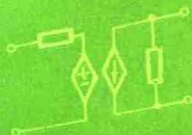
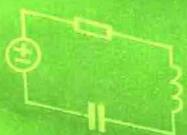


电工基础

主编 乔 军

副主编 任伯祥 程宝柱



延边大学出版社

1988年12月

责任编辑 安承业

责任校对 乔 军

封面设计 张 荣

内 容 简 介

本书是吉林省教委组织的编写小组根据原机械工业部、水利电力工业部及有关军校审订的高等工业专科学校《电工基础教学大纲》编写的。本书以经典内容为主，力图重点突出，层次清楚，理论联系实际，使用的符号贯彻国家标准，例题比较丰富，每章后有习题，以体现高等工程专科层次的特色和要求。

本书共十四章，即电路模型和电路定律、电路的等效变换法、网络方程法、网络定理、正弦电流电路、具有互感的电路、三相电路、非正弦周期电流电路、磁路和有铁心线圈的交流电路、一阶电路和二阶电路、二端口网络、网络图论和网络方程、拉普拉斯变换、非线性电阻电路。

本书适用于电力、工业自动化、航空电气等电类专业。考虑到未设电机学作为后续课程各专业的要求，增加了磁路和有铁心线圈的交流电路等内容，因此，也可供无线电技术类专业使用。本书可作为高等工业专科学校教材，也可供工程技术人员参考。

电 工 基 础

主 编 乔 军

副主编 任伯祥 崔宝柱

*

延边大学出版社出版发行

长春大学印刷厂 印刷

*

开本 787×1092毫米 1/16 印张 23 字数 517,000

1988年12月第1版 1988年12月第1次印刷

印数 00,001—3,000

ISBN 7-5634-0098-6/TM·6(课)

定价 6.20 元



序 言

《中共中央关于教育体制改革的决定》指出：我国的高等教育要“改变专科、本科比例不合理的状况，着重加快高等专科教育的发展。”原教育部1984年3月在《关于高等工程教育层次、规格和学习年限调整改革问题的几点意见》中，要求“高等工程专科教育要切实改变在业务培养上向本科看齐的状况，努力办出自己的特色。”迄今为止，在我国国内，尚未见到正式出版的高等工程专科各电类专业用的《电工基础》教材，许多专科院校仍在使用本科教材，根据有关教学大纲进行取舍，有时还需另编一些补充讲义和习题，给教学工作带来了不便，在客观上容易产生向本科看齐的倾向，不利于突出专科层次特色。编写具有专科特色，满足专科教学需要的教材，实属迫切任务。为此，在吉林省教委的组织领导下，由吉林工业大学、空军第二航空技术专科学校、长春大学、吉林电力职工大学组成的联合编审小组，编审了这本适用于工程专科各电专业的《电工基础》教材，做了一件适时而有益的工作。

本书是根据原机械工业部、水利电力工业部及有关军校颁发的《电工基础教学大纲》编写的，符合本门课程在教学计划中的地位和作用，取材合适，深广度要求恰当，体现了与本科教材的区别。本书以经典电路理论知识为主，注重对电路基本概念、原理的深入阐述，重点突出；适当编入了一些近代电路理论知识，符合发展的需要。本书注意理论联系实际，提高教材的针对性。本书在结构体系上注意贯彻系统性原则，层次清楚，循序渐进。本书还选编了较丰富的习题，有利于完成对学生分析能力的基本训练，有利于自学。本书所采用量及其单位的名称和符号，均遵照我国法定计量单位和国家标准，采用国际单位制。

本书编审的分工是：长春大学的丁自力同志编写第一、十四章，任伯祥同志编写第二、三、四章，吉林电力职工大学的戴凤斌同志编写第七、八、九章，空军第二航空技术专科学校的程宝柱同志编写第十、十二章，邢柏森同志编写第十一、十三章，乔军同志编写第五、六章并对全书顺笔主编，吉林工业大学的王万树同志担任主审，对全书做了认真的审查。此外，空军第二航空技术专科学校的袁宏飞同志也参加了本书的审校工作，长春大学的李正解同志负责全书的绘图。

本书的编写参考了俞大光、邱关源、李瀚荪、周孔章、周长源等老师所编教材，希望从这些久经锤炼的优秀教材中得到教益，并力图体现专科层次特色。但是，编写专科《电工基础》教材还只是一个初步尝试，审校时间也不充裕，定有不当之处，希望试用一段时间，通过实践检验并得到各方面帮助，以便修订再版时进一步提高质量。

