

# 关于多级放大器高频特性一节的

## 一点意见

电机系 刘国恩

华中工学院编的《电子技术基础》教材,在多级放大器高频特性一节(上册200—224页),对一个RC耦合的两级放大器进行了分析计算。现想结合教学实践,仅对这节的分析计算方法,提出一点很不成熟的意见,供参考,并望得到有关老师和同志们的指教,以促进我们的教学工作。

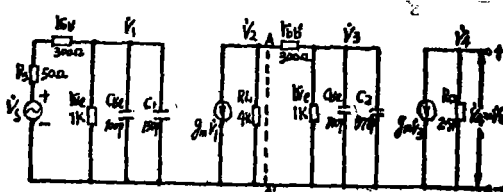


图1 两级放大器的简化高频等效电路

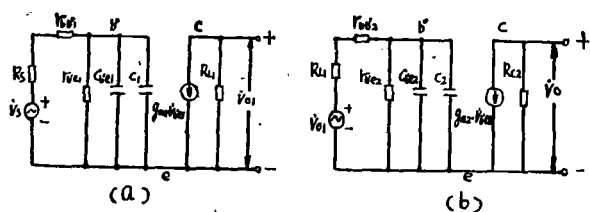


图2 由图1分出的两个单级放大电路

(a) 第一级放大电路的简化高频等效电路

(b) 第二级放大电路的简化高频等效电路

为了能把问题说清楚,我想应先把教材中的分析计算方法简述一下。

如图1所示,为一RC耦合两级放大器的简化高频等效电路。图中,两管的 $g_m$ 、 $r_{bb'}$ 、 $r_{b'e}$ 都对应相等, $R_{L1}$ 为前级的 $R_{C1}$ 与后级的 $R_b$ 并联电阻,其它各参数值如图中所注。

$$\text{设 } G'_s = \frac{1}{R'_s} = \frac{1}{R_s + r_{bb'}}, \quad g_{b'e} = \frac{1}{r_{b'e}}, \quad g_{bb'} = \frac{1}{r_{bb'}}, \quad G_{L1} = \frac{1}{R_{L1}},$$

$$G_{C2} = \frac{1}{R_{C2}},$$

由图1可列出节点导纳方程:

$$(G'_s + g_{b'e} + j\omega C_{b'e} + j\omega C_1) \dot{V}_1 = G'_s \dot{V}_s$$

$$g_n \dot{V}_1 + (G_{L1} + g_{bb'}) \dot{V}_2 - g_{bb'} \dot{V}_3 = 0$$

$$-g_{bb'} \dot{V}_2 + (j\omega C_{b'e} + j\omega C_2 + g_{b'e} + g_{bb'}) \dot{V}_3 = 0$$

$$g_n \dot{V}_3 + G_{C2} \dot{V}_4 = 0$$

解上式并经整理后可得放大倍数表达式

$$\dot{A}_{VH} = \frac{\dot{V}_4}{\dot{V}_s} = \frac{g_m^2 G'_s g_{bb'} R_{C2}}{[(G'_s + g_{b'e} + j\omega C_{b'e} + j\omega C_1)(G_{L1} + g_{bb'})] \times \left[ (j\omega C_{b'e} + j\omega C_2 + g_{b'e} + g_{bb'}) - \frac{g_{bb'}^2}{G_{L1} + g_{bb'}} \right]}$$

