

简明电路分析

袁良范 马幼鸣 编著

北京理工大学出版社

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

简明电路分析/袁良范,马幼鸣编著. —北京:北京理工大学出版社,2003.8

高等工科院校电子信息类教材

ISBN 7 - 5640 - 0618 - 2

简... . 袁... 马... 电路分析 - 高等学校 - 教材 .TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 056787 号

出版发行 /北京理工大学出版社

社 址 /北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 /100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68912824(发行部)

网 址 /[http:// www .bitpress .com .cn](http://www.bitpress.com.cn)

电子邮箱 /[chiefedit@bitpress .com .cn](mailto:chiefedit@bitpress.com.cn)

经 销 /全国各地新华书店

印 刷 /北京地质印刷厂

开 本 /787 毫米 × 1092 毫米 1/ 16

印 张 /18 .5

字 数 /450 千字

版 次 /2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

印 数 /1 ~ 5000 册

责任校对 /陈玉梅

定 价 /26 .00 元

责任印制 /母长新

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

本书根据教育部颁发的电路和电路分析基础课程的基本要求编写。作者多年从事该课程的教学工作,将丰富的教学经验融入其中。内容包括电阻电路、动态电路和正弦稳态电路的分析,每章都配有大量例题和习题,可作为高等院校电子、通信、计算机、自控等专业本科生教材,也可作为远程教育和成人教育同类专业教材。

全书共分十一章,第一章~第七章由袁良范编写,第八章~第十一章由马幼鸣编写。

编者在编写本书的同时还编写了《电路分析——基本概念、典型题分析、测试》一书,该书将于近期出版,其主要内容包括电路分析中的基本概念,典型习题解题过程分析,并配有自测题,全书的最后是北京理工大学近年来的期末试题和考研试题,可作为电子、通信、计算机、自控专业学生学习电路分析课程及考研的参考书。

龚绍文教授对全书进行了认真的审阅,提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中得到了吴翠兰、甘淑贞、梁蕪、谢征和张彦梅等老师的协助,在书稿的录入过程中得到林谦老师的帮助,在此一并表示感谢。

此外北京理工大学出版社任世宏同志在本书的编写与出版过程中给予了大力支持与帮助,编者深表谢意。

限于水平,书中难免有不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2003年6月

目 录

第一章	集总参数电路的基本概念.....	(1)
1-1	电路及电路模型	(1)
1-2	电路变量	(2)
1-3	基尔霍夫定律	(5)
1-4	电路元件	(8)
	习 题 一.....	(16)
第二章	电阻电路的等效电路及混联电路分析.....	(21)
2-1	单口网络的等效电路	(21)
2-2	电阻串联及分压	(22)
2-3	电阻并联及分流	(23)
2-4	混联电路的分析	(26)
2-5	无独立源单口网络的等效电路	(27)
2-6	含独立源单口网络的等效电路	(28)
2-7	电阻 T 形网络和 π 形网络的等效变换.....	(38)
	习 题 二.....	(42)
第三章	线性网络的一般分析方法	(48)
3-1	支路分析法	(48)
3-2	网孔分析法	(52)
3-3	节点分析法	(57)
3-4	网络的图	(62)
3-5	回路分析法	(64)
3-6	含运算放大器的电阻电路	(66)
	习 题 三.....	(68)
第四章	网络定理	(72)
4-1	齐性原理和叠加原理	(72)
4-2	置换定理	(77)
4-3	戴维南定理和诺顿定理	(79)
4-4	最大功率传递定理	(87)
	习 题 四.....	(89)
第五章	动态元件.....	(95)
5-1	电容元件	(95)
5-2	电感元件	(101)
5-3	电路的状态及初始值	(106)
5-4	电路的对偶性	(109)
	习 题 五.....	(111)
第六章	一阶电路.....	(115)

6-1	一阶微分方程及求解	(115)
6-2	一阶电路的零输入响应	(118)
6-3	恒定激励下一阶电路的零状态响应	(125)
6-4	恒定激励下一阶电路的完全响应	(135)
6-5	一阶电路的三要素法	(138)
6-6	阶跃信号和阶跃响应	(146)
6-7	正弦激励下一阶电路的响应	(149)
	习 题 六	(151)
第七章	二阶电路	(157)
7-1	RLC 串联电路的零输入响应	(157)
7-2	直流 RLC 串联电路的完全响应	(165)
7-3	GCL 并联电路	(168)
7-4	一般二阶电路	(171)
	习 题 七	(173)
第八章	正弦稳态分析	(177)
8-1	正弦稳态响应的基本概念	(177)
8-2	正弦量	(178)
8-3	正弦量的相量表示	(182)
8-4	两类约束的相量形式	(188)
8-5	阻抗与导纳及相量模型	(194)
8-6	正弦稳态分析	(202)
	习 题 八	(213)
第九章	正弦稳态功率	(219)
9-1	电阻、电感和电容的功率	(219)
9-2	单口网络的功率	(223)
9-3	最大功率传输定理	(236)
9-4	平均功率的叠加	(241)
	习 题 九	(244)
第十章	耦合电感电路	(248)
10-1	耦合电感的伏安关系	(248)
10-2	含有耦合电感的电路计算	(253)
10-3	空心变压器	(258)
10-4	理想变压器	(261)
	习 题 十	(266)
第十一章	谐振电路	(269)
11-1	RLC 串联的谐振	(269)
11-2	GLC 并联的谐振	(274)
11-3	频率特性和选择性	(278)
	习 题 十 一	(285)
	参考文献	(288)

