

## 第五章 放大电路的频率响应

### 自 测 题

一、选择正确答案填入空内。

(1) 测试放大电路输出电压幅值与相位的变化,可以得到它的频率响应,条件是\_\_\_\_\_。

- A. 输入电压幅值不变, 改变频率
- B. 输入电压频率不变, 改变幅值
- C. 输入电压的幅值与频率同时变化

(2) 放大电路在高频信号作用时放大倍数数值下降的原因是\_\_\_\_\_, 而低频信号作用时放大倍数数值下降的原因是\_\_\_\_\_。

- A. 耦合电容和旁路电容的存在
- B. 半导体管极间电容和分布电容的存在。
- C. 半导体管的非线性特性
- D. 放大电路的静态工作点不合适

(3) 当信号频率等于放大电路的  $f_L$  或  $f_H$  时, 放大倍数的值约下降到中频时的\_\_\_\_\_。

- A. 0.5 倍
- B. 0.7 倍
- C. 0.9 倍

即增益下降\_\_\_\_\_。

- A. 3dB
- B. 4dB
- C. 5dB

(4) 对于单管共射放大电路, 当  $f = f_L$  时,  $\dot{U}_o$  与  $\dot{U}_i$  相位关系是\_\_\_\_\_。

- A.  $+45^\circ$
- B.  $-90^\circ$
- C.  $-135^\circ$

当  $f = f_H$  时,  $\dot{U}_o$  与  $\dot{U}_i$  的相位关系是\_\_\_\_\_。

- A.  $-45^\circ$
- B.  $-135^\circ$
- C.  $-225^\circ$

解:(1) A (2) B, A (3) B A (4) C C

二、电路如图 T5.2 所示。已知： $V_{CC} = 12V$ ；晶体管的  $C_{\mu} = 4pF$ ， $f_T = 50MHz$ ， $r_{bb'}$  = 100， $\beta_0 = 80$ 。试求解：

- (1) 中频电压放大倍数  $\dot{A}_{usm}$ ；
- (2)  $C_{\pi}'$ ；
- (3)  $f_H$  和  $f_L$ ；
- (4) 画出波特图。

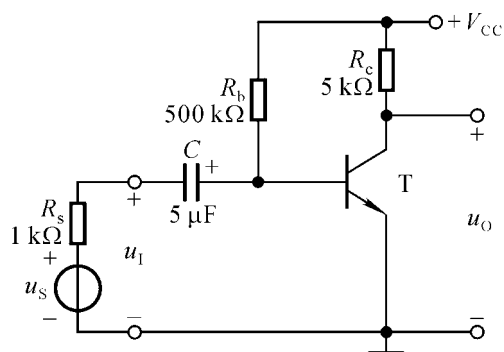


图 T5.2

解：(1) 静态及动态的分析估算：

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \approx 22.6 \mu A$$

$$I_{EQ} = (1 + \beta)I_{BQ} \approx 1.8 mA$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c \approx 3V$$

$$r_{b'e} = (1 + \beta) \frac{26mV}{I_{EQ}} \approx 1.17k\Omega$$

$$r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e} \approx 1.27k\Omega$$

$$R_i = r_{be} \quad R_b \approx 1.27k\Omega$$

$$g_m = \frac{I_{EQ}}{U_T} \approx 69.2mA/V$$

$$\dot{A}_{usm} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} (-g_m R_c) \approx -178$$

(2) 估算  $C_{\pi}'$ ：

$$f_T \approx \frac{\beta_0}{2 r_{b'e} (C + C_\mu)}$$

$$C_\pi \approx \frac{\beta_0}{2 r_{b'e} f_T} - C_\mu \approx 214 \text{pF}$$

$$C_\pi' = C_\pi + (1 + g_m R_c) C_\mu \approx 1602 \text{pF}$$

(3) 求解上限、下限截止频率：

$$R = r_{b'e} \quad (r_{bb} + R_s \parallel R_b) \approx r_{b'e} \quad (r_{bb} + R_s) \approx 567 \Omega$$

