

DIANZI XIANLU  
GAINIAN LILUN YU  
YINGYONG

# 电子线路

## ——概念理论与应用

杨兴瑶 汤光华 编著



化学工业出版社

# 电子线路

## ——概念理论与应用

杨兴瑶 汤光华 编著



化学工业出版社

·北京·

对于初学者来说,这是一本从理论直接联系到应用的教材;对于从事电气工程、自动化工程和机械制造工程的技术人员来说,这是一本能够从实际应用中找出理论根据和基本概念的参考书;对于无线电爱好者、电子装置设计和制造的设计师们,这是一本简便、实用的手册。

本书共7章。第1章介绍电工电路的基本原理;第2、3、4章分别介绍电子线路的三大器件:二极管、三极管(晶体管和场效应管)和运算放大器的基本原理、各种线路和组态;第5、6章主要列举电子线路在工程上的种种应用;第7章则介绍了近年来发展起来的光电子电路。

本书对从事电工电子技术、机械与自动化领域的理工院校师生是一本实用的教材参考书,对广大技术工作者和技术工人,是一本实用的指导书,对于攻读研究生的读者也有指导意义。

电子线路——概念理论与应用

杨兴瑶 汤光华 编著

### 图书在版编目(CIP)数据

电子线路——概念理论与应用/杨兴瑶,汤光华编著.  
北京:化学工业出版社,2008.4  
ISBN 978-7-122-02326-1

I. 电… II. ①杨…②汤… III. 电子电路-高等学校-教学参考资料 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第032302号

责任编辑:张建茹

装帧设计:史利平

责任校对:蒋宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张18½ 字数472千字 2008年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

电子线路是每一位工程技术人员和理工科院校在校师生都必须学习和掌握的技术基础知识，也是一门既深奥又实际的专业学科。面对着繁杂的内容如何从中选择少而精的题材，使之既有一定的理论并从而能建立起基本的概念，又能密切联系实际、指导实际，对将来或目前进行的工作起到学以致用的重要作用，是这一类书籍的作者所面临的重要任务。

笔者在担当电子线路教学任务之后，又长期从事电气控制与自动化系统科研设计工作，深感任何时候都离不开电子线路的知识。遇到很多具体问题都要用电子学理论来解决，需要用到电子线路、装置和系统来完成。近年来，笔者编写了一系列实用电子线路方面的书籍（见参考文献6~10），为广大读者提供了数千个比较简捷实用的电路。但是，单纯靠这些书中提供的实用电路很难选择到最佳的方案，没有深入理解和亲自设计、调试这些电路，就很难获得最好的效果。必须要用理论、概念和分析来设计出自己最满意的电路。对此，作者力求在理论与实际之间搭建桥梁，为从事理论学习的读者提供尽可能多的实际应用渠道，为从事实际工作的读者提供尽可能全面的理论基础。

全书共分7章，全面系统介绍了主要电子器件的理论原理、工作特性、参数选择和实用电路。对每一种器件的可能应用方向都尽可能作了介绍，对每一种线路的原理和性能都尽可能作了分析。本书在选材布局上作者做了很多考虑。比如二极管一章，由于其应用无处不在，而且种类繁多，在多数书籍中却较少介绍，故书中用了较大的篇幅进行了分类和分析。场效应晶体管也是一种应用广泛、极有前途、在弱电和强电领域〔特别是在大规模和超大规模集成电路以及计算机硬件、SOC（片上系统）和SOPC（片上可编程系统）等器件上〕都越来越受到重视，因此也把它放在与普通晶体管同等重要的地位并列进行阐述。相对来说，在电子线路类书籍中都普遍介绍的内容（如双极性晶体管、运算放大器），本书则从精选基本内容和简化分析上着手，做到少而精。

此外，全书特别重视对电子器件、线路分析、设计中的很多基本概念进行深入浅出的说明。为了压缩篇幅，书中利用了很多表格，将众多的内容合并、对比，从而尽可能做到统观整体、突出重点的目的。

本书在编写过程中得到了周淑阁、蒋立平、王雷和马鑫金教授的帮助。简云飞、刘行景、刘一民和张益清、杨绪东、王嵩、张春华、刘振贤参加了部分资料的编写和整理工作，对此表示感谢。

鉴于笔者水平能力有限，误漏之处欢迎不吝指正。

编著者  
2008.3

# 目 录

<b>1 电路原理基础</b> .....	1
1.1 基本变量 .....	1
1.1.1 电位、电压和电流 .....	1
1.1.2 电能与电功率 .....	2
1.2 基本元件 .....	3
1.2.1 无源元件 .....	3
1.2.2 有源元件 .....	6
1.3 等效和替代 .....	10
1.3.1 电阻电路的等效变换 .....	10
1.3.2 电源的连接和等效变换 .....	12
1.4 基本定律和定理 .....	13
1.4.1 基尔霍夫定律 .....	13
1.4.2 等效电源定理 .....	14
1.5 相量和复阻抗——直流电路到交流 电路的推广 .....	16
1.5.1 交流正弦量的基本参数 .....	16
1.5.2 无源元件的电压-电流相量 公式 .....	18
<b>2 普通二极管和特种二极管理论及其应用电路</b> .....	20
2.1 普通二极管 .....	20
2.1.1 二极管的基本原理 .....	20
2.1.2 二极管的结构和分类 .....	23
2.1.3 普通二极管的特性曲线和方程 .....	24
2.1.4 普通二极管的主要参数和选用 .....	33
2.1.5 二极管整流电路分析 .....	36
2.1.6 考虑二极管管压降及串联偏移 电压时的整流电路分析 .....	41
2.1.7 二极管滤波电路 .....	44
2.1.8 整流电源中电源变压器、整流 二极管和滤波电容的选择 .....	47
2.1.9 二极管输出限幅电路 .....	48
2.1.10 二极管嵌位电路和微分电路 .....	53
2.1.11 二极管峰值和峰-峰(谷)值 检测电路 .....	56
2.1.12 二极管倍压整流电路和泵电路 .....	56
2.1.13 各种二极管功能电路的比较与 直流恢复电路 .....	59
2.1.14 二极管保护电路 .....	61
2.1.15 二极管极性变换电路 .....	61
2.1.16 二极管控制电路 .....	62
2.1.17 检波电路 .....	63
2.2 稳压二极管 .....	64
2.2.1 稳压二极管的基本原理 .....	64
2.2.2 稳压管的特性曲线和技术参数 .....	65
2.2.3 稳压管的常用产品型号 .....	66
2.2.4 稳压管电路分析 .....	68
2.2.5 稳压管电路的设计 .....	70
2.2.6 利用稳压管来降低纹波电压的 多级稳压电路 .....	72
2.2.7 稳压管与二极管或与另一稳压管 串联 .....	73
2.2.8 稳压管交流限幅电路 .....	74
2.2.9 稳压管降压电路 .....	75
2.2.10 利用稳压管产生偏移电压的 电路 .....	75
2.3 瞬态电压抑制二极管 .....	75
2.3.1 瞬态电压抑制二极管的基本结构 和特性 .....	75
2.3.2 瞬态电压抑制二极管的典型保护 电路 .....	76
2.4 稳流(恒流)二极管 .....	76
2.4.1 稳流二极管的工作原理和特性 曲线 .....	76
2.4.2 稳流二极管的主要参数和稳流 电路设计 .....	77
2.4.3 稳流二极管的应用电路 .....	79
2.4.4 可调稳流二极管及其应用电路 .....	80
2.5 测量用精密二极管 .....	81
2.5.1 基本测量电路 .....	81
2.5.2 精密二极管的外形和型号 .....	83
2.6 具有快速开关能力和反向恢复能力 的二极管 .....	83
2.6.1 开关二极管 .....	83



