

# 多级放大器频率特性的分析

## ——计算机辅助分析

严 可 明

(电机系)

### 摘 要

在多级放大器正弦稳态分析中,需要绘制对数频率特性曲线,即Bode图。由Bode图可以定出放大器的通频带,也可以用它来分析放大器的稳定性。在绘制Bode图时,传统的方法是采用折线近似法。

本文利用微变等效电路分析得到放大倍数的表达式,并用算法语言BASIC编写程序,然后输入一组数据,用IBM-PC 计算机打印出计算结果和Bode图,提高了计算和绘图速度,保证了计算的准确性和图形的精确度。

**关键词:** 多级放大器, Bode图, 计算机辅助分析,

本文主要分析两级RC耦合放大器的频率特性

## 一、两级阻容耦合放大电路的组成

电路如图1所示,在分析这种放大电路的频率特性时,可以画出一个完整的微变等效电路(包括所有电容元件在内)进行计算,但这样做演算繁琐,结果复杂,不能给出放大器频率特性的明确概念,所以实用上采用分频区的分析方法,即把放大器的工作频率范围划分成低、中、高三个频区,根据各个频区中影响放大倍数的

主要因素画成等效电路进行分析,使计算简化,概念清楚。但要注意低、中、高没有严格界线,只是为计算方便而大致划分的,下面就按三个频区进行分析。

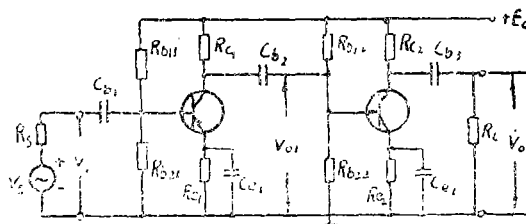


图1 两级阻容耦合电压放大器

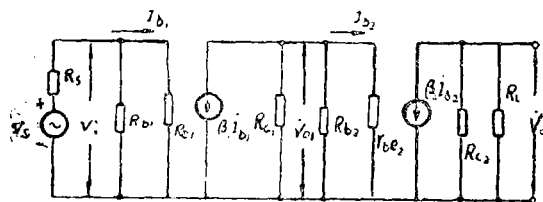


图2 中频微变等效电路

### 1 中频区微变等效电路

图2画出了两级阻容耦合放大器的中频区等效电路,其中各个电容元件的影响都可以不考虑。图2中 $R_{b1} = R_{b11} // R_{b12}$ ,  $R_{b2} = R_{b21} // R_{b22}$ 。为简化分析,作如下合理假设。

本文1987年5月20日收到

假设  $R_{b1} \gg r_{be1}$ ;  $R_{b2} \gg r_{be2}$  即忽略  $R_{b1}$ ,  $R_{b2}$  的影响。

$$\begin{aligned} \dot{A}_{vsm} &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_s} \cdot \frac{\dot{V}_{o1}}{\dot{V}_i} \cdot \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{o1}} = \frac{r_{be1}}{R_s + r_{be1}} \left( -\beta_1 \frac{R_{L'1}}{r_{be1}} \right) \left( -\beta_2 \frac{R_{L'2}}{r_{be2}} \right) \\ &= \frac{\beta_1 \beta_2 R_{L'1} R_{L'2}}{(R_s + r_{be1}) r_{be2}} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

(1) 式中  $R_{L'1} = R_{c1} \parallel r_{be1}$ ;  $R_{L'2} = R_{c2} \parallel R_L$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26 \text{ mV}}{I_{c1}}; \quad r_{be2} = r_{bb'} + (1 + \beta_2) \frac{26 \text{ mV}}{I_{c2}}$$

$$I_{c1} = \frac{E_c R_{b11}}{R_{b11} + R_{b21}} - V_{BE1}; \quad I_{c2} = \frac{E_c R_{b22}}{R_{b12} + R_{b22}} - V_{BE2}$$