为求上限频率,把上式整理一下得

$$\begin{aligned} \dot{A}_{VH} &= \frac{g_m^2 G'_s g_{bb'} R_{C2} \times \frac{1}{(G'_s + g_{b'e})(G_{L1} + g_{bb'})}}{\left( 1 + j \frac{f}{\frac{(g_{bb'} + g_{b'e}) - \frac{g_{bb'}^2}{G_{L1} + g_{bb'}}}{2\pi(C_{b'e} + C_2)}} \right)} \\ &\times \frac{\frac{1}{(g_{bb'} + g_{b'e}) - \frac{g_{bb'}^2}{G_{L1} + g_{bb'}}}}{\left( 1 + j \frac{f}{\frac{G'_s + g_{b'e}}{2\pi(C_{b'e} + C_1)}} \right)} \\ &= \frac{A_{VM}}{\left[ 1 + j \left( \frac{f}{f_{H1}} \right) \right] \left[ 1 + j \left( \frac{f}{f_{H2}} \right) \right]} \end{aligned}$$

其中 $A_{VM}$ 为中频区放大倍数,  $f_{H1}$ 和 $f_{H2}$ 为高频转折频率。

$$A_{VM} = \frac{g_m^2 G' s g_{bb'} R_{c2}}{(G'_1 + g_{b'e}) (G_{L1} + g_{bb'})} \times \frac{1}{(g_{bb'} + g_{b'e}) - \frac{g_{bb'}^2}{G_{L1} + g_{bb'}}}$$

$$f_{H1} = \frac{g_{bb'} + g_{b'e} - \frac{g_{bb'}^2}{G_{L1} + g_{bb'}}}{2\pi (C_{b'e} + C_2)}$$

$$f_{\omega_2} = \frac{G'_2 + g_{b'e}}{2\pi (C_{b'e} + C_1)}$$

从以上的分析计算, 可以看到, 这种分析计算方法, 是以整体电路进行的, 我们不妨称这一方法叫整体分析法吧。这一分析方法比较直观, 整体概念清楚。

但是我觉得, 用整体分析法来计算象图 1 所示的这个两级放大器, 就要依节点列出四个导纳方程, 然后再联立求解, 又由于电路参数繁多, 计算起来已显得相当麻烦。同时我们还看到, 几个结果表达式也比较复杂, 而且从其形式上看, 也不易由电路参数中找到规律。我想, 如果我们用这种方法去分析一个三级或更多级放大器的高频电压放大倍数, 恐怕会感到更加麻烦和复杂。当然, 为分析多级放大器的高频特性, 作为一个例子是完全可以的。不过我认为, 最好象分析多级放大器中频电压放大倍数一样, 再给出一个分析多级放大器高频电压放大倍数的一般方法, 并进而给出一个多级放大器高频电压放大倍数的一般表达式。这样既便于对高频特性作进一步的分析, 又不致使人对高频特性的分析感到过于复杂和畏难。

因此, 我想, 在教学实践中, 应对这种整体分析法只作一般的介绍, 而主要采用分级进行分析计算的方法。在采用分级分析法时, 我们仍以图 1 所示的这个两级放大器为例, 并由此而推广到分析一个 N 级放大器。

下面, 我们分几个步骤来进行分析说明。

### 一、把图 1 所示的两级放大器, 分为两个单级放大器, 并画出其简化高频等效电路:

从 A—A' 处将图 1 所示的电路分为两部分, 左边为第一级放大器, 右边为第二级放大器。由于第二级的输入信号电压, 就是第一级的输出端电压, 而第一级的输出端为一电流源 ( $g_{m1} \cdot \dot{V}_{b'e1}$ ) 与  $R_{L1}$  并联组合, 所以, 可以将其等效为一电压源 ( $\dot{V}_{\omega 1} = g_{m1} \cdot \dot{V}_{b'e1} \cdot R_{L1}$ ) 与  $R_{L1}$  串联组合, 然后加到第二级放大器的输入端。用这一方法分开的两个单级放大器的简化高频等效电路如图 2 所示。同样, 我们亦可用此法将一个 N 级放大器, 分为 N 个单级放大器。这里值得注意的一点是, 各级的密勒等效电容值, 欲在单级中求时, 应注意该级在整个电路中的实际负载。