2.6.2	PIN 二极管	85	2.7.1	变容二极管的结构原理	90
2.6.3	肖特基(热载流子)二极管	88	2.7.2	变容二极管的型号参数和应用电路	90
2.7	变容二极管	90			
<b>3</b>	<b>双极性晶体管和场效应晶体管</b>	<b>92</b>			
3.1	双极性晶体管	92		和工作原理	111
3.1.1	晶体管的工作原理和基本组态电路	92	3.2.3	结型场效应管的特性曲线和工作区域划分	112
3.1.2	共射极电路的特性曲线	98	3.2.4	结型场效应管的主要参数和产品型号	116
3.1.3	晶体管的工作参数和极限参数	101	3.2.5	结型场效应管端子、管型和工作状态的判断	119
3.1.4	晶体管的常用型号和封装型式	103	3.2.6	绝缘栅型场效应管的基本类型和工作原理	120
3.1.5	晶体管端子的判别和故障查找	108	3.2.7	绝缘栅场效应管的基本特性、参数和型号	123
3.2	场效应晶体管	111			
3.2.1	场效应晶体管与双极性晶体管的比较	111			
3.2.2	结型场效应晶体管的基本结构				
<b>4</b>	<b>晶体管和场效应管放大电路</b>	<b>130</b>			
4.1	放大的概念和主要性能指标	130	4.3.1	晶体管间的串接电路	157
4.1.1	放大器的组成和分类	130	4.3.2	功率放大电路及其组合电路	159
4.1.2	电压模式电路和电流模式电路	131	4.3.3	差分放大电路	166
4.1.3	放大器的主要性能指标	131	4.3.4	多级耦合放大电路	170
4.2	基本放大电路	142	4.4	放大电路中的反馈	173
4.2.1	双极性晶体管基本放大电路	142	4.4.1	反馈的类型及其判断	173
4.2.2	场效应晶体管基本放大电路	147	4.4.2	负反馈对放大电路性能的影响及其改善	176
4.2.3	交流放大器静态(直流)工作点的设置——偏置电路	152	4.4.3	引入负反馈的一般原则和典型实例电路分析	177
4.3	复合晶体管和组合晶体管放大电路	157			
<b>5</b>	<b>运算放大器原理、参数及其应用电路</b>	<b>179</b>			
5.1	运算放大器的组成原理、类型和特性参数	179	5.3.3	运算放大器非线性运算电路	191
5.1.1	运算放大器的组成原理和类型	179	5.4	工作在非线性区域的运算放大器应用电路	193
5.1.2	运算放大器的主要参数和选用	181	5.4.1	电压比较器电路	194
5.2	理想运算放大器及其工作区域	183	5.4.2	最大值(峰值)检测电路	197
5.2.1	理想运算放大器的等效模型	183	5.4.3	精密半波整流电路和绝对值电路	197
5.2.2	理想运算放大器的工作区域	184	5.5	工业用运算放大器电路	199
5.3	工作在线性区域的运算放大器应用电路	185	5.5.1	仪器(仪表)放大器电路	199
5.3.1	基本放大电路	185	5.5.2	隔离放大器	202
5.3.2	运算放大器线性运算电路	188	5.5.3	可编程增益放大器电路	206
<b>6</b>	<b>信号产生与变换电路</b>	<b>211</b>			
6.1	振荡(信号产生)电路	211	6.1.1	振荡电路的分类和产生振荡的	

必备条件 .....	211	(F-V) 变换电路 .....	226
6.1.2 正弦波振荡电路 .....	212	6.2.2 电压-电流 (V-I) 和电流-电压 (I-V) 变换电路 .....	227
6.1.3 非正弦振荡 (信号产生) 电路 (张弛振荡器) .....	220	6.2.3 电压和电阻的变换电路 .....	233
6.1.4 压控振荡器 (电压-频率 变换器) .....	224	6.3 非电量-电气量的变换电路 .....	237
6.2 电气量-电气量变换电路 .....	226	6.3.1 温度传感器变换电路 .....	237
6.2.1 电压-频率 (V-F) 和频率-电压		6.3.2 压力传感器变换电路 .....	241
<b>7 光电子电路 .....</b>	<b>244</b>		
7.1 光电信息变换方式和器件的分类 .....	244	7.3.1 光电耦合器的特点和分类 .....	267
7.1.1 光电信息变换方式的分类 .....	244	7.3.2 光电耦合器的特性和参数 .....	269
7.1.2 光源和光电检测器件的分类 .....	245	7.3.3 光电耦合器的应用电路 .....	272
7.1.3 光电发射器件 .....	246	7.4 光电通信电路 .....	275
7.1.4 光敏电阻及其应用电路 .....	249	7.4.1 光电通信电路的组成 .....	275
7.1.5 光电池及其应用电路 .....	251	7.4.2 调制光波发射-接收电路 .....	276
7.1.6 光敏二极管及其应用 .....	254	7.4.3 载波调幅红外光波传输电路 .....	277
7.1.7 光敏晶体管及其应用电路 .....	258	7.4.4 脉冲调频红外光波传输电路 .....	277
7.2 发光二极管及其应用电路 .....	261	7.4.5 无线光波传输扬声器 (耳机) 系统 .....	278
7.2.1 发光二极管的基本原理和分类 .....	261	7.4.6 采用激光二极管的光波通信 电路 .....	281
7.2.2 发光二极管的主要特性 .....	262		
7.2.3 发光二极管的驱动电路 .....	263		
7.3 光电耦合器及其应用电路 .....	267		
<b>参考文献 .....</b>	<b>287</b>		