## 2、低频微变等效电路

假设  $C_e$  足够大,  $\frac{1}{\omega C_{e1}} \ll R_{e1}$ ;  $\frac{1}{\omega C_{e2}} \ll R_{e2}$ , 这样在两个射极电路中只剩下  $c_{e1}$  和  $c_{e2}$ , 再分别把  $c_{e1}$  和  $c_{e2}$  折算到各自的基极电路, 如图 3 (b) (c)

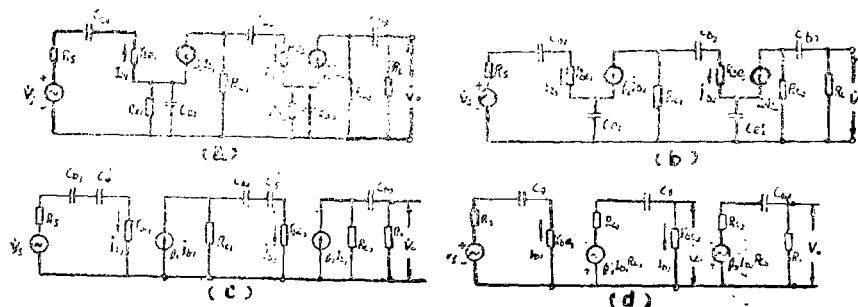


图3 低频微变等效电路

(a) 完全等效电路 (b) 简化等效电路 (c) 将  $C_e$  折算到基极电路后的等效电路  
(d) 电流源转换成电压源的等效电路

图3中  $c_4' = \frac{C_{e1}}{1 + \beta_1}$ ;  $c_5' = \frac{C_{e2}}{1 + \beta_2}$

$$c_4 = \frac{C_{b1} C_{e1}}{(1 + \beta_1) C_{b1} + C_{e1}}; \quad c_5 = \frac{C_{b2} C_{e2}}{(1 + \beta_2) C_{b2} + C_{e2}}$$

由图3 (d) 可得  $\frac{\dot{V}_{o1}}{\dot{V}_s}$ ;  $\frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{o1}}$

$$\frac{\dot{V}_{o1}}{\dot{V}_s} = \frac{-\beta_1 R_{L'1}}{R_s + r_{be1}} \cdot \frac{1}{(1 - j \frac{f_{L1}}{f})(1 - j \frac{f_{L2}}{f})} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{在(2)式中 } f_{L1} = \frac{1}{2\pi(R_s + r_{be1})C_4}$$

$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi(R_{c1} + r_{be2})C_5}$$

$$\frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{o1}} = \frac{-\beta_2 R'_{L2}}{r_{be2}} \cdot \frac{1}{(1 - j\frac{f_{L3}}{f})} \quad (3)$$

$$(3) \text{ 式中 } f_{L3} = \frac{1}{2\pi(R_{c2} + R_L)C_{b3}}$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_{VSL} &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{V}_{o1}}{\dot{V}_s} \cdot \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{o1}} \\ &= \frac{\beta_1 \beta_2 R'_{L1} R'_{L2}}{(R_s + r_{be1}) r_{be2}} \cdot \frac{1}{(1 - j\frac{f_{L1}}{f})(1 - j\frac{f_{L2}}{f})(1 - j\frac{f_{L3}}{f})} \\ &= \dot{A}_{VSM} \frac{1}{(1 - j\frac{f_{L1}}{f})(1 - j\frac{f_{L2}}{f})(1 - j\frac{f_{L3}}{f})} \quad (4) \end{aligned}$$