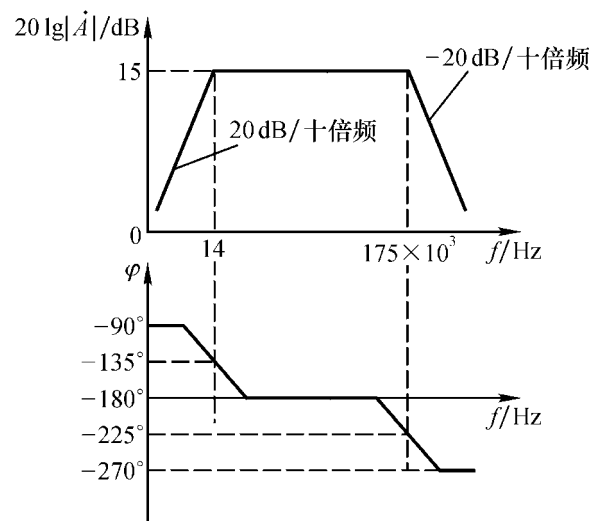
$$f_H = \frac{1}{2 RC'} \approx 175 \text{kHz}$$

$$f_L = \frac{1}{2 (R_s + R_i) C} \approx 14 \text{Hz}$$

(4) 在中频段的增益为

$$20 \lg |A_{usm}| \approx 45 \text{dB}$$

频率特性曲线如解图 T5.2 所示。



解图 T5.2

三、 已知某放大电路的波特图如图 T5.3 所示，填空：

- (1) 电路的中频电压增益  $20\lg|\dot{A}_{um}| = \underline{\hspace{2cm}} \text{ dB}$  ,  $\dot{A}_{um} = \underline{\hspace{2cm}}$  。
- (2) 电路的下限频率  $f_L \underline{\hspace{2cm}} \text{ Hz}$  , 上限频率  $f_H \underline{\hspace{2cm}} \text{ kHz}$  。
- (3) 电路的电压放大倍数的表达式  $\dot{A}_u = \underline{\hspace{4cm}}$  。

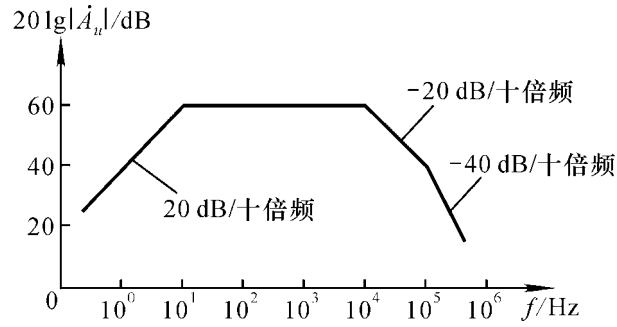


图 T5.3

- 解：(1) 60       $10^4$
- (2) 10      10
- (3)

$$\frac{\pm 10^3}{(1 + \frac{10}{jf})(1 + j\frac{f}{10^4})(1 + j\frac{f}{10^5})} \quad \text{或} \quad \frac{\pm 100jf}{(1 + j\frac{f}{10})(1 + j\frac{f}{10^4})(1 + j\frac{f}{10^5})}$$

说明：该放大电路的中频放大倍数可能为“+”，也可能为“-”。

## 习 题

5.1 在图 P5.1 所示电路中，已知晶体管的  $r_{bb'}$ 、 $C_{\mu}$ 、 $C_{\pi}$ ， $R_i$ 、 $r_{be}$ 。

填空：除要求填写表达式的之外，其余各空填入 增大、基本不变、减小。

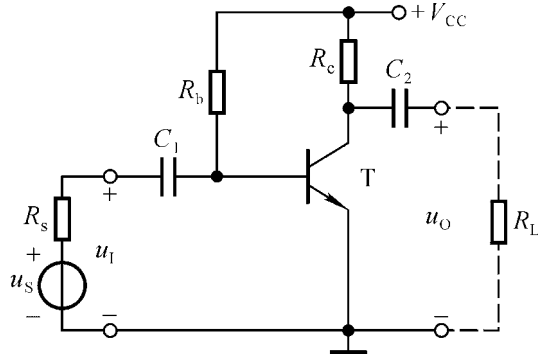


图 P5.1

(1) 在空载情况下，下限频率的表达式  $f_L =$  \_\_\_\_\_。当  $R_s$  减小时， $f_L$  将 \_\_\_\_\_；当带上负载电阻后， $f_L$  将 \_\_\_\_\_。

(2) 在空载情况下，若 b-e 间等效电容为  $C_{\pi}'$ ，\_\_\_\_\_ 则上限频率的表达式  $f_H =$  \_\_\_\_\_；当  $R_s$  为零时  $f_H$  将 \_\_\_\_\_；当  $R_b$  减小时， $g_m$  将 \_\_\_\_\_， $C_{\pi}'$  将 \_\_\_\_\_， $f_H$  将 \_\_\_\_\_。