第一章 集总参数电路的基本概念

本章主要介绍电路及电路模型，电路变量，电压、电流的参考方向和关联参考方向，基尔霍夫定律，电阻元件，电源元件，受控源。

1-1 电路及电路模型

若干个电子器件或电器设备由导线连接起来形成的通路叫电路。电路可完成各种功能，如供电、传输、存储、信号处理、计算等等。有些电路非常复杂，有些则非常简单。手电筒电路是最简单的电路之一，如图 1-1 (a) 所示。干电池作为电源，灯泡是用电器，由导线（外壳）连接。当开关闭合后电路中有电流通过，灯泡消耗电能发光。这种由实际元件组成的电路称为实际电路。

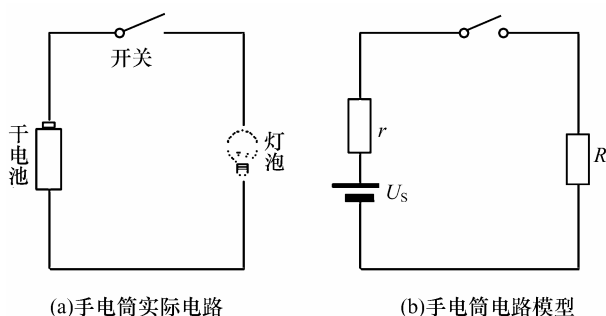


图 1-1 手电筒实际电路及电路模型

实际元件在工作过程中有多种物理性能同时存在，研究起来很复杂。再者，实际电路多种多样，完成的功能也各不相同，不可能逐一研究。实际电路虽各不相同，但遵循的规律都一样。对这种规律进行研究的理论就是电路理论。电路理论包括电路分析（网络分析）和电路综合（网络综合）。复杂的电路也称为网络。在很多情况下“电路”和“网络”通用。电路分析是给出电路的结构和参数，求解电路中的电压、电流、功率或传输特性。网络综合是给出电路的传输特性，即电路完成的功能，求出（设计出）电路的结构和参数。电路分析的对象是电路模型而不是实际电路，即实际电路的数学模型。

当电路的工作频率所对应的波长远大于电路的尺寸时可以用理想元件来表征实际元件，称为集总参数电路。当电路的工作频率所对应的波长与电路的尺寸相比拟时必须用分布参数电路来模拟，这是微波技术研究的问题。本课程研究的是集总参数电路。

理想元件是实际元件的理想化模型，只表示一种物理现象。表征电磁现象的基本元件有三种，即

电阻元件：只消耗电能的元件。

电容元件：只储存电场能量的元件。

电感元件：只储存磁场能量的元件。

除反映电磁现象的三种基本元件之外还有供给电路能量的电源元件，即电压源和电流源，这些都是二端元件，即单口元件。另外还有受控源、耦合电感和理想变压器等四端元件，这些元件是组成电路模型的最小单元。

电路元件也可按有源元件和无源元件分类，有源元件包括电压源、电流源、受控源，无源元件包括电阻、电容、电感、耦合电感和理想变压器。

一个实际元件工作时往往有几种物理现象同时存在，要用几种理想元件组成它的模型，有些实际元件在某种工作状态下只有一种主要物理性能，其他物理性能可以忽略，可用一种元件作为它的模型，如电灯泡主要消耗电能，可以用电阻作为它的模型。有些元件在不同的工作条件下电路模型也不同，例如一个电感线圈，它的主要物理性能是储存磁场能量，可用电感元件作为它的模型，如图 1-2 (a) 所示。但一般情况下线圈的损耗不能忽略，就要串联一个小电阻，如图 1-2 (b) 所示。当频率比较高时，它的匝间电容也不能忽略，需要再加一个小电容，如图 1-2 (c) 所示。