## 二、对图 2 所示的两个单级放大器分别进行分析计算：

由图 2 我们可以看到，这两个单级放大器的简化高频等效电路，在电路形式上是完全相同的，并且，它们与教材中已详细介绍过的单级放大器的高频特性一节所分析的电路，也是相同的（教材 200 页）。这样，对它们的分析计算，已是很熟悉了，甚至可以 直接套用公式把它们的结果写出来。为了清楚起见，这里我们再作一次分析计算。

### 1. 求图 2—a 所示第一级放大器的高频放大倍数 $\dot{A}_{VH1}$

$$\text{设 } G'_s = \frac{1}{R'_s} = \frac{1}{R_s + r_{bb'1}}, \quad g_{b'e1} = \frac{1}{r_{b'e1}}, \quad G_{L1} = \frac{1}{R_{L1}},$$

$$C'_1 = C_{b'e1} + C_1, \quad R_1 = \frac{1}{G'_s + g_{b'e1}} = R'_s \parallel r_{b'e1} = (R_s + r_{bb'1}) \parallel r_{b'e1}$$

于是可依出端和入端列出节点导纳方程

$$(G'_s + g_{b'e1} + j\omega C'_1) \dot{V}_{b'e1} = G'_s \dot{V}_s$$

$$g_{m1} \dot{V}_{b'e1} + G_{L1} \dot{V}_{o1} = 0$$

解上式得

$$\dot{A}_{VH1} = \frac{\dot{V}_{o1}}{\dot{V}_s} = \frac{-g_{m1} G'_s R_{L1}}{G'_s + g_{b'e1} + j\omega C'_1} = \frac{-A_{VM1}}{1 + j \frac{f}{f_{H1}}}$$

$$\text{式中: } A_{VM1} = \frac{g_{m1} G'_s R_{L1}}{G'_s + g_{b'e1}} \text{ 为该级中频区电压放大倍数,}$$

$$f_{H1} = \frac{1}{2\pi R_1 C'_1} \text{ 为该级上限频率。}$$

### 2、求图 2—b 所示第二级放大器的高频放大倍数 $\dot{A}_{VH2}$

$$\text{设 } G'_{L1} = \frac{1}{R'_{L1}} = \frac{1}{R_{L1} + R_{bb'2}}, \quad G_{b'e2} = \frac{1}{R_{b'e2}}, \quad G_{c2} = \frac{1}{R_{c2}},$$

$$C'_2 = C_{b'e2} + C_2, \quad R_2 = \frac{1}{G'_{L1} + G_{b'e2}} = R'_{L1} \parallel R_{b'e2} \\ = (R_{L1} + R_{bb'2}) \parallel R_{b'e2}$$

同第一级的计算方法一样，可得

$$\dot{A}_{VH2} = \frac{\dot{V}_{o2}}{\dot{V}_{o1}} = \frac{-g_{m2} G'_{L1} R_{c2}}{G'_{L1} + G_{b'e2} + j\omega C'_2} = \frac{-A_{VM2}}{1 + j \frac{f}{f_{H2}}}$$

式中:

$$A_{VM2} = \frac{g_{m2} G'_{L1} R_{c2}}{G'_{L1} + g_{b'e2}} \quad \text{为该级中频区电压放大倍数,}$$

$$f_{H2} = \frac{1}{2\pi R_2 C'_2} \quad \text{为该级上限频率。}$$

### 三、求图 1 所示的两级放大器的高频电压放大倍数 $\dot{A}_{VH}$

由于第二级放大器的输入信号电压, 即第一级放大器的输出电压, 故两级总电压放大倍数为

$$\begin{aligned} \dot{A}_{VH} &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \dot{A}_{VH1} \times \dot{A}_{VH2} = \frac{(-1)^2 g_{m1} g_{m2} G'_s R_{L1} G'_{L1} R_{c2}}{(G'_s + G_{b'e1} + j\omega C'_1)(G'_{L1} + G_{b'e2} + j\omega C'_2)} \\ &= \frac{A_{VM}}{(1 + j\frac{f}{f_{H1}})(1 + j\frac{f}{f_{H2}})} \end{aligned}$$

$$\text{式中: } A_{VM} = A_{VM1} \times A_{VM2} = \frac{g_{m1} g_{m2} G'_s R_{L1} G'_{L1} R_{c2}}{(G'_s + g_{b'e1})(G'_{L1} + G_{b'e2})}$$