解：(1)  $\frac{1}{2\pi(R_s + R_b \parallel r_{be})C_1}$  ； 。

(2)  $\frac{1}{2\pi[r_{be} \parallel (r_{bb'} + R_b \parallel R_s)]C_{\pi}'}$  ； ； ， ， 。

5.2 已知某电路的波特图如图 P5.2 所示，试写出  $\dot{A}_u$  的表达式。

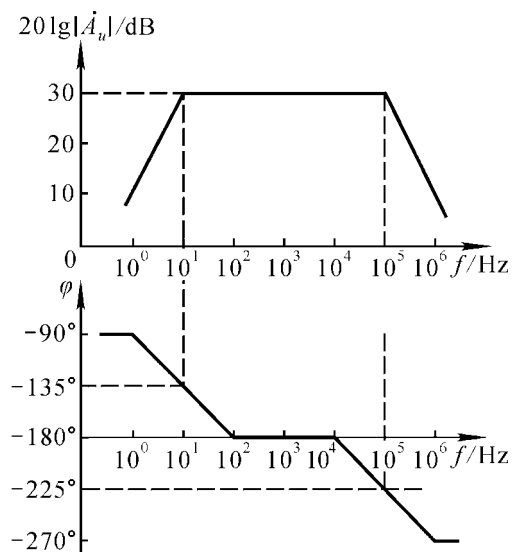


图 P5.2

解：设电路为基本共射放大电路或基本共源放大电路。

$$\dot{A}_u \approx \frac{-32}{(1 + \frac{10}{jf})(1 + j\frac{f}{10^5})} \quad \text{或} \quad \dot{A}_u \approx \frac{-3.2jf}{(1 + j\frac{f}{10})(1 + j\frac{f}{10^5})}$$

5.3 已知某共射放大电路的波特图如图 P5.3 所示，试写出  $\dot{A}_u$  的表达式。

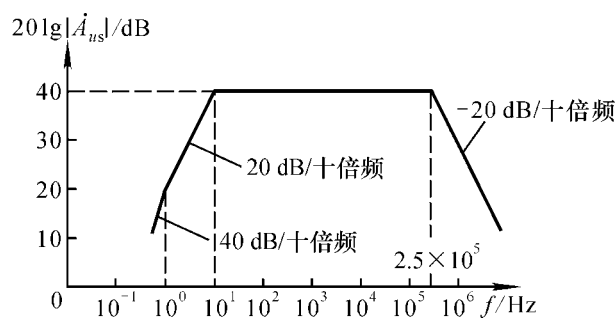


图 P5.3

解：观察波特图可知，中频电压增益为 40dB，即中频放大倍数为 -100；下限截止频率为 1Hz 和 10Hz，上限截止频率为 250kHz。故电路  $\dot{A}_u$  的表达式为

$$\dot{A}_u = \frac{-100}{(1 + \frac{1}{jf})(1 + \frac{10}{jf})(1 + j\frac{f}{2.5 \times 10^5})}$$

或

$$\dot{A}_u = \frac{+10f^2}{(1 + jf)(1 + j\frac{f}{10})(1 + j\frac{f}{2.5 \times 10^5})}$$

5.4 已知某电路的幅频特性如图 P5.4 所示，试问：

- (1) 该电路的耦合方式；
- (2) 该电路由几级放大电路组成；
- (3) 当  $f = 10^4 \text{Hz}$  时，附加相移为多少？当  $f = 10^5$  时，附加相移又约为多少？

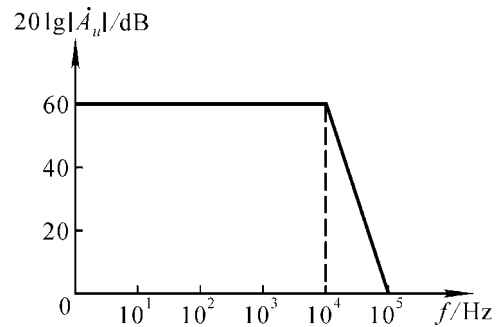


图 P5.4

解：(1) 因为下限截止频率为 0，所以电路为直接耦合电路；

(2) 因为在高频段幅频特性为 -60dB/十倍频，所以电路为三级放大电路；

(3) 当  $f = 10^4 \text{Hz}$  时， $\varphi = -135^\circ$ ；当  $f = 10^5 \text{Hz}$  时， $\varphi = -270^\circ$ 。