### 3 高频微变等效电路

采用混合 $\pi$ 型等效电路来分析高频特性,如图4(a),这里忽略分布电容和输出端电容的影响。

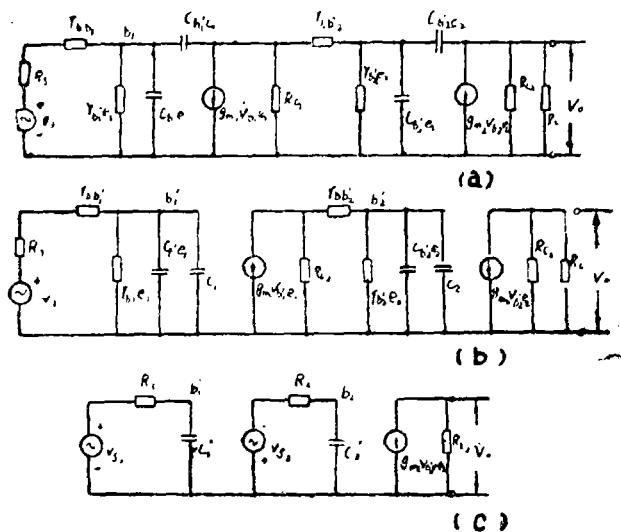


图4 高频微变等效电路

(a) 完全等效电路

(b) 经密勒定理变换后的电路

(c) 简化电路

图4(a)经密勒定理变换后,使电路单向化,即只存在从输入回路到输出回路的信号传输过程,忽略 $C_{b'_{1}e_1}$ 对第一级输出端的影响, $C_{b'_{2}e_2}$ 对第二级输出端的影响,如图(b),其中

$$C_1 = C_{b'_{1}e_1} (1 + g_{m1} R'_{L1}) \quad C_2 = C_{b'_{2}e_2} (1 + g_{m2} R'_{L2})$$

$$C_{b'_{1}e_1} = \frac{g_{m1}}{2\pi f_{T1}} \quad C_{b'_{2}e_2} = \frac{g_{m2}}{2\pi f_{T2}}$$

$f_T$ 为三极管的特征频率, $g_m$ 为三极管的互导,它的单位用 $\text{mA}/\text{V}$ , $g_m$ 在很宽的频率范围内与频率无关,它与 $\beta$ 有下列关系  $g_m = \frac{\beta}{r_{be}}$ ,利用戴维南定理以及第一级电流源转成电压

源图(b)又等效成图(c),在图4(c)中

$$\dot{V}_{s1} = \frac{\dot{V}_s r_{b'_{1}e_1}}{(R_s + r_{b'_{1}b_1}) + r_{b'_{1}e_1}}$$

$$R_1 = (R_s + r_{b'_{1}b_1}) \parallel r_{b'_{1}e_1}$$

$$C'_1 = C_{b'_{1}e_1} + C_1$$

$$\dot{V}_{s2} = \frac{g_{m1} \dot{V}_{b'_{1}e_1} R_{c1} r_{b'_{2}e_2}}{R_{c1} + r_{b'_{1}b_2} + r_{b'_{2}e_2}}$$

$$R_2 = (R_{c1} + r_{b'_{1}b_2}) \parallel r_{b'_{2}e_2}$$

$$C'_2 = C_{b'_{2}e_2} + C_2$$

由图4(c)可求得

$$\dot{V}_0 = -g_{m2} \dot{V}_{b'_{2}e_2} R'_{L2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\dot{V}_{v_{2}e_2} = \frac{-\dot{V}_{s2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C'_2}} \cdot \frac{1}{j\omega C'_2} = \frac{-\dot{V}_{s2}}{1 + j\omega R_2 C'_2}$$

$$= \frac{-g_{m1} \dot{V}_{b'_{1}e_1} R_{c1} r_{b'_{2}e_2}}{(R_{c1} + r_{b'_{1}b_2} + r_{b'_{2}e_2})(1 + j\omega R_2 C'_2)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

将  $\dot{V}_{b'1e1} = \frac{\dot{V}_{s1}}{1+j\omega R_1 C_1'}$  代入 (6)

$$\dot{V}_{b'2e2} = \frac{-g_{m1} R_{c1} r_{b'2e2} \dot{V}_{s1}}{(R_{c1} + r_{bb'2} + r_{b'2e2})(1+j\omega R_2 C_2')(1+j\omega R_1 C_1')} \dots\dots\dots (7)$$

