

# 电子线路基础

陈诗闻 编著

东南出版社

## 内 容 简 介

本书以原教育部制订的综合大学物理专业电子线路教学大纲为依据，参照国内外有关教材，结合多年来的教学实践和当前电子技术的发展状况编写而成。内容包括线性电路基础、半导体电子器件、放大电路基础、反馈放大器、自激振荡器、集成运算放大器、直流稳压电源、脉冲技术、数字电路基础、集成触发器、数字集成电路的应用。本书大致适用于70~90学时的课堂教学。

本书可作为高等院校理、工科有关专业的教材或教学参考书，也可供各有关学科的科技人员参考。

### 电子线路基础

陈诗闻 编著

责任编辑 陶国庆

高等教育出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京昌平环球科技印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

开本：850×1168 1/32 印张：18.875 字数：488千字

1991年2月第1版 1991年2月第1次印刷

印数：1-5000 定价：15.95元

ISBN 7-5029-0450-6/TN·0007

## 前 言

电子线路是许多专业必修的技术基础课。课程面临着两对矛盾：一是由于电子技术发展迅速，内容极其丰富且急剧膨胀，而本课学时有限；二是物理类学生经过较长期的数学物理基础课训练，习惯于严密的推导计算，而具有非线性器件的电子线路不能得到数学上的解析解。课程中常用的图解和分段线性近似解都有一定的局限性，加之半导体器件的离散性和实际电路中寄生参量的影响，电路的精确计算不可能实现，学生对此感到不严格，但又不易掌握。

笔者在教学实践和教材编写的过程中，对于内容和课时这一矛盾的解决办法是抓基础和前哨：加强基本概念，介绍发展动态；对于后一矛盾，则使思维能力的训练重于知识的传授，培养学生掌握电子线路的学习、思考方法和认识学科自身（不同于数学和物理学）的规律性。

打好基础是培养智能的重要途径，因此本书宁可在内容的广度上作些牺牲，而对基本概念、基本原理和基本分析方法作了由浅入深的、准确透彻的阐述。学生若对基本内容有确切的概念和深刻的印象，有举一反三的能力，就会适应电子科技的发展，接受和开创新事物。

电子技术的发展，表现在器件的更新和电路的改进两方面，集成电路的进展则是两者的统一。

电子器件的共性是非线性和有源性，每种器件的个性由其特性曲线表现出来。器件不断更新，新器件的物理特性从特性曲线上便可一目了然。在特性曲线上作图解分析能揭示器件的运行状态和求解电路的工作过程。本书较详细地介绍图解分析和波形

分析，使读者对器件的特性和电路工作的全过程有清晰的物理概念。

新电路的出现，总是针对原有电路的某种缺点而加以克服，或因某种实际需要而进行设计的。电路的结构，反映出人的构思。本书介绍最新的模拟集成电路和数字集成电路，同时简要说明电路的演化和电路构成的思路，希望有助于读者理解基本原理，提高对电路的分析能力和部分设计能力。

数字电路比模拟电路易于掌握，按认识规律先易后难，应先讲数字电路。但笔者考虑到：从信号波形讲，由简谐波到多谐波（即正弦波到脉冲波）为由简入繁；从器件的运行区域讲，由线性区进入非线性区，直至一个周期全部时间都在非线性区更为顺理成章。而且，模拟电路中基本概念较集中，以它为基础有利于对数字电路的学习和理解。如同高等数学中极限的概念比微分运算难，但必须在极限的基础上导出微分一样。因此本书采取先模拟后数字的次序。

本书每章后的思考题和习题，是为巩固所学的理论知识、加深对概念的理解，培养分析问题和解决问题的能力而安排的。

本书第一章由有色冶金设计院陈武亮同志帮助编写。

浙江工学院著名电子技术专家邓汉馨教授在百忙中详细审阅了本书全部书稿，并提出了宝贵的意见。在此谨表衷心的感谢！

笔者水平有限，书中错误和不足之处，恳切希望读者批评指正。

陈诗闻于北京大学

1989.5.12

# 目 录

## 前 言

第一章 线性电路基础	1
§1.1 电路参数	1
§1.2 线性电路的几个常用定理	6
§1.3 信号的频谱分析	14
§1.4 系统的频率特性	22
§1.5 电路中的过渡过程	26
思考题与习题	41
第二章 晶体二极管、三极管和场效应管	46
§2.1 半导体基本知识	46
§2.2 晶体二极管	54
§2.3 晶体三极管	65
§2.4 场效应晶体管	80
思考题与习题	95
第三章 放大电路基础	102
§3.1 共发射极放大器概述	102
§3.2 放大电路的图解分析	111
§3.3 放大电路的晶体管模型分析	121
§3.4 放大器静态工作点的稳定	130
§3.5 共集电极放大电路	138
§3.6 共基极放大电路	145
§3.7 场效应管放大器	148
§3.8 放大器的频率特性	155
§3.9 多级放大器	172
§3.10 功率放大器	179
思考题与习题	189

