

第5章

多级放大电路与集成运算放大器

多级放大电路是把多个基本放大电路连接起来组成的电路。第一级放大电路一般要求有较高的输入电阻,以减小信号源电流,而末级放大电路通常要求较低的输出电阻,因此多级放大电路中通常在第一级采用场效应管放大电路或者射极跟随器得到高输入电阻,在最后一级采用射极跟随器得到低输出电阻,与低阻的负载相匹配。各级放大电路之间的连接方式则称为耦合,常见的耦合方式有直接耦合、阻容耦合、变压器耦合和光电耦合。

5.1 多级放大电路的耦合方式

5.1.1 直接耦合

直接耦合是将后级电路直接通过导线与前级相连,如图 5.1.1 所示。

图 5.1.1 中电阻 R_{c1} 既是第一级的集电极电阻,又是第二级的基极电阻。

上述电路存在以下两个问题:

(1) 严重的零点漂移现象。当输入信号为零时,前级温度变化所引起的电流、电位变化会被逐级放大。

(2) 前后级的直流电平需要匹配。求解 Q 点应按照各回路列多元一次方程,然后解方程组。

改进方法是设置合适的 Q 点以提高 T_2 管的基极电位,具体方法如下:

(1) 在 T_2 管的发射极加电阻 R_e ,如图 5.1.2 所示。加电阻 R_e 后,第二级的 A_{u2} 下降, A_{u2} 为

$$A_{u2} = -\frac{\beta_2 R'_L}{r_{be2} + (1 + \beta_2) R_e}$$

(2) 在 T_2 管的发射极加二极管或者稳压管。

(3) NPN 管和 PNP 管混合使用。

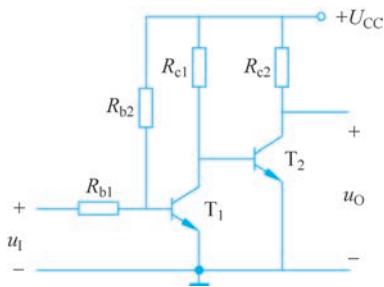


图 5.1.1 直接耦合

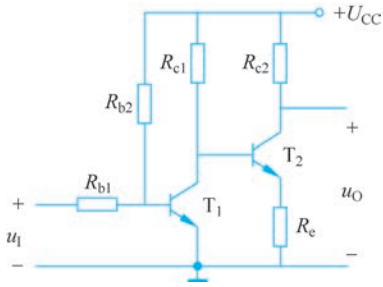


图 5.1.2 带发射极电阻 R_e 直接耦合

若只用 NPN 管,有 $U_{CQ1} = U_{BQ2} > U_{BQ1}$, $U_{CQ2} > U_{BQ2} = U_{CQ1}$ 。若 N 级共射放大电路全部用 NPN 管,因 $U_{CQi} > U_{BQi}$,所以 $U_{CQi} > U_{CQ(i-1)}$ ($i = 1 \sim N$),以至于后级集电极电位接近电源电压, Q 点不合适。

如图 5.1.3 所示,NPN 管和 PNP 管混合使用,可得

$$U_{CQ1} = U_{BQ2} > U_{BQ1}$$

$$U_{CQ2} < U_{BQ2} = U_{CQ1}$$

直接耦合具有以下优点：

- (1) 电路中没有电容和变压器，易于集成；
- (2) 能放大交流信号，同时也能放大缓变信号甚至直流信号。

直接耦合具有以下缺点：

- (1) 各级静态工作点 Q 相互影响，分析、设计和调试困难；
- (2) 前后级的直流电平需匹配；
- (3) 存在着严重的零点漂移现象。

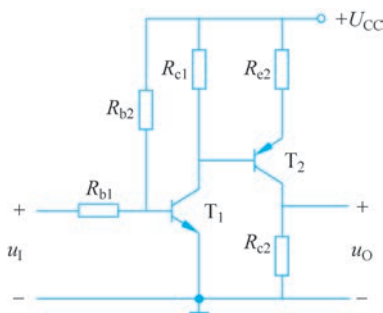


图 5.1.3 NPN 管和 PNP 管混合使用

5.1.2 阻容耦合

阻容耦合是将后级电路通过电容器与前级相连。图 5.1.4 为阻容耦合多级放大电路。

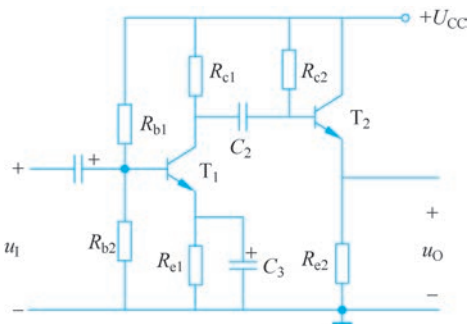


图 5.1.4 阻容耦合

利用电容连接信号源与放大电路、放大电路的前后级、放大电路与负载，为阻容耦合。

阻容耦合具有以下优点：

- (1) 各级之间直流通路不相通， Q 点相互独立；

- (2) 设计、应用便于高频交流信号的放大。

阻容耦合具有以下缺点：

- (1) 耦合电容隔断直流，不能放大直流信号，且当信号频率较低时，放大倍数下降。

- (2) 耦合电容容量大，不利于电路的集成。

5.1.3 变压器耦合

变压器耦合是将放大电路前级的输出端通过变压器接到后级的输入端或负载电阻上的连接方式。

变压器耦合具有以下优点：

- (1) 变压器不能传输直流信号，具有隔直流作用，因此各级静态工作点相互独立，互不影响；

- (2) 在传输信号的同时，可以进行阻抗、电压、电流的变换，因此在分立元件功率放大电路中得到广泛应用设计。

变压器耦合具有以下缺点：

- (1) 变压器耦合低频特性较差；
- (2) 体积较大、较为笨重，不利于电路集成化。

5.1.4 光电耦合

光电耦合是以光信号为媒介来实现电信号的耦合和传递。图 5.1.5 为光电耦合多级放大电路。

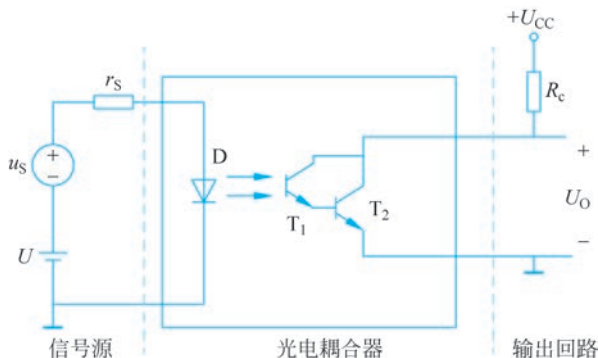


图 5.1.5 光电耦合

光电耦合器是将发光元件(发光二极管)与光敏元件(光电三极管)相互绝缘地组合在一起:发光元件为输入回路,将电能转化成光能,光敏元件为输出回路,将光能再转换成电能,实现输入与输出电路的电气隔离,从而可有效地抑制电干扰。