将  $\dot{V}_{s1}$  代入 (7) 得

$$\dot{V}_{b'2e2} = \frac{-g_{m1} R_{c1} r_{b'2e2} \dot{V}_{sr_{b'1e1}}}{(R_{c1} + r_{bb'2} + r_{b'2e2})(1+j\omega R_2 C_2')(1+j\omega R_1 C_1')(R_s + r_{be1})} \dots\dots\dots (8)$$

将 (8) 代入 (5) 得

$$\dot{V}_0 = \frac{g_{m1} R_{c1} r_{b'2e2} r_{b'1e1} g_{m2} R_{L2}' \dot{V}_s}{(R_s + r_{be1})(R_{c1} + r_{be2})(1+j\omega R_2 C_2')(1+j\omega R_1 C_1')}$$

将  $g_m = \frac{\beta}{r_{b'e}}$  代入上式

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &= \frac{\beta_1 \beta_2 R_{c1} R_{L2}' \dot{V}_s}{(R_s + r_{be1})(R_{c1} + r_{be2})(1+j\omega R_2 C_2')(1+j\omega R_1 C_1')} \\ &= \frac{\beta_1 \beta_2 R_{L1}' R_{L2}' \dot{V}_s}{(R_s + r_{be1}) r_{be2}} \cdot \frac{1}{(1+j\omega R_2 C_2')(1+j\omega R_1 C_1')} \end{aligned}$$

$$\dot{A}_{vsh} = \frac{\dot{V}_0}{\dot{V}_s} = \dot{A}_{vsm} \frac{1}{(1+j\frac{f}{f_{H1}})(1+j\frac{f}{f_{H2}})} \dots\dots\dots (9)$$

$$(9) \text{ 式中 } f_{H1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1'} \quad f_{H2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2'}$$

## 二、完整的放大倍数表达式

综合上面中频、低频、高频的放大倍数,就可得到两级阻容耦合放大电路在全部范围内放大倍数的表达式

$$\dot{A}_{vs} = \frac{\dot{A}_{vsm}}{(1-j\frac{f_{L1}}{f})(1-j\frac{f_{L2}}{f})(1-j\frac{f_{L3}}{f})(1+j\frac{f}{f_{H1}})(1+j\frac{f}{f_{H2}})} \dots\dots\dots (10)$$

式 (10) 可以分别用模和相角表示

$$|\dot{A}_{vs}| = \frac{|\dot{A}_{vsm}|}{\sqrt{1 + (\frac{f_{L1}}{f})^2} \sqrt{1 + (\frac{f_{L2}}{f})^2} \sqrt{1 + (\frac{f_{L3}}{f})^2} \sqrt{1 + (\frac{f}{f_{H1}})^2} \sqrt{1 + (\frac{f}{f_{H2}})^2}} \quad \dots (11)$$

$$\varphi = \arctg \frac{f_{L1}}{f} + \arctg \frac{f_{L2}}{f} + \arctg \frac{f_{L3}}{f} - \arctg \frac{f}{f_{H1}} - \arctg \frac{f}{f_{H2}} \quad \dots (12)$$

将(11)式用分贝(dB)表示, 则有

$$\begin{aligned} 20\lg|\dot{A}_{vs}| &= 20\lg|\dot{A}_{vsm}| - 20\lg\sqrt{1 + (\frac{f_{L1}}{f})^2} \\ &- 20\lg\sqrt{1 + (\frac{f_{L2}}{f})^2} - 20\lg\sqrt{1 + (\frac{f_{L3}}{f})^2} \\ &- 20\lg\sqrt{1 + (\frac{f}{f_{H1}})^2} - 20\lg\sqrt{1 + (\frac{f}{f_{H2}})^2} \quad \dots (13) \end{aligned}$$