5.5 若某电路的幅频特性如图 P5.4 所示，试写出  $\dot{A}_u$  的表达式，并近似估算该电路的上限频率  $f_H$ 。

解： $\dot{A}_u$  的表达式和上限频率分别为

$$\dot{A}_u = \frac{\pm 10^3}{(1 + j\frac{f}{10^4})^3} \quad f_H \approx \frac{f_H'}{1.1\sqrt{3}} \approx 5.2 \text{kHz}$$

5.6 已知某电路电压放大倍数

$$\dot{A}_u = \frac{-10jf}{(1+j\frac{f}{10})(1+j\frac{f}{10^5})}$$

试求解：

(1)  $\dot{A}_{um} = ? f_L = ? f_H = ?$

(2) 画出波特图。

解：(1) 变换电压放大倍数的表达式，求出  $\dot{A}_{um}$ 、 $f_L$ 、 $f_H$ 。

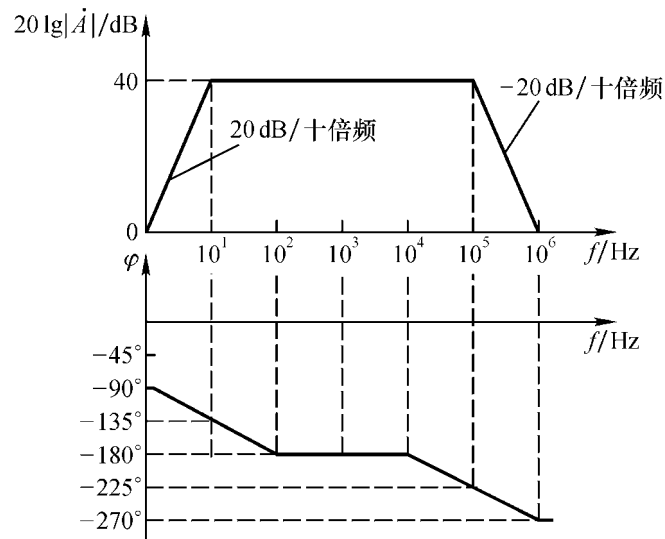
$$\dot{A}_u = \frac{-100 \cdot j \frac{f}{10}}{(1+j\frac{f}{10})(1+j\frac{f}{10^5})}$$

$$\dot{A}_{um} = -100$$

$$f_L = 10\text{Hz}$$

$$f_H = 10^5\text{Hz}$$

(2) 波特图如解图 P5.6 所示。



解图 P5.6

5.7 已知两级共射放大电路的电压放大倍数



$$\dot{A}_u = \frac{200 \cdot jf}{\left(1 + j\frac{f}{5}\right)\left(1 + j\frac{f}{10^4}\right)\left(1 + j\frac{f}{2.5 \times 10^5}\right)}$$

(1)  $\dot{A}_{um} = ? f_L = ? f_H = ?$

(2) 画出波特图。

解:(1) 变换电压放大倍数的表达式, 求出  $\dot{A}_{um}$ 、 $f_L$ 、 $f_H$ 。

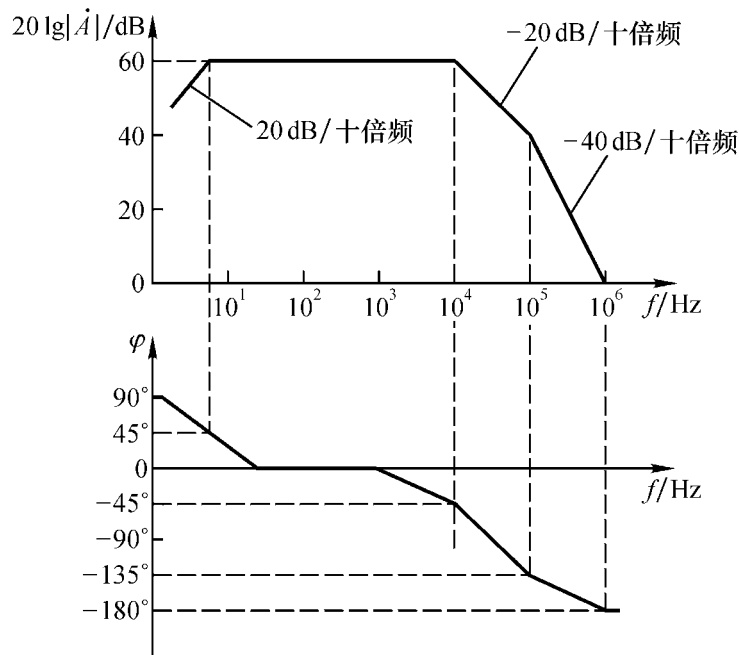
$$\dot{A}_u = \frac{10^3 \cdot j\frac{f}{5}}{\left(1 + j\frac{f}{5}\right)\left(1 + j\frac{f}{10^4}\right)\left(1 + j\frac{f}{2.5 \times 10^5}\right)}$$