# 1 电路原理基础

在学习电子线路之前，先了解、回顾或归纳一下有关电路基础知识是很有必要的。这其中主要包括基本变量、基本元件、基本定律以及相关的基本分析方法。对于不具备这方面基础的读者，下面的内容可以起到辅导和摘要介绍的作用。

## 1.1 基本变量

### 1.1.1 电位、电压和电流

#### (1) 电位和电压

电场力把 1 库仑 (C) 的正电荷从电场中的某一点沿任意路径 (实际上是某一电路) 移动到无穷远处 (场强为零点, 实际上是参考点) 电场力所做的功, 称为电场中该点的电位, a 点电位常记为  $\varphi_a$ 。

电场中任意两点, 如 a、b 两点, 之间的电位差称为该两点间的电压, 如 a、b 两点的电压  $\varphi_a - \varphi_b = u_{ab}$  或简写成  $u$ 。

电压是有方向的量, 实际的方向是从高电位指向低电位。但是在列写方程时可以随意或人为地规定其正方向, 称为规定或参考正方向。如计算结果为正, 则规定与实际方向一致。否则相反。电压与电位的单位是 V (伏)、mV (毫伏) 和  $\mu\text{V}$  (微伏) 以及 kV (千伏) 等。电压规定或参考正方向用箭头 (高电位指向低电位) 方向或 “+” “-” 表示, 如图 1.1.1-1 (a) 中  $u = \varphi_a - \varphi_b = 6\text{V} - 2\text{V} = 4\text{V} > 0$ , 规定方向与实际方向一致; 图 (b) 中  $u = \varphi_c - \varphi_d = 2\text{V} - 6\text{V} = -4\text{V} < 0$ , 表明图中人为规定的方向与实际方向相反。

实际的电器元件有的是发出电能量, 有的是吸收电能量 (见后), 一般把前者称为电源,

后者称为电负载或简称负载。电源正极电位高于负极电位, 故电源的电动势实际上是电位升或电压升, 这与负载上电位降刚好相反。如图 1.1.1-1 (c) 中  $u$  实际是电压降, 该元件为负载  $R$ ; 图 (d) 中  $u$  实际是电位升, 故该元件实际上是电源。注意电源中电动势  $e$  与电压  $u$  的规定正方向 (实箭头): 若  $e$ 、 $u$  两者的规定方向相反, 则可以写成  $u = e$ , 否则应写成  $u = -e$  或  $e = -u$ 。图中  $u$ 、 $e$  实箭头为规定正方向, 计算结果  $u = -4\text{V} < 0$ , 由于图中  $e$  的方向与  $u$  相反, 故  $e = u = -4\text{V}$ , 二者规定方向皆与实际方向相反, 故实际方向应如图中虚箭头所示。

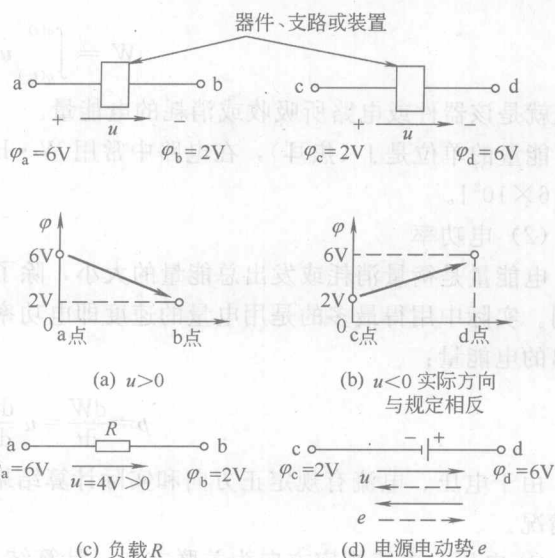


图 1.1.1-1 电压的规定 (参考) 方向和实际方向



## (2) 电流

电流是正电荷在电场力的作用下从较正的电位点流向较负的电位点时流量（电荷量）的速率，亦即单位时间流动的正电荷量  $q$ ：

$$i = \frac{dq}{dt}$$

在线路中实际流动的是电子流（负电荷），但一般仍把正电荷流动的方向视为电流的方向。

电流也是有方向的量，同样有规定或参考正方向与实际正方向之分。规定可以任意，但

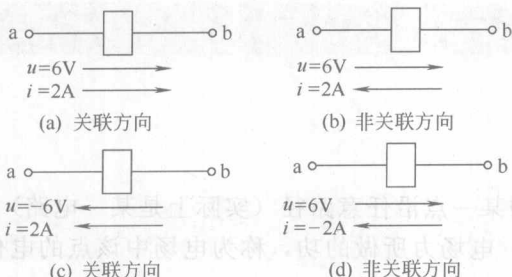


图 1.1.1-2 电流与电压方向之间的关系

若取与电压一致的方向，则称电流方向是在电压驱动下的方向，此时电压、电流方向称为关联方向，意指二者知其一方向必知另一方向。但有时也可将电流方向取在与电压相反的方向上，此时电流是在电压驱动相反方向上流动，电压、电流方向为非关联方向。显然，图 1.1.1-2 (a)、(c) 为关联方向，(b)、(d) 为非关联方向。

在电压为正值的情况下，见图 1.1.1-1 (a)，电流按规定正方向计算的结果，若为正值，说明规定的正方向就是实际的电流方向；若为负值，则规定的正方向与实际电流的方向相反。若  $u$  为负值，见图 1.1.1-1 (b)，则情况同上相反。

### 1.1.2 电能量与电功率

#### (1) 电能量

前面已经定义，电压是单位正电荷在电场力作用下从一点沿电路移动到另一点所做的功，即  $u = dW/dq$ ，这里  $dW$  为  $dq$  电荷移动所做的功。那么反过来，当正电荷在电压  $u$  作用下在时间  $t_0$  至  $t$  内从电压“+”端运动到“-”端，电场力对电荷所做的功则应为

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq$$

这也就是该器件或电路所吸收或消耗的电能量。

能量的单位是 J（焦耳），在电路中常用  $W \cdot h$ （瓦时）、 $kW \cdot h$ （千瓦时或度）， $1W \cdot h = 3.6 \times 10^3 J$ 。