要画整个频率范围内的Bode图, 根据(13)(12)式利用折线近似法是较麻烦的, 尤其放大级数愈多, 手工作图就更麻烦, 而且不准确。根据(13)(12)式编制程序, 用计算机打印计算结果和Bode图, 那就方便和精确了, 而且很快求得放大器的下限频率 $f_L$ 和上限频率 $f_H$ 。本文用算法语言BASIC编写程序, 给出一组原始数据, 在IBM-PC计算机上打印出计算结果和Bode图, 求得两级阻容耦合放大器的中频放大倍数 $A_{vsm} = 67.7\text{dB}$ ,  $f_L = 140\text{Hz}$ ,  $f_H = 378\text{kHz}$ 。

### 三、利用IBM-PC计算机进行计算和绘图。

对数频率特性计算和打印Bode图程序框图, 如图5所示。输入放大电路一组常用数据列于表1

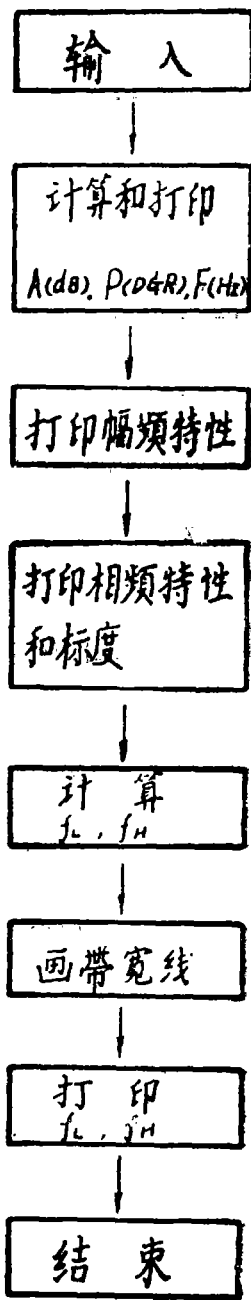


图5 对数频率特性计算和打印Bode图程序框图

表 1

$\beta_1$	$\beta_2$	$C_{b1}(F)$	$C_{e1}(F)$		
50	50	0.00005	0.00005		
$C_{b2}(F)$	$C_{e2}(F)$	$C_{b3}(F)$	$\Delta BE(v)$		
0.000005	0.00005	0.000005	0.7		
$\Delta BE(v)$	$EC(v)$	$R_{b21}(\Omega)$	$R_{b11}(\Omega)$		
0.7	12	33000	91000		
$R_{b22}(\Omega)$	$R_{b12}(\Omega)$	$R_{e1}(\Omega)$	$R_{e2}(\Omega)$		
43000	82000	2200	2700		
$Y_{bb1}'(\Omega)$	$Y_{bb2}'(\Omega)$	$R_L(\Omega)$	$R_{c1}(\Omega)$		
300	300	5000	5000		
$R_{c2}(\Omega)$	$R_e(\Omega)$	$C_{b1c1}'(F)$	$f_{T1}(Hz)$	$f_{T2}(Hz)$	$C_{b'2c2}(F)$
5000	600	3E-12	1E+08	1E+08	3E-12

在IBM—PC计算机上打印计算结果，部分列于表2。

绘制的Bode图如图6所示。

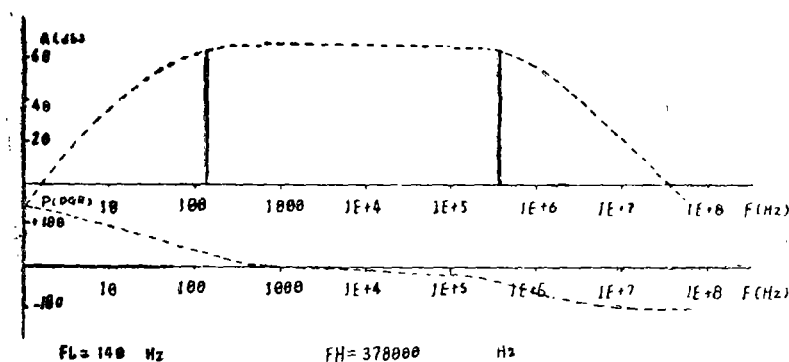


图 6 Bode图

## 结 束 语

电子计算机是分析电子电路的现代化工具，它可以节省计算时间，保证计算精度。本文分析的步骤，首先画出微变等效电路，合理近似推导放大倍数的表达式，根据数学表达式用BASIC语言编写程序。利用此程序可以打印出两级阻容耦合放大器在不同输入数据下频率