东北电力学院教授、吉林省电工技术学会副理事长 马昭彦

1988年5月

目 录

第一章 电路模型和电路定律	(1)
§1-1 电路和电路模型	(1)
§1-2 电路的基本变量	(4)
§1-3 电阻元件	(8)
§1-4 电容元件	(11)
§1-5 电感元件	(14)
§1-6 电压源和电流源	(17)
§1-7 受控源	(20)
§1-8 基尔霍夫定律	(21)
习题	(25)
第二章 电路的等效变换法	(29)
§2-1 电路的等效条件	(29)
§2-2 无源二端网络的等效变换	(30)
§2-3 无源三端网络的等效变换	(35)
§2-4 电源模型的等效变换	(37)
§2-5 含受控源电路的等效变换	(42)
习题	(45)
第三章 网络方程法	(51)
§3-1 支路法	(51)
§3-2 回路法	(53)
§3-3 节点法	(57)
习题	(61)
第四章 网络定理	(64)
§4-1 叠加定理	(64)
§4-2 替代定理	(67)
§4-3 等效电源定理	(69)
§4-4 最大功率传递定理	(73)
§4-5 互易定理	(75)
习题	(77)
第五章 正弦电流电路	(81)
§5-1 正弦交流电的基本概念	(81)
§5-2 正弦量的相量表示法	(85)
§5-3 正弦电流电路中的电阻、电感和电容	(91)
§5-4 电阻、电感、电容串联电路和复数阻抗	(95)

§5-5	电阻、电感、电容并联电路和复数导纳	(99)
§5-6	阻抗和导纳的等效变换	(101)
§5-7	阻抗(导纳)的串联和并联	(104)
§5-8	正弦电流电路的功率	(106)
§5-9	实际元件的电路模型	(112)
§5-10	正弦电流电路的计算	(115)
*§5-11	最大功率传输	(120)
§5-12	串联谐振	(123)
§5-13	并联谐振	(128)
	习题	(132)
第六章	具有互感的电路	(139)
§6-1	互感	(139)
§6-2	互感电路的计算	(144)
§6-3	空心变压器	(151)
§6-4	理想变压器	(154)
	习题	(157)
第七章	三相电路	(161)
§7-1	对称三相电源的基本概念	(161)
§7-2	三相电源的联结	(163)
§7-3	三相负载的联结	(166)
§7-4	对称星形联结负载电路的计算	(168)
§7-5	对称三角形联结负载电路的计算	(171)
*§7-6	多组对称负载的三相电路	(175)
§7-7	星形联结不对称三相电路	(177)
§7-8	三相电路中的功率	(180)
	习题	(184)
第八章	非正弦周期电流电路	(187)
§8-1	非正弦周期电流的产生	(187)
§8-2	周期函数分解为傅立叶级数	(188)
§8-3	波形对称性与傅立叶系数的关系	(191)
§8-4	非正弦周期电流的有效值、平均值和有功功率	(193)
§8-5	非正弦周期电流电路的计算	(195)
§8-6	滤波器的概念	(198)
*§8-7	对称三相电路中的高次谐波	(201)
	习题	(204)
第九章	磁路和有铁心线圈的交流电路	(207)
§9-1	磁场的基本物理量及其相互关系	(207)
§9-2	铁磁物质的磁化	(210)

