

高等学校试用教材

电子线路

(第二版)

上册

武汉大学《电子线路》教材编写组 编

梁明理 改编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是在第一版的基础上参照1980年6月教育部制订的“综合大学物理学专业电子线路教学大纲”经改编写成的,适用于72学时(打星号内容不讲)至90学时的教学计划。

本版大体上按照“器件-模拟-数字”的体系编排,为了与电子技术的飞跃发展相适应,本版加强了集成电路和数字电路的内容,扩大了相应的篇幅。

全书分上、下两册,本册为上册,包括线性电路分析和信号问题、半导体器件及放大电路的分析。

第二版的审稿工作由兰州大学的席先觉同志和吉林大学的杨崇志同志主持,暨南大学的朱广漆同志、广西大学的苏百川同志、山西大学的陈秀岩同志和贵州大学的丁正昌同志参加了审阅。

本书可作为高等学校理科物理专业的试用教材,也可供有关科技人员参考。

责任编辑:郭玉凤

高等学校试用教材

电 子 线 路

(第 二 版)

上 册

武汉大学《电子线路》教材编写组 编

梁明理 改编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

佳木斯印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 7.375 字数 178,000

1979年3月第1版 1984年3月第2版 1984年8月第1次印刷

印数 00,001—13,340

书号 13010·0085 定价 1.20 元

第二版前言

本书是参照一九八〇年六月教育部制订的“综合大学物理学专业电子线路教学大纲”，在武汉大学电子线路教材编写组编《电子线路》第一版的基础上经过改编写成的。它适用于72学时（打*号内容不列入教学计划）至90学时的教学计划，可作为理科电子线路课程的教材。

本书大体上按照“器件-模拟-数字”的体系编排。第二章为器件部分，第三至七章、十一章为模拟电路，第八至十章为数字电路。第一章简述了本课将涉及到的几个线性电路和信号的问题，以弥补学生在学习本课之前电路方面知识的不足。

为了与八十年代电子技术的发展相适应，本版加强了线性集成电路和数字集成电路的内容。相应削减了分立元件的功率放大、多级放大、稳压电源、脉冲电路、门电路和触发器等内容。

本书在编写过程中，注意精选内容，避免浓缩和烦琐，在内容的编排上，注意由浅入深，加强基本概念的阐述和习题的合理安排，以使学完本课以后，能具有较强的分析问题和解决问题的能力。

为了提高电子线路的教学效果，建议教师采用本书作教材时，注意加强各教学环节的配合。有些内容（如单级RC放大器的设计等）可放到习题课去讲。本书还有某些没有讲过的内容（如功率放大、脉冲电路等），可在实验课的原理电路中补充。有些亦属重要的内容，如逻辑代数等，让学生充分预习，课堂上扼要讲解，可提高教学效率；还有一些必须了解的内容（目录中打△号），可布置学生自学。为了获得更好的教学效果，最好有挂图或幻灯相配合。我系魏慧如、张蕴、宋霁、周建平、许后香、吴令熙等同志审阅了本书

初稿并作了很多具体工作；许后香、张蕴和周建平同志协助演算了全部习题；梁红同志描绘了大部分图稿。华中工学院康华光老师对本书的大纲和内容处理等方面提出了许多带方向性的宝贵意见。

一九八三年四月在武汉开了审稿会。会议由编委兰州大学席先觉同志和主审单位吉林大学杨崇志同志主持，暨南大学、广西大学、山西大学、贵州大学等校的代表参加了会议。代表们指出了初稿中的错误和不妥之处，提出了许多改进的宝贵意见。

谨在此对审阅本书并提出宝贵意见的同志们以及在编写过程中给予本书热情帮助和支持的同志们，一并致以衷心的感谢。

由于编者业务水平的限制，书中一定会有错误和不妥之处，恳切希望使用本书的读者指正。

编 者

一九八三年六月

目 录

第一章 电路分析与信号简述

§ 1.1 电压源和电流源	1
1.1-1 独立源	1
1.1-2 受控源	3
§ 1.2 线性网络的几个定理	3
1.2-1 叠加定理	4
1.2-2 戴文宁定理	6
1.2-3 诺顿定理	7
1.2-4 密勒定理	7
§ 1.3 双口网络简介	9
1.3-1 双口网络的基本方程和网络参数	9
1.3-2 网络函数	14
§ 1.4 信号的频谱分析	17
1.4-1 信号的类型与特点	17
1.4-2 周期信号的频谱	19
习题与思考题	22