表 2

A (db)	F(DGR)	F(H <sub>2</sub> )
62.78402	71.42033	100
65.96133	43.36398	200
66.86235	30.51953	300
67.22246	23.36725	400
67.39886	18.86393	500
67.4975	15.78216	600
67.55798	13.54454	700
67.59766	11.84685	800
67.62566	10.51457	900
67.64475	9.446698	1000
67.70821	4.471335	2000
67.71993	2.685905	3000
67.72389	1.702881	4000
67.72556	1.041462	5000
67.7263	5409843	6000
67.72656	1325166	7000
67.72656	- 2184252	8000
67.72637	- 5310045	9000
67.72605	- 8167216	10000
67.71834	- 3.081954	20000
67.70456	- 5.021545	30000
67.68525	- 6.825511	40000
67.66048	- 8.690562	50000
67.63035	-10.48123	60000
67.55446	-12.25288	70000
67.59498	-14.007552	80000
67.50893	-15.74565	90000
67.45853	-17.46713	100000
66.72284	-33.62938	200000
65.69083	-47.58	300000
64.51741	-59.33202	400000
63.30223	-69.21429	500000
62.09771	-77.60446	600000
60.92779	-84.82222	700000
59.8016	-91.11211	800000
58.7213	-96.65538	900000
57.68594	-101.5866	1000000
42.30133	-131.7344	2000000
43.3159	-143.8088	3000000
38.74658	-153.7193	4000000
35.108129	-158.7196	5000000
32.03253	-162.1456	6000000
27.42747	-164.6323	7000000
27.15562	-166.5164	8000000
25.14258	-167.9918	9000000
23.33506	-169.1779	1E+07

特性的计算结果和Bode图,很快得到下限频率 $f_L$ 和上限频率 $f_H$ ,使通频带得到满意的结果,这样可以代替繁琐的设计工作。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 华中工学院工业电子学教研室编,康华光主编:《电子技术基础》上册,高等教育社,1982
- [ 2 ] 清华大学电子学教研组编,童诗白主编:《模拟电子技术基础》上册,人民教育出版社,1980年。
- [ 3 ] 谭浩强、田淑清、谢锡迎编著《BASIC语言》科学普及出版社,1980年。
- [ 4 ] [美] 克里斯·馮德著,王世耕等译《IBM—PC(个人计算机)》电子工业出版社,1985年。
- [ 5 ] 路贵增,宣国昌译《IBM—PC BASIC程序设计语言》同济大学出版社,1985年。

## ANALYSIS OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF MULTISTAGE AMPLIFIER ——COMPUTER AIDED ANALYSIS

Yan Kemin

(Electrical engineering department)

### Abstract

Analysis of a multistage amplifier in the sine stable state needs drawing a logarithmic frequency response plot which is Bode diagram. Bandwidth can be determined by Bode diagram. Bode diagram can be also used to analyze stability of the amplifier. The traditional method for drawing Bode diagram is the broken line approximation

In this paper, the analysis of microchanged equivalent circuit is used to obtain the expression of amplification and BASIC language is used for programming on an IBM—PC microcomputer. After the data is inputted, the result of calculation and the Bode diagram will be printed out. In this way, the speed of calculation and drawing has been raised and the accuracy of calculation and exactness of diagram have been ensured.

**key words:** multipoles amplifier, bode diagrams, Computer aided analysis