

电子放大器  
的  
理论和设计

(美)J. M. 佩提 M. M. 麦克霍特著

上海科学技术出版社

73.45573

361

# 电子放大器的理论和设计

[美] J. M. 佩提 M. M. 麦克霍特 著

柴 振 明 译

1956.4  
上海科学技术出版社

## 內 容 提 要

本书是一本专著,介绍目前行之有效的几种設計和綜合的方法,連同其有关的基本原理。本书首先复习有源器件(真空管和半导体三极管)及其在简单情形中的应用。继而介绍“快速”低通放大器(例如視頻放大器)和带通放大器。最后,讲述放大电路中的噪声和放大器的測量。

本书可供无綫电电子学方面从事設計的工程技術人員和研究人员以及大专学校师生的参考。

ELECTRONIC AMPLIFIER CIRCUITS

THEORY AND DESIGN

J. M. Pettit, M. M. McWhorter

McGraw-Hill Book Co. • 1961

电子放大器的理論和設計

柴振明 譯

---

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

---

上海洪兴印刷厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1156 1/32 印张 10 08/32 排版字数 287,000

1966 年 3 月第 1 版 1966 年 3 月第 1 次印刷

印数 1—5,000

統一書号 15119·1865 定价(科六) 1.60 元

## 序 言

几乎在所有电子系统中，把弱信号放大成较强信号都具有根本的重要性。有时，这个问题是显然的，例如在收音机中，其任务是选择并放大从天线来的微弱信号，并把检波后的信号通过扬声器放送出来。有时，放大的需要并不甚显然，例如在电子计算机中常无标为“放大器”的“电路”。但是，即使在这里，放大作用也是存在而重要的；它可以发生在每个逻辑元件内，或者仅出现于一部分电路中。但是无论如何，为了保证信息不至于湮没在噪声之中，增益是必需的。

由于放大器在电子技术中的重要性，我们尝试编写一本专著，希望它有利于读者从比较先进的观点来再次学习放大器理论。我们不准备全部或部分地详述各种类型放大器，而是来讨论构成放大器设计基础的基本原理，并阐述在过去已被证实有效的几个设计和综合的方法。因此，我们并不讲授“关于放大器的一切”，而是说明一些可以应用的近代方法，帮助读者自己来扩充这方面的知识。

本书的第一部分是复习有源器件——真空管和半导体三极管——及其在简单情形中的应用。由于这些讨论的一个较有价值之处是评价这两类器件的相对优缺点和限制，因此把它们放在一起来讨论——例如，对高频截止的讨论同时包括了真空管和半导体三极管的等效电路，以便指出每一电路的哪一些元件对于决定高频性态和求完整等效电路的有用近似都是重要的。这种近似特别重要，它使读者能够以比较简单的电路来更清楚地考虑处理问题

的邏輯性和正確性，並且同時熟練地掌握近似方法，以達到結果所要求的準確度。

本書中使半導體三極管的等效電路數目減至最少，並力圖突出最有物理意義的那些表征。我們認為現已有足夠多的半導體三極管書籍，無遺地包括了大量等效電路。而且，我們不打算在本書中全面講述真空管或半導體三極管內部的電子學問題，但引用了某些物理推論來闡明等效電路的合理性。

本書的第二個主要部分講述設計“快速”低通放大器，例如視頻放大器問題。在這部分內討論了獲得高速高增益放大器的根本限制。由於大多數這類放大器是用來放大瞬變信號的，所以大部分的論述涉及瞬態響應特性。同時，從理論上和實踐上討論了多級電路對上升時間和頂部斜降的影響、帶寬和上升時間之間的關係等等問題。對分布放大器的初步介紹，足以使讀者了解這種放大器的作用和限制。

本書第三個主要部分講述帶通放大器，內容包括從極點-零點的觀點來分析和綜合寬帶放大器和增益函數的各種模擬方法。雖然本書特別着重於寬帶的情況，但結果一般都適用於窄帶情況，因為後者的情況實際上更為簡單。

關於放大電路中的噪聲的第13章，是想對放大器噪聲來源給予讀者一個適當的物理概念，並且特別是想在計算放大器噪聲時，給他們一些有用的等效電路。應用這些電路計算了放大器輸入電路和多級放大器的噪聲系數。這裡還介紹了輸入電路最佳設計的一個例子。