第二章 半导体器件的特性

§ 2.1 半导体的导电特性	25
2.1-1 本征半导体的导电特性	25
2.1-2 N 型半导体和 P 型半导体	29
§ 2.2 PN 结	32
2.2-1 PN 结的形成	33
2.2-2 PN 结的单向导电性	35
2.2-3 PN 结的伏安特性	38
2.2-4 PN 结的击穿	39
2.2-5 PN 结二极管的电容	41
2.2-6 不对称结	43

§ 2.3 半导体二极管	44
2.3-1 半导体二极管的结构	44
2.3-2 二极管的伏安特性	45
2.3-3 二极管的动态电阻	47
2.3-4 二极管的主要参数	47
2.3-5 二极管应用一例——限幅器	48
2.3-6 稳压二极管	49
§ 2.4 晶体管	51
2.4-1 晶体管的结构	51
2.4-2 晶体管内载流子的运动规律	52
2.4-3 电流分配关系和放大作用	55
2.4-4 晶体管的共射极特性曲线	58
2.4-5 晶体管的主要参数	62
§ 2.5 场效应管	67
2.5-1 结型场效应管	68
2.5-2 绝缘栅场效应管	74
^§ 2.6 集成电路的制造和特性	79
2.6-1 硅平面管工艺	80
2.6-2 集成电路的结构和制造工艺	82
2.6-3 集成化晶体管和二极管	84
2.6-4 集成化电阻和电容元件	85
2.6-5 集成电路的特点	86
^附录 2.1 半导体器件的命名方法	87
习题与思考题	88

第三章 放大电路基础

§ 3.1 放大电路的图解分析法	92
3.1-1 单管共射放大电路的结构	92
3.1-2 作出负载线, 确定静态工作点	94
3.1-3 绘出 i_B 、 i_C 、 v_{CE} 的波形, 求放大倍数	98
3.1-4 用图解法分析放大器的非线性失真	102
§ 3.2 放大电路的等效电路分析法	103
3.2-1 晶体管的 h 参数及其等效电路	104

3.2-2 用 h 参数等效电路分析基本放大电路	109
§ 3.3 偏置电路及工作点的稳定	113
3.3-1 温度变化对静态工作点的影响	113
3.3-2 射极偏置电路	115
*3.3-3 补偿式偏置电路	120
*§ 3.4 单级放大器的设计	121
3.4-1 动态范围和电路参数的关系	121
3.4-2 单级放大器的设计方法	123
§ 3.5 射极输出器和放大电路三种组态的比较	126
3.5-1 射极输出器	126
*3.5-2 放大电路三种基本组态的比较	131
§ 3.6 单级阻容耦合放大器的频率特性	132
3.6-1 放大器频率特性的概念	132
3.6-2 晶体管的混合参数 π 型等效电路	134
3.6-3 单级阻容耦合放大器的频率特性	138
*§ 3.7 多级放大器	148
3.7-1 多级放大器的耦合方式	148
3.7-2 多级放大器的输入、输出电阻和电压放大倍数	150
3.7-3 多级放大器的频率特性	151
§ 3.8 功率放大器	153
3.8-1 单管共射功率放大器	153
3.8-2 互补对称功率放大器	157
§ 3.9 场效应管放大器	161
3.9-1 场效应管放大器的偏置电路	161
3.9-2 场效应管的小信号交流等效电路	166
3.9-3 共源放大电路的分析	167
习题与思考题	169