第四章	反馈放大器和自激振荡器	198
§4.1	反馈的基本概念	198
§4.2	负反馈的分类	200
§4.3	负反馈对放大器性能的影响	204
§4.4	负反馈放大器的稳定性	215
§4.5	振荡器的工作原理	226
§4.6	LC振荡器	228
§4.7	RC振荡器	241
§4.8	石英晶体振荡器	254
	<b>思考题与习题</b>	262
第五章	集成运算放大器	270
§5.1	运算放大器概述	270
§5.2	运算放大器内部的级间耦合与零点漂移	271
§5.3	差动式直流放大器	276
§5.4	集成运算放大器的内部结构和技术参数	287
§5.5	集成运算放大器的应用基础	308
§5.6	集成运放在信号运算方面的应用	324
§5.7	集成运放的线性正反馈应用	336
	<b>思考题与习题</b>	342
第六章	直流稳压电源	351
§6.1	整流电路	351
§6.2	滤波电路	355
§6.3	稳压电路	361
	<b>思考题与习题</b>	383
第七章	脉冲电路	388
§7.1	脉冲电路的基本知识	388
§7.2	分立元件单稳态触发器	401
§7.3	集成运放组成的脉冲波形发生器和变换器	413
	<b>思考题与习题</b>	432
第八章	数字电路基础	440
§8.1	基本逻辑门电路及其逻辑关系	441

§8.2	集成电路逻辑门	450
§8.3	数字逻辑的基本分析方法	478
	<b>思考题与习题</b>	497
<b>第九章</b>	<b>集成电路触发器</b>	<b>501</b>
§9.1	RS触发器	501
§9.2	维持-阻塞D触发器	506
§9.3	主从JK触发器	510
§9.4	触发器的转换	515
§9.5	MOS触发器	518
§9.6	集成逻辑门构成的脉冲单元电路	520
	<b>思考题与习题</b>	531
<b>第十章</b>	<b>数字集成电路的应用</b>	<b>534</b>
§10.1	寄存器	534
§10.2	计数器	538
§10.3	加法器	547
§10.4	译码器和数字显示电路	552
§10.5	存储器	565
§10.6	数/模转换和模/数转换	571
	<b>思考题与习题</b>	587
<b>附录</b>	<b>本书常用符号</b>	<b>592</b>
	<b>参考文献</b>	<b>595</b>

# 第一章 线性电路基础

线性电路中，电压和电流间的变化关系可以由线性代数方程或线性微分方程来表达。常用的电子电路在一定的工作条件下都可等效为线性电路，所以，对线性电路的分析是研究电子线路的基础。

## §1.1 电路参数

电路参数包括无源元件和有源元、器件。前者如电阻器、电容器、电感器等，后者如电源、信号源、电子管、晶体管等。

### 一、电路元件

电子电路由电阻器、电容器、电感器、变压器以及各种不同的电子器件组成。这些元件、器件的主要物理特性明确，几何尺度比工作的信号波长小得多，是电路中的集中参数。

电阻器、电容器和电感器是二端元件，它们的主要物理特性如下：

$$\frac{u_R}{i_R} = R \quad (1.1)$$

$$\frac{u_C}{\int i_C dt} = \frac{1}{C} \quad (1.2)$$

$$\frac{u_L}{\frac{di_L}{dt}} = L \quad (1.3)$$

式中  $u_R$ 、 $u_C$  和  $u_L$  为电阻  $R$ 、电容  $C$  和电感  $L$  两端的电压， $i_R$ 、 $i_C$  和  $i_L$  分别为流过它们的电流。