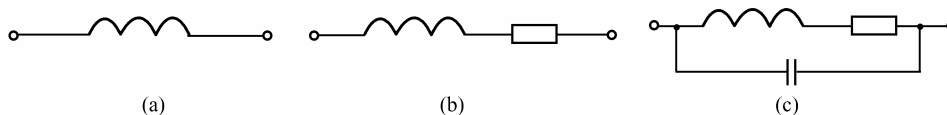


图 1-2 实际电感的电路模型

集总元件（理想元件）按一定方式联接起来组成的电路称为电路模型。如图 1-1 (b) 所示为手电筒的电路模型，由电源、电源内阻、电阻、开关和导线组成，其中导线为理想导线，电阻可以忽略。

一个实际电路如何做出它的电路模型不是这门课研究的内容，本课程的任务是会分析和计算所给出的电路模型。

1-2 电路变量

电路分析是在给出电路的结构和参数的情况下，求电路中的电压、电流，所以电压、电流是电路分析的基本变量。除此之外还常用到另外一个物理量，即电功率。

一、电流

带电粒子的定向运动形成电流，电流用 i 表示，其大小为

$$i = dq / dt \quad (1-1)$$

在国际单位制(SI)中，电荷单位为库伦(用 C 表示)，时间单位为秒(用 s 表示)，电流的单

位为安（用 A 表示）。电流比较小时，也可用毫安（mA）、微安（ μA ）表示。

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

电流方向为正电荷运动的方向，大小和方向不随时间变化的电流称为直流电流，即恒定电流，用大写的 I 表示。在直流单电源的电路中电流方向很容易确定，但在多电源的电路中往往很难确定电流方向。大小和方向随时间变化的电流称为交变电流或时变电流，用小写的 i 表示。如果是交变电流，即使单电源作用的电路中电流方向也无法确定。为解决这一问题引入电流参考方向。

电流参考方向：预先假定的方向，称为正方向，用箭头表示，如图 1-3 所示。

根据参考方向进行计算，如果求出电流为正，真实方向与参考方向相同，如果求出电流为负，真实方向与参考方向相反。即使求出电流为负也不要将参考方向改成真实方向，根据参考方向和求出的结果就可知道真实方向。

二、电压

如图 1-4 所示，单位正电荷由 a 点移动到 b 点电路得到或失去的能量即 a、b 两点之间的电压

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

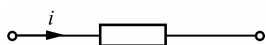


图 1-3 电流参考方向

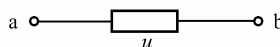


图 1-4 电压用图

在国际单位制（SI）中，能量的单位为焦（用 J 表示），电压的单位为伏（用 V 表示）。如果电压较大或较小时，也可用千伏（用 kV）、毫伏（mV）表示。

如果单位正电荷从 a 点移动到 b 点电路失去能量，则 a 点电位高，b 点电位低，从 a 到 b 为电压降。如果得到能量，则 a 点电位低，b 点电位高，从 a 到 b 为电压升。一般所说的电压都是指电压降，如 U_{ab} 是指 a 到 b 的电压降。

大小和方向都不随时间变化的电压称为直流电压，用大写的 U 表示，随时间变化的电压称为交流电压，用小写的 u 表示。和电流一样，电压的极性也很难确定，也要预先假定参考极性，高电位用（+）号表示，低电位用（-）号表示，如图 1-5 所示。

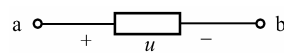


图 1-5 电压参考极性

如果求出 u 为正，则电压的真实极性和参考极性相同。如果求出为负，则真实极性和参考极性相反。即使求出电压为负值也不要将参考极性改成真实极性，根据电压参考极性和求出电压的正负就可知道电压的真实极性。

电路中电流的参考方向和电压的参考极性可分别任意假设。但为了方便起见引入关联参考方向。

关联参考方向：电压、电流相一致的方向，即电流由高电位流向低电位。

图 1-6（a）所示电压、电流为关联参考方向，图 1-6（b）所示电压、电流为非关联参考

方向。



图 1-6 电压、电流的关联参考方向和非关联参考方向

在电路的分析计算中可以只假设电流参考方向或电压参考极性，根据关联参考方向可确定电压或电流的参考方向，如图 1-7 所示。

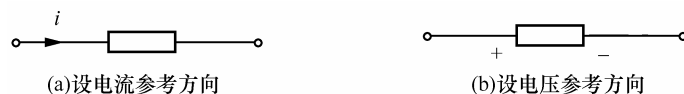


图 1-7 设电流或设电压参考方向

三、电功率

电路中一段电路或一个元件如图 1-8 所示。

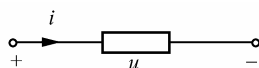


图 1-8 电路中一段电路或一个元件

单位时间电路所失去或得到的能量为电功率，简称功率。

$$p = dw / dt$$

由式 (1-2) 可知

$$dw = udq$$

则

$$p = dw / dt = udq / dt = ui$$

$$p = ui \tag{1-3}$$

在直流电路中用大写字母表示

$$P = UI \tag{1-4}$$

如果电压、电流为关联参考方向，求出功率为正，说明电路消耗或吸收功率，即由电能转化成其他形式的能量，如热能、光能、机械能、化学能等。如求出功率为负，说明电路放出功率，由其他形式的能量转化为电能。