第四章 反馈放大器

§ 4.1 反馈的基本概念与分类	179
4.1-1 反馈的基本概念	179
4.1-2 反馈的基本类型	181
4.1-3 反馈的一般表达式	188

§ 4.2 负反馈对放大器性能的改善·····	191
4.2-1 提高放大倍数的稳定性·····	191
4.2-2 扩展频带·····	192
4.2-3 减小非线性失真·····	195
§ 4.3 负反馈对放大器输入电阻和输出电阻的影响·····	197
4.3-1 负反馈对输入电阻的影响·····	197
4.3-2 负反馈对输出电阻的影响·····	200
§ 4.4 负反馈放大器的分析方法·····	204
4.4-1 划分基本放大器的原则·····	204
4.4-2 分析步骤·····	206
4.4-3 单级电流串联负反馈放大器的分析·····	206
^4.4-4 源极输出器的分析·····	209
^4.4-5 两级电压串联负反馈放大器的分析·····	211
*§ 4.5 负反馈放大器的自激·····	213
4.5-1 负反馈放大器的自激现象·····	213
4.5-2 负反馈放大器稳定工作的条件·····	215
4.5-3 反馈放大器的校正方法·····	217
习题与思考题·····	222

第一章 电路分析与信号简述

针对电子线路课程的需要,本章简述电路分析与信号的几个基本问题,以补充电磁学课程中电路方面的不足。本章在介绍电源和几个网络定理以后,再介绍双口网络的基本概念,最后略述信号及其频谱问题。

§ 1.1 电压源和电流源

电子线路中的电源,可分为独立源和受控源两大类。

1.1-1 独立源

独立电源是给电路提供能量或提供信号的电源,它的参数完全由电源内部的因素决定,而与电路中其它部分的电流和电压无关。我们经常遇到的电池、信号源等都属于独立源。独立源又可分为电压源和电流源两种。

一、电压源

两端能保持定值电压的电源,称为理想电压源。它有两个基本特性: (i) 端电压 $\dot{V}$ 是定值 (等于 $\dot{V}_s$) 或是一定的时间函数 $v(t)$, 与流过的电流无关; (ii) 流过它的电流是由定值电压 $\dot{V}_s$ 和与它相连接的外电路共同决定的。理想电压源的符号如图 1.1-1 (a) 所示。

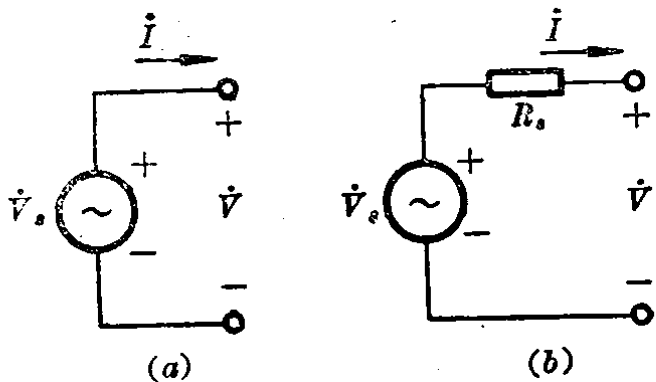


图 1.1-1 电压源

(a) 理想电压源 (b) 实际电压源

由于理想电压源的端电压为定值,与流过它的电流的大小无

关，这一特性意味着理想电压源的内阻为零。如果 $\dot{V}_s = 0$ ，则理想电压源两端点相当于短路。

实际电压源的端电压随电流而改变，它可以用一个理想的电压源 $\dot{V}_s$ 和内阻 R_s 串联的电路来等效，如图 1.1-1(b) 所示。因此实际电压源的端电压可表示为

$$\dot{V} = \dot{V}_s - \dot{I}R_s \quad (1.1-1)$$

由此可见，由于内阻上的压降 $\dot{I}R_s$ 随电流改变，使电源端电压也随电流而变。实际电压源的内阻越小，就越接近于理想电压源。今后我们常把理想电压源简称电压源。

二、电流源

能输出定值电流的电源，称为理想电流源。它也有两个基本特性：(i) 它的电流是定值，或是一定的时间函数，与端电压无关；(ii) 它的端电压是由定值电流 $\dot{I}_s$ 和与它相连接的外电路共同决定的。理想电流源的符号如图 1.1-2(a) 所示。由于理想电流源具有输出电流为定值而不随端电压改变的特性，这就意味着它的内阻为 ∞ ，在 $\dot{I}_s = 0$ 时，它的两个端点相当于开路。

