压的实际方向与参考方向相反,即电压值为负。电压的参考方向可以任意选取,但电压的实际方向是客观存在的,它不会因为参考方向的改变而改变。

原则上同一支路(或某一元件)电压的参考方向和电流的参考方向可以任意选定,但为了方便起见,一般都把电压的参考方向与电流的参考方向取为一致,通常将这种参考方向称为关联参考方向,反之称为非关联参考方向,如图 1-7 所示。本书的各项公式定理若无特殊说明,都默认为关联参考方向。

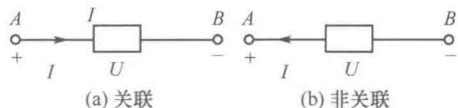


图 1-7 电压和电流的方向

**3. 电位及其分析计算** 为了分析问题方便,常在电路中指定一点作为参考点,假定该点的电位为零,用符号“ $\perp$ ”表示。在实际中,把地球作为零电位点,凡是机壳接地的设备,机壳电位即为零电位。有些设备或装置,机壳并不接地,这时把许多元件的公共点作为零电位点,用符号“ $\perp$ ”表示。

电路中某点相对于参考点的电压即是该点的电位,因此,任意两点间的电压等于这两点的电位之差,我们可以用电位的高低来衡量电路中某点电场能量的大小。

电路中各点电位的高低是相对的,参考点不同,各点电位的高低也不同,但是电路中任意两点之间的电压与参考点的选择无关。电路中,凡是比参考点电位高的点,电位是正值;比参考点电位低的点,电位是负值。

**例 1-1** 电路如图 1-8 所示,求开关 S 断开和闭合时 A、B 两点的电位  $U_A$ 、 $U_B$ 。

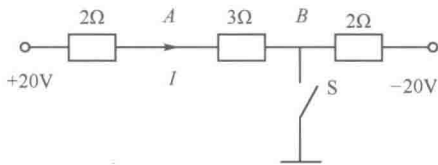


图 1-8 例 1-1 电路图

**解** 设电路中电流为  $I$ ,如图 1-8 所示。

开关 S 断开时

$$I = \frac{20 - (-20)}{2 + 3 + 2} = \frac{40}{7} (\text{A})$$

因为  $20 - U_A = 2I$ , 所以

$$U_A = 20 - 2I = 20 - 2 \times \frac{40}{7} = \frac{60}{7} (\text{V})$$

$$U_B = 20 - (2+3)I = 20 - 5 \times \frac{40}{7} = -\frac{60}{7}(\text{V})$$

开关 S 闭合时

$$I = \frac{20-0}{2+3} = 4(\text{A})$$

$$U_A = 3I = 3 \times 4 = 12(\text{V})$$

$$U_B = 0\text{V}$$

### (三) 电功率

电流通过电路时传输或转换电能的速率,即单位时间内电场力所做的功,称为电功率,简称功率。数学描述为

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-4)$$

其中,  $p$  表示功率。国际单位制中,功率的单位是瓦特(W)。常用的功率单位还有千瓦(kW)。

$$1\text{kW} = 10^3\text{W}$$

将式(1-4)等号右边分子、分母同乘以  $dq$  后,变为

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

可见,电路元件的功率等于元件上的电压乘以电流。电流电压无论是否选取关联方向,只要  $p > 0$ ,则该元件就是在吸收功率,即消耗功率,该元件为负载;若  $p < 0$ ,则该元件是在发出功率,即产生功率,该元件为电源。

实际电路中,电阻元件的电压与电流的实际方向总是一致的,说明电阻总在消耗能量;而电源则不然,其功率可能正也可能为负,这说明它可以作为电源提供电能,也可能被充电,吸收功率。

根据能量守恒定律,对于一个完整的电路,发出功率的总和应正好等于吸收功率的总和。

### (四) 电能

电路在一段时间内消耗或提供的能量称为电能。根据式(1-4),电路元件在  $t_0$  到  $t$  时间内消耗或提供的能量为

$$W = \int_{t_0}^t p dt \quad (1-6a)$$

直流时

$$W = p(t - t_0) \quad (1-6b)$$

在国际单位制中,电能的单位是焦耳(J)。1J 等于 1W 的用电设备在 1s 内消耗的电能。通常电业部门用“度”作为单位测量用户消耗的电能,“度”是千瓦时(kW·h)的简称。1度(或 1 千瓦时)等于功率为 1 千瓦的元件在 1 小时内消耗的电能。

$$1 \text{度} = 1\text{kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{J}$$