#### (2) 电功率

电能量是衡量消耗或发出总能量的大小，除了常用作总耗电量外，在电路计算中较少涉及到。实际中用得最多的是用电量的速度即电功率，定义是单位时间内器件或电路所吸收或发出的电能量：

$$p = \frac{dW}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui$$

由于电压、电流有规定正方向和实际计算结果有正值和负值之分，因此就可能有下列几种情况。

① 电压、电流规定方向为关联方向，计算结果有以下两种情况：

•  $p = ui > 0$ ，则该器件或支路吸收或消耗功率，因为电流流过该器件电位下降了，如图

1.1.1-2 (a) 所示。

•  $p=ui<0$ ，则该器件或支路发出或产生功率，因为电流从电位高的地方流出，从电位低的地方流进，如图 1.1.1-2 (c) 所示，电压  $u=-6\text{V}$ ，表明实际电压方向与规定的相反，即实际 a 点电位高于 b 点电位，电流由 a 点流出，由 b 点流进。

② 电压、电流方向为非关联方向 计算结果也有两种情况：

•  $p=ui>0$ ，则该器件或支路发出或产生功率。如图 1.1.1-2 (b) 所示电路，电流也是从电位高即 a 点流出，从电位低即 b 点流进。

•  $p=ui<0$ ，则该器件或支路吸收或消耗功率。如图 1.1.1-2 (d) 所示电路， $i=-2\text{A}$ ，说明电流实际方向为自 a 流至 b，即从电位高处 a 点流进，从电位低处 b 点流出，故吸收或消耗功率。

将实际计算结果及是否为关联方向二者联系起来立即可以判断是吸收还是发出功率。但在没有实际数值结果情况下，则按规定：在关联方向时， $p=ui>0$  为吸收功率， $p=ui<0$  为发出功率；在非关联情况下， $p=ui>0$  为发出功率， $p=ui<0$  为吸收功率。究竟是吸收还是发出，还要看计算的结果才能最后确定。

## 1.2 基本元件

### 1.2.1 无源元件

#### (1) 电阻

一般使用的电阻均为电压  $u$  与电流  $i$  成正比的电阻，即线性电阻：

$$R = \frac{u}{i} \quad \text{或} \quad u = iR \quad (1.2.1-1)$$

这里  $R$  为常数，在伏安特性上为一直线，见图 1.2.1-1 (a)。显然，阻值  $R$  越大，直线越趋向于横轴。如图线 2 电阻比线 1 大。因为在相同电压  $U$  下产生的线 2 电流  $I_2$  比线 1 电流  $I_1$  小。此外，在实际线路中也存在很多非线性电阻，如图 1.2.1-1 (b) 线 1 为二极管的伏安特性。此外，有些器件还具有负电阻或负阻特性，如单结晶体管、晶闸管等，其中一部分伏安特性，随电压升高，其电流反而减小。利用这种特性可以构成触发或振荡器件，如图 1.2.1-1 (b) 中线 2 所示。

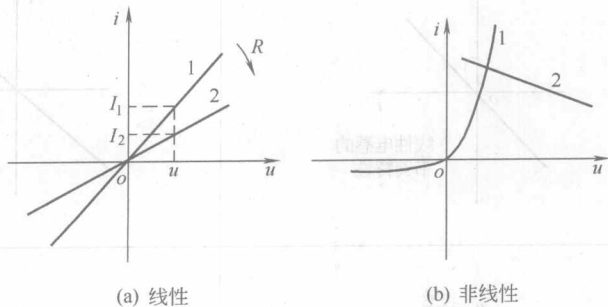


图 1.2.1-1 电阻的特性

此外，电阻还可能与温度、湿度或时间等因素有关。不过一般指的电阻都是线性电阻，且为正值。

电阻的倒数称为电导：

$$G = \frac{1}{R} = \frac{i}{u} \quad (1.2.1-2)$$

电阻单位为  $\Omega$  (欧姆) 或  $k\Omega$  (千欧)、 $M\Omega$  (兆欧); 电导的单位为 S (西门子), 曾称姆欧, 符号为  $\sigma$ 。

正值电阻在电路中总是吸收或消耗功率的, 其大小为

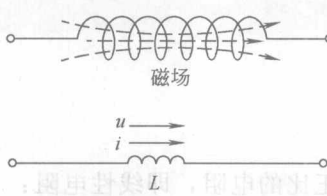
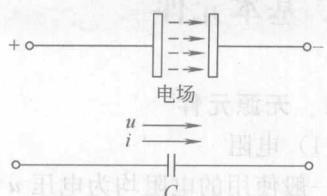
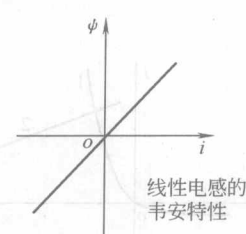
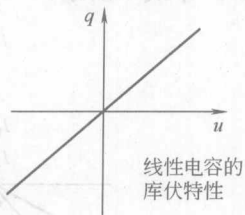
$$p = ui = u^2/R = u^2G = i^2R = i^2/G \quad (1.2.1-3)$$

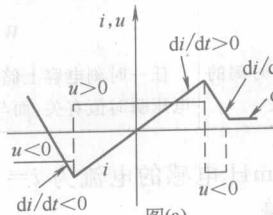
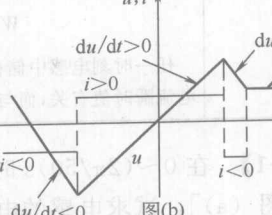
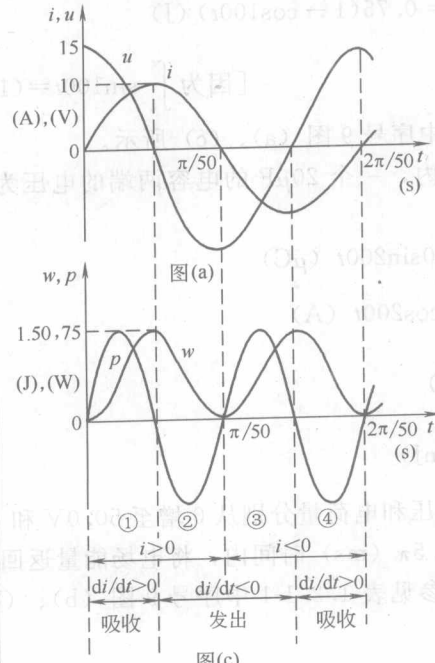
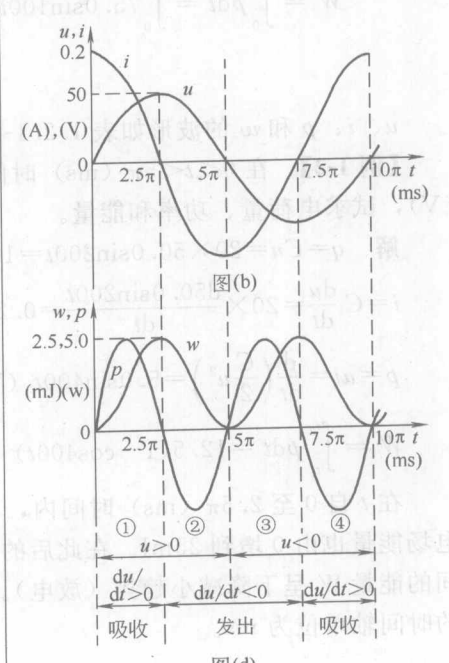
记住电阻是耗能元件是很重要的, 耗能元件消耗的电能以热能形式散发出去。下面所述的两个元件就不是耗能元件。