如果电压电流为非关联参考方向， ui 前加一负号。即

$$p = -ui$$

$$P = -UI$$

相当于把电压或电流反向，判断功率性质的方法与前面一样。

电压单位为伏 (V)、电流单位为安(A)，则功率单位为瓦(W)。功率也可用千瓦(kW)、毫

瓦(mW)、微瓦(μ W)表示。

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

$$1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$$

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

部分 SI 词头如表 1-1 所示。

表 1-1 部分 SI 词头

因 数	词 头	符 号
10^9	giga 吉	G
10^6	mega 兆	M
10^3	kilo 千	k
10^{-3}	milli 毫	m
10^{-6}	micro 微	μ
10^{-9}	nano 纳	n
10^{-12}	pico 皮	p

电路吸收或放出的能量等于功率的积分

$$W(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t ui d\xi \quad (1-5)$$

例 1-1 图例 1-1 (a) 中, $i = -2 \text{ A}$, 元件 A 吸收的功率为 5 W , 求电压 u 。图例 1-1 (b) 中, $i = -1 \text{ A}$, $u = 5 \text{ V}$, 求元件 B 产生的功率。



图例 1-1

解: 图例 1-1 (a) 中, u 、 i 为关联参考方向

$$p = ui \quad 5 = u \times (-2)$$

$$u = \frac{5}{-2} = -2.5 \text{ V}$$

图例 1-1 (b) 中, u 、 i 为非关联参考方向

$$p = -ui = -(5) \times (-1) = 5 \text{ W} \quad (\text{元件 B 产生 } 5 \text{ W 的功率})$$

1-3 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是集总参数电路遵循的基本规律, 是电路分析的基础。在介绍基尔霍夫定律之前先介绍几个电路中常用的名词。

(1) 支路: 一个二端元件称为一条支路, 若干个二端元件串联在一起也可称为一条支路。

(2) 节点：两条或两条以上支路的连接点称为节点。图 1-9 中，7、8 两个元件组成的电路可看成两条支路，也可看成一条支路。如果看成两条支路，中间的连接点 g 是节点。如果看成一条支路， g 就不是节点。

(3) 回路：电路中任何一个闭合的路径称为回路。

(4) 网孔：除组成回路的支路外不再含有其他支路的回路称为网孔。网孔一定是回路，但回路不一定是网孔。如图 1-9 中 (123)、(465)、(34)、(2786) 是回路也是网孔，(78641)、(2651) 是回路但不是网孔。

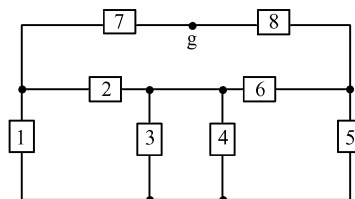


图 1-9 支路、节点、网孔、回路示意图

一、基尔霍夫电流定律——KCL

基尔霍夫电流定律：对于集总参数电路中的任一节点，在任一时刻，流出或流入该节点支路电流的和等于零。该定律简称为 KCL。

如图 1-10 是某电路中的一个节点，设流出节点的电流为正，则流入为负，也可作相反的假设。其方程为

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

如果是 n 条支路，则

$$\sum_{k=1}^n i_k(t) = 0 \quad (1-6)$$

如把负项移到等号的右端，对图 1-10 所示节点，则

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

通式为

$$\sum i_h(t) = \sum i_j(t) \quad (1-7)$$

上式表明：对于集总参数电路中的任一节点，流出节点的电流总和等于流入节点的电流总和。

电路中的节点是几何上的一个点，它不能聚集电荷，有多少电荷流入必有多少电荷流出，电荷的变化率为零，KCL 是电流连续性的体现。

如果用一个闭合面切割电路中的某些支路，如图 1-11 所示，对两节点列 KCL 方程

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

$$i_2 - i_4 - i_5 = 0$$

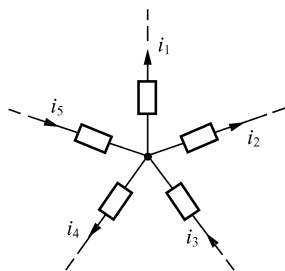


图 1-10 某电路中的一个节点

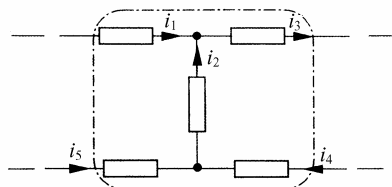


图 1-11 切割面切割电路

两式相加

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

此式说明流入（或流出）切割面的电流的和为零，即流出切割面的电流等于流入切割面的电流。基尔霍夫电流定律不仅适合集总参数电路中的一个节点，也适合闭合面。

根据基尔霍夫电流定律列方程无需考虑元件，也就是说基尔霍夫定律与元件性质无关。

KCL 方程中如果只有一个未知电流，这个未知电流是可求的，它反映了和节点相连的各支路电流之间的约束关系。

例 1-2 图例 1-2 所示电路中，已知 $I_1=2\text{ A}$ ， $I_2=-1\text{ A}$ ， $I_5=-2\text{ A}$ ，求各未知电流。