如果通过实际元件的电流过大,会由于温度升高使元件的绝缘材料损坏,甚至使导体熔化;如果电压过大,会使绝缘击穿,所以必须加以限制。

电气设备或元件长期正常运行的电流允许值称为额定电流，其长期正常运行的电压允许值称为额定电压；额定电压和额定电流的乘积为额定功率。通常电气设备或元件的额定值标在产品的铭牌上。如一白炽灯标有“220V，40W”，表示它的额定电压为220V，额定功率为40W。

## 第二节 电路的基本定律

### 一、欧姆定律

#### (一) 部分电路欧姆定律

在对电路某一支路进行分析时，电路中某个元件上的电压和电流的关系遵循欧姆定律。欧姆定律的内容为：流过导体的电流与这段导体两端的电压成正比，与这段导体的电阻成反比。假设有一段电路的电阻为 $R$ ，加在其两端的电压为 $U$ ，则该段电路中的电流 $I$ 为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-7)$$

这一规律只适用于一段不含电源的电阻电路，称为部分电路的欧姆定律。

#### (二) 闭合电路欧姆定律

对于一个完整的闭合电路一定含有电源，假设该电路电源的电动势为 $E$ ，内阻为 $R_0$ ，外电路电阻为 $R$ ，则该电路中的电流 $I$ 为

$$I = \frac{E}{R + R_0} \quad (1-8)$$

上式称为闭合电路欧姆定律。式中，电阻 $R$ 或 $(R+R_0)$ 反映了电阻元件阻碍电流的能力，其单位为欧姆，符号 $\Omega$ 。电阻越大，表示导体对电流的阻碍作用越大，导体的导电能力越小。为了表示导体导电能力的大小，引入了电导这个概念，规定电阻的倒数为电导，符号 $G$ 。

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-9)$$

电导反映了电阻元件允许电流通过的能力，电导的单位是西门子，符号 $S$ ， $1S = \frac{1}{1\Omega}$ 。这样欧姆定律又可以表示成

$$I = GU \quad (1-10)$$

#### (三) 电阻分类

随着电子技术的发展和电路分析的需要，电阻元件的广义定义为：如果一个二端元件在任一时刻的电压 $U$ 与其电流 $I$ 的关系，可由 $U-I$ 平面上的一条曲线确定，则此二端元件被称为电阻元件，其数学表达式是

$$f(U, I) = 0 \quad (1-11)$$

这条曲线称为电阻的伏安特性曲线。这样电阻元件按曲线又可分为线性时变电阻、线性非时变电阻、非线性非时变电阻和非线性时变电阻四种，如图1-9所示。在不作特别声明的

情况下，本书所指的电阻为线性非时变电阻。

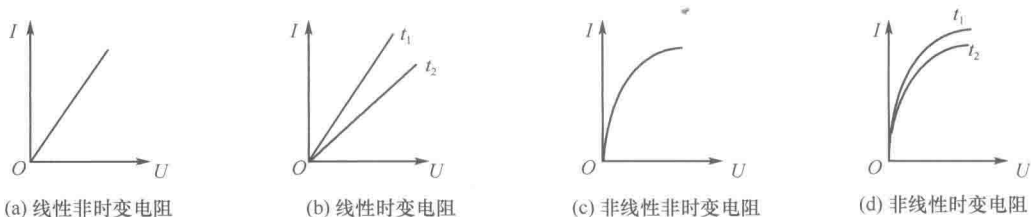


图 1-9 伏安特性

## 二、基尔霍夫定律

基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律(KCL)和基尔霍夫电压定律(KVL)，它反映了电路中所有各支路电压和电流所遵循的基本规律，是电路分析的基础。