§9-3	磁路及其基本定律	(215)
§9-4	恒定磁通磁路的计算	(217)
§9-5	交流铁心线圈的电压、电流和磁通	(220)
§9-6	铁心的能量损耗	(222)
§9-7	铁心线圈的相量图及等效电路模型	(224)
习题		(227)
第十章	一阶电路和二阶电路	(230)
§10-1	电路的初始条件	(230)
§10-2	一阶电路的零输入响应	(233)
§10-3	一阶电路的零状态响应	(239)
§10-4	一阶电路的全响应	(246)
§10-5	阶跃函数与阶跃响应	(249)
§10-6	冲激函数与冲激响应	(253)
§10-7	二阶电路的零输入响应	(257)
习题		(265)
第十一章	二端口网络	(269)
§11-1	二端口网络的基本概念	(269)
§11-2	二端口网络的方程和参数	(270)
§11-3	二端口网络的等效电路	(277)
§11-4	二端口网络的联结	(279)
§11-5	二端口网络的转移函数	(281)
习题		(282)
第十二章	网络图论和网络方程	(285)
§12-1	图的基本概念	(285)
§12-2	图的矩阵表示	(288)
§12-3	复合支路与方程	(291)
§12-4	节点法	(293)
§12-5	改进节点法	(298)
§12-6	特勒根定理	(301)
习题		(303)
第十三章	拉普拉斯变换	(307)
§13-1	拉普拉斯变换的定义	(307)
§13-2	拉普拉斯变换的基本性质	(308)
§13-3	拉普拉斯反变换	(312)
§13-4	电路模型和电路定律的运算形式	(319)
§13-5	利用拉普拉斯变换分析线性电路	(323)
§13-6	网络函数	(328)

习题	(333)
第十四章 非线性电阻电路	(337)
§14-1 非线性电阻元件的伏安特性	(337)
§14-2 非线性电阻电路方程的编写	(340)
§14-3 非线性电阻电路的图解法	(341)
§14-4 非线性电阻电路的小信号法和折线法	(344)
习题	(347)
各章习题答案	(349)

第一章 电路模型和电路定律

本章主要内容有：电路模型、电流、电压等电路基本变量及其参考方向的概念，电阻、电容、电感、电压源、电流源、受控源等电路元件的基本特性（元件约束）和反映元件联接特性的基本规律（拓扑约束）——基尔霍夫定律。这些都是本书的重要基础知识，读者应牢固掌握。

§1-1 电路和电路模型

一、电路的组成和作用

电路(circuit)就是电流通过的路径。实际电路是由各种电器设备和元器件组成的。电在日常生活、工农业生产、科研以及国防等各个方面都有广泛的应用。在电力、自动控制、通讯、计算机等各个系统中，所应用的各种电路，尽管种类繁多、千差万别，各起着不同的作用，但就电路的基本组成而言，大体上可分为电源、负载、传输和控制几大部分。

电路的作用主要是实现能量的传输和转换。在电路中，进行着从其它形式的能量转换成**电能**（electric energy）、电能的传输和分配以及把电能转换成其它形式能量的过程。典型的例子是电力系统，发电厂的发电机把热能或原子能或水位能等转换成电能，通过变压器、输电线和控制等设备输配给各用电单位，用电户应用各种用电设备又把电能转换成机械能、光能、热能等，这样就构成了一个**电路或系统**（system）。我们把供给电能的设备称为**电源**（source），而把用电设备称为**负载**（load）。

电路的另一个重要作用是实现信号的处理。通常人们把反映信息（语言、文字、图象、电码等）特征的电压和电流称为**电信号**，简称**信号**（signal）。通过电路，可以把**输入**（input）信号即**激励**（excitation）变换成所需要的**输出**（output）信号即**响应**（response）。例如，收音机和电视机中的放大器电路可以把微弱的输入信号放大，输出较强的信号；调谐电路可以选择出所需要的信号而滤除其它信号。所以象放大器和调谐电路的作用就是处理激励信号使之成为所要求的响应。

二、理想电路元件和电路模型

实际的电路，从简单的手电筒电路到复杂的电力系统，种类繁多。例如，电源就有各种类型的蓄电池、干电池、光电池、发电机等等，负载方面有各种灯具、电动机等等数不清的用电设备。如果我们都就实际的元件和电路研究，那将是很麻烦的，同时也是不可能的。但是，种类繁多的实际电路元件，它们在电磁现象方面却具有共同的地方。有的元件主要是消耗电能的，如各种电阻器、电灯、电炉等，当电流通过它们时，可把电能转换成热能。虽然还会产生磁场，还兼有电感的性质，但电感很小，可以忽略不计，所以这类实际电路元件，都可以用理想电阻元件来近似地代替。有的元件主要是储存磁场能量的，如各式各样的线圈，当导线的电阻可以忽略时，则可以用一个理想电感