为该两级放大器的中频电压放大倍数,

$f_{H1} = \frac{1}{2\pi R_1 C'_1}$ ,  $f_{H2} = \frac{1}{2\pi R_2 C'_2}$  为该两级放大器的两个高频转折频率, 也即分别为两个单级放大器的上限频率。

### 四、求N级放大器的高频电压放大倍数 $\dot{A}_{VH}$

既然用分级分析法可以对一个两级放大器的高频电压放大倍数进行分析计算, 那么, 同样亦可用此法去分析一个N级放大器。

设  $\dot{A}_{VH1}$ 、 $\dot{A}_{VH2}$ …… $\dot{A}_{VHN}$  分别为N级放大器中各个单级的高频电压放大倍数, 于是

$$\begin{aligned} \dot{A}_{VH} &= \dot{A}_{VH1} \cdot \dot{A}_{VH2} \cdots \dot{A}_{VHN} \\ &= \frac{(-1)^N A_{VM}}{(1 + j\frac{f}{f_{H1}})(1 + j\frac{f}{f_{H2}}) \cdots (1 + j\frac{f}{f_{HN}})} \end{aligned}$$

式中:  $A_{VM} = A_{VM1} \cdot A_{VM2} \cdots A_{VMN}$  为N级放大器的中频放大倍数, 数值上等于各单级中频放大倍数的乘积; 也可直接由多级放大器中频区放大倍数公式求得 (见教材 216 页 2.5.4 式), 但都只取其绝对值。由于在对多级放大器高频特性的进一步分析中, 常采用相对于中频放大倍数的高频放大倍数去分析, 故  $A_{VM}$  常被销去, 所以, 对  $A_{VM}$  的具体表示式来说, 我们并不一定要作认真的分析, 只要明确它在表达式中所代表的内

容，一般也就够了。

式中， $f_{H1}$ 、 $f_{H2}$ …… $f_{HN}$ ，为这个N级放大器的N个高频转折频率，也即分别是N级放大器中各个单级的上限频率。例如， $f_{HN}$ 为第N级单级放大器的上限频率

$$f_{HN} = \frac{1}{2\pi R_N C'_N}$$

其中： $R_N = (R_{sN} + r_{bb'1}) \parallel r_{b'eN}$ ； $C'_N = C_{b'eN} + C_N$ 。

而 $R_{sN}$ 又为该级信号源的等效内阻， $C_N$ 为该级的密勒等效电容值，其余均为该级的相应参数。由 $R_N$ 和 $C'_N$ 所表示的内容可知： $R_N \cdot C'_N = \tau_{HN}$ ， $\tau_{HN}$ 表示第N级高频等效电路的时间常数（见教材206页，单级放大器的阶跃响应一节2·4·2式）。到此，我们可以说，N级放大器的N个高频转折频率，是由它的N个单级放大器的高频等效电路的时间常数决定的。

由以上对N级放大器高频电压放大倍数表达式的分析，我们可以知道，欲求一个多级放大器的高频电压放大倍数，只要求出这个多级放大器中每个单级的时间常数，于是便可求得它的各个高频转折频率，并将它的中频放大倍数以 $A_{VM}$ 代之，就可依照N级放大器高频电压放大倍数的表达形式，很容易地把这个多级放大器的高频电压放大倍数表达式写出来。