## (2) 电感和电容

电感和电容是一对“对偶的电路无源元件”。电感中的磁场、磁链、电压和电流等分别对应于电容中的电场、电荷量、电流和电压等。为清晰和便于对照, 下面列表说明这两个元件的特性。

表 1.2.1-1 电感和电容特性对照

序号	类别	电 感	电 容
1	图形和符号		
2	构成原理	用导线在空气中或磁芯或铁芯上绕成线圈, 就构成了电感器或电感线圈。在电感线圈两端加电压, 产生电流, 从而建立磁场	将两片金属板用介质(如空气、电解质等)隔开就构成一个简单的电容器。在两侧极板上加电压; 两极板分别聚集不同极性的电荷, 介质中建立电场
3	基本定义和特性	$L = \frac{\psi}{i} \text{ [H(亨)] (常用 mH, } \mu\text{H)}$ $\psi \text{——磁链 [V} \cdot \text{s(伏秒) 或 Wb(韦伯)]}$ $i \text{——电流 [A(安)]}$  <p>线性电感的 韦安特性</p>	$C = \frac{q}{u} \text{ [F(法)] (常用 } \mu\text{F, pF)}$ $q \text{——电荷量 [C(库)];}$ $u \text{——电压 [V(伏)]}$  <p>线性电容的 库伏特性</p>
4	电压-电流关系式	$u = \frac{d\psi}{dt}$ $= L \frac{di}{dt}$ <p>任一时刻电感上电压与该时刻电流的变化率(变化速度)成正比</p>	$i = \frac{dq}{dt}$ $= C \frac{du}{dt}$ <p>任一时刻电容上电流与该时刻电压变化率(变化速度)成正比</p>

序号	类别	电 感	电 容
5	微分、积分关系	电压与“电流的微分”成正比,或电压正比于“电流的微分”	电流与“电压的微分”成正比,或电流正比于“电压的积分”
6	L中 <i>i</i> 、C上 <i>u</i> 不能突变	电感内的电流不能突变,因为若 <i>i</i> 突变,则 $di/dt = \infty, u = \infty$ ,需要无穷大功率电源,这是不可能的,线圈内部总有电阻。但当通电和断电瞬间, $di/dt$ 确实很大。特别是断电,必须要为“放磁”提供通路,限制过电压	电容两端电压不能突变,因为若 <i>u</i> 突变,则 $du/dt = \infty, i = \infty$ ,需要无穷大功率电源,这是不可能的,电容两端间总有电阻。但当通电和断电瞬间, $du/dt$ 确实很大。特别是通电,必须要为“充电”电路接入电阻,以限制过电流
7	L“短直”,C“隔直”	当通过电感的电流为常量(直流)时,虽有电流但无电压,故电感有“短直”作用(直流电阻为零)	当加于电容的电压为常量(直流)时,虽有电压但无电流,故电容有“隔直”作用(直流电阻为 $\infty$ )
8	斜坡信号的作用	<p>从产生原因到作用结果上看,电流变化产生电压。若<math>di/dt = \text{常数}</math>即电流恒速变化时,则<i>u</i>=常数。见下图波形例</p>  <p>图(a)</p>	<p>从产生原因到作用结果上看,电压变化产生电流。若<math>du/dt = \text{常数}</math>即电压恒速变化时,则<i>i</i>=常数。见下图波形例</p>  <p>图(b)</p>
9	正弦信号的作用	<p>若<math>i = I_m \sin \omega t</math>,则<math>u = L di/dt = I_m \omega L \cos \omega t</math>,<i>i</i>、<i>u</i>波形如图(a)所示。由图可见,电压超前于电流<math>90^\circ</math></p>  <p>图(c)</p>	<p>若<math>u = U_m \sin \omega t</math>,则<math>i = C du/dt = U_m \omega C \cos \omega t</math>,<i>u</i>、<i>i</i>波形如图(b)所示。由图可见,电压滞后于电流<math>90^\circ</math></p>  <p>图(d)</p>

序号	类别	电 感	电 容
10	功率	$P=ui=Li \frac{di}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} Li^2 \right)$ 若 $i>0$ : ① $di/dt>0$ , 则 $P=ui>0$ 吸收功率, ② $di/dt<0$ , 则 $P=ui<0$ , 发出功率; 若 $i<0$ : ③ $di/dt<0$ , 则 $P=ui>0$ , 吸收功率; ④ $di/dt>0$ , 则 $P=ui<0$ , 发出功率。 由图可见, 在一周期内, 电感吸收功率=发出功率, 故电感不消耗功率	$P=ui=Cu \frac{du}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{C}{2} u^2 \right)$ 若 $u>0$ : ① $du/dt>0$ , 则 $P=ui>0$ , 吸收功率, ② $du/dt<0$ , 则 $P=ui<0$ , 发出功率; 若 $u<0$ : ③ $du/dt<0$ , 则 $P=ui>0$ , 吸收功率, ④ $du/dt>0$ , 则 $P=ui<0$ , 发出功率。 由图可见, 在一周期内, 电容吸收功率=发出功率, 故电容不消耗功率
11	能量	从时刻 $t_0$ 至 $t_1$ , 电感的能量为 $W = \int_{t_0}^{t_1} u(\xi) i(\xi) d\xi$ $= \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(t_0)$ 若 $t_0$ 时刻 $i(t_0)=0$ , 则 $W = \frac{1}{2} Li^2$ 任一时刻电感中储存的磁场能量只与该时刻的电流瞬时值有关, 而与电流的建立过程无关	从时刻 $t_0$ 至 $t$ , 电容的能量为 $W = \int_{t_0}^t i(\xi) u(\xi) d\xi$ $= \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(t_0)$ 若 $t_0$ 时刻 $u(t_0)=0$ , 则 $W = \frac{1}{2} Cu^2$ 任一时刻电容上储存的电场能量只与该时刻的电压瞬时值有关, 而与电压的建立过程无关