最後一個主要部分為放大器測量。這部分是為了解決放大器設計和製成放大器的必需測試的一些共同問題。特別是，甚高增益放大器具有某些特殊的問題，如果不予以適當的注意，將難以進行準確的測試。這裡還討論了測量普通有源和無源元件參量的一些方法，因為在必需應用到的頻率或信號電平下，這些測量往往是

不很容易的。

采用本书作为教材的教师，必須以不同的程度来着重考虑两种情况。其一是侧重于介绍目前的“技术水平”，这也可能对专业技术人员最为有用。因此，本书介绍了许多有用的高性能放大器的设计，这些设计表征着目前可得的真空管和半导体三极管所能达到的最高指标。

另一方面，目前技术水平的知识是一种不断更新的东西，而为了使技术人员在将来而不是在近期解决问题，则要求把这些知识作为适当的补充内容。为了满足这样的要求，最好是提供良好的数学和物理基础，同时给予应用这些基础科学于工程问题的方法论方面的经验。但本书并不讲授基础科学，而是包含了方法论。这里记录了成功地应用电子器件（真空管和半导体三极管）的物理特性以及数学中复变数和变换理论等方面的先进知识。

然而，在学习应用理论时这一点很重要：应注意把复杂概念和数学分析的应用进行到很深入的程度，从而得出一些较简单的设计公式、表格等等是可能的（也是在工程上必需的）；运用这些公式不需要有高深的知识，而能为广大的中级设计技术人员所应用，这样完整地应用理论的成果，在本书内到处都能找到。

总的说来，本书的主要内容可以作为有用的实际设计数据来研究；或者，可以把本书当作工程设计方法范例的汇集，而通过这些例子，介绍了应用数学和物理理论来解决新的困难问题的方法。

作 者

# 目 录

## 序 言

<b>1 放大器的几个基本定义</b> .....	1
1-1 放大器增益 .....	1
1-2 频率响应特性 .....	1
1-3 阶跃响应 .....	4
1-4 冲激响应 .....	5
<b>2 线性有源器件的等效电路</b> .....	6
2-1 以二端口电路参量表征线性有源器件 .....	6
2-2 真空管在低频的表征 .....	9
2-3 半导体三极管在低频的表征 .....	10
2-4 T形等效电路 .....	14
2-5 真空管在高频的表征 .....	20
2-6 半导体三极管的高频等效电路 .....	24
2-7 混合 $\pi$ 形高频等效电路 .....	31
<b>3 低通(视频)放大器的稳态特性</b> .....	37
3-1 五极管放大级的低频响应特性 .....	38
3-2 增益函数的几何解释 .....	45
3-3 五极管放大级的高频响应特性 .....	48
3-4 一般放大器接法的中心频带特性 .....	51
3-5 直流偏压(偏流)问题 .....	58
3-6 偏压(偏流)电路阻抗形成的低频响应特性的求法 .....	64
3-7 帘栅电路形成的低频截止特性的计算 .....	70
3-8 级联的低频响应特性 .....	73
3-9 放大器高频响应特性的求法 .....	75
<b>4 低通(视频)放大器的阶跃响应:上升速度</b> .....	87
4-1 五极管放大级——真空管的选择 .....	87

4-2	五极管放大級——电路的選擇 .....	89
4-3	并聯补偿电路 .....	90
4-4	改进的并聯补偿电路 .....	93
4-5	其他形式的二端网络 .....	94
4-6	四端网络补偿 .....	94
4-7	半导体三极管视频放大級的瞬态特性——串聯补偿級 .....	97
4-8	并聯补偿半导体三极管級間网络 .....	103
4-9	放大級的級联 .....	107
4-10	不相同級組成的放大器 .....	116
4-11	輸出級 .....	120
4-12	瞬态响应特性和稳态响应特性之間的关系 .....	123
4-13	特种高速放大器 .....	132
<b>5</b>	<b>低通放大器在长作用時間的阶跃响应:斜降效应等 .....</b>	<b>137</b>
5-1	耦合电路 .....	138
5-2	其他原因引起的斜降 .....	140
5-3	多种原因产生的斜降 .....	143
5-4	阴极补偿 .....	145
5-5	斜度补偿 .....	147
<b>6</b>	<b>相加放大器 .....</b>	<b>152</b>
6-1	分布式放大的基本理論 .....	153
6-2	分布放大器的級联 .....	155
6-3	屏极綫和栅极綫的特性 .....	156
6-4	真空管輸入电导的影响 .....	163
6-5	級联放大和分布放大 .....	164
6-6	应用半导体三极管的分布放大器 .....	167
6-7	裂帶式放大器 .....	168
<b>7</b>	<b>滤波放大器概述 .....</b>	<b>170</b>
7-1	具有单調諧級間网络的五极管放大級的特性 .....	173
7-2	多級单調諧放大器(帶寬減縮和增益帶寬系数) .....	178
7-3	选择性比 .....	180
<b>8</b>	<b>推广和解釋 .....</b>	<b>184</b>
8-1	放大器增益函数的性质 .....	186
8-2	进一步的解釋——物理模拟的基础 .....	188