5.2 阻容耦合多级放大电路

对于单级放大电路而言,在实际应用中常常会受到对电路多种要求的限制而无法进行选用,比如,实际所需的输出电压值可能超过一个单级放大电路所能达到的最大值,而此时可以对多个单级放大电路进行不同的组合,构成多级放大电路。通过对多级放大电路的设计,可以产生更高的增益和指定输入和输出电阻特性。常见的二级放大电路如图 5.2.1 所示。

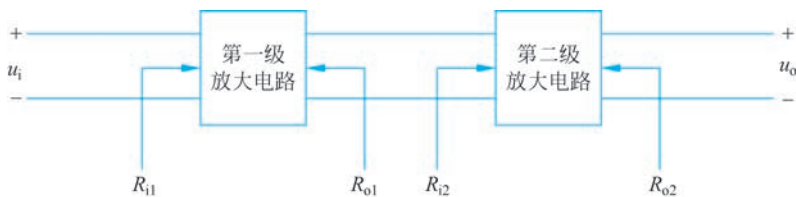


图 5.2.1 常见的二级放大电路

多级放大电路也有着多种不同的耦合方式,常见的有阻容耦合、直接耦合、光电耦合和变压器耦合。

直接耦合是指将前一级的输出端直接连接到后一级的输入端。直接耦合方式通常具有良好的低频特性,可以放大变化缓慢的信号,并且易于构成集成电路;但是采用直接耦合方式时,各级之间的直流通路相连,因而静态工作点相互影响,存在零点漂移现象。阻容耦合方式是指将放大电路的前一级的输出端通过电容接到后一级的输入端。由于耦合电容的隔直流通交流作用,使得阻容耦合放大电路各级之间的直流通路不相通,各

级的静态工作点相互独立,可以单独考虑各级放大器的静态工作点。对于交流输入信号,如果信号频率较高,耦合电容容量较大,前级的输出信号可以几乎没有衰减地传递到后级的输入端,但是阻容耦合放大电路不能对直流信号和超低频交流信号进行放大。变压器耦合方式是指将放大电路前级的输出端通过变压器接到后级的输入端或负载电阻上。变压器耦合方式如今已经基本上被集成功率放大电路取代。

本节主要探究阻容耦合方式连接的多级放大电路。图 5.2.2 为典型的两个 N 沟道增强型场效应管阻容耦合放大电路。

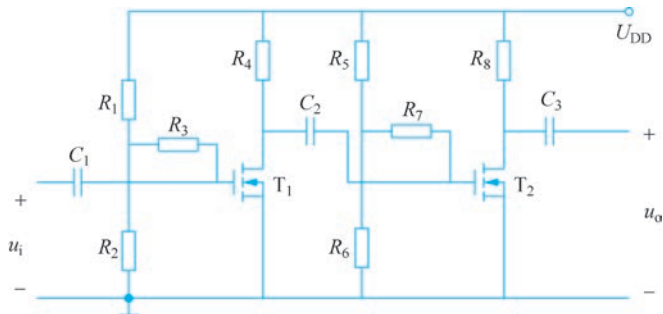


图 5.2.2 两个 N 沟道增强型场效应管阻容耦合放大电路

对多级放大电路进行分析时,通常将对多级电路的分析简化成对多个单级电路的分析,将前一级放大电路的输出电阻作为后一级放大电路的输入信号源内阻,或者将后一级放大电路的输入电阻作为前一级放大电路的负载电阻。由于多级放大电路中前一级放大电路的输出即为后一级电路的输入,因此多级放大电路的总放大倍数为各级电路放大倍数的乘积。

5.2.1 静态工作点

阻容耦合电路中,前一级放大电路的输出端通过电容连接到后一级放大电路的输入端,适用于输入信号频率较高以及输出功率较大的情况。而由于耦合电容对直流电流的阻隔作用,使得阻容耦合电路的前一级放大电路与后一级放大电路之间的直流通路无法互通,各级放大电路的静态工作点可以当作相互独立,因此对各级放大电路的静态工作点的分析较为简单,只需对每一级电路进行单独分析。

当输入信号为零,直流电源单独作用时,放大电路的工作状态称为静态,而此时场效应管的栅极-源极间电压 U_{GSQ} 、漏极-源极间电压 U_{DSQ} 、漏极电流 I_{DQ} 称为放大电路的静态工作点。静态工作点由直流通路所决定,通过设置合适的静态工作点,可以确保放大电路在不失真的前提下对信号进行放大。