(1.1) 式、(1.2) 式和 (1.3) 式都是线性方程，特征参



数  $R$ 、 $C$  和  $L$  都是常数，与其端电压和流过其上的电流无关，这种元件称为线性元件。如果特征参数还与时间无关，则为线性定常元件。

变压器是四端元件，它由相互耦合的初级和次级线圈绕制而成，其端电压  $u_1$ 、 $u_2$  和流过其上的电流  $i_1$ 、 $i_2$  之间有如下关系：

$$\left. \begin{aligned} \frac{u_1}{u_2} &= \frac{N_1}{N_2} \\ \frac{i_1}{i_2} &= \frac{N_2}{N_1} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

式中  $N_1$  为初级线圈匝数， $N_2$  为次级线圈匝数，它们是常数，因此变压器也是线性元件。

由 (1.1) ~ (1.4) 式所描述的电阻器、电容器、电感器和变压器的主要物理特性是理想化了的，实际的元件还存在分布参数。分布参数不是人工有意接入的，而是实际电路中难以避免的。电感或变压器中的绕线损耗电阻、电容器中的漏电阻、各种元件中的卷绕电感、引线电感、变压器的漏感和磁化电感以及元件和电路中的端间或线间的电容等等都是分布参数。分布参数也称寄生参数，它与元件的材料、制造工艺和工作频率有关，频率高时波长短，分布参数的影响较为明显。实际电路中以集中参数元件来表示，有时也需酌情考虑分布参数的影响。

有些元件的端电压与流过元件的电流之间的关系不能用线性方程表示，这些元件称为非线性元件（或称器件）。各种类型的电子器件都是非线性元件。实际上任何电路元件都是非线性的，例如，通过电阻的电流过大时，电阻器的温度上升，电阻值就不是常数。可见线性元件的直线性是有限度的。而另一方面，非线性元件在一定工作范围内呈现出线性特点，可以等效为线性元件。

## 二、电源

电子线路中的电源有两种：独立电源和相关电源，后者又称

受控电源。

### 1. 独立电源

独立电源的基本参数（源电压或源电流）完全由电源的内部因素决定，与电路中任一支路的电流或任两端点间的电压无关。独立电源给电路提供能量或信号。

独立电源又分电压源和电流源。

#### (1) 电压源

理想的电压源  $e_s(t)$  接到任一电路中两端都能保持恒定的电压，而与流过电路的电流大小无关。

电压源保持恒定的电压是对不同的电流来说的。对于时间来说，电压可以是时间的函数，函数的形式由电源内部因素决定，与电路中任何其它电压或电流无关。直流电压源输出的电压  $E$  是一个与时间无关的常数，各种信号发生器输出的电压随时间则有正弦形变化、锯齿形变化或阶跃形变化等。

理想电压源的内阻为零。在某一时刻  $t$ ，电压源  $e_s(t)$  在电压-电流坐标上的特性曲线应是平行于电流轴、与电压轴的截距为源电压  $e_s(t)$  的直线。但任何实际的电压源其内阻都不为零，输出电流在内阻上有电压降，实际电压源的端电压  $u_s(t)$  小于源电压  $e_s(t)$ ，电压-电流坐标上的特性曲线不平行于电流轴，而是倾斜的。电压源的端电压  $u_s(t)$  与输出电流  $i_s(t)$  有如下关系：

$$u_s(t) = e_s(t) - R_s i_s(t) \quad (1.5)$$

式中  $R_s$  为实际电压源的内阻。特性曲线与电压轴的交点  $e_s(t)$  即输出电流  $i_s(t) = 0$  的端电压，也称作开路电压。

于是，一个实际的电压源可以用一个理想的电压源  $e_s(t)$  和一个内阻  $R_s$  串联而成的等效电路来表示。 $R_s$  越小，实际的电压源越接近于理想的电压源。

#### (2) 电流源

理想的电流源  $i_s(t)$  接到任一电路中流入电路的电流值保持恒定，而与端电压变化的大小无关。

恒定的电流是电流源对不同的端电压（端电压由与电流源相连的外电路决定）来说的。对时间来说，电流可以是时间的函数，函数的形式由电源内部因素决定，与电路中任何其它电压或电流无关。电流源有不随时间改变的直流电流源和随时间改变的交流电流源之分，本课程中的符号如图1.1 (a) 和图1.1<sup>(b)</sup> 所示。