元件来近似地代替，当导线的电阻不能忽略时，则可以用一个理想电阻元件和一个理想电感元件的串联组合来代替。有的元件主要是储存电场能量的，如各种类型的电容器，当能量损耗很小可以忽略时，则可用一个理想电容元件来代替。还有一种类型的元件主要是供给电能的，如电池和发电机。电池等直流电源如内电阻不能忽略时，就可以用一个理想电压源和一个理想电阻元件的串联组合来代替。就这样，我们可以把繁多的实际元件，按其电磁性质用理想元件或其组合来近似地代替。理想电路元件简称为**电路元件** (circuit element)。每一种理想电路元件都可以用一种数学模型或图形符号等表示。常见的理想电路元件符号如图1-1所示。其中图(a)是理想电阻元件，只消耗电能，是耗能元件；图(b)是理想电感元件，只储存磁场能量，是储能元件；图(c)是理想电容元件，只储存电场能量，是储能元件；图(d)是理想电压源，能产生恒定电压 U_s 。图(e)是理想电流源，能产生恒定电流 I_s ；图(f)是理想开关，只有通断两种状态，且通、断瞬时完成；图(g)是理想导线，只导通电流，不消耗电能，即无电阻。

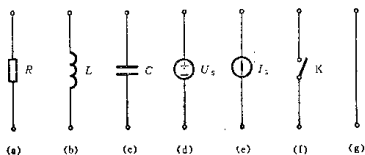


图1-1 常见的理想电路元件符号

把实际电路元件用理想电路元件及其组合来代替，就构成了与实际电路相对应的**电路模型** (circuit model)。今后我们所说的电路一般均指这种抽象电路，而把“理想”二字省去。如图1-2 (a)、(b) 分别是手电筒原理电路及其模型。其中，小灯泡用电阻元件 R_L 表示，干电池则用电压源 U_s 和电阻元件 R_s 的串联组合表示。

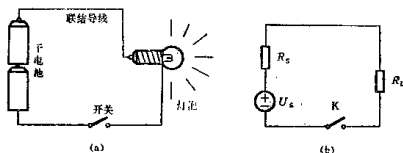


图1-2 手电筒原理电路及其电路模型

三、电路的分类

电路从不同的角度，可以分为不同的类型。

(一) 直流电路与交流电路

仅含直流电源的电路叫做直流电路；含交流电源的电路叫做交流电路。交流电路又可根据电源的电压或电流随时间变化的规律，分为正弦交流电路和非正弦交流电路。正弦交流电路按相数又可分为单相正弦交流电路和三相正弦交流电路，等等。

（二）稳态电路与暂态电路

直流电路和交流电路等各种电路，都可能处于两种不同的状态：一种叫做**稳态**（steady state），电路中的电流和电压都处在相对稳定状态（如为正弦电流，则其振幅、频率保持定值）；另一种叫做**暂态或瞬变状态**（transient state），在这种状态下，电路中的电流和电压都处在随时间的变化中，即电路处于从一种稳态到另一种稳态的过渡过程中。

（三）线性电路与非线性电路

如果元件的参数（如电阻、电感、电容等）与通过的电流或所加的电压无关，即不是电流或电压的函数时，这样的元件叫做**线性**（linear）元件；反之，叫做**非线性**（nonlinear）元件。由线性元件组成的电路叫做线性电路。含有非线性元件（如铁心线圈、晶体管等）的电路叫做非线性电路。本书主要讨论线性电路。

（四）简单电路与复杂电路

凡能用串并联简化的方法化为无分支电路的，叫做简单电路；反之，叫做复杂电路。如图1-3（a）、（b）就分别是简单电路和复杂电路。

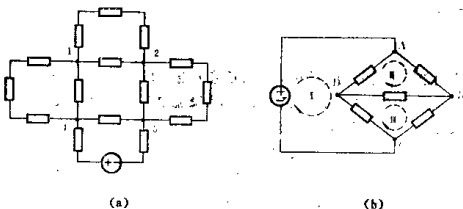


图1-3 简单电路和复杂电路

通常，在电路中三个或三个以上支路的联结点叫做**节点**（node），两个相邻节点间的每个分支叫做**支路**（branch），电路中任意闭合路径叫做**回路**（loop），在回路内部不另含有支路的回路叫做**网孔**（mesh）。

由于许多电路具有网状的联结形式，所以电路又叫做**网络**（network）。含有电源的网络叫做**有源网络**（active network），不含电源的网络叫做**无源网络**（passive network）。