$$\dot{A}_{um} = 10^3$$

$$f_L = 5\text{Hz}$$

$$f_H \approx 10^4\text{Hz}$$

(2) 波特图如解图 P5.7 所示。



解图 P5.7

5.8 电路如图 P5.8 所示。已知：晶体管的  $\beta$ 、 $r_{bb}$ 、 $C_{\mu}$  均相等，所有电容的容量均相等，静态时所有电路中晶体管的发射极电流  $I_{EQ}$  均相等。定性分析各电路，将结论填入空内。

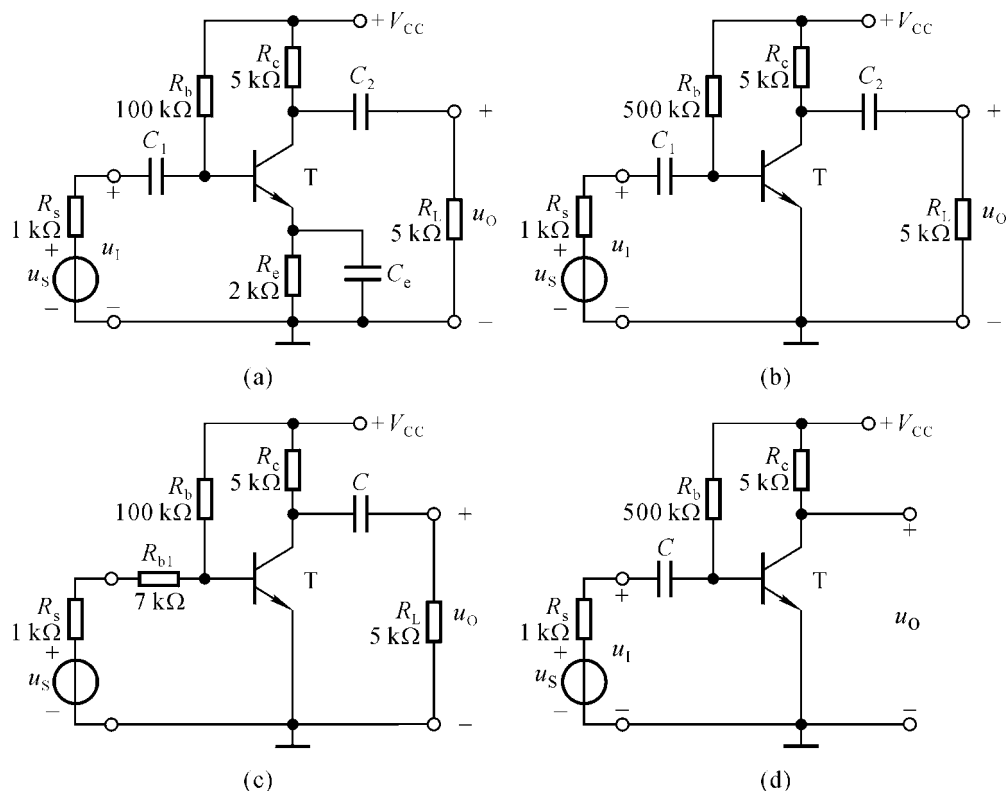


图 P5.8

- (1) 低频特性最差即下限频率最高的电路是 \_\_\_\_\_;
- (2) 低频特性最好即下限频率最低的电路是 \_\_\_\_\_;
- (3) 高频特性最差即上限频率最低的电路是 \_\_\_\_\_;

解：(1)(a)      (2)(c)      (3)(c)

5.9 在图 P5.8 (a) 所示电路中，若  $\beta = 100$ ， $r_{be} = 1\text{ k}\Omega$ ， $C_1 = C_2 = C_e = 100\text{ }\mu\text{F}$ ，则下限频率  $f_L$  ？

解：由于所有电容容量相同，而  $C_e$  所在回路等效电阻最小，所以下限频率决定于  $C_e$  所在回路的时间常数。

$$R = R_e \frac{r_{be} + R_s}{1 + \beta} \approx \frac{r_{be} + R_s}{1 + \beta} \approx 20\Omega$$

$$f_L \approx \frac{1}{2\pi RC_e} \approx 80\text{Hz}$$

5.10 在图 P5.8 (b) 所示电路中,若要求  $C_1$  与  $C_2$  所在回路的时间常数相等,且已知  $r_{be}=1k$ , 则  $C_1:C_2=?$  若  $C_1$  与  $C_2$  所在回路的时间常数均为  $25ms$ , 则  $C_1$ 、 $C_2$  各为多少? 下限频率  $f_L$  ?