### (一) 常用电路名词

基尔霍夫定律是与电路结构有关的定律，在研究基尔霍夫定律之前，先介绍几个有关的常用电路名词。

1. **支路** 任意两个节点之间无分支的电路称为支路。同一支路中电流处处相等。如图 1-10 中的 *bafe* 支路，*be* 支路，*bcde* 支路。含有电源的支路称为有源支路，如 *bafe* 支路为有源支路；没有电源的支路称为无源支路，如 *bcde* 支路为无源支路。

2. **节点** 电路中，三条或三条以上支路的连接点称为节点。如图 1-10 中的 *b* 点，*e* 点。

3. **回路** 电路中任一闭合路径称为回路。如图 1-10 中的 *abefa* 回路、*bcdeb* 回路、*abcdefa* 回路。

4. **网孔** 路内不含支路的回路称为网孔。如图 1-10 中 *abcdefa* 回路和 *bcdeb* 回路都是网孔，而 *abefa* 回路不是网孔。网孔一定是回路，回路不一定是网孔。

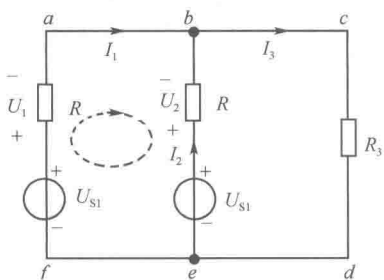


图 1-10 电路举例

### (二) 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律确定了电路中任意节点上各支路电流之间的关系。根据电流的连续性原理，在任意时刻电路中的任何一点，都不可能发生电荷堆积，所以基尔霍夫电流定律指出：对于任何电路中的任意节点，在任意时刻，流入该节点的电流之和恒等于流出该节点的电流之和。

其数学表达式为

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}} \quad (1-12)$$

如图 1-10 中的 *b* 节点，则有

$$I_1 + I_2 = I_3$$

这一规律又称为基尔霍夫第一定律，又叫做节点电流定律。如果规定流入节点电流为正，流出节点电流为负，则电路中某个节点所有支路电流的代数和恒为零。

$$\sum I = 0 \quad (1-13)$$

如图 1-11 所示, 对于节点  $O$  则有

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$

或

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

基尔霍夫电流定律不仅适用于电路中的任一节点, 也可推广应用于广义节点, 即包围部分电路的虚拟的封闭面。无论虚拟的封闭面内有多少个元件, 电路如何连接, 流入封闭面内的电流之和恒等于流出封闭面的电流之和。

在图 1-12 中, 对于虚线所包围的封闭面, 可以证明有如下关系

$$I_a - I_b - I_c = 0$$

在图 1-10 中, 对于节点  $b$ 、 $c$  可写出电流方程:

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

显然上面两个方程只有一个是独立的, 一般来说, 电路中有  $n$  个节点, 只能写出  $(n-1)$  个独立的节点电流方程。

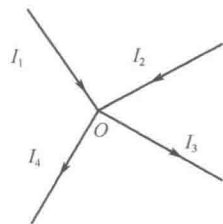


图 1-11

**例 1-2** 在图 1-11 中已知  $I_1=2\text{A}$ ,  $I_2=-1\text{A}$ ,  $I_3=5\text{A}$ , 求电流  $I_4=?$

**解** 本题可以用基尔霍夫电流定律解出, 首先, 假定所求电流的参考方向, 并在电路中用箭头标出, 如图所示, 然后对节点  $A$  列出 KCL 方程:

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$

将已知数据代入上式得

$$2 + (-1) = 5 + I_4$$

解得  $I_4 = -4\text{A}$ 。

答案为负值, 说明  $I_4$  的实际方向与参考方向相反。

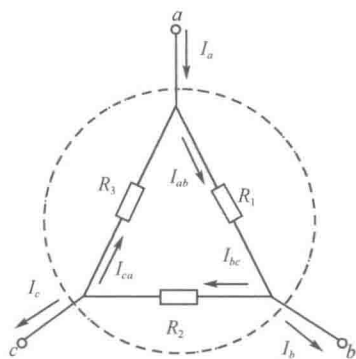


图 1-12 广义节点

### (三) 基尔霍夫电压定律

**1. 基尔霍夫电压定律的内容** 基尔霍夫电压定律反映电路中任一闭合回路中各支路电压之间的关系。如果从回路中某一点出发, 沿回路绕行一周再回到出发点, 回路中有的地方电位升, 有的地方电位降, 但其升降的总和为零。因此基尔霍夫电压定律的内容为: 对于任何电路中任一回路, 在任一时刻, 沿着回路绕行一周(顺时针方向或逆时针方向), 各段电压的代数和恒为零。其数学表达式为