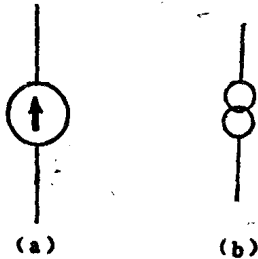


图1.1 直流电流源  
与交流电流源

理想电流源的内阻为 $\infty$ 。在某一时刻  $t$ ，电流源  $j_s(t)$  在电压-电流坐标上的特性曲线应是平行于电压轴、与电流轴的截距为  $j_s(t)$  的直线。但任何实际的电流源其内阻不可能为 $\infty$ ，其特性曲线也不平行于电压轴，而是倾斜的，即电流随着端电压的增加而减少。电流源流入外电路的电流  $i_s(t)$  与端电压有如下关系：

$$i_s(t) = j_s(t) - \frac{u_s(t)}{R_s} \quad (1.6)$$

式中  $j_s(t)$  为电流源的源电流， $R_s$  为电流源的内阻， $\frac{u_s(t)}{R_s}$  为内阻  $R_s$  所分走的电流。特性曲线与电流轴的交点  $j_s(t)$  即  $u_s(t) = 0$  时的电流，也称作短路电流。

于是，一个实际的电流源可以用一个理想的电流源  $j_s(t)$  和一个内阻  $R_s$  并联而成的等效电路来表示。 $R_s$  越大分走的电流越小，实际电流源越接近于理想电流源。

## 2. 相关电源

相关电源又称受控电源，其基本参数与电路中某个参数有关，或者说受某个参数的控制。相关电源不给电路提供能量或信号，在电路中仅能将电源提供的能量转化为信号能量输出。受控电源的名称主要是用来模拟某些电子器件（如晶体管）各电极间

的电流或电压的控制作用。相关电源有两条支路：支路1不是开路就是短路；支路2不是电压源就是电流源。支路2中的电源或是支路1的开路电压的函数，或是支路1的短路电流的函数。也就是说，支路2的电源受到支路1中的电压或电流的控制。

相关电源（受控电源）有四种情况，如图1.2所示。图中(a)是电压控制电压源，(b)是电压控制电流源，(c)是电流控制电压源，(d)是电流控制电流源。

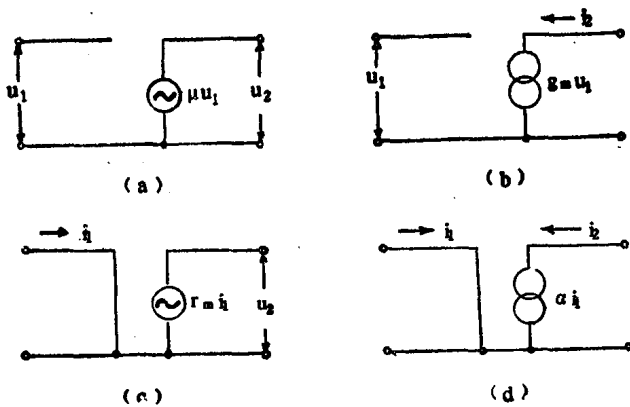


图1.2 相关电源的四种情况

四种受控电源分别可用下列方程表示：

$$\left. \begin{aligned}
 \text{电压控制电压源} \quad u_2 &= \mu u_1 \\
 \text{电压控制电流源} \quad i_2 &= g_m u_1 \\
 \text{电流控制电压源} \quad u_2 &= r_m i_1 \\
 \text{电流控制电流源} \quad i_2 &= \alpha i_1
 \end{aligned} \right\} (1.7)$$

(1.7) 式中四个比例系数  $\mu$ 、 $g_m$ 、 $r_m$ 、 $\alpha$  分别代表电压比（无量纲）、转移导纳（电导量纲）、转移阻抗（电阻量纲）、电流比（无量纲）。如果它们都是不随电压或电流变化的常数，则受控电源为线性受控源。

实际的受控电源中，起控制作用的支路1既非开路，也非短

路，而是接有电阻或其它元件的，受控制的电源支路 2 也带有内阻。明显的例子是：共发射极连接的晶体管，集电极电流  $i_c$  受基极电流  $i_b$  的控制， $i_c = \beta i_b$ ， $\beta$  在交流小信号工作条件下为常数。所以晶体管可用线性电阻和线性电流控制电流源来模拟。如图 1.3 所示。