对图 5.2.3 所示的 N 沟道增强型场效应管与晶体管阻容耦合放大电路进行分析。

首先进行静态工作点的估算。只考虑直流分量的影响,将输入信号置为 0,将电容视为开路。将电容视为开路后的等效电路如图 5.2.4 所示。

阻容耦合的连接方式下,由于电容的隔直流作用,各级放大电路的静态工作点相互独立,画出第一级放大电路的等效电路如图 5.2.5 所示。

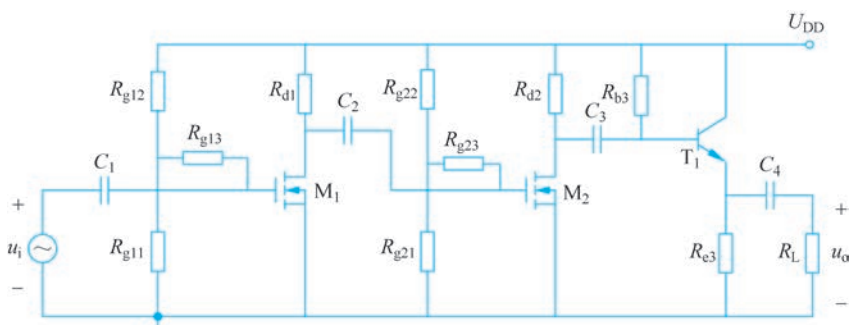


图 5.2.3 N 沟道增强型场效应管与晶体管阻容耦合放大电路

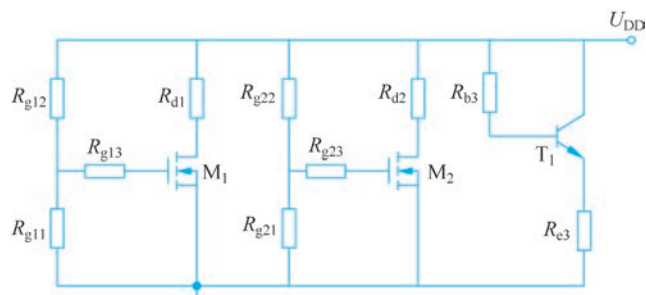


图 5.2.4 将电容视为开路后的等效电路

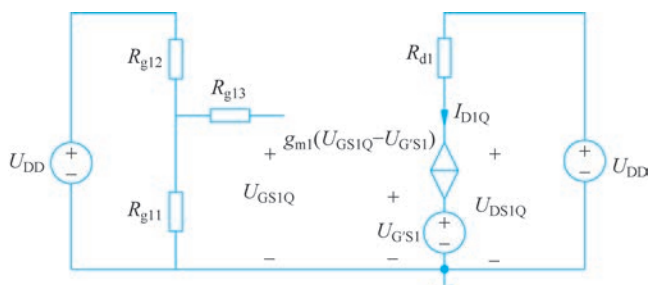


图 5.2.5 第一级放大电路

$$U_{GS1Q} = U_{G1} = \frac{R_{g11}}{R_{g11} + R_{g12}} U_{DD} \quad (5.2.1)$$

$$I_{D1Q} = g_{m1} (U_{GS1Q} - U_{G'S1}) \quad (5.2.2)$$

$$U_{DS1Q} = U_{DD} - R_{d1} I_{D1Q} \quad (5.2.3)$$

式中

$$g_{m1} = \left. \frac{di_{D1}}{du_{GS1}} \right|_Q = \frac{2I_{D1Q}}{U_{TN1}} \left(\frac{U_{GS1Q}}{U_{TN1}} - 1 \right)$$

$$U_{G'S1} = \frac{U_{GS1Q} + U_{TN1}}{2}$$

第二级放大电路等效电路如图 5.2.6 所示。

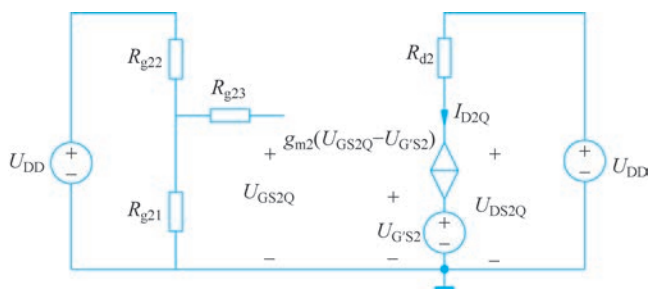


图 5.2.6 第二级放大电路

$$U_{GS2Q} = U_{G2} = \frac{R_{g21}}{R_{g21} + R_{g22}} U_{DD} \quad (5.2.4)$$

$$I_{D2Q} = g_{m2} (U_{GS2Q} - U_{G'S2}) \quad (5.2.5)$$

$$U_{DS2Q} = U_{DD} - R_{d2} I_{D2Q} \quad (5.2.6)$$

式中

$$g_{m2} = \left. \frac{di_{D2}}{du_{GS2}} \right|_Q = \frac{2I_{D02}}{U_{TN2}} \left(\frac{U_{GS2Q}}{U_{TN2}} - 1 \right)$$

$$U_{G'S2} = \frac{U_{GS2Q} + U_{TN2}}{2}$$

第三级放大电路等效电路如图 5.2.7 所示。

$$I_{B3Q} = \frac{U_{DD} - U_{on} - U_T}{R_{b3} + r_{be3} + (1 + \beta_3) R_{e3}} \quad (5.2.7)$$

$$r_{be3} = r_{bb'3} + \frac{U_T}{I_{B3Q}} \quad (5.2.8)$$

$$I_{C3Q} = \beta_3 I_{B3Q} \quad (5.2.9)$$

$$U_{CE3Q} = U_{DD} - R_{e3} (I_{B3Q} + I_{C3Q}) \approx U_{DD} - R_{e3} I_{C3Q} \quad (5.2.10)$$

式中： $r_{bb'3}$ 为基极电阻。在常温下， $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