$$\sum U = 0 \quad (1-14a)$$

$$\sum U_{\text{升}} = \sum U_{\text{降}} \quad (1-14b)$$

这一定律又称为基尔霍夫第二定律或回路电压定律。

**2. 基尔霍夫电压定律的应用** 在应用基尔霍夫电压定律分析电路时, 首先要假设回路的绕行方向及电压的参考方向, 当某段电路电压的参考方向与回路绕行方向一致时, 该段电路的电压取正值; 当某段电路电压的参考方向与回路绕行方向相反时, 该段电路的电压



取负值。一般电流电压取关联参考方向。

如图 1-10 所示的闭合回路中，电压参考方向如图所示，沿 *abefa* 顺时针绕行一周，则有

$$-U_{S1} + U_1 - U_2 + U_{S2} = 0$$

由于  $U_1 = R_1 I_1$  和  $U_2 = R_2 I_2$ ，代入上式有

$$-U_{S1} + R_1 I_1 - R_2 I_2 + U_{S2} = 0$$

或

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 = U_{S1} - U_{S2}$$

这时，基尔霍夫电压定律可表述为：对于电路中任一回路，在任一时刻，沿着一定的绕行方向(顺时针方向或逆时针方向)绕行一周，电阻元件上电压降之和恒等于电源电压升之和。其表达式为

$$\sum RI = \sum U_S \quad (1-15)$$

KVL 不仅适用于闭合回路，也适用于虚拟回路。在图 1-13 中，有

$$U = 2I + 4$$

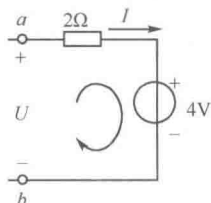


图 1-13 虚拟回路

**例 1-3** 在图 1-14 中， $I_1 = 3\text{mA}$ ， $I_2 = 1\text{mA}$ 。试确定电路元件 3 中的电流  $I_3$  和其两端电压  $U_{ab}$ ，并说明它是电源还是负载。

**解** 电流参考方向如图所示，根据 KCL，对于节点 *a* 有

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

代入数值得

$$(3-1) + I_3 = 0, \quad I_3 = -2\text{mA}$$

根据 KCL 和图 1-14 右侧网孔所示绕行方向，可列出回路的电压平衡方程式为

$$-U_{ab} - 20I_2 + 80 = 0$$

代入  $I_2 = 1\text{mA}$  数值，得

$$U_{ab} = 60\text{V}$$

显然，元件 3 两端电压和流过它的电流实际方向相反，是产生功率的元件，即元件 3 是电源。

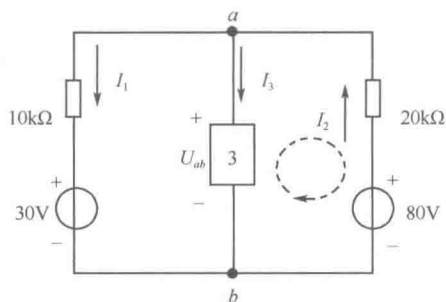


图 1-14 例 1-3 图

### 第三节 电路的等效变换

等效变换是电路分析的一种基本方法，即将复杂的电路部分用一个简单的电路代替，或者将一个复杂电路化简为一个简单电路，使电路分析变得简单化，这种分析电路的方法叫做等效变换。

#### 一、电阻的串联、并联、混联及等效变换

##### (一) 电阻的串联

1. 电阻的串联 当电阻与电阻首尾相连时称电阻串联，图 1-15(a)所示为  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  三个电阻组成的串联电路。 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  的串联总电阻可以用一个电阻  $R$  来等效代替，如图 1-15(b)所示。