（五）二端网络与多端网络

元件分二端元件和多端元件，图1-1标出的都是二端元件，象晶体三极管有三个引出端叫三端元件，把具有三个或三个以上引出端的元件叫多端元件。只有二个引出端的电路叫二端网络，含有三个或三个以上引出端的电路叫做多端网络。

(六) 集总电路与分布电路

如果实际电路的尺寸远小于电路工作时电磁波的波长, 可以认为电磁过程都是集中在元件内部进行的, 在任何时刻, 从具有两个引出端的理想元件的某一端流入的电流将恒等于从另一端流出的电流, 并且元件的两个引出端间的电压值也是完全确定的, 符合上述条件的电路元件称为**集总** (lumped) 参数元件, 简称集总元件, 又称为**分列元件** (separable element)。由集总元件构成的电路称为集总电路, 或具有集总参数的电路。如果不满足上述条件, 这样的电路叫做分布电路或具有分布参数的电路。本书只讨论集总电路, 分布电路将在微波技术等课程中讨论。

§1-2 电路的基本变量

一、电流

(一) 电流的概念

电荷有规律的运动即形成**电流** (electric current)。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向, 也就是以后所说的电流的真实方向。

电流的大小用电流强度来衡量, 我们把单位时间内通过导体横截面的电荷(量) (electric charge) 定义为电流强度, 电流强度简称为电流。

在任一瞬间电流的数值叫做电流的瞬时值, 用小写字母 i 表示, 它等于电荷(量) 的瞬时变化率。电流的定义式是

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

量值和方向都不随时间变动的电流称为**直流电流** (direct current), 简称直流 (d.c.); 周期性变动且平均值为零的电流称为**交流电流** (alternating current), 简称交流 (a.c.)。对于直流电流, 有

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2)$$

电荷(量)的基本单位是库[仑] (coulomb, 简写为C)。电流的基本单位是安[培] (ampere, 简写为A)。如果每秒钟通过导体横截面的电荷(量)为1库[仑], 则电流为1安[培]。实用中, 还有毫安 (mA)、微安 (μA) 等。

电流可以用电流表串联在电路中测量。测量直流电流时要注意仪表的正、负极性。

(二) 电流的参考方向

上面已经提到, 正电荷运动的方向就是电流的方向, 在导线内部流动的电流的实际方向只有两种可能, 如图1-4中虚线所示, 正电荷从A流向B或从B流向A。但在实际问题中, 电流的实际方向往往难以在电路图中标出。交流电路中的电流, 方向随时间变化, 不能用一个固定的箭头来表示实际方向。即使在直流电路中, 在分析较复杂电路时, 也往往难以事先判断电流的实际方向。为了解决这样的困难, 我们事先任意选定一个电流为正的方向, 叫做**正方向**或**参考方向** (reference direction), 在电路图中用实线箭头表示。如果电流的实际方向与参考方向一致, 则电流为正值; 如果两者相反, 则



图1-4 电流的参考方向与实际方向间的关系

电流为负值。这样，把电流看成代数数量，我们就可以利用电流的正负值结合着参考方向来表明电流的实际方向。所以，参考方向成了电流为正的标准。显然，在未选定参考方向的条件下来谈电流的正负是毫无意义的。

二、电位

(一) 电位的定义

当电路中建立起电场时，电荷在电路电场中的各点就具有一定的电位能。人们把试验正电荷在电场中某点所具有的电位能 W 同正电荷所带电荷 Q 的比值定义为该点的电位 (electrical potential) (或电势)。例如A点的电位为

$$V_A = \frac{W_A}{Q} \quad (1-3)$$

由于试验电荷对电场有影响，其电荷量应选得极小。因此，电位的较严格的定义式是

$$V_A = -\frac{dW_A}{dQ} \quad (1-4)$$

电能的单位是焦[耳] (joule)，用符号J表示。电位的单位是伏[特] (volt)，用符号V表示。如果1库仑正电荷在电路中某点所具有的能量为1焦耳，则该点的电位为1伏特。

(二) 电位的分布规律

在图1-5所示的电路中，电源正极的电位最高，电源负极的电位最低。当电流通过理想导线时，因为没有能量损失，所以同一段导线上各点电位相等。当电流通过电阻时，因为电阻要把电能转换为热能，正电荷所具有的电位能要减小，电位就要降低，这种电位降低叫做电位降，习惯上叫做电压降。在图1-5电路中，开关闭合时电位分布规律可用下式表示。