8-3	靜电模拟	190
8-4	电导模拟	192
8-5	薄膜模拟	196
8-6	关于各种模拟法的总结	199
8-7	保角映射	200
8-8	鏡象极点(或零点)	204
<b>9</b>	<b>近似恒定增益或綫性相位的常用函数</b>	<b>211</b>
9-1	最大平坦度增益函数	212
9-2	寬带变换	217
9-3	等波动增益函数	221
9-4	綫性相位特性	225
9-5	任意响应特性	229
<b>10</b>	<b>參差調諧</b>	<b>231</b>
10-1	窄带情况	232
10-2	寬带情况	235
10-3	漸近情况	238
10-4	$n$ 級組的級联	239
10-5	增益帶寬系数	240
10-6	实用設計資料	244
<b>11</b>	<b>双調諧級間网络</b>	<b>252</b>
11-1	双調諧級的級联	260
11-2	參差阻尼	260
11-3	寬带的情况	261
11-4	电容耦合电路	264
11-5	自耦变压器耦合	265
11-6	選擇性比	266
<b>12</b>	<b>反饋兩級組</b>	<b>268</b>
12-1	反饋兩級組的普遍設計关系式	268
12-2	帶寬轉換	271
12-3	增益帶寬系数	272
12-4	選擇性比	272
<b>13</b>	<b>放大器电路中的噪声</b>	<b>274</b>
13-1	电路噪声	274

13-2	真空管噪声	276
13-3	半导体三极管噪声	279
13-4	放大器噪声系数的计算(真空管放大器)	282
13-5	半导体三极管放大级的噪声系数	287
<b>14</b>	<b>噪声系数的几个普遍关系式</b>	<b>295</b>
14-1	可用功率和可用功率增益	295
14-2	以可用功率表示的噪声系数	296
14-3	级联网络的噪声系数	297
14-4	用等效温度表示的噪声系数	299
14-5	等效噪声带宽	299
14-6	低噪声系数电路的设计:阴地-栅地级联放大器	300
14-7	阴地-栅地级联放大级和单五极管放大级的比较	303
<b>15</b>	<b>放大器的测量</b>	<b>306</b>
15-1	$R$ 、 $L$ 和 $C$ 的测量	307
15-2	真空管参量的测量	311
15-3	半导体三极管低频参量的测量	313
15-4	半导体三极管高频参量的测量	315
15-5	放大器增益的测量	320
15-6	放大器瞬态响应特性的测量	325
15-7	噪声系数的测量	327
<b>索 引</b>		<b>333</b>

# 1

## 放大器的几个基本定义

### 1-1 放大器增益

放大器是为增高电压、电流或功率的电平而设计的。这种电平增高的数量称为放大器的增益。定量地说明增益的方法是重要的，并且应该同放大器的应用场合相适应。例如，在示波器的放大器中，电压增益是重要的，因为输入端和输出端的阻抗都很高。与此不同，电话增音机的放大器却只有有限的可用输入功率，并且它必须供给功率到规定的线路阻抗。因而，把增益表示成可用输入功率对输出功率之比是适当的。说明增益的四种常用方法表示于图 1-1 中。虽然头三个例子是以功率表达的，但也可以用电压或电流表示增益；例如，介入电压增益  $= V_2/V_1$ 。一个放大器的“实在”功率增益  $(= P_2/P_1)$  却存在着某些含糊之处，而不是常用的。

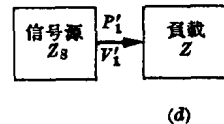
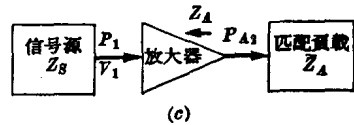
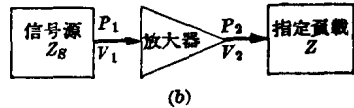
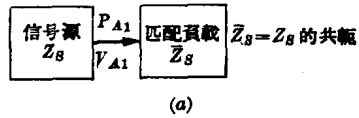