**【例 1-1】** 在  $0 \sim (2\pi/50)$ s 时间内, 通过 30mH 电感的电流为  $i=10.0\sin 50t$ A [见上表中序号 9 图 (a)], 试求电感的电压、功率和能量。

解  $u=L \frac{di}{dt} = 30 \times 50 \times 10.0 \cos 50t = 15.0 \cos 50t$  (V) [因为  $\frac{di}{dt} = 50 \times 10.0 \cos 50t$ ]

$p=ui=15.0 \cos 50t \times 10.0 \sin 50t = 75.0 \sin 100t$  (W) [因为  $2\cos 50t \times \sin 50t = \sin 2 \times 50t$ ]

$W = \int_0^t p dt = \int_0^t 75.0 \sin 100t = 0.75(1 - \cos 100t)$  (J)

[因为  $\int_0^t \sin 100t = (1 - \cos 100t)/100$ ]

$u$ 、 $i$ 、 $p$  和  $w$  的波形如表 1.2.1-1 中序号 9 图 (a)、(c) 所示。

**【例 1-2】** 在  $0 < t < 5\pi$  (ms) 时间内, 一个  $20\mu\text{F}$  的电容两端的电压为  $u=50.0\sin 200t$  (V), 试求电荷量、功率和能量。

解  $q=Cu=20 \times 50.0 \sin 200t = 1000 \sin 200t$  ( $\mu\text{C}$ )

$i=C \frac{du}{dt} = 20 \times \frac{d50.0 \sin 200t}{dt} = 0.20 \cos 200t$  (A)

$p=ui = \frac{d}{dt} \left( \frac{C}{2} u^2 \right) = 5.0 \sin 400t$  (W)

$W = \int_{t_1}^{t_2} p dt = 12.5(1 - \cos 400t)$  (mJ)

在  $t$  自 0 至  $2.5\pi$  (ms) 时间内, 电压和电荷量分别从 0 增至  $50.0\text{V}$  和  $1000\mu\text{C}$ , 储存的电场能量也由 0 增至  $25\text{mJ}$ 。在此后的  $2.5\pi$  (ms) 时间内, 将电场能量返回给电源, 使这期间的能量  $W$  呈下降减小趋势 (放电)。参见表 1.2.1-1 中序号 9 图 (b)、(d)。注意, 这里的时间轴单位为 ms。

### 1.2.2 有源元件

任何电路工作都必须有供给能量的电源。电源有直流电源 (如电池、直流发电机) 以

及交流电源（如由交流发电机及变压器输出的交流电源）。电源常由电动势  $E$  或  $e$  和内阻  $R_0$  或内阻抗  $z_0$  二者组合构成，并有电压源和电流源之分。

### (1) 电压源

一个理想电压源（简称恒压源）其输出电压为恒值，不管负载电阻或电流多大都保持不变。如图 1.2.2-1 (a) 所示，其电压特性为一水平线。理论上讲，如果负载电阻  $R_L=0$ ，则其电流  $i=u/R=e/R=\infty$ ，然而这是不可能的。任何电源，哪怕是刚买来的新电池，都是有内阻的，电源都不可能产生无穷大的功率或电流。而且线路导线上也电阻（除非是绝对超导体），加在负载上的电压一定比电源的电动势小，例如图 1.2.2-1 (b) 中电源电动势  $e=10\text{V}$ ，电源内阻  $R_0=0.01\Omega$ ，那么若负载  $R_L=1\Omega$ ，则输出到负载上的电压  $u$  要比电势  $e$  小约 1%，因为按照分压的原理，回路总电阻  $R_\Sigma=R_L+R_0=(1+0.01)\Omega=1.01\Omega$ ，负载  $R_L=1\Omega$ ，故其上电压为电动势的  $1/1.01\approx 99\%$ 。

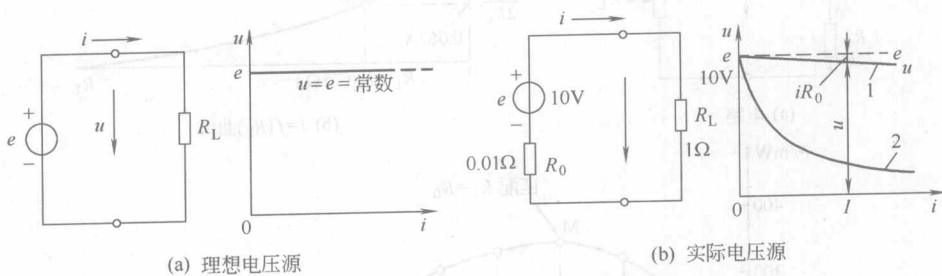


图 1.2.2-1 电压源及其输出特性

一个好的电压源，其输出电压  $u$  受其本身内阻影响很小，亦即其内阻很小，对外界负载变化有很“强”的适应力。相反，一个较差的电压源，稍一带负载，其输出电压就可能下降得很厉害。如用过的旧电池，用万用表测量仍可能有一定的电压，然而一带负载，输出电压立即降至接近于零。在第 3 章介绍的放大器，要求其输出电阻尽可能小，这个输出电阻对于放大器这一信号源来讲就是源内阻。

一个电压源，随着负载电阻  $R_L$  的减小，输出电流增大。当负载电阻  $R_L=0$  即所谓短路时，电路中将流过最大的电流，见图 1.2.2-1：

$$i = \frac{e}{R_L + R_0} = \frac{e}{R_0} = i_{\max}$$

例如一节高能电池的  $e=1.5\text{V}$ ，其内阻  $R=0.1\Omega$ ，若忽略导线电阻，在使用中发生短路其  $i=15\text{A}$ ，这是一个相当大的数值，极易把电池烧坏。但有时也利用短路来进行一些测试，比如在做发电机发电能力试验时，有意将其输出短路来看其短路电流是否能达到要求。又如在检查 1.5V 电池是否有电时，也常用万用表  $\times 100\text{mA}$  挡瞬时触碰电池两端，当表针能达到约 50mA 以上且可稳定 1~2s 时，则表明电池还有足够的电，否则说明电池没电了。

图 1.2.2-1 (b) 中线 1 是比较平直的，代表刚性比较好的电压源特性，电压  $u$  随负载电流  $i$  增加呈直线下降的趋势，其内阻  $R_0$  很小，短路电流是会很很大的。但也有的直流电源，如直流串励发电机，随电流增大其内部反电动势和内阻压降也增大，输出电压  $u$  随  $i$  增加是沿向下弯的曲线下落的（线 2），这时短路电流就可能不大，它甚至可以工作在输出短路状态下。

短路电流可以计算出来。如图 1.2.2-2 (a) 中，当  $R_L=0$  时， $i=10\text{V}/75\Omega=0.13\text{A}$ 。图 (b) 示出负载电流  $i$  随负载电阻  $R_L$  增加而减小的变化曲线。当  $R_L \rightarrow \infty$  时， $u=e=10\text{V}$ ，即负载开路时端电压  $u$  等于电源电势  $e$ 。又因为