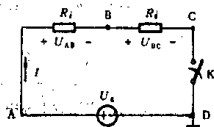


图1-5 电位分布规律

$$V_A > V_B > V_C = V_D$$

当开关断开时，电路没有电流，电阻上没有电压降，所以

$$V_A = V_B = V_C$$

(三) 电位的参考点

因为位能的高低都与参考点的选择有关，所以电位的数值也与参考点的选择有关。参考点是零位能点，在电场或电路中，也就是零电位点。在电路中，人们常把大地、电

器的共用金属机壳或飞机的机体等选作参考点。

电路中某点的电位，在数值上等于单位正电荷从该点移动到参考点电场力所做的功。例如在图1-5所示电路中，B点电位为

$$V_B = \frac{A_{BD}}{Q} \quad (1-5)$$

电位是个标量，有正负之分。因为参考点的电位为零，所以高于参考点的电位为正电位，低于参考点的电位为负电位。离开参考点的标定谈电位的正负是毫无意义的。参考点选择不同，各点电位随之改变。例如，在图1-5所示电路中，我们选择D点为参考点，即 $V_D = 0V$ ，并假设 $V_A = 10V$ ， $V_B = 3V$ ， $V_C = V_D = 0V$ 。若把参考点改在B点，则 $V_B = 0V$ 。因为 V_A 比 V_B 高7V， V_C 比 V_B 低3V，所以 $V_A = 7V$ ， $V_C = V_D = -3V$ 。由此还可以看出，参考点改变，各点电位随之改变，但是并不影响电路中任意两点之间电位的差值。

三、电压

(一) 电压的概念

电路中两点之间的电位差叫做电压 (voltage)。为了与其单位相区别，用符号 U 表示。电路中某点的电位，实际上也是该点与参考点之间的电位差，即该点与参考点之间的电压。两者的区别在于电位与参考点的选择有关，而电压与参考点的选择无关。电压是指任意两点间的电位差。例如，在图1-5所示的电路中，B、C两点间的电压记作 U_{BC} ，则

$$U_{BC} = V_B - V_C = \frac{W_B}{Q} - \frac{W_C}{Q} = \frac{W_B - W_C}{Q} = \frac{W_{BC}}{Q} = \frac{A_{BC}}{Q} \quad (1-6)$$

从式(1-5)可知，电路中B、C两点间的电压，等于单位正电荷从B点到C点电位能之差，即电场力所做的功。

电压也有正负之分。例如在图1-5所示电路中，以D点为参考点，假若 $V_A = 10V$ ， $V_B = 3V$ ，则

$$U_{AB} = V_A - V_B = 10 - 3 = 7V$$

$$\text{而 } U_{BA} = V_B - V_A = 3 - 10 = -7V$$

可见，在计算电压时，应注意下标中两点的先后次序。

(二) 电压的参考方向

电压的实际方向规定为由高电位点指向低电位点的方向，即电位降的方向。如同需要为电流规定参考方向一样，我们也需要为电压规定参考方向或参考极性。电压的参考方向可以用一个实线箭头表示，也可以用正(+)、负(-)极性来表示，正极指向负极的方向就是电压的参考方向。当电压的实际方向与它的参考方向一致时，电压为正值；反之，电压为负值。如图1-6所示。

电压的参考方向也是任意选定的，在未选定电压参考方向的情况下谈论电压的正负也是毫无意义的。只有根据参考方向配合电压的正值或负值才能表明电压的真实极性。

综上所述，既要为通过元件的电流任意选定参考方向，又要为元件两端的电压任意

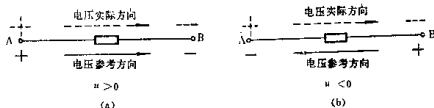


图1-6 电压的实际方向与参考方向之间的关系

选定参考方向。这两者本来是可以独立地任意选定的。但是，为了方便起见，在同一元件上人们常将两者的参考方向选得一致，如图1-7所示。这种参考方向，叫做关联参考方向。今后在电路图中，如果只标出电压或电流一个参考方向时，均系采用关联参考方向。参考方向是电路分析中的一个十分重要的概念。