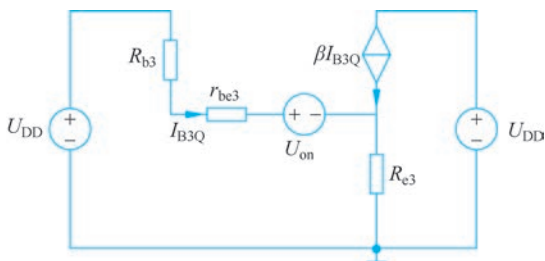


图 5.2.7 第三级放大电路

通过以上步骤对各级放大电路分别进行分析，即可求得静态工作点。

分析了增强型场效应管与晶体管阻容耦合放大电路之后，接下来进行对共源-共源-共漏放大电路的分析，如图 5.2.8 所示，对其静态工作点进行估算。

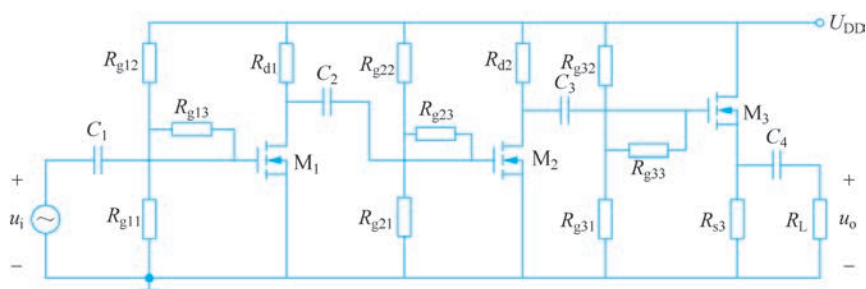


图 5.2.8 共源-共源-共漏放大电路

考虑直流通路,如图 5.2.9 所示,该电路由三级放大电路组成。

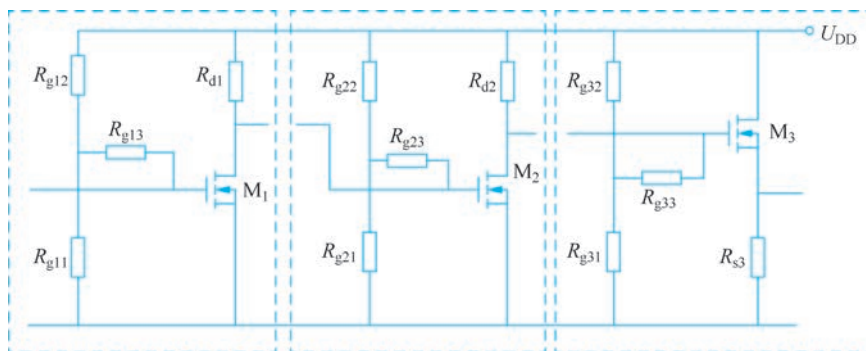


图 5.2.9 共源-共源-共漏放大电路的直流通路

共源-共源-共漏放大电路的第一级电路的小信号等效电路如图 5.2.10 所示。

$$U_{GS1Q} = \frac{R_{g11}}{R_{g11} + R_{g12}} U_{DD} \quad (5.2.11)$$

$$I_{D1Q} = g_{m1} (U_{GS1Q} - U_{G'S1}) \quad (5.2.12)$$

$$U_{DS1Q} = U_{DD} - R_{d1} I_{D1Q} \quad (5.2.13)$$

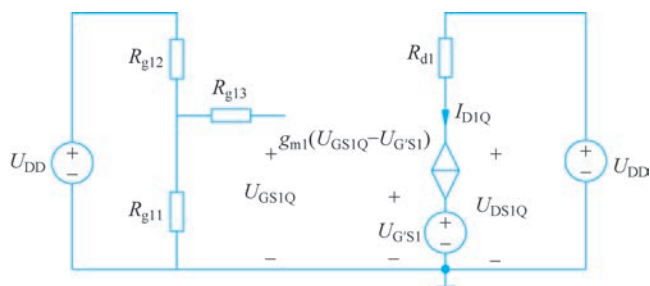


图 5.2.10 共源-共源-共漏放大电路的第一级小信号等效电路

式中

$$g_{m1} = \left. \frac{di_{D1}}{du_{GS1}} \right|_Q = \frac{2I_{D01}}{U_{TN1}} \left(\frac{U_{GS1Q}}{U_{TN1}} - 1 \right)$$

$$U_{G'S1} = \frac{U_{GS1Q} + U_{TN1}}{2}$$

共源-共源-共漏放大电路的第二级电路的小信号等效电路如图 5.2.11 所示。

$$U_{GS2Q} = \frac{R_{g21}}{R_{g21} + R_{g22}} U_{DD} \quad (5.2.14)$$

$$I_{D2Q} = g_{m2} (U_{GS2Q} - U_{G'S2}) \quad (5.2.15)$$

$$U_{DS2Q} = U_{DD} - R_{d2} I_{D2Q} \quad (5.2.16)$$

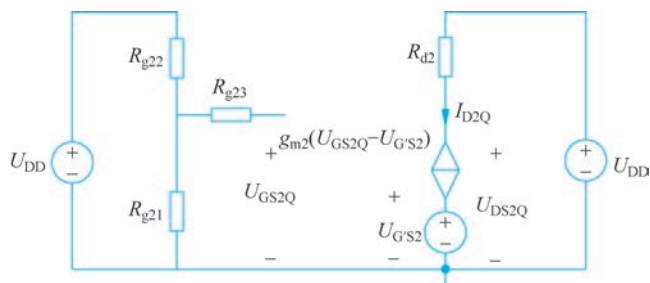


图 5.2.11 共源-共源-共漏放大电路的第二级小信号等效电路

式中

$$g_{m2} = \left. \frac{di_{D2}}{du_{GS2}} \right|_Q = \frac{2I_{D02}}{U_{TN2}} \left(\frac{U_{GS2Q}}{U_{TN2}} - 1 \right)$$

$$U_{G'S2} = \frac{U_{GS2Q} + U_{TN2}}{2}$$

共源-共源-共漏放大电路的第三级电路的小信号等效电路如图 5.2.12 所示。

$$U_{GS3Q} = \frac{R_{g31}}{R_{g31} + R_{g32}} U_{DD} - R_{s3} I_{D3Q} \quad (5.2.17)$$

$$I_{D3Q} = g_{m3} (U_{GS3Q} - U_{G'S3}) = I_{D03} \left(\frac{U_{GS3Q}}{U_{TN3}} - 1 \right)^2 \quad (5.2.18)$$

$$g_{m3} = \left. \frac{di_{D3}}{du_{GS3}} \right|_Q = \frac{2I_{D03}}{U_{TN3}} \left(\frac{U_{GS3Q}}{U_{TN3}} - 1 \right) \quad (5.2.19)$$

$$U_{G'S3} = \frac{U_{GS3Q} + U_{TN3}}{2} \quad (5.2.20)$$

$$U_{DS3Q} = U_{DD} - R_{s3} I_{D3Q} \quad (5.2.21)$$

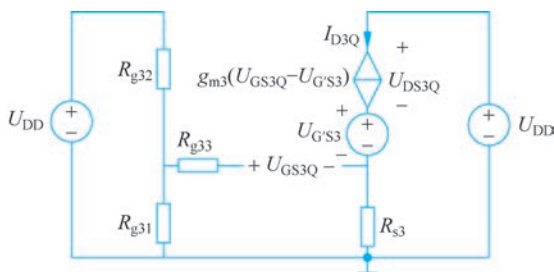


图 5.2.12 共源-共源-共漏放大电路的第三级小信号等效电路

5.2.2 基本性能

在多级放大电路中,输入电阻基本上等于第一级放大电路的输入电阻,而输出电阻约等于末级放大电路的输出电阻。通常情况下,多级放大电路与单级放大电路相比,电压增益会变大,而通频带会变窄。

图 5.2.13 为三级放大电路的小信号等效模型。

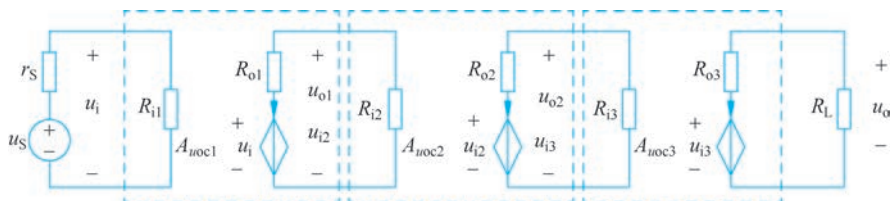


图 5.2.13 三级放大电路的小信号等效模型

对于输入电阻 R_i ,如图 5.2.14 所示,有

$$u_i = R_{i1} i_i$$

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} = \frac{R_{i1} i_i}{i_i} = R_{i1} \quad (5.2.22)$$