解:(1) 求解  $C_1:C_2$

因为  $C_1(R_s + R_i) = C_2(R_c + R_L)$

将电阻值代入上式, 求出

$$C_1:C_2=5:1。$$

(2) 求解  $C_1$ 、 $C_2$  的容量和下限频率

$$C_1 = \frac{\tau}{R_s + R_i} \approx 12.5 \mu F$$

$$C_2 = \frac{\tau}{R_c + R_L} \approx 2.5 \mu F$$

$$f_{L1} = f_{L2} = \frac{1}{2\tau} \approx 6.4 \text{Hz}$$

$$f_L \approx 1.1\sqrt{2}f_{L1} \approx 10 \text{Hz}$$

5.11 在图 P5.8 (a) 所示电路中, 若  $C_e$  突然开路, 则中频电压放大倍数  $\dot{A}_{usm}$ 、 $f_H$  和  $f_L$  各产生什么变化(是增大、减小、还是基本不变)? 为什么?

解:  $|\dot{A}_{usm}|$  将减小, 因为在同样幅值的  $\dot{U}_i$  作用下,  $|\dot{i}_b|$  将减小,  $|\dot{i}_c|$  随之减小,  $|\dot{U}_o|$  必然减小。

$f_L$  减小, 因为少了一个影响低频特性的电容。

$f_H$  增大。因为  $C'$  会因电压放大倍数数值的减小而大大减小, 所以虽然  $C'$  所在回路的等效电阻有所增大, 但时间常数仍会减小很多, 故  $f_H$  增大。

5.12 在图 P5.8 (a) 所示电路中, 若  $C_1 > C_e$ ,  $C_2 > C_e$ ,  $\beta = 100$ ,  $r_{be} = 1k$ , 欲使  $f_L = 60 \text{Hz}$ , 则  $C_e$  应选多少微法?

解: 下限频率决定于  $C_e$  所在回路的时间常数,  $f_L \approx \frac{1}{2\pi RC_e}$ 。R 为  $C_e$  所在回路的等效电阻。

R 和  $C_e$  的值分别为:

$$R = R_e \frac{r_{be} + R_s}{1 + \beta} \frac{R_b}{1 + \beta} \approx \frac{r_{be} + R_s}{1 + \beta} \approx 20 \Omega$$

$$C_e \approx \frac{1}{2\pi R f_L} \approx 133 \mu F$$

5.13 在图 P5.8 (d) 所示电路中, 已知晶体管的  $r_{bb'} = 100 \Omega$ ,  $r_{be} = 1k \Omega$ , 静态电流  $I_{EQ} = 2mA$ ,  $C_{\pi}' = 800pF$ ;  $R_s = 2k \Omega$ ,  $R_b = 500k \Omega$ ,  $R_C = 3.3k \Omega$ ,  $C = 10 \mu F$ 。

试分别求出电路的  $f_H$ 、 $f_L$ , 并画出波特图。

解: (1) 求解  $f_L$

$$f_L = \frac{1}{2(R_s + R_i)} \approx \frac{1}{2(R_s + r_{be})} \approx 5.3Hz$$

(2) 求解  $f_H$  和中频电压放大倍数

$$r_{b'e} = r_{be} - r_{b'b} = 0.9k\Omega$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi [r_{b'e} (r_{b'b} + R_b + R_s)] C_{\pi}'} \approx \frac{1}{2\pi [r_{b'e} (r_{b'b} + R_s)] C_{\pi}'} \approx 316kHz$$

$$g_m \approx \frac{I_{EQ}}{U_T} \approx 77mA/V$$

$$\dot{A}_{usm} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot (-g_m R_L') \approx \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{be}} \cdot (-g_m R_L') \approx -76$$

$$20 \lg |\dot{A}_{usm}| \approx 37.6dB$$

其波特图参考解图 P5.6。

5.14 电路如图 P5.14 所示, 已知  $C_{gs} = C_{gd} = 5pF$ ,  $g_m = 5mS$ ,  $C_1 = C_2 = C_s = 10 \mu F$ 。