而  $i = e / (R_0 + R_L)$ ，故有

$$u = iR_L$$

或

$$u = \frac{e}{R_0 + R_L} R_L$$

故当  $R_L \rightarrow \infty$  时与  $R_L$  相比较  $R_0$  可以忽略。比如  $R_L = 100R_0$ ，则电压约为电动势的 99%。

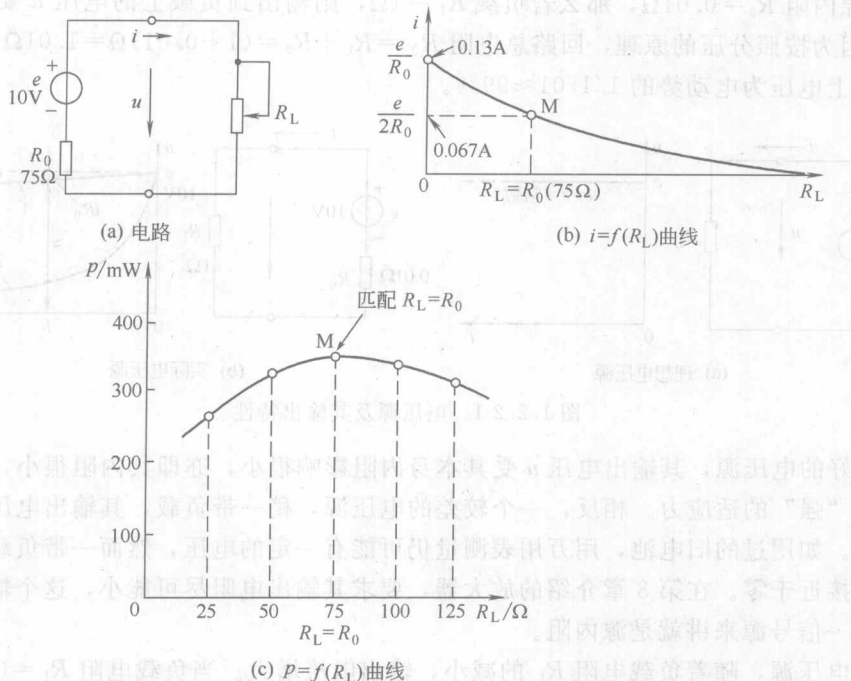


图 1.2.2-2 改变负载电阻  $R_L$  时电流  $i$  和功率  $p$  的变化曲线

图 1.2.2-2 (c) 示出输出功率  $p = ui$  随负载电阻  $R_L$  变化的曲线。这里  $e = 10V$ ， $R_0 = 75\Omega$ 。当  $R_L = 0$  时  $u = 0$ ， $p = 0$ ；当  $R_L \rightarrow \infty$  即开路时  $i = 0$ ， $p = 0$ ，故是一条中间上凸的曲线。

注意图 1.2.2-2 中  $R_L = R_0$  这一点，此时电流等于短路 ( $R_L = 0$ ) 电流的一半，此例中为 0.067A。这一点称为匹配点。利用公式  $i = \frac{e}{R_0 + R_L}$  分别计算出在  $R_L = 25\Omega$ 、 $50\Omega$ 、 $75\Omega$ 、 $100\Omega$  和  $125\Omega$  不同值时的电流分别为 100mA、80mA、66.7mA、57.1mA 和 50mA。再利用公式  $p = ui = i^2 R_L$  计算功率分别为 250mW、320mW、334mW、326mW 和 313mW。将  $p = f(R_L)$  各点画成曲线如图 1.2.2-2 (c) 所示。由图不难看出，当  $R_L = R_0$  时电源输出到负载上的功率最大。这就是所谓最大功率传递定理。既不是在负载电阻  $R_L$  很小，以使电流很大情况下，也不是在负载电阻  $R_L$  很大，以使电压很大情况下，而是在内阻与外阻相等即匹配的情况下才能最大限度地使电源的功率传递给负载。这个定理对交流电路也是适用的（二者电导幅值相等），它们广泛应用在音频系统，如收音机扬声器以及音响传输线和通信线路上。在放大器进行级联时，若要求传输最大功率，也应当使内阻与负载匹配。

## (2) 电流源

与上节所述电压源相反，还有一种电源是电流源，它的内阻很大，其产生的电流却不随

负载电阻的变化而变化。

图 1.2.2-3 (a) 示出一个电路, 电源内阻很大, 比如  $R_0 = 10\text{M}\Omega$ , 电源电动势比如  $e = 12\text{V}$ , 带  $R_L$  负载。若  $R_L = 0$ , 则电流

$$i = \frac{e}{R_0 + R_L} = \frac{e}{R_0} = \frac{12\text{V}}{10\text{M}\Omega} = 1.2\mu\text{A}$$

若  $R_L = 10\text{k}\Omega$ , 则  $i = e / (R_0 + R_L) = 1.1988\mu\text{A}$ ; 若  $R_L = 100\text{k}\Omega$ , 则  $i = 1.188\mu\text{A}$ 。可见, 负载电阻从 0 经  $10\text{k}\Omega$  到  $100\text{k}\Omega$ , 电流  $i$  仅下降约 1%。这表明, 此电源输出电流近似为恒值。图 1.2.2-3 (b) 示出其  $i$  与  $R_L$  的关系曲线。

一般, 要想使得电源具有电流源的特性, 应满足条件

$$R_0 \geq 100R_L$$

实际中很少用电压源串一个大电阻来做电流源的, 如上例中那么小的电流很少会用到。但在实际中确有很多器件, 如晶体管、场效应管等, 确是能产生有足够大恒流的电流源。

根据诺顿定理 (见后), 一个电压源串一个电阻, 可以等效为一个电流源并联该电阻, 于是可将图 1.2.2-3 (a) 点画线框内所示电路改画成图 1.2.2-4 (a) 点画线框内所示的电路。图 1.2.2-4 (b) 示出一个实际的电流源, 它等效于一个理想电流源 ( $i = 2\text{mA}$ ) 与一个电阻 ( $1\text{M}\Omega$ ) 并联。这个并联电阻对于在负载  $R_L = \infty$  即开路情况下给电流源电流 (此例中为  $2\text{mA}$ ) 提供通路是必须的。例如, 在负载短路即  $R_L = 0$  时, 所有电流 ( $2\text{mA}$ ) 均要经短路线流过, 负载电流最大, 为  $2\text{mA}$ 。若负载电阻增加至  $R_L = 10\text{k}\Omega$ , 则电流约有 99% 从负载电阻上通过 ( $10\text{k}\Omega$  是  $1\text{M}\Omega$  的 1%)。负载电阻继续增加到  $R_L = 1\text{M}\Omega$ , 则有一半的电流 ( $1\text{mA}$ ) 从负载  $R_L$  上通过, 另一半在内阻  $R_0$  上通过。当负载电阻  $R = \infty$  即上面所说的开路情况下, 所有电流 ( $2\text{mA}$ ) 都要在内阻  $R_0$  上通过。