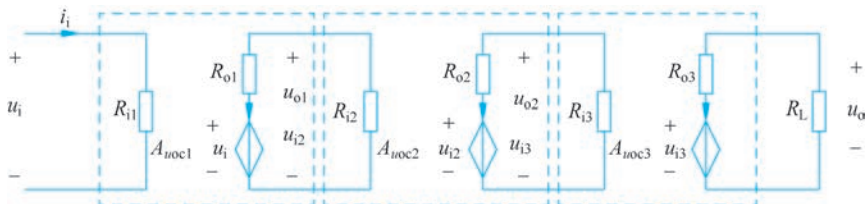


图 5.2.14 三级放大电路的小信号等效模型(1)

对于空载电压放大倍数 A_{uoc} ,如图 5.1.15 所示,有

$$u_{oc} = A_{uoc3} u_{i3} = A_{uoc3} u_{o2}$$

$$= A_{uoc3} \frac{R_{i3}}{R_{o2} + R_{i3}} A_{uoc2} u_{i2}$$

$$= A_{uoc3} \frac{R_{i3}}{R_{o2} + R_{i3}} A_{uoc2} u_{o1} \quad (5.2.23)$$

$$= A_{uoc3} \frac{R_{i3}}{R_{o2} + R_{i3}} A_{uoc2} \frac{R_{i2}}{R_{o1} + R_{i2}} A_{uoc1} u_i$$

$$= A_{uoc3} A_{u2} A_{u1} u_i$$

$$A_{uoc} = \frac{u_{oc}}{u_i} = A_{uoc3} \frac{R_{i3}}{R_{o2} + R_{i3}} A_{uoc2} \frac{R_{i2}}{R_{o1} + R_{i2}} A_{uoc1} = A_{uoc3} A_{u2} A_{u1} \quad (5.2.24)$$

对于输出电阻 R_o ,如图 5.2.16 所示。

当 $u_S = 0$ 时, $u_i = 0$, 则有

$$A_{uoc1} u_i = 0 \rightarrow u_{i2} = 0 \rightarrow A_{uoc2} u_{i2} = 0 \rightarrow u_{i3} = 0 \rightarrow A_{uoc3} u_{i3} = 0$$

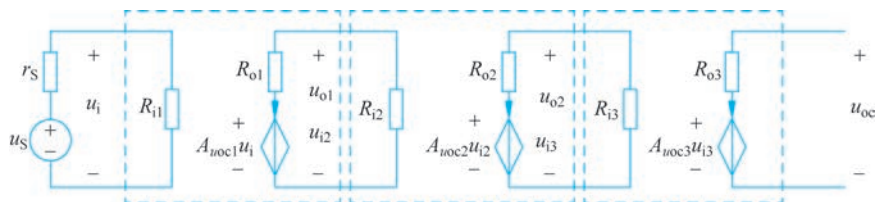


图 5.2.15 三级放大电路的小信号等效模型(2)

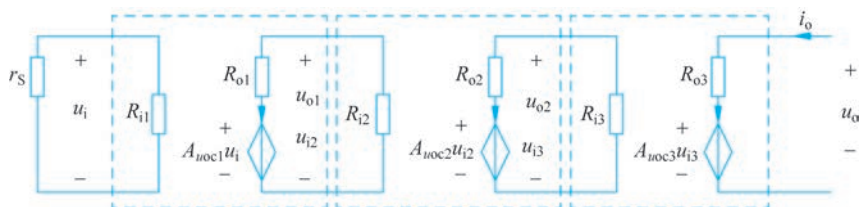


图 5.2.16 三级放大电路的小信号等效模型(3)

所以根据 $u_o = R_{o3} i_o$, 若在输出端加入测试信号, 必然会产生相应的动态电流, 则有

$$R_o = \left. \frac{u_o}{i_o} \right|_{u_s=0} = R_{o3} \quad (5.2.25)$$

源电压倍数为

$$\begin{aligned} A_{us} &= \frac{R_L}{R_o + R_L} \frac{R_i}{r_s + R_i} \\ &= \frac{R_L}{R_o + R_L} A_{uoc3} \frac{R_{i3}}{R_{o2} + R_{i3}} A_{uoc2} \frac{R_{i2}}{R_{o1} + R_{i2}} A_{uoc1} \frac{R_i}{r_s + R_i} \\ &= A_{u3} A_{u2} A_{u1} \frac{R_i}{r_s + R_i} \\ &= A_{u3} A_{u2} A_{us1} \end{aligned} \quad (5.2.26)$$

关于多级放大电路的一些基本性能指标, 通过图 5.2.8 所示共源-共源-共漏放大电路来进一步分析。将原电路转化为图 5.2.17 所示等效电路。

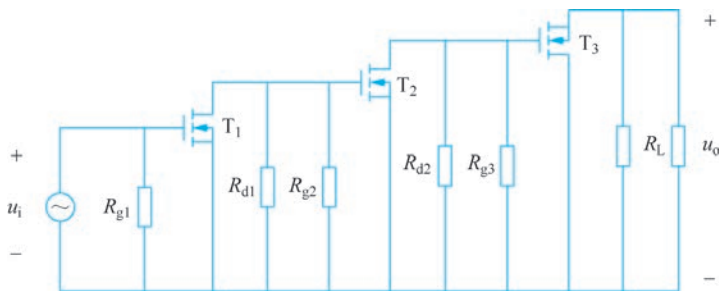


图 5.2.17 多级放大电路的等效电路

图中:

$$R_{g1} = (R_{g11} // R_{g12}) + R_{g13} \quad (5.2.27)$$

$$R_{g2} = (R_{g21} // R_{g22}) + R_{g23} \quad (5.2.28)$$

$$R_{g3} = (R_{g31} // R_{g32}) + R_{g33} \quad (5.2.29)$$

共源-共源-共漏放大电路的小信号等效电路如图 5.2.18 所示。

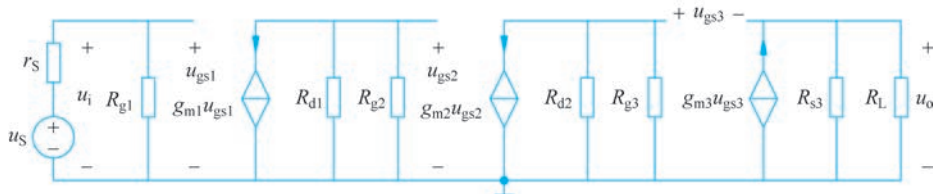


图 5.2.18 共源-共源-共漏放大电路的小信号等效电路

源漏电阻

$$r_{ds1} = \frac{U_{A1}}{I_{D1Q}} \rightarrow \infty \quad (5.2.30)$$

$$r_{ds2} = \frac{U_{A2}}{I_{D2Q}} \rightarrow \infty \quad (5.2.31)$$

$$r_{ds3} = \frac{U_{A3}}{I_{D3Q}} \rightarrow \infty \quad (5.2.32)$$

因此 r_{ds1} 、 r_{ds2} 、 r_{ds3} 可视为断路。

第一级小信号等效电路如图 5.2.19 所示。

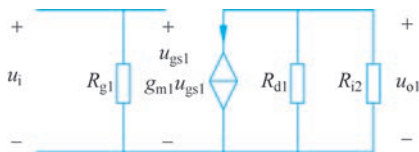


图 5.2.19 第一级小信号等效电路

$$R_i = R_{i1} = R_{g1} \quad (5.2.33)$$

$$A_{uoc1} = -g_{m1} R_{d1} \quad (5.2.34)$$

令 $u_s = 0$, 所以 $u_{gs1} = 0$, $g_{m1} u_{gs1} = 0$, $u_{o1} = R_{d1} i_{o1}$, 可得

$$R_{o1} = \left. \frac{u_{o1}}{i_{o1}} \right|_{u_s=0} = R_{d1} \quad (5.2.35)$$

第二级小信号等效电路如图 5.2.20 所示。

$$R_{i2} = R_{g2} \quad (5.2.36)$$

$$A_{uoc2} = -g_{m2} R_{d2} \quad (5.2.37)$$

令 $u_s = 0$, 所以 $u_{gs1} = 0$, $g_{m1} u_{gs1} = 0$, 则 $u_{gs2} = 0$, $g_{m2} u_{gs2} = 0$, $u_{o2} = R_{d2} i_{o2}$, 可得

$$R_{o2} = \left. \frac{u_{o2}}{i_{o2}} \right|_{u_s=0} = R_{d2} \quad (5.2.38)$$

第三级小信号等效电路如图 5.2.21 所示。

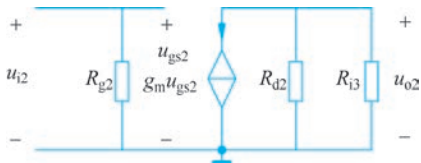


图 5.2.20 第二级小信号等效电路

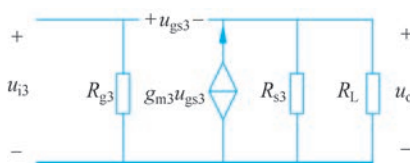


图 5.2.21 第三级小信号等效电路

$$R_{i3} = R_{g3} \quad (5.2.39)$$

$$A_{uoc3} = \frac{g_{m3} R_{s3}}{1 + g_{m3} R_{s3}} \quad (5.2.40)$$

令 $u_s = 0$, 得到 $u_{gs1} = 0 \rightarrow g_{m1} u_{gs1} = 0 \rightarrow u_{gs2} = 0 \rightarrow g_{m2} u_{gs2} = 0$ 。

从图 5.1.21 中可以看出, $u_{gs3} = -u_o$, 所以 $g_{m3} u_{gs3} = -g_{m3} u_o$, 则有

$$i_o = g_{m3} u_o + \frac{u_o}{R_{s3}} \quad (5.2.41)$$

$$R_o = R_{o3} = \frac{u_o}{i_o} \bigg|_{u_s=0} = \frac{1}{g_{m3}} // R_{s3} \approx \frac{1}{g_{m3}} \quad (5.2.42)$$

空载电压放大倍数为

$$\begin{aligned} A_{uoc} &= A_{uoc3} \frac{R_{i3}}{R_{o2} + R_{i3}} A_{uoc2} \frac{R_{i2}}{R_{o1} + R_{i2}} A_{uoc1} \\ &= \frac{R_{g3}}{R_{d2} + R_{g3}} \frac{R_{g2}}{R_{d1} + R_{g2}} \frac{g_{m3} g_{m2} g_{m1} R_{s3} R_{d2} R_{d1}}{1 + g_{m3} R_{s3}} \end{aligned} \quad (5.2.43)$$

源电压放大倍数为

$$\begin{aligned} A_{us} &= \frac{R_L}{R_o + R_L} \frac{R_i}{R_s + R_i} A_{uoc} \\ &= \frac{R_L}{\frac{1}{g_{m3}} + R_L} \frac{R_{g3}}{R_{d2} + R_{g3}} \frac{R_{g2}}{R_{d1} + R_{g2}} \frac{R_{g1}}{R_s + R_{g1}} \frac{g_{m3} g_{m2} g_{m1} R_{s3} R_{d2} R_{d1}}{1 + g_{m3} R_{s3}} \end{aligned} \quad (5.2.44)$$

例 5.1 在图 5.2.22 所示共源-共源-共漏放大电路中, $U_{TN1} = U_{TN2} = U_{TN3} = 1V$, $I_{DO1} = I_{DO2} = I_{DO3} = 2mA$, $U_{A1} = U_{A2} = U_{A3} \rightarrow \infty$, $R_s = 0.2k\Omega$ 。试求:

- (1) 静态工作点 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 ;
- (2) 输入电阻 R_i 、空载电压放大倍数 A_{uoc} 、输出电阻 R_o 和源电压放大倍数 A_{us} 。