解：对 I_1 、 I_2 、 I_4 三条支路的连接点①只有 I_4 未知，列节点①的 KCL 方程可以求得。设流出该节点的电流为正，则方程为

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

$$I_4=-I_1+I_2=-2+(-1)=-3\text{ A}$$

负号表示真实方向与参考方向相反，但不要把参考方向改成真实方向。

由节点④可求 I_3 ，其节点方程为

$$I_3+I_4+I_5=0$$

$$I_3=-I_4-I_5=-(-3)-(-2)=5\text{ A}$$

由节点②求 I_6 ，其节点方程为

$$I_1-I_5-I_6=0$$

$$I_6=I_1-I_5=2-(-2)=4\text{ A}$$

在计算过程中要注意两套符号，括号外的正负号是列方程时得到的符号，如果设流出节点的电流为正，流入就为负，也可作相反的假设。括号里的符号是数据本身的符号，正的说明真实方向与参考方向相同，负的说明相反，反映了真实方向与参考方向的关系。

二、基尔霍夫电压定律——KVL

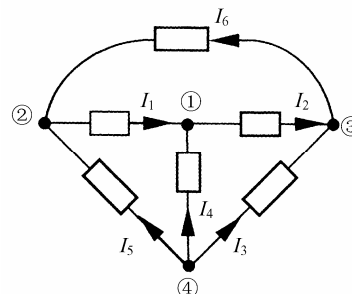
基尔霍夫电压定律：对于集总参数电路中的任一回路，沿回路电压降的和等于零。该定律简称为 KVL。如图 1-12 所示为某电路中的一个回路，由 a 点出发，按顺时针绕行（也可按反时针绕行）一周，遇电压降取正，电压升取负，则

$$u_1-u_2-u_3+u_4-u_5=0$$

如果是 n 条支路，则通式为

$$\sum_{k=1}^n u_k(t) = 0 \quad (1-8)$$

式（1-8）称回路电压方程，与电路中元件性质无关，如果方程中只有一条支路的电压未知，这个电压是可求的，所以基尔霍夫电压定律反映了支路电压之间的约束关系。如果单位正电



图例 1-2

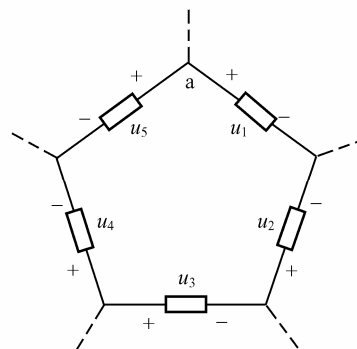


图 1-12 电路中某一回路

荷由 a 点出发绕行一周又回到 a 点，电路得到或失去的能量为零。KVL 是能量守恒的体现。

例 1-3 图例 1-3 所示电路中，已知 $U_1=2\text{ V}$ ， $U_2=1\text{ V}$ ， $U_4=-2\text{ V}$ ，求各支路未知电压。