现在让我们再回过头来分析一下图1所示的这个两级放大器。从图2中，我们可以很清楚地看到它的两个单级高频等效电路的时间常数，于是马上可以写出它的两个高频转折频率和高频电压放大倍数的表达式：

$$f_{H1} = \frac{1}{2\pi R_1 C'_1} = \frac{1}{2\pi [(R_s + r_{bb'1}) \parallel r_{b'e1}] [C_{b'e1} + C_1]}$$

$$f_{H2} = \frac{1}{2\pi R_2 C'_2} = \frac{1}{2\pi [(R_{L1} + r_{bb'2}) \parallel r_{b'e2}] [C_{b'e2} + C_2]}$$

$$\therefore \dot{A}_{VH} = \frac{(-1)^2 A_{VM}}{(1 + j \frac{f}{f_{H1}}) (1 + j \frac{f}{f_{H2}})}$$

而相对于中频的幅频特性为：

$$\left| \frac{\dot{A}_{VH}}{A_{VM}} \right| = \frac{1}{\left[ \sqrt{1 + \left( \frac{f}{f_{H1}} \right)^2} \right] \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{f}{f_{H2}} \right)^2} \right]}$$

进而还可以分析计算它的相频特性和上限频率。

在这里说明一点，即教材中用整体电路计算出的两个高频转折频率表达式，经化简整理后，与上述 $f_{H1}$ 、 $f_{H2}$ 的表达式完全相同。

$$\text{例如 } f_{H1}(\text{整体}) = \frac{(g_{bb'} + g_{b'e}) - \frac{g_{bb'}^2}{G_{f1} + g_{bb'}}}{2\pi (C_{b'e} + C_2)}$$

$$\begin{aligned}
\therefore g_{bb'} + g_{b'e} - \frac{g_{bb'}^2}{G_{L1} + g_{bb'}} &= g_{b'e} + g_{bb'} - g_{bb'}^2 \cdot \frac{R_{L1} r_{bb'}}{R_{L1} + r_{bb'}} \\
&= g_{b'e} + g_{bb'} - \frac{g_{bb'} \cdot R_{L1}}{R_{L1} + r_{bb'}} = g_{b'e} + \frac{g_{bb'} \cdot r_{bb'} + g_{bb'} R_{L1} - g_{bb'} R_{L1}}{R_{L1} + r_{bb'}} \\
&= g_{b'e} + \frac{1}{R_{L1} + r_{bb'}} = g_{b'e} + G'_{L1} = \frac{1}{R_2}
\end{aligned}$$

$$\text{又} \because C_{b'e} + C_2 = C'_2$$

$$\therefore f_{H1}(\text{整体}) = \frac{1}{2\pi R_2 C'_2} = \frac{1}{2\pi [(R_{L1} + r_{bb'}) \parallel r_{b'e2}] [C_{b'e2} + C_1]}$$

$$\therefore f_{H1}(\text{整体}) = f_{H2}(\text{分级})$$

$$\text{同样可得 } f_{H2}(\text{整体}) = \frac{1}{2\pi R_1 C'_1}$$

$$= \frac{1}{2\pi [(R_s + r_{bb'1}) \parallel [C_{b'e1} + C_1]]}$$

$$\therefore f_{H2}(\text{整体}) = f_{H1}(\text{分级})$$

综上所述,对多级放大器高频电压放大倍数的分析计算,可用整体分析法和分级分析法。我认为分级分析法可使计算简化,所得结果表达式与电路参数之间的关系明确而有规律,因而容易记忆。同时,用分级分析法还综合应用了过去讲过的许多内容,可使学生得到的概念前后系统一致。尤为重要的一点是,用分级分析法能比较容易的推出多级放大器的高频放大倍数的一般表达式,有了这个一般表达式,便能进而对它的高频特性作全面分析。我想,在本教材下面要介绍的多级放大器的通频带一节,如能用多级放大器高频电压放大倍数的一般表达式去进行分析,那么所推得的多级放大器的上限频率通式,将是具有普遍意义的。