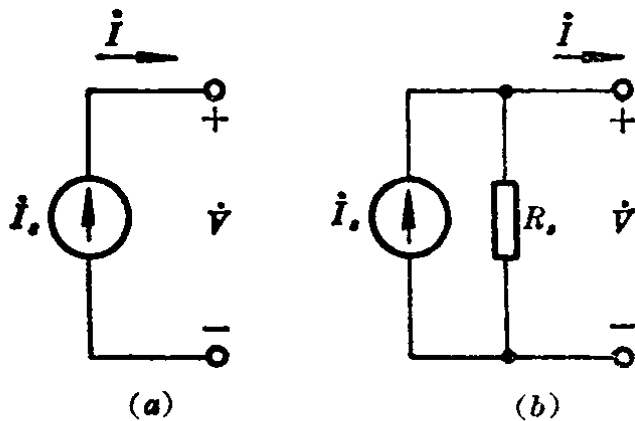


图 1.1-2 电流源

(a) 理想电流源

(b) 实际电流源

实际电流源的输出电流随端电压而改变，它可用一个理想的电流源 $\dot{I}_s$ 和内阻 R_s 的并联电路来等效，如图 1.1-2(b)，它往外输送的电流 $\dot{I}$ 为

$$I = I_s - \frac{\dot{V}}{R_s} \quad (1.1-2)$$

其中 I_s 为电流源的定值电流， $\dot{V}/R_s$ 为内阻所分走的电流。内阻越大，分走的电流越小，实际电流源就越接近于理想电流源。今后我们常把理想电流源简称电流源。

1.1-2 受控源

受控源又称非独立源，它的电流或电压是受电路中其他部分的电流或电压控制的，是这些电流或电压的函数。

受控源的控制量，可以是电压，也可以是电流。因此，受控源共有四种，图 1.1-3 中给出了两种。有两种受控电压源，即“电压控制电压源 $\gamma\dot{V}_s$ ”和“电流控制电压源 $r\dot{I}_s$ ”；还有两种受控电流源，即“电压控制电流源 $g\dot{V}_s$ ”和“电流控制电流源 $\beta\dot{I}_s$ ”。当受控源的被控制量 $\gamma\dot{V}_s$ 正比于控制量 $\dot{V}_s$ 时，比例系数 γ 为常数，则受控源是一种线性元件。显然在四个比例系数中 γ 、 β 没有量纲， r 具有电阻的量纲， g 具有电导的量纲。

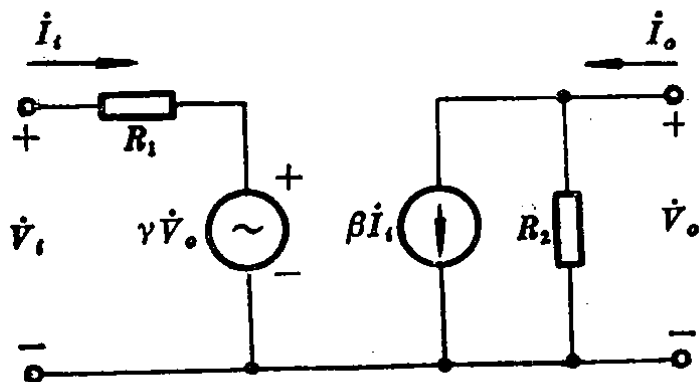


图 1.1-3 具有受控源的电路

§ 1.2 线性网络的几个定理

如于元件上的电压和电流之间的关系可用线性的代数或微分方程来描述的元件，称为线性元件。电阻、电容和电感元件，它们的伏安特性可用下列代数或微分方程表示：

$$v_R = Ri_R \quad i_C = C \frac{dv_C}{dt} \quad v_L = L \frac{di_L}{dt}$$

因此它们是线性元件。由线性元件组成的电路，称为线性电路。

网络是电路的概括和泛称，当研究电路的一般规律时用网络，讨论具体的电路时用电路，但两个名词的意义很相近，往往混用。网络理论是研究电路系统一般规律的理论。

由线性元件构成的网络，称为线性网络，若网络中包含非线性元件，则称为非线性网络。内部不含电源的网络，称为无源网络，内部含有电源的网络，则称为有源网络。网络也常按引出端口的数目来分类，有一个端口(一对引出端)的网络，称为单口网络，如图 1.2-1 所示；有两个端口亦即有两对引出端的网络，称为双口网络(下节详述)。