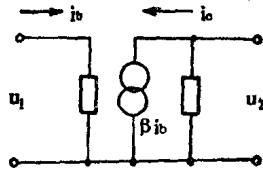


图 1.3 晶体管模拟为电流控制电流源

## §1.2 线性电路的几个常用定理

全部由线性元件构成的电路称为线性电路，凡含有非线性元件的电路称为非线性电路。描述线性电路中电压和电流间变化关系用的是线性方程。但对于非线性电路，却不能用解析式来表示，目前还没有统一的描述方法，只能针对某个具体问题，忽略次要矛盾，用近似法求解，其中分段线性近似法是分析非线性电路的方法之一。

这里介绍的几个线性电路的常用定理，是建立在求解线性方程的基础之上，又从实践中总结出来的规律，是分析处理问题的简便方法，不但能解决线性电路的问题，也能部分地解决非线性电路的问题。

### 一、叠加原理 (Superposition Principle)

线性系统具有均匀性，在输入信号  $x$  的作用下，响应（电路中某点的电压或某支路的电流）为  $f(x)$ ，则对于任意常数  $\alpha$ ，满足下列关系：

$$f(ax) = af(x) \quad (1.8)$$

线性系统具有可加性，在输入信号 $x_1$ 的作用下响应为 $f(x_1)$ ，在输入信号 $x_2$ 的作用下响应为 $f(x_2)$ ，则当 $x_1$ 和 $x_2$ 同时作用时，该系统的响应为：

$$f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2) \quad (1.9)$$

综合(1.8)式和(1.9)式所表示的特性，就是叠加原理，即：一个线性系统在几个独立输入信号( $x_1, x_2, \dots, x_n$ )的作用下的响应等于每个信号单独作用下的响应之和，表示为：

$$\begin{aligned} & f(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n) \\ &= \alpha_1 f(x_1) + \alpha_2 f(x_2) + \dots + \alpha_n f(x_n) \end{aligned} \quad (1.10)$$

式中 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 为 $n$ 个任意常数。

考虑电路中某一个信号单独作用时，就是把除此之外的信号源都当作零（遇电压信号将其短路而保留其内阻，遇电流信号将其开路而保留其内阻）。

例1.1 在图1.4(a)所示的电路中，试用叠加原理求流过电阻 $R_3$ 的电流。

解：考虑电流源 $I$ 单独作用时，将电压源 $E$ 短路，电路如图1.4(b)所示。流过 $R_3$ 的电流 $I'_3$ 为：

$$I'_3 = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I = \frac{2 \times 10^3 \Omega}{2 \times 10^3 \Omega + 1 \times 10^3 \Omega} \times 1.5 \text{mA} = 1 \text{mA}$$

考虑电压源 $E$ 单独作用时，将电流源 $I$ 开路，电路如图1.4(c)， $R_3$ 支路的电流 $I''_3$ 为：

$$I''_3 = \frac{E}{R_2 + R_3} = \frac{-6\text{V}}{2 \times 10^3 \Omega + 1 \times 10^3 \Omega} = -2 \text{mA}$$

流过 $R_3$ 的总电流 $I_3$ 应为：

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = 1 \text{mA} + (-2 \text{mA}) = -1 \text{mA}$$

如果在电路中遇到电抗元件，就要注意它的初始值。若初始有电压或电流，则也把它当作电源处理（电容为电压源，电感为电流源）。

如果电路中存在受控电源，只要受控电源和控制变量之间存

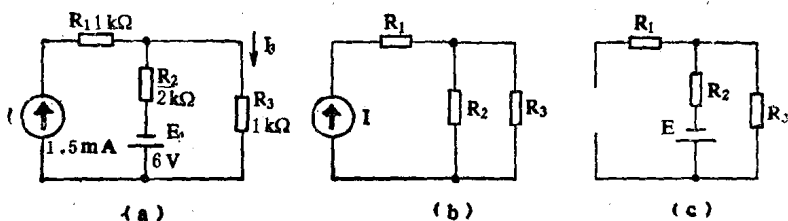


图1.4 例1.1图

在线性关系，叠加原理仍然适用，但不能假定受控电源为零。因为，当控制变量不为零时，受控电源不可能是零。

叠加原理只适用于线性电路，是线性电路分析与计算的普遍原理，应用非常广泛。它的理论基础是：线性方程（线性代数方程或线性微分方程）的解服从叠加原理。

非齐次线性微分方程的通解等于非齐次方程的一个特解与对应的齐次方程的通解的叠加，这在线性电路中就是由外加电动势和电路的初始状态共同引起的工作过程。若自由项是两项的叠加，则这个非齐次方程的特解就是自由项分别为  $e_1$  和  $e_2$  的两个非齐次方程的特解之和。这在线性电路中就是两个电动势（即电压源） $e_1$  和  $e_2$  同时作用于线性电路，结果等于  $e_1$  和  $e_2$  分别作用时所产生的电过程的叠加。