解：在由 U_1 、 U_2 、 U_3 组成的回路中，只有 U_3 是未知的，根据基尔霍夫电压定律可求。按反时针方向绕行，其回路电压方程为

$$U_1 - U_2 - U_3 = 0$$

$$U_3 = U_1 - U_2 = (2) - (1) = 1\text{ V}$$

求得电压为正值说明真实极性与参考极性相同。

在由 U_2 、 U_4 、 U_5 组成的回路中可求 U_5 ，其回路方程为

$$U_2 + U_5 - U_4 = 0$$

$$U_5 = -U_2 + U_4 = -(1) + (-2) = -3\text{ V}$$

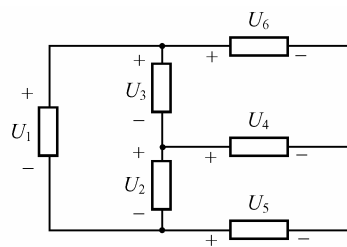
求得电压为负值说明真实极性与参考极性相反。

在由 U_3 、 U_4 、 U_6 组成的回路中求 U_6 ，其回路方程为

$$U_3 + U_4 - U_6 = 0$$

$$U_6 = U_3 + U_4 = (1) + (-2) = -1\text{ V}$$

在解题过程中也要注意两套符号，括号外的符号是列方程时得到的，沿绕行方向遇电压降取正，电压升取负。括号里的符号是数据本身的符号，反映了真实极性与参考极性的关系。

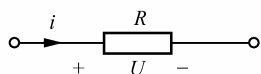


图例 1-3

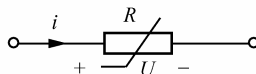
1-4 电路元件

一、电阻元件

很多用电器都可以看成一个实际电阻器。当电流通过时，它阻碍电流的流动，其两端产生电压。实际电阻器消耗电能，将电能转化成其他能量。不仅如此，还同时存在其他物理性能，如电场、磁场的性质等。而电阻元件是从实际电阻中抽象出来的理想化模型，只表示消耗电能的元件，它的约束关系是电压、电流的关系（电压、电流关系简称为 VCR）。因此电阻元件可以这样定义：一个二端元件，在任一瞬间，流过它的电流 $i(t)$ 与两端产生的电压 $u(t)$ 的关系由 $u-i$ 平面上的一条曲线所决定，则此二端元件称为电阻元件。如果电阻的伏安特性曲线是通过原点的直线，电压、电流的关系为线性关系，称为线性电阻。线性电阻用 R 表示，电路符号如图 1-13 (a) 所示。如果电路的伏安特性曲线不是过原点的直线，两端电压、电流不是线性关系，称为非线性电阻，电路模型如图 1-13 (b) 所示。如果电阻的伏安特性曲线不随时间变化，称为非时变电阻，随时间变化的电阻称为时变电阻。



(a)线性电阻电路符号



(b)非线性电阻电路符号

图 1-13 线性电阻与非线性电阻的电路符号

1. 线性非时变电阻和线性时变电阻

电阻元件的伏安特性曲线如果是一条过原点的直线，且不随时间变化，此电阻称为线性非时变电阻，其伏安特性曲线如图 1-14 (a) 所示。如果电阻的伏安特性曲线是过原点的直线，

但随时间变化，称为线性时变电阻，其伏安特性曲线如图 1-14 (b) 所示。一般情况下所说的电阻指的是线性非时变电阻，简称电阻。

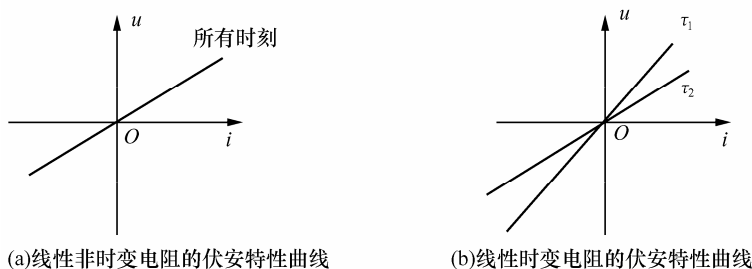


图 1-14 线性电阻的伏安特性曲线

电阻两端电压电流为线性关系，如电压、电流采用关联参考方向，关系式为

$$u(t) = Ri(t) \quad (1-9)$$

式 (1-9) 称欧姆定律，式中： R 为正实常数，称为电阻，单位为欧（用 Ω 表示），如果电阻比较大，可用 $k\Omega$ 、 $M\Omega$ 表示。

$$1 \text{ k}\Omega = 10^3 \Omega, \quad 1 \text{ M}\Omega = 10^6 \Omega$$

电阻的倒数称为电导

$$G = 1 / R$$

电导的单位为西门子（用 S 表示）。

电压、电流的关系也可写成

$$i = Gu \quad (1-10)$$

当电压、电流为非关联参考方向时，电阻两端电压电流关系不能用式 (1-9) 表示，要加负号，即

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

线性非时变电阻的伏安特性曲线是过原点的直线。电阻具有双向性，也就是说当把电阻连接在电路中时，可以任意连接，无方向性。当电阻中有电流通过时，电阻两端就产生电压，一旦电流为零，电压也为零。电阻两端的电压值（电流值）取决于同一时刻的电流值（电压值），所以电阻元件是无记忆元件。