试求  $f_H$ 、 $f_L$  各约为多少, 并写出  $\dot{A}_{us}$  的表达式。

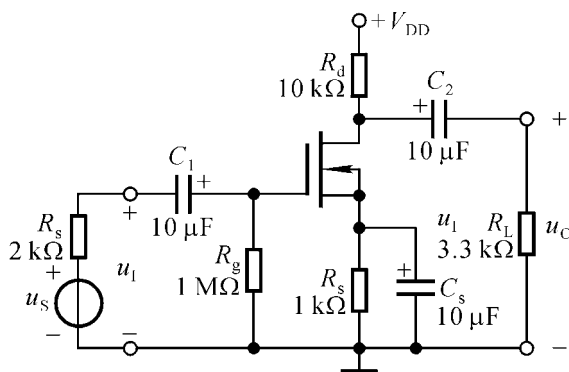


图 P5.14

解： $f_H$ 、 $f_L$ 、 $\dot{A}_{us}$ 的表达式分析如下：

$$\dot{A}_{usm} = \frac{R_i}{R_s + R_i} (-g_m R'_L) \approx -g_m R'_L \approx -12.4$$

$$f_L \approx \frac{1}{2\pi R_s C_s} \approx 16\text{Hz}$$

$$C'_{gs} = C_{gs} + (1 + g_m R'_L) C_{gd} \approx 72\text{pF}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi (R_s + R_g) C'_{gs}} \approx \frac{1}{2\pi R_s C'_{gs}} \approx 1.1\text{MHz}$$

$$\dot{A}_{us} \approx \frac{-12.4 \cdot (j \frac{f}{16})}{(1 + j \frac{f}{16})(1 + j \frac{f}{1.1 \times 10^6})}$$

5.15 在图 5.4.7 (a) 所示电路中，已知  $R_g = 2\text{M}$ ， $R_d = R_L = 10\text{k}$ ， $C = 10\mu\text{F}$ ；场效应管的  $C_{gs} = C_{gd} = 4\text{pF}$ ， $g_m = 4\text{mS}$ 。试画出电路的波特图，并标出有关数据。

解：

$$\dot{A}_{um} = -g_m R'_L = -20, 20\lg|\dot{A}_{um}| \approx 26\text{dB}$$

$$C'_{gs} = C_{gs} + (1 + g_m R'_L) C_{gd} = 88\text{pF}$$

$$f_L \approx \frac{1}{2(R_d + R_L)C} \approx 0.796\text{Hz}$$

$$f_H = \frac{1}{2R_g C'_{gs}} \approx 904\text{Hz}$$

其波特图参考解图 P5.6。

5.16 已知一个两级放大电路各级电压放大倍数分别为

$$\dot{A}_{u1} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} = \frac{-25jf}{\left(1 + j\frac{f}{4}\right)\left(1 + j\frac{f}{10^5}\right)}$$

$$\dot{A}_{u2} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{i2}} = \frac{-2jf}{\left(1 + j\frac{f}{50}\right)\left(1 + j\frac{f}{10^5}\right)}$$

- (1) 写出该放大电路的表达式；  
 (2) 求出该电路的  $f_L$  和  $f_H$  各约为多少；  
 (3) 画出该电路的波特图。

解：(1) 电压放大电路的表达式

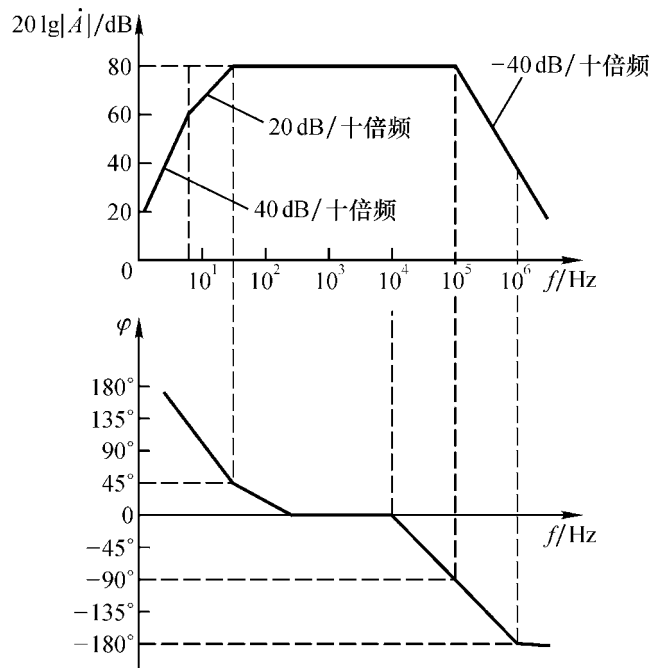
$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1}\dot{A}_{u2} = \frac{-50f^2}{\left(1 + j\frac{f}{4}\right)\left(1 + j\frac{f}{50}\right)\left(1 + j\frac{f}{10^5}\right)^2}$$