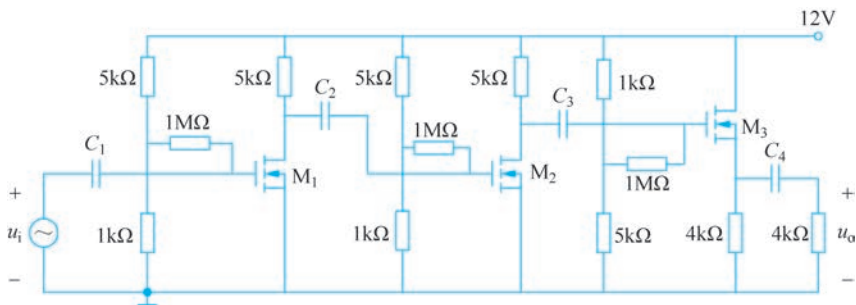


图 5.2.22 共源-共源-共漏放大电路举例

解: 画出等效电路图, 首先进行静态工作点的分析, 对多级放大电路进行逐级单独分析。第一级放大电路等效电路如图 5.2.23 所示。

$$U_{GS1Q} = \frac{R_{g11}}{R_{g11} + R_{g12}} U_{DD} = \frac{1}{1+5} \times 12 = 2(\text{V})$$

$$g_{m1} = \frac{2I_{D01}}{U_{TN1}} \left(\frac{U_{GS1Q}}{U_{TN1}} - 1 \right) = \frac{2 \times 2}{1} \left(\frac{2}{1} - 1 \right) = 4(\text{mS})$$

$$U_{G'S1} = \frac{U_{GS1Q} + U_{TN1}}{2} = \frac{2+1}{2} = 1.5(\text{V})$$

$$I_{D1Q} = g_{m1} (U_{GS1Q} - U_{G'S1}) = 4 \times (2 - 1.5) = 2(\text{mA})$$

$$U_{DS1Q} = U_{DD} - R_{d1} I_{D1Q} = 12 - 5 \times 2 = 2(\text{V})$$

$$r_{ds1} = \frac{U_{A1}}{I_{D1Q}} = \frac{U_{A1}}{2} \rightarrow \infty$$

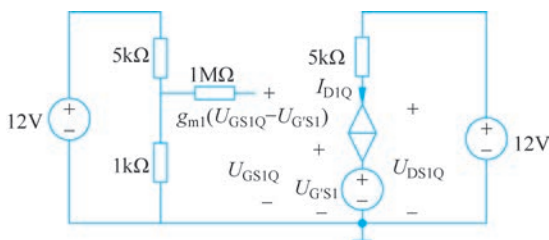


图 5.2.23 第一级放大电路等效电路

第二级放大电路等效电路如图 5.2.24 所示。

$$U_{GS2Q} = \frac{R_{g21}}{R_{g21} + R_{g22}} U_{DD} = \frac{1}{1+5} \times 12 = 2(\text{V})$$

$$g_{m2} = \frac{2I_{D02}}{U_{TN2}} \left(\frac{U_{GS2Q}}{U_{TN2}} - 1 \right) = \frac{2 \times 2}{1} \left(\frac{2}{1} - 1 \right) = 4(\text{mS})$$

$$U_{G'S2} = \frac{U_{GS2Q} + U_{TN2}}{2} = \frac{2+1}{2} = 1.5(\text{V})$$

$$I_{D2Q} = g_{m2} (U_{GS2Q} - U_{G'S2}) = 4 \times (2 - 1.5) = 2(\text{mA})$$

$$U_{DS2Q} = U_{DD} - R_{d2} I_{D2Q} = 12 - 5 \times 2 = 2(\text{V})$$

$$r_{ds2} = \frac{U_{A2}}{I_{D2Q}} = \frac{U_{A2}}{2} \rightarrow \infty$$

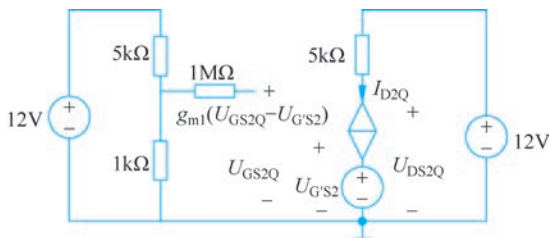


图 5.2.24 第二级放大电路等效电路

第三级放大电路等效电路如图 5.2.25 所示。

$$U_{GS3Q} = \frac{R_{g31}}{R_{g31} + R_{g32}} U_{DD} - R_{S3} I_{D3Q} = \frac{5}{5+1} \times 12 - 4 I_{D3Q} = 10 - 4 I_{D3Q}$$

$$I_{D3Q} = I_{DO3} \left(\frac{U_{GS3Q}}{U_{TN3}} - 1 \right)^2 = 2 \left(\frac{U_{GS3Q}}{1} - 1 \right)^2 = 2 U_{GS3Q}^2 - 4 U_{GS3Q} + 2$$

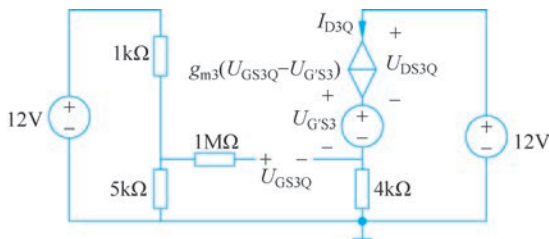


图 5.2.25 第三级放大电路等效电路

则有

$$8 U_{GS3Q}^2 - 15 U_{GS3Q} - 2 = (U_{GS3Q} - 2)(8 U_{GS3Q} + 1) = 0$$

$$U_{GS3Q} = 2V$$

$$g_{m3} = \frac{2 I_{DO3}}{U_{TN3}} \left(\frac{U_{GS3Q}}{U_{TN3}} - 1 \right) = \frac{2 \times 2}{1} \left(\frac{2}{1} - 1 \right) = 4(\text{mS})$$

$$U_{G'S3} = \frac{U_{GS3Q} + U_{TN3}}{2} = \frac{2+1}{2} = 1.5(\text{V})$$

$$I_{D3Q} = g_{m3} (U_{GS3Q} - U_{G'S3}) = 4 \times (2 - 1.5) = 2(\text{mA})$$

$$U_{DS3Q} = U_{DD} - R_{S3} I_{D3Q} = 12 - 4 \times 2 = 4(\text{V})$$

$$r_{ds3} = \frac{U_{A3}}{I_{DO3}} = \frac{U_{A3}}{2} \rightarrow \infty$$

图 5.2.26 为该共源-共源-共漏放大电路的小信号等效电路。

$$R_{g1} = (g_{g11} // R_{g22}) + R_{g13} = \frac{1000 \times 5}{1000 + 5} + 1000 \approx 1000\text{k}\Omega = 1\text{M}\Omega$$

$$R_{g2} = (g_{g21} // R_{g22}) + R_{g23} = \frac{1000 \times 5}{1000 + 5} + 1000 \approx 1000\text{k}\Omega = 1\text{M}\Omega$$

$$R_{g3} = (g_{g31} // R_{g32}) + R_{g33} = \frac{1000 \times 5}{1000 + 5} + 1000 \approx 1000\text{k}\Omega = 1\text{M}\Omega$$