当电阻为 ∞ 时称为开路，如图 1-15 所示，电阻开路时 $i(t) = 0$ ， $u(t)$ 可为任意值。



图 1-15 电阻为 ∞ 时的电路模型及伏安特性曲线

当电阻为零时称为短路，如图 1-16 所示，电阻短路时 $u(t)=0$ ， $i(t)$ 为任意值。

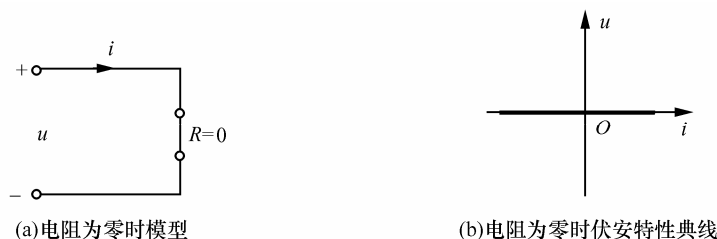


图 1-16 电阻为零时电路模型和伏安特性曲线

电阻元件是实际元件抽象出来的理想化模型。如果是正电阻，它两端的电压、电流真实方向总是一致的，电阻是消耗能量的元件。它的功率为

$$p(t)=u(t)i(t) \quad (\text{关联参考方向}) \quad (1-12)$$

$$p(t)= -u(t)i(t) \quad (\text{非关联参考方向}) \quad (1-13)$$

求出的功率永远为正。如把欧姆定律代入

$$p=i^2R=u^2/R \quad (1-14)$$

实际电阻都标有额定功率、额定电压或电流，如果超过额定值就会烧坏，使其开路或短路。

电阻消耗的能量为

$$w(t)=\int p dt \quad (1-15)$$

如果线性非时变电阻的特性曲线在 II-IV 象限，此电阻为线性非时变负电阻，如图 1-17 所示，负电阻可供出能量。

例 1-4 图例 1-4 所示电阻上电流 $I=2\text{ A}$ ， $R=5\ \Omega$ ，

求电阻上电压 U 及消耗的功率。

解：电阻上电压、电流为非关联参考方向。

$$U=-RI=-5\times 2=-10\text{ V}$$

$$\text{电阻消耗的功率} \quad P=-UI=-(-10)\times 2=20\text{ W}$$

$$\text{也可用电流的平方乘以电阻} \quad P=I^2R=2^2\times 5=20\text{ W}$$

$$\text{还可用电压的平方除以电阻} \quad P=U^2/R=100/5=20\text{ W}$$

例 1-5 一个 100 W 、 $4\ \Omega$ 的电阻接到电路中，允许通过的电流、电压各是多少？

解：电阻的功率为 $P=I^2R=U^2/R$

$$\text{允许通过的电流} \quad |I|=\sqrt{P/R}=\sqrt{100/4}=5\text{ A}$$

$$\text{允许通过的电压} \quad |U|=\sqrt{PR}=\sqrt{400}=20\text{ V}$$

2. 非线性非时变电阻和非线性时变电阻

不是线性电阻即是非线性电阻。如果非线性电阻的伏安特性曲线随时间变化，则称为非线性时变电阻，其伏安特性曲线如图 1-18 所示。如果非线性电阻的伏安特性曲线不随时间变化，则称为非线性非时变电阻。半导体二极管就属于这种电阻。这门课的任务是分析线性电路，即由线性元件及电源组成的电路。对于非线性元件只介绍一下半导体二极管。其电路符号与伏安特性曲线如图 1-19 所示。

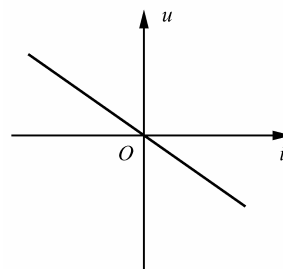
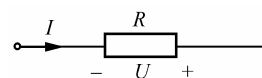


图 1-17 负电阻的伏安特性曲线



图例 1-4

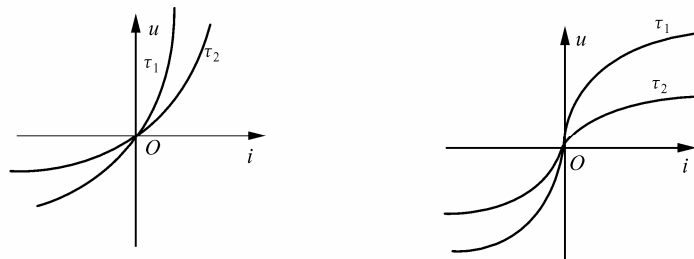


图 1-18 非线性时变电阻的伏安特性曲线

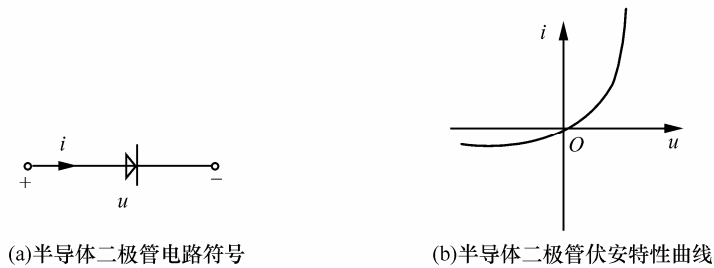


图 1-19 半导体二极管的电路符号及伏安特性曲线

由二极管的伏安特性曲线可以看出，它是一个非线性电阻。当 $u > 0$ ，即正向偏置时，电流很大，说明电阻很小，称为导通。而 $u < 0$ ，即反向偏置时，电流很小，说明电阻很大，称为截止。正向偏置时电阻非常小，如果忽略不计，可把二极管看成短路，相当于一短路线。反向偏置时电阻非常大，可看成开路，这时电流为零，这种二极管称为理想二极管，其电路符号及伏安特性曲线如图 1-20 所示。