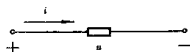


图1-7 关联参考方向

四、功率

如图1-8所示方框为电路的一部分，它可能是产生电能的电源，也可能是取用电能的负载。



图1-8 功率与电流电压参考方向的关系

在单位时间内电路吸收的电能，叫做电功率 (electric power)，常简称为功率，用 P 表示。在电压与电流的关联参考方向下，有

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UI t}{t} = UI \quad (1-7)$$

若功率是时间的函数，则电路吸收的瞬时功率的表达式为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{udq}{dt} = ui \quad (1-8)$$

电功率的单位是瓦[特] (watt)，简称瓦，用符号 W 表示。

当电压、电流采用关联参考方向时，如图1-8 (a) 所示，可用式 (1-7)、(1-8) 计算吸收的功率。

当采用非关联参考方向时，如图 (b) 所示，则计算吸收功率的公式应为

$$P = -UI \quad (1-9)$$

或

$$p = -ui \quad (1-10)$$

若算得的功率为正值，表示确是吸收的功率，电路元件是负载；若算得的功率为负值，表示是产生（或发出）功率，电路元件是电源。

§1-3 电 阻 元 件

一、线性电阻

电阻元件 (resistor) 是从实际电阻器中抽象出来的模型。

线性电阻元件是理想二端元件，它的电阻值是个常量，与通过的电流（或所加的电压）无关，电阻两端的电压和所通过的电流之间的关系 (voltage-current relationship, 简称为VCR) 遵循**欧姆定律** (Ohm's law)。在电压和电流的关联参考方向下，如图1-9(a)所示，欧姆定律可表示为

$$u = Ri \quad (1-11)$$

$$\text{或} \quad i = Gu \quad (1-12)$$

式中， R 表示电阻元件的**电阻** (resistance)， G 表示电阻元件的**电导** (conductance)。电阻与电导互为倒量，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-13)$$

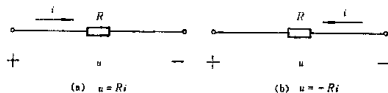


图1-9 线性电阻元件电压与电流的关系

电阻的单位为**欧[姆]** (ohm)，简称欧，用符号 Ω 表示。电导的单位为**西[门子]** (siemens)，简称西，用符号 S 表示。

如果电阻元件电压的参考方向与电流的参考方向相反，如图 (b) 所示，则欧姆定律应写为

$$u = -Ri \quad (1-14)$$

$$\text{或} \quad i = -Gu \quad (1-15)$$

如果把电阻元件的电压取为纵坐标（或横坐标），电流取为横坐标（或纵坐标），画出电压和电流的关系曲线，这条曲线称为该电阻元件的**伏安特性** (volt-ampere characteristic)。显然，线性电阻元件的伏安特性是通过坐标原点的直线，它反映了元件两端电压与元件中电流成正比，如图1-10所示。直线的斜率等于该线性电阻元件的电阻值，即

$$R = \frac{u}{i} \quad (1-16)$$

可见，伏安特性为直线的电阻称为线性电阻。

线性电阻元件的特性与元件电压或电流的方向无关，因此，线性电阻元件是双向性的元件。在使用线性电阻元件时，它的两个引出端是没有任何区别的。

实际上，所有的电阻器、电灯、电炉等元件，它们的伏安特性或多或少都是非线性的。但是，这些元件在一定的工作电压或电流范围内，它们的伏安特性近似为一条直线，所以可以作为线性电阻元件来处理。

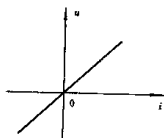


图1-10 线性电阻元件的伏安特性

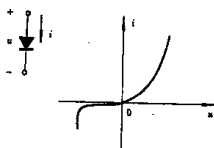


图1-11 某晶体二极管的伏安特性

如果电阻元件的伏安特性不随时间改变，即电阻值与时间无关，则称为非时变电阻元件或定常电阻元件；否则，称为时变电阻元件。本书只讨论线性时不变元件，不讨论时变元件。元件的伏安关系(volt-ampere relationship)以后用VAR表示。

今后，为了叙述方便，把线性电阻元件简称为电阻。这样，电阻这个术语以及它相应的符号 R ，一方面表示一个电阻元件，另一方面也表示这个元件的参数(parameter)。