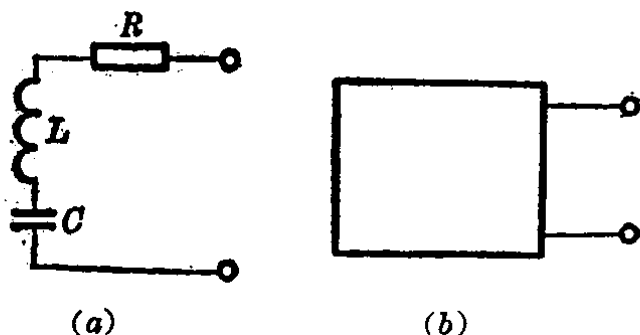


图 1.2-1 单口网络
(a)单口网络一例 (b)符号

对线性网络的分析，可采用克希霍夫定理进行，但如果还采用本节介绍的几个基本定理，将使分析更加简化，并能更深入地了解电路的结构和相互关系，下面讨论这些定理。

1.2-1 叠加定理

在线性网络中，若含有两个或两个以上的独立电源，每一元件的电流或电压，可以看成是每一个独立源单独作用于网络时在该元件上产生的电流或电压之和，这就是叠加定理。

运用叠加定理时应该注意：考虑任一独立源单独作用时，其它独立源应视为零值，即独立电压源用短路代替，独立电流源用开

路代替;而全部受控源则应该保留。

例 1.2-1 电路结构和元件数值如图 1.2-2, 试用叠加定理求 R_1 支路的电流 I_1 。

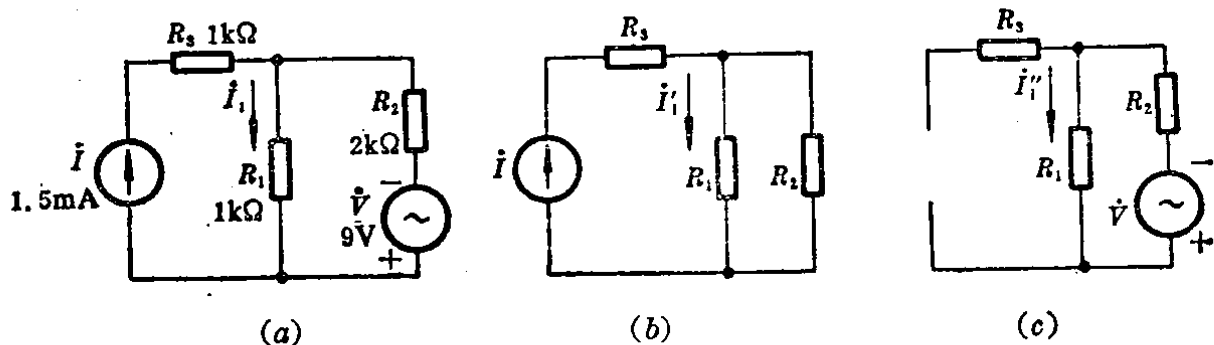


图 1.2-2

(a) 具有两个独立源的电路 (b) I 单独作用 (c) V 单独作用

解: 电流源 I 单独作用于网络时, 电压源 V 用短路代替, 电路如图 (b), I_1' 为 I 在 R_1 上的分流, 即

$$I_1' = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I = \frac{2}{1+2} \times 1.5 = 1 \text{ mA}$$

电压源 V 单独作用于网络时, 电流源 I 用开路代替, 如图 (c)。 R_1 的电流为

$$I_1'' = \frac{-V}{R_1 + R_2} = \frac{-9}{(1+2) \times 10^3} = -3 \text{ mA}$$

流过 R_1 的总电流 I_1 , 应为两个独立源单独作用于网络时, 在 R_1 上产生的电流的代数和, 即

$$I_1 = I_1' + I_1'' = 1 - 3 = -2 \text{ mA}$$

由上例可见, 运用叠加定理来分析线性网络, 计算比较简易, 而且不易出错。读者可用克希霍夫定理验证其结果是否一致^①。

还须指出: 在分析电路时, 我们既要假定电流的参考方向, 又要假定电压的参考极性。如果电流的计算结果为正值, 表明电流的真实方向与参考方向一致。在未标示参考方向的情况下, 电流的正负结果是毫无意义的, 对电压也如此。电流的参考方向和电压的参考极性, 可以彼此无关地任意假定, 但为方便起见, 常采用“关联”参考方向, 即假定电流的参考方向与电压的参考极性一致。