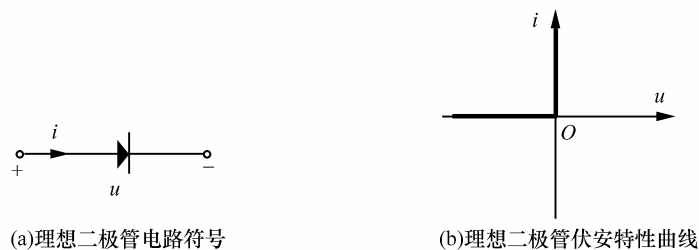


图 1-20 理想二极管的电路符号及伏安特性曲线

理想二极管也是非线性元件，含有理想二极管的电路称为非线性电路。分析含有理想二极管的电路首先要判断二极管是正向偏置还是反向偏置。如果是正向偏置，用短路线代替，如果是反向偏置，看成开路。这样处理过的电路就变成线性电路，可按线性电路计算。

二、独立电源

独立电源是供给电路能量的元件，简称电源。它是从实际电源抽象出来的理想化模型。因它能供给电路能量，激励电路工作，也称为激励源，简称激励。在电路中产生的电压、电流称为响应。给电路提供能量可以是电压的形式也可以是电流的形式，所以电源分电压源和

电流源两种。

1. 电压源

一个二端元件，无论流过它的电流为何值，两端的电压都是定值 U 或一定的时间函数 $u_S(t)$ ，而电流由连接的外电路决定，此二端元件称为电压源，电路符号如图 1-21(a)所示。其端电压

$$u(t)=u_S(t)$$

如果端电压为恒定值（无论电流为何值），即 $u(t)=U_S$ ，称为直流电压或恒定电压，电路符号也可用图 1-21(b) 所示。长线表示“+”极。

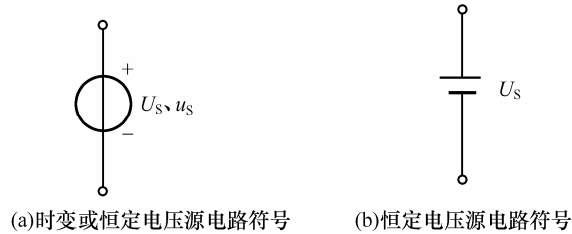


图 1-21 电压源电路符号

恒定电压源的伏安特性曲线是平行于 i 轴的直线，如图 1-22(a) 所示。如果端电压是时间 t 的函数，在某一时刻其两端电压也是常数，与电流无关，所以时变电压源的伏安特性曲线也是平行于 i 轴的直线，但这条直线和 i 轴的距离随时间变化，如图 1-22(b) 所示。当电压源电压为零值时电压源可看成短路，其伏安特性曲线与 i 轴重合。

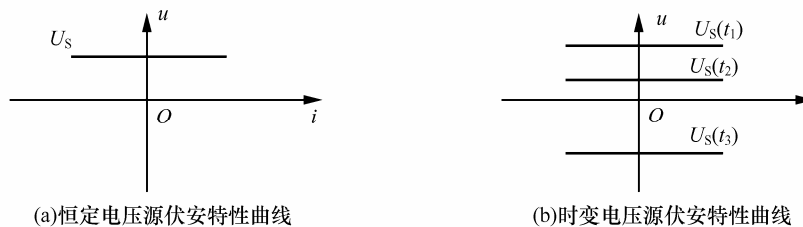


图 1-22 电压源的伏安特性曲线

实际电压源是大家比较熟悉的，如干电池、蓄电池、直流发电机、交流发电机等等。实际电压源都有内阻的损耗，可用电压源和电阻的组合作为它的电路模型。

2. 电流源

一个二端元件，不管其两端的电压为何值都能输出定值的电流 I_S 或一定的时间函数 $i_S(t)$ ，而电压由外电路决定，此二端元件称为电流源。电流源是从实际电流源中抽象出来的理想化模型。电流源的电路符号如图 1-23(a) 所示，箭头为电流源输出电流的方向。

电流源的输出电流

$$i(t)=i_S(t) \quad (\text{端电压为任意值})$$

如果输出电流为常数，即 $i(t)=I_S$ ，称为直流电流或恒定电流，其伏安特性曲线是平行于 u 轴的直线，如图 1-23(b)所示。如果输出电流 $i(t)$ 是时间 t 的函数，在某一时刻其伏安特性曲线也是平行于 i 轴的直线，时间变化，直线与 u 轴的距离也随着变化，如图 1-23(c)所示。当电流源电流为零值时相当于开路，伏安特性曲线与 u 轴重合。