二、非线性电阻

非线性电阻元件的伏安特性不是直线，所以元件上电压和通过元件电流之间的关系不遵循欧姆定律，即元件的电阻将随电压或电流的改变而改变，是电压或电流的函数。它的特性要由整条曲线来表征，不能笼统地说它是多少欧姆的电阻。例如，图1-11给出了某晶体二极管的伏安特性。二极管是一个非线性电阻元件，它的伏安特性是一条通过坐标原点的曲线。而且，象二极管这种非线性电阻元件的伏安特性还与电压或电流的方向有关，就是说，当二极管两端所加电压的方向不同时，流过它的电流不但方向不同，而且大小差别很大。许多非线性电阻都具有非双向性。因此，在使用象二极管这样的元件时，必须认清它的两个引出端的极性——正极和负极。

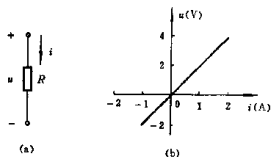


图1-12 例1-1图

例1-1 已知某电阻元件两端电压为 $u = 4 \sin \omega t$ V，电流为 $i = 2 \sin \omega t$ A，试绘制该元件的伏安特性曲线，并求 R 。

解 设电压、电流为关联参考方向，如图1-12 (a) 所示，由欧姆定律可得

$$R = \frac{u}{i} = \frac{4 \sin \omega t}{2 \sin \omega t} = 2 \Omega$$

该线性电阻元件的伏安特性如图 (b) 所示。

三、决定电阻大小的因素

电阻与导线的长度 l 、截面积 S 以及材料的关系，可用公式表示为

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma S} \quad (1-17)$$

式中 ρ 称为**电阻率** (resistivity)， γ 是 ρ 的倒量，称为**电导率** (conductivity)。物体的材料不同，其电阻率或电导率不同。电阻率的 SI 主单位为欧米 ($\Omega \cdot m$)。在实用中，当长度 l 的单位为米、截面积 S 的单位为毫米²、电阻的单位为欧时，则电阻率的单位为欧·毫米²/米 ($\Omega \cdot mm^2/m$)。因此电阻率就是长度为1米、截面积为1毫米²的材料所具有的电阻值。电导率的 SI 主单位是西每米 (S/m)。

电阻率与温度有关。利用金属电阻随温度变化的特性，可以制造电阻温度计，测量温度。有些金属和合金在温度低于负二百多摄氏度时电阻突然变为零，成为**超导体** (superconductor)。超导体中通过电流时几乎不消耗能量，因而得到各国科学家的广泛重视。超导体发电机、超导体电缆输电的研究已取得一定进展。

合金的电阻温度系数较小。锰铜、康铜等高电阻合金的电阻随温度的变化很小，常用于制造标准电阻、电阻箱或滑线电阻器等精密电阻器件。滑线电阻器和旋转电阻器上常有三个引出端，可以接成分压器或**电位器** (potentiometer) 电路。这时，两个固定端作为输入端，滑动触头和一个固定端作为输出端，如图1-13 (a)、(b) 所示。在电子仪器和通讯设备中常使用合成碳膜电位器、线绕电位器以及碳膜电阻、金属膜电阻和线绕电阻等。

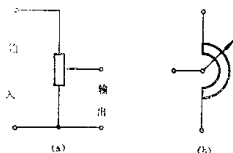


图1-13 电位器

例1-2 有一个 $10k\Omega$ 、 $1W$ 的碳膜电阻，用于直流电路，问在使用时电流、电压不得超过多大的数值？

解 电流流过电阻时，必然消耗电能而发热。这使我们能够利用电能来加热、发光，如电灯、电烙铁、电炉等各种电阻性质的电器就是这种用途。在电子电路中使用的电阻器以及电机、变压器（它们都要用导线来制作，具有一定的电阻）等，不是为发热而设置的，但都因为有电阻存在，使用时不可避免的要发热，这不但是一种无谓的电能损失，而且在使用时若电流过大，温度过高，还会烧坏元件。为了保证正常工作，制造工厂在他们所制造的电器的名牌上都要标出它们的电压、电流或功率的限额，称为**额定值**，使用时不准超过额定值。电子电路中常用的绕线电阻与碳膜电阻不仅要标明电阻值还要标明**额定功率** (rated power)，如 500Ω 、 $5W$ ， $10k\Omega$ 、 $1W$ ，等等。

本题的解答如下：

因为

$$P = I^2 R$$

所以

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{1}{10 \times 1000}} = \frac{1}{100} = 10mA$$