^① 叠加定理、戴文宁定理和诺顿定理的证明, 见参考文献[1]第四章。

1.2-2 戴文宁定理

戴文宁定理的内容是：任一线性有源单口网络，可用一个电压源串联一个阻抗来代替，电压源的电压等于该网络端口的开路电压 $\dot{V}_o$ ，而等效阻抗 Z_o 则等于该网络中全部独立源为零值时从端口看进去的阻抗。

由这一电压源和等效阻抗组成的等效电路，称为戴文宁等效电路，图 1.2-3 说明了这种等效关系。

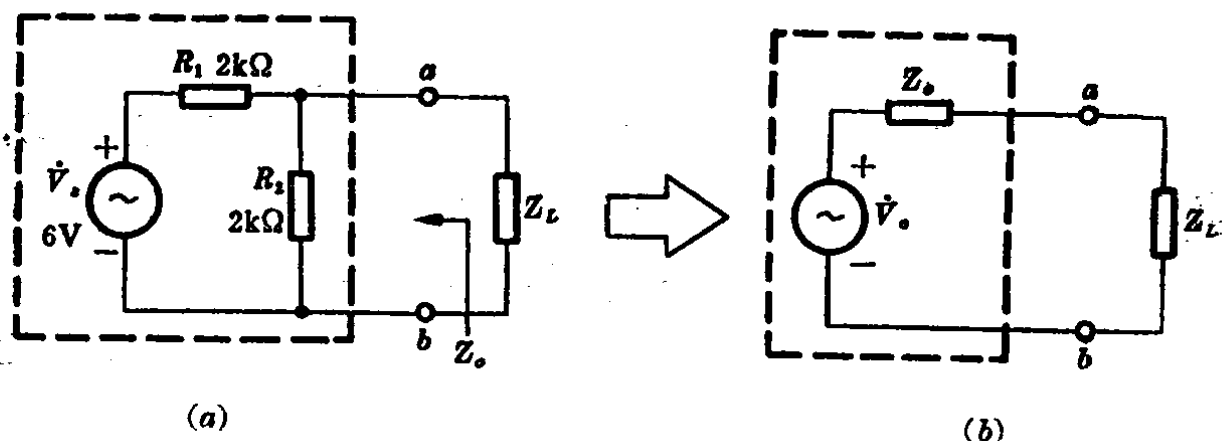


图 1.2-3 戴文宁定理示意图

(a) 电路一例

(b) 戴文宁等效电路

图 1.2-3 中 a, b 左边的电路是一个线性有源单口网络， Z_L 为网络的外部电路。求等效电压源 $\dot{V}_o$ 时，应将 Z_L 断开， $\dot{V}_o$ 就是 a, b 两端的电压。对于图中例子则

$$\dot{V}_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \dot{V}_s = \frac{2}{2+2} \times 6 = 3\text{V}$$

等效阻抗 Z_o 应为 Z_L 断开，网络内部的电压源短路（电流源开路）时 a, b 两端的阻抗。对于图中例子则

$$Z_o = R_o = R_1 \parallel R_2 = 1\text{k}\Omega$$

在应用戴文宁定理时，还有两个问题必须注意：(1) 由戴文宁定理所得的等效电路，仅对网络的外部电路等效，亦即只适用于计算外部电路的电压和电流，而不适用于计算网络内部的电压和电流；(2) 只要单口网络内部是线性的，外部电路即使是含有非线性

性元件的非线性电路，戴文宁定理同样适用。

1.2-3 诺顿定理

一个有源线性单口网络，可用一个电流源并联一个等效阻抗来代替，电流源 I_o 等于该网络端口的短路电流，等效阻抗 Z_o 等于该网络中全部独立源为零值时从端口看进去的阻抗，这就是诺顿定理。图 1.2-4 说明了这种等效关系，电流源与等效阻抗并联的电路，称为诺顿等效电路。