图 1-1 增益的定义

(a) 信号源的可用功率  $\triangleq P_{A1}$ 。(b) 换能器增益  $\triangleq P_2/P_{A1}$ 。(c) 可用功率增益  $\triangleq P_{A2}/P_{A1}$ 。(d) 介入功率增益  $\triangleq P_2/P_1'$ 。在 (b) 中还隐含地表明了另外两个增益的定义，即所谓电压增益  $V_2/V_1$  和实在功率增益  $P_2/P_1$ 。符号  $\triangleq$  意指“的定义为”

### 1-2 频率响应特性

首先以稳态正弦波信号来说，放大器的增益对于频率总不是

绝对恒定不变的；因而只说明增益大小的某一个数值并没有什么意义，除非知道这个增益是在什么频率测量的。通常，未加说明的“增益”表示放大器的中心频率增益。在图 1-2 中示出了低通放大器的一条典型增益对频率关系曲线（通常称为频率特性曲线或频率响应曲线）。这样的放大器一般根据其应用而称之为音频或视频放大器；视频放大器需要有较高的频率上限。严格地讲，低通放大器应该放大大自零频率（直流）至某个上限频率之间的信号；不过，为了避免直流放大的种种问题，大多数实用的低通放大器都是交流耦合的，并具有如图中虚线所示的特性。功率增益降低到中心频率处的一半的频率称为带边频率（或截止频率）——在图 1-2 中标为  $f_l$  和  $f_u$ 。放大器的带宽等于这两个频率之差量： $B \triangleq f_u - f_l$ 。在典型的低通放大器中，频率  $f_l$  是很低的，因而有  $B \cong f_u$ 。在用电压增益来量度  $G$  的情况下，上带边频率和下带边频率取为电压增益下降到中频增益值的  $1/\sqrt{2}$  点的频率<sup>†</sup>。

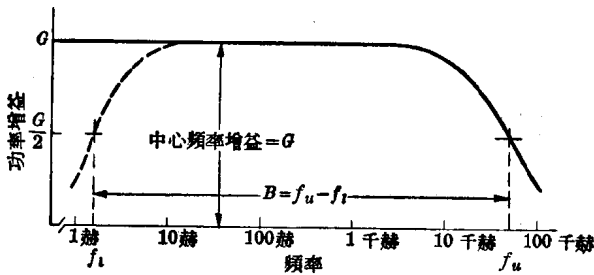


图 1-2 低通放大器的典型频率特性

对于许多用途，常以双对数坐标画出增益对频率曲线。而增益的值通常用分贝来表示，

$$\text{分贝} = 10 \log G_{\text{功率}} \quad (1-1)$$

电压增益或电流增益亦常以分贝表示；虽然严格地讲，除非测量电

<sup>†</sup> 对于特殊的用途，将在以后介绍带宽的其他定义，并将给予不同的名称，以免混淆。

压的各点的阻抗值相等,这同分貝的经典定义是不符合的。設  $V_1$  和  $V_2$  分别是在放大器的輸入端  $R_1$  和輸出端  $R_2$  上測得的电压, 則正确地写出分貝增益为

$$\text{分貝} = 20 \log \frac{V_2}{V_1} + 10 \log \frac{R_1}{R_2}. \quad (1-2)$$

在一般实用中以及在本书的各處,第二項都被略去;其結果因而只同电压比成正比,而不一定确切地等于功率比<sup>†</sup>。注意到带边点的增益比带中心点的低 3 分貝,因此,这些点的頻率常称为 -3 分貝頻率。

带通放大器(或称滤波放大器)具有类似于图 1-2 中虛綫所示的特性。主要不同之处在于,其高频和低频的带边都是小心地控制的,以便放大指定的一段頻带,而并不是仅仅使低频带边尽可能低和使高频带边尽可能高。我們将会看到一个实际的差别是:只有在低通放大器中才能分别处理  $f_u$  和  $f_l$  处的各种效应。