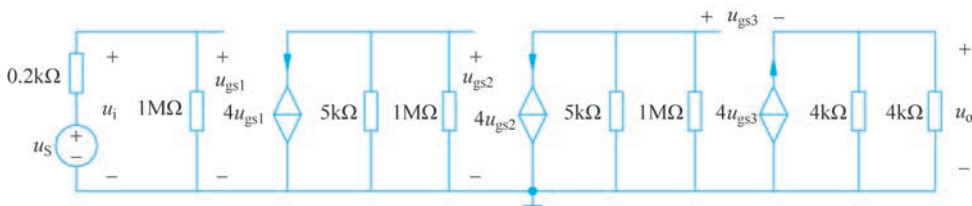


图 5.2.26 共源-共源-共漏放大电路的小信号等效电路

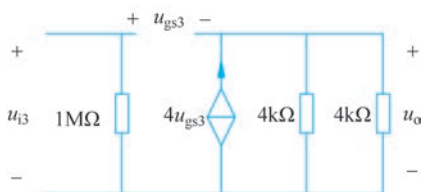


图 5.2.27 第三级放大电路的小信号等效电路

第三级放大电路的小信号等效电路如图 5.2.27 所示。

$$R_{i3} = R_{g3} = 1000\text{k}\Omega$$

$$A_{uoc3} = \frac{g_{m3}R_{s3}}{1 + g_{m3}R_{s3}} = \frac{4 \times 4}{1 + 4 \times 4} \approx 0.94$$

$$R_o = R_{o3} \approx \frac{1}{g_{m3}} = \frac{1}{4} = 0.25(\text{k}\Omega)$$

第二级放大电路的小信号等效电路如图 5.2.28 所示。

$$R_{i2} = R_{g2} = 1000\text{k}\Omega$$

$$A_{uo2} = -g_{m2}R_{d2} = -4 \times 5 = -20$$

$$R_{o2} = R_{d2} = 5\text{k}\Omega$$

第一级放大电路的小信号等效电路如图 5.2.29 所示。

$$R_i = R_{i1} = R_{g1} = 1000\text{k}\Omega$$

$$A_{uoc1} = -g_{m1}R_{d1} = -4 \times 5 = -20$$

$$R_{o1} = R_{d1} = 5\text{k}\Omega$$

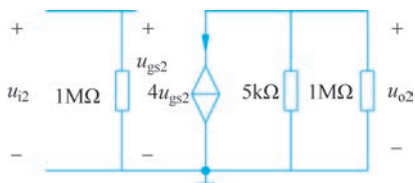


图 5.2.28 第二级放大电路的小信号等效电路

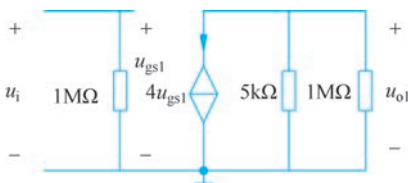


图 5.2.29 第一级放大电路的小信号等效电路

所以该共源-共源-共漏放大电路的空载电压放大倍数为

$$\begin{aligned} A_{uoc} &= A_{uoc3} \frac{R_{g3}}{R_{d2} + R_{g3}} A_{uoc2} \frac{R_{g2}}{R_{o1} + R_{i1}} A_{uoc1} \\ &= 0.94 \times \frac{1000}{5 + 1000} \times (-20) \times \frac{1000}{5 + 1000} \times (-20) \\ &\approx 372.3 \end{aligned}$$

源电压放大倍数为

$$A_{us} = \frac{R_L}{R_o + R_L} \frac{R_i}{R_s + R_i} A_{uoc} = \frac{4}{0.25 + 4} \times \frac{1000}{0.2 + 1000} \times 372.3 \approx 350.3$$

对多级放大电路进行分析时,应先进行直流分析以求出静态工作点,再对电路进行交流分析以求出电路动态参数。只有各级电路都工作在合适的静态工作点时,才能对信号进行有效放大,并可求出相应的电路动态参数。

5.2.3 频率特性

在实际应用中,多级放大电路所需要放大的信号往往不同于之前章节中所假定的输入信号 U_i 为单一频率的正弦波,由于电路中电抗元件的存在,放大电路对不同频率的输

入信号也有着不同的放大能力,同时不同频率分量的信号通过放大电路的放大作用后还会产生不同程度的相移,因此还需要对放大电路的频率特性进行分析和讨论。

电路的频率特性包括幅频特性和相频特性两个部分:幅频特性反映出信号放大倍数与频率之间的关系,通常用 A_u 表示;相频特性反映出输出信号与输入信号的相位差与频率的关系,通常用 φ 表示。

在多级阻容耦合放大电路中,多级放大电路的幅频特性等于各级放大电路幅频特性之积,即

$$A_u = A_{u1} \times A_{u2} \times \cdots \times A_{un} \quad (5.2.45)$$

相频特性等于各级放大电路相频特性之和,即

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \cdots + \varphi_n \quad (5.2.46)$$

多级阻容耦合放大电路的频率特性可综合表示为

$$20\lg A_u = 20\lg A_{u1} + 20\lg A_{u2} + \cdots + 20\lg A_{un} \quad (5.2.47)$$

$$\dot{A}_{us} = \frac{Z_i}{Z_S + Z_i} \frac{Z_L}{Z_o + Z_L} \dot{A}_{uoc} = \frac{Z_i}{Z_S + Z_i} \frac{Z_L}{Z_o + Z_L} \dot{A}_{uoc3} \dot{A}_{u2} \dot{A}_{u1} = \dot{A}_{u3} \dot{A}_{u2} \dot{A}_{us1} \quad (5.2.48)$$

$$\dot{A}_{u3} = \frac{A_{u3}}{\left(1 - j \frac{f_{L3}}{f}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H3}}\right)}, \quad f_{L3} = \sqrt{f_{031}^2 + f_{032}^2}$$

$$\dot{A}_{u2} = \frac{A_{u2}}{\left(1 - j \frac{f_{L2}}{f}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H2}}\right)}, \quad f_{L2} = \sqrt{f_{021}^2 + f_{022}^2}$$

$$\dot{A}_{u1} = \frac{A_{us1}}{\left(1 - j \frac{f_{L1}}{f}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H1}}\right)}, \quad f_{L1} = \sqrt{f_{011}^2 + f_{012}^2}$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_{us} &= \dot{A}_{u3} \dot{A}_{u2} \dot{A}_{us1} \\ &= \frac{A_{u3}}{\left(1 - j \frac{f_{L3}}{f}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H3}}\right)} \frac{A_{u2}}{\left(1 - j \frac{f_{L