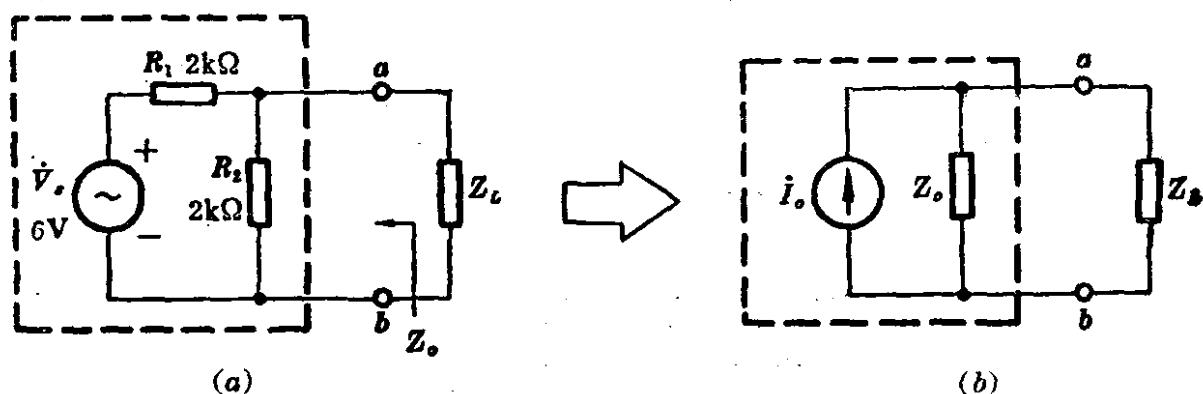


图 1.2-4 诺顿定理示意图

(a) 电路一例

(b) 诺顿等效电路

对于图 1.2-4(a) 的例子，将 a 、 b 两端短路，则流过短路线的电流为等效电流源 I_o ，即 $I_o = \dot{V}_s / R_1 = 6V / 2k\Omega = 3mA$ ；等效阻抗 $Z_o = R_1 \parallel R_2 = 1k\Omega$ 。

对比图 1.2-3 和图 1.2-4 可见，同一个电路既可等效为戴文宁电路，又可等效为诺顿电路，表明两种电路之间也是彼此等效的。我们可将图 1.2-3(b) 的戴文宁电路变换为图 1.2-4(b) 的诺顿电路， $I_o = \dot{V}_o / Z_o$ ，而 Z_o 则不变；还可作相反的变换。

1.2-4 密勒定理

密勒定理指出：具有 N 个独立节点的任意网络，如图 1.2-5， N 为参考节点，假设在节点 1 与节点 2 之间接有阻抗 Z' ，并已知节点电压 $\dot{V}_1$ 与节点电压 $\dot{V}_2$ 之比 K ($K = \dot{V}_2 / \dot{V}_1$)；若断开阻抗 Z' ，而在节点 1 与节点 N 之间接以阻抗 $Z_1 = \frac{Z'}{1-K}$ ，在节点 2 与节点