## 二、等效电压源定理 (Thevenin's Theorem)

一个复杂的电路，如果只要计算其中一个支路的电压和电流，可以将这个支路孤立出来，而将其余部分看作是一个有源二端网络——内部含有电源的、具有两个输出端的部分电路，如图1.5(a)所示。对于所要计算的这个支路而言，不管其余部分的电路内部如何复杂，只相当于一个电压源，包括电动势和内阻。换句话说，这个有源二端网络可简化为一个电动势  $\dot{U}'$  与内阻  $r'$  串联的等效电压源，如图1.5(b)所示。

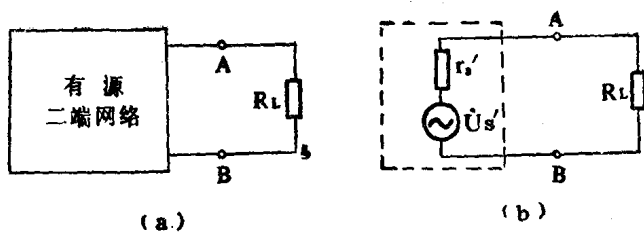


图1.5 等效电压源

经这样等效变换后，A和B两点间的电压和AB支路中的电流没有变动。电流 $\dot{I}$ 可由下式算出：

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}'_s}{r'_s + R_L} \quad (1.11)$$

式中等效电源的电动势 $\dot{U}'_s$ ，就是有源二端网络的开路电压，而等效电源的内阻 $r'_s$ 等于有源二端网络中全部独立电源皆为零值时从两端看进去的等效电阻。这种计算方法又称戴维南定理 (Thevenin's Theorem)。

等效电压源定理是指对外等效，也就是说，外接任何负载 $Z_L$ ，等效电源给出与二端有源网络同样的端电压和电流。因此，不论何种外部线路，等效电压源只有一个。

例1.2 电路如图1.6(a)所示。试用等效电压源定理来计算流过电表G的电流 $I_x$ 。

解：先画出等效电路，如图1.6(b)所示；再计算A、B两点开路时等效电压源的电压 $E'$ 。

$$E' = E \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$$

然后求等效电压源的内阻 $R'_s$ ：

$$R'_s = (R_1 \parallel R_2) + (R_3 \parallel R_4) = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$$



最后，得出流过电表的电流  $I_x$  为：

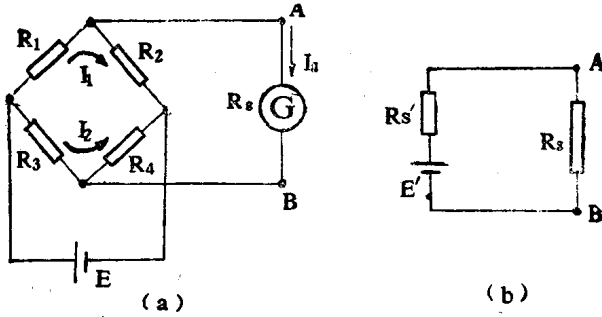


图1.6 例1.2图

$$I_x = \frac{E'}{R'_s + R_g}$$

式中  $R_g$  为电表  $G$  的电阻。

可见用等效电压源定理计算比用克希霍夫 (Kirchhoff) 定律求解要简便得多。

最后还需指出：戴维南定理要求作为等效电压源的有源二端网络内部是线性的，但外接负载或电路可以是非线性的。

### 三、等效电流源定理 (Norton's Theorem)

一个线性有源二端网络，对于外部电路来说，也可以等效为一个电流源并联一个内阻。电流源的电流  $\dot{I}'_s$  等于网络两个输出端短路的电流，并联内阻  $r'_s$  等于网络中所有独立电源为零值时两端的总电阻，如图1.7所示。

这种等效方法，称为诺顿定理 (Norton's Theorem)。

等效电流源定理也是对外等效。不论何种负载电路，等效电流源给出与原网络同样的电流和内阻。

实际上，一个有源线性二端网络既可用戴维南定理等效为电压源和内阻的串联，也可用诺顿定理等效为电流源和内阻的并联，它们又互等效。如图1.8(a)所示的电路，用戴维南定理等