放大器的輸出电压相对于輸入电压的相移也同頻率有关。在图 1-3 中示出了一个典型的带通放大器的这种关系(称为相位特性曲线),图中同时画出了幅度特性。

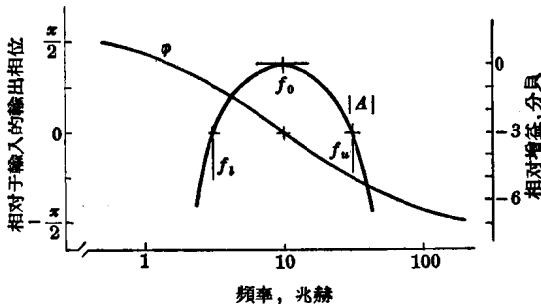


图 1-3 单級带通放大器的典型相位和頻率特性

<sup>†</sup> 在许多应用中,以分貝表示的增益是相对于頻带中心值而言的。在这种情况下,式(1-2)中的第二項是不需要的。

### 1-3 阶跃响应

若一个放大器的稳态幅度和相位特性都已知，则对于任何输入波形（例如瞬变等），都可以推算出放大器的输出波形。不过，若不采用计算正弦波特性的中间步骤，而直接从某种标准输入或激励波形的响应来求输出，往往更方便些。常用的一种输入波形是瞬刻地从某一个值变到另一个值的电压波形——阶跃电压 [见图 1-4(a)]。这种输入波形包含了所有频率分量，而放大器并不能均等地放大所有频率，因而输出波形并不是输入波形的精确重现。输出波形的上升部分 [图 1-4(b)] 并不即刻地跃变到其终值，而具有一定的上升时间。由于严格地规定上升从什么地方开始和终止是困难的，上升时间通常规定为输出从其终值的 10% 变到 90% 的这段时间。输出可能上升到超过 100%，并在这电平的上下振荡。至于输出超出 100% 的那部分称为超量，通常以百分数来表示。

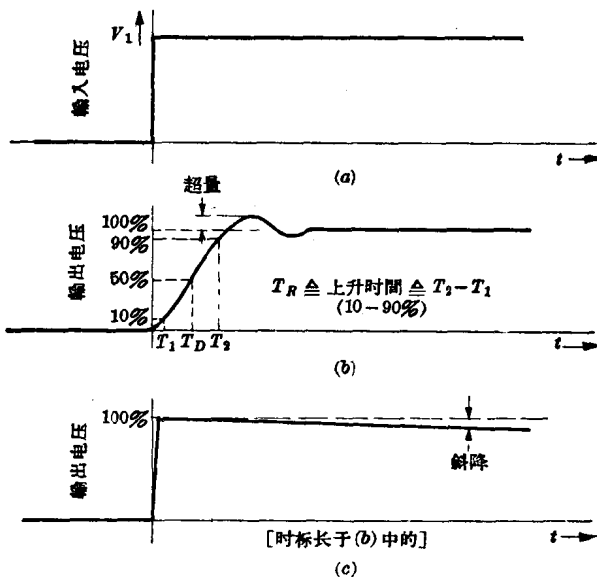


图 1-4 低通放大器对于阶跃电压输入响应

放大器的輸出一般并不在輸入阶跃加上之后立即上升;这样,放大器对通过它的信号有延迟作用. 延迟时间  $T_D$  的定义可任意定为: 从阶跃发生时算起, 輸出上升到其終值的 50% 的时间.

如果把时间标尺延长, 以便对輸出作較长时间間隔的观察, 就可看到典型放大器的輸出偏离 100% 电平. 的确, 若放大器不能放大零頻(指不是一个直流放大器), 則輸出的最終值必为零. 放大器輸出不能保持 100% 电平的現象称之为斜降. 这通常以指定时间內的百分数来表示. 注意到, 斜降的存在使得确切的 100% 值不大肯定. 在实际的放大器中, 100% 点可以最准确地取为引起超量的振蕩消失之后的瞬間輸出幅度†.

#### 1-4 冲激响应

描述放大器瞬变性的另一个方法是应用一个冲激来激励放大器; 所得輸出即冲激响应. 理想的冲激波形应具有零寬度(零持續時間)而有一定的面积, 但对于测量的目的, 可以用一个如图 1-5(a) 所示的甚窄的脉冲来作滿意的近似. 放大器的冲激响应是阶跃响应的時間导数, 而典型放大器的輸出响应画出于图 1-5(b) 中. 应用冲激响应可以从数学上来对上升时间和延迟时间下定义(見 4-9 节); 不过, 利用冲激响应来测量这些数量是困难的.