(2)  $f_L$  和  $f_H$  分别为：

$$f_L \approx 50\text{Hz}$$

$$\frac{1}{f_H} \approx \frac{1}{1.1\sqrt{2}10^5}, f_H \approx 64.3\text{kHz}$$

(3) 根据电压放大倍数的表达式可知，中频电压放大倍数为  $10^4$ ，增益为 80dB。波特图如解图 P5.16 所示。



解图 P5.16

5.17 电路如图 P5.17 所示。试定性分析下列问题，并简述理由。

- (1) 哪一个电容决定电路的下限频率；
- (2) 若  $T_1$  和  $T_2$  静态时发射极电流相等，且  $r_{bb}$  和  $C_\pi'$  相等，则哪一级的上限频率低。

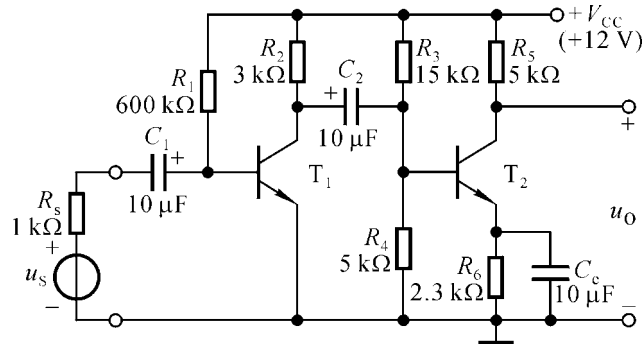


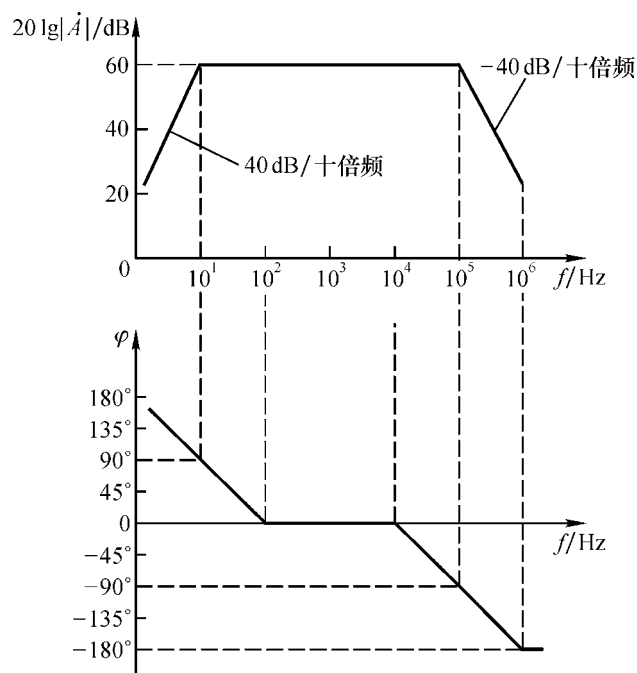
图 P5.17

解：(1) 决定电路下限频率的是  $C_e$ ，因为它所在回路的等效电阻最小。

(2) 因为  $R_2 \parallel R_3 \parallel R_4 > R_1 \parallel R_5$ ， $C_2'$  所在回路的时间常数大于  $C_1'$  所在回路的时间常数，所以第二级的上限频率低。

5.18 若两级放大电路各级的波特图均如图 P5.2 所示，试画出整个电路的波特图。

解： $20\lg|\dot{A}_{um}| = 60\text{dB}$ 。在折线化幅频特性中，频率小于  $10\text{Hz}$  时斜率为  $+40\text{dB}/十倍频$ ，频率大于  $10^5\text{Hz}$  时斜率为  $-40\text{dB}/十倍频$ 。在折线化相频特性中， $f = 10\text{Hz}$  时相移为  $+90^\circ$ ， $f = 10^5\text{Hz}$  时相移为  $-90^\circ$ 。波特图如解图 P5.18 所示。



解图 P5.18