N 之间接以阻抗 $Z_2 = \frac{Z' K}{K-1}$; 由此得出的网络与原网络彼此等效。

图 1.2-5 说明了这种等效关系。

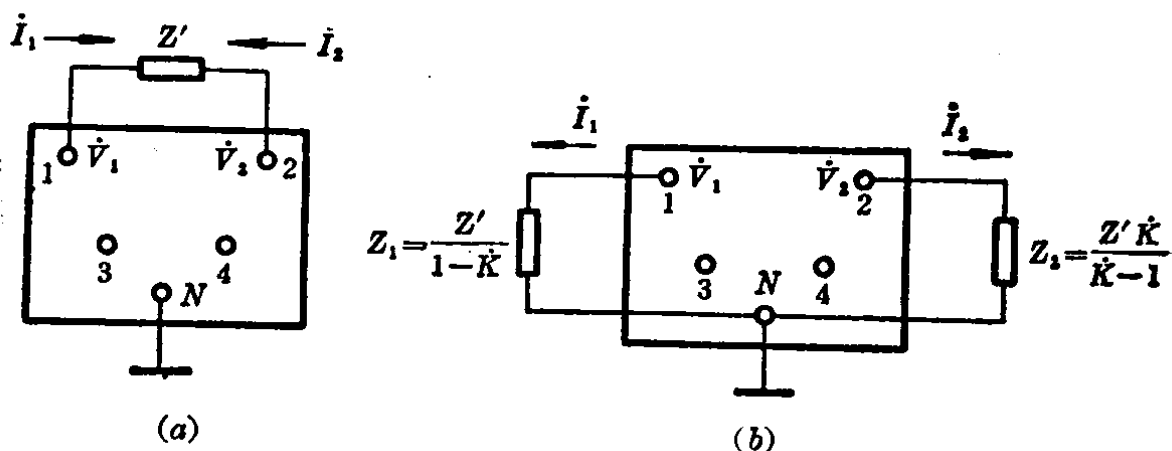


图 1.2-5 密勒定理示意图

(a) 变换前的网络

(b) 变换后的网络

密勒定理不难证明。对于具有 N 个独立节点的任意网络, 如图(a), 其节点电压为 $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{V}_3, \dots, \dot{V}_N$, N 为参考节点或接地点, 故 $\dot{V}_N = 0$ 。其中某两个节点(1与2)之间接有阻抗 Z' , 则节点1流过 Z' 的电流 I_1 为

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{Z'} = \frac{\dot{V}_1(1-K)}{Z'} \\ &= \frac{\dot{V}_1}{\frac{Z'}{1-K}} = \frac{\dot{V}_1}{Z_1} \end{aligned} \quad (1.2-1)$$

上式表明, 如果断开 Z' , 而在节点1与节点 N 之间接以阻抗 $Z_1 = \frac{Z'}{1-K}$, 则从节点1流过 Z_1 的电流 I_1 将与流过原电路 Z' 的电流相同, 如图(b)所示。同理也可证明, 如果断开 Z' 而在节点2与节点 N 之间接以阻抗 Z_2 , 则从节点2流过 Z_2 的电流 I_2 , 将与流过原电路 Z' 的电流相同, Z_2 应为

$$Z_2 = \frac{Z'}{1 - \frac{1}{K}} = \frac{Z' K}{K-1} \quad (1.2-2)$$

因此，对于图(a)和(b)所示的两个网络，可列出相同的节点电流方程，这就证明了这两个网络是等效的。

必须指出，密勒定理的应用，只有当电压比 K 能用某种方法单独求出时，才是可行的。在电子电路的分析中，有些电路利用密勒定理简化，可使电路的分析简单得多。

§1.3 双口网络简介

双口网络是电子路线中广泛应用的电路单元，变压器、耦合电路、传输线以及放大器等，都属双口网络。有两对引出端的网络，称为双口网络，它的符号如图 1.3-1 所示。双口网络总得与电源相接，也总要接上负载，与电

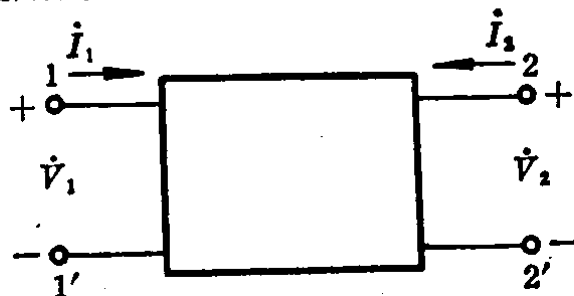


图 1.3-1 双口网络

源相联接的端口 1、1' 称为输入端口，简称输入端或输入口，与负载相接的端口 2、2'，称为输出端口，简称输出端或输出口。输入端口的电流、电压以 I_1 、 V_1 表示， I_2 、 V_2 为输出端口的电流、电压。图中标出了电流的参考方向和电压的参考极性。

双口网络的输入端和输出端的电流电压关系，反映了网络的特性。我们可以不去深入研究网络的内部结构，而把它看作一个整体，仅从分析和测量外部电流电压的关系，来确定网络的特性。下面我们首先讨论 V_1 、 I_1 、 V_2 、 I_2 之间的关系。

1.3-1 双口网络的基本方程和网络参数

描述双口网络的输入端和输出端电流电压的关系式，称为双口网络的基本方程。由于 I_1 、 V_1 、 I_2 、 V_2 四个物理量之间只有两个是独立的，只能列出两个基本方程。任意选取四个量中的两个为自变量，另两个量为因变量，同一双口网络将有六种不同形式的基本方程。下面讨论本课常用的两种。