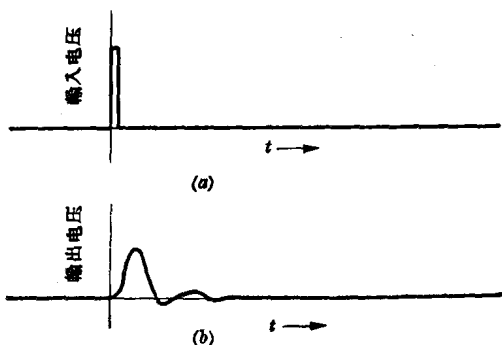


图 1-5 典型放大器的冲激响应

† 若放大器沒有超量, 則 100% 值为輸出的最大值. 在  $f_l$  和  $f_u$  紧密相邻的某些放大器中, 100% 值很不肯定. 不过, 一般并不用阶跃响应来描述这类放大器的特性.

## 2

# 线性有源器件的等效电路

本书中所讨论的放大器都采用某种型式的有源二端口器件来提供放大器中的增益。在历史上，应用于电子学中的第一种这类有源器件是真空三极管。当然，三极管仍然是常用的，但是对于我们将要着重考虑的放大器，几乎普遍采用稍后研制出来的五极管，因为它从屏极至栅极的反馈比较小。在许多应用中，一种较新型的器件——半导体三极管——已代替了多种真空管，因为它具有较高的固有可靠性、较低的功率消耗和较小的体积。不过，半导体三极管似乎不会完全代替真空管，因为半导体三极管在高温和高辐射强度下工作有许多缺点，并且在高频大功率器件的生产方面也有困难。还有，在有些特殊电路的运用中，例如作为高输入阻抗器件或者在高信号源阻抗作低噪声放大，真空管似乎优于半导体三极管。因而，在下面对于两类器件的等效电路的所有讨论中，记着这一点是有好处的：即等效电路显示出哪一种器件最为适用；读者应该对不同类型器件的表述方法作相互的比较<sup>†</sup>。

### 2-1 以二端口电路参量表征线性有源器件

图 2-1 的形式可用来表征我们要描述的有源器件，图中的

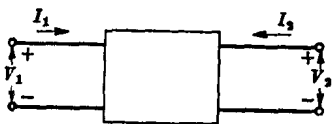


图 2-1 一般二端口网络的  
的习惯表示法

器件有两个输入端（常称为一个输入端口）和两个输出端（一个输出端口）。四个端中的两个通常是公共的，也就是说，它们在匣子的内部联接在一起。现在可以用许多种不同

<sup>†</sup> 可参阅 D. G. Fink, *Transistor vs. Vacuum Tubes*, *Proc. IRE*, **44**, 479 (1956).



的方法来表示电压和电流之间的函数关系，下面只介绍普通而常用的三种表示法： $z$  参量或阻抗参量：

$$V_1 = z_{11}I_1 + z_{12}I_2; \quad (2-1)$$

$$V_2 = z_{21}I_1 + z_{22}I_2. \quad (2-2)$$

$y$  参量或导纳参量：

$$I_1 = y_{11}V_1 + y_{12}V_2; \quad (2-3)$$

$$I_2 = y_{21}V_1 + y_{22}V_2. \quad (2-4)$$

$h$  参量或混合(串联-并联)参量：

$$V_1 = h_{11}I_1 + h_{12}V_2; \quad (2-5)$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}V_2. \quad (2-6)$$

这里可注意到，当一对电压或电流已知时，只需要四个数量来说明另一对电压或电流。在某些情况下，少于四个数量就足够了。各组参量直接导致一种等效电路，如图 2-2 中所示。应注意的是：

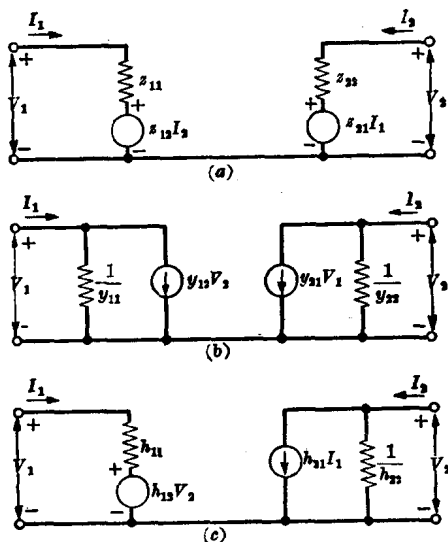


图 2-2 二端口参量的等效电路

(a)  $z$  参量； (b)  $y$  参量； (c)  $h$  参量