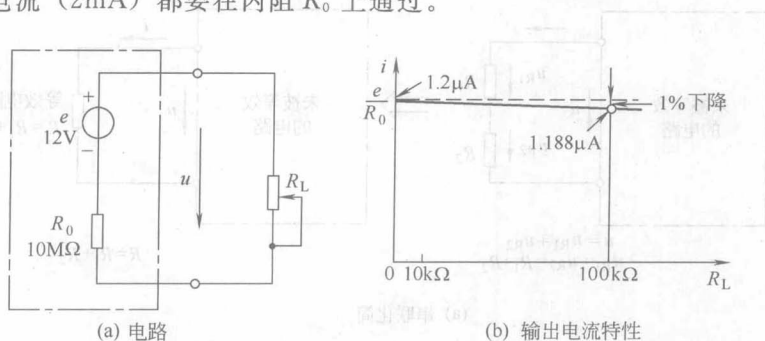


图 1.2.2-3 电压源及其特性

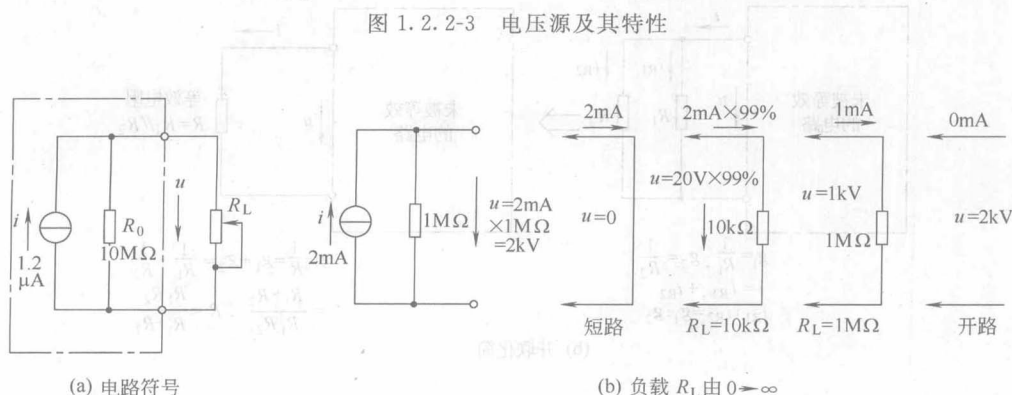


图 1.2.2-4 电流源符号和负载变化

通过以上分析可以知道，如同电压源负载短路将要产生最大电流一样，电流源的负载开路，则在电流源内部 ( $R_0$  上) 也将产生最大的电压。这两种情况在实际工作中都是应当避免的。与电压源电压不变而电流随负载电阻变化而变化相对应，电流源电流不变而电压则随负载电阻变化而变化。图 1.2.2-4 (b) 中，当负载开路时电压竟能达到 2kV。

## 1.3 等效和替代

在分析电路时经常会用到等效变换和替代的概念。等效和替代是指为了计算的方便，将原电路的一部分即被等效的电路用另一部分即等效电路置换，二者具有相同的端口 (未被等效部分与被等效部分的接口) 方程 ( $u$ 、 $i$  特性)。

### 1.3.1 电阻电路的等效变换

#### (1) 电阻的串并联等效化简

电阻串联时流过同一电流，其等效电阻等于各电阻之和，见图 1.3.1-1 (a)。电阻串联常用于分压，各串联电阻上的电压比等于电阻比。

电阻并联时承受同一电压，等效电导等于各电导之和。两个电阻并联后的等效电阻 (电导的倒数) 等于一个分数，分子为两电阻之积，分母为两电阻之和，见图 1.3.1-1 (b)。电阻并联常用于分流，各并联电阻上的电流比例于各支路上的电导或电阻的倒数比。

#### (2) Y-△形电阻连接方式间的等效变换

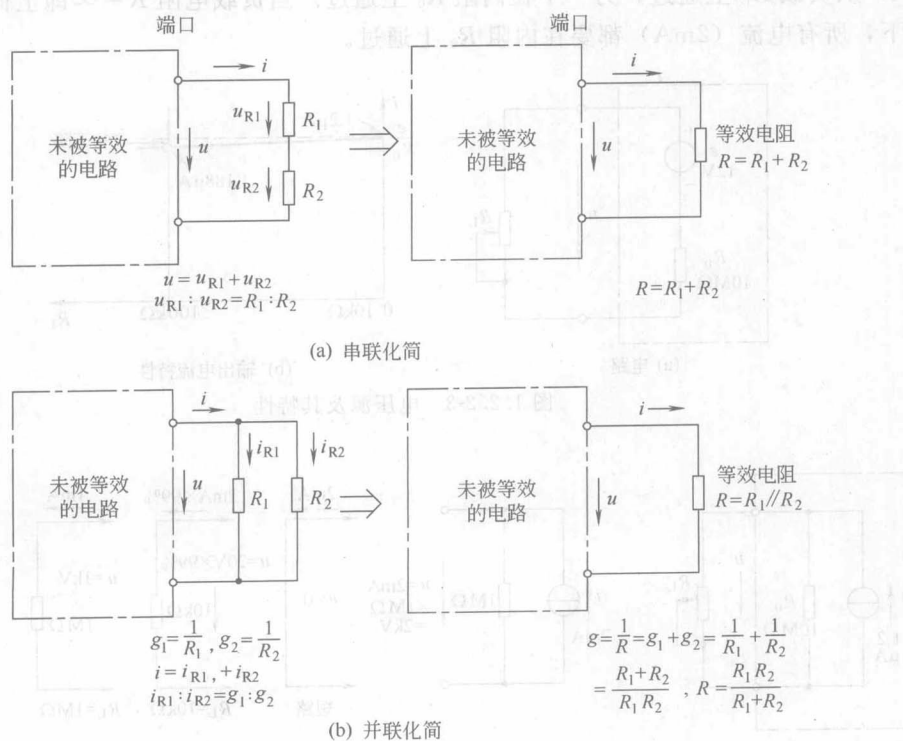


图 1.3.1-1 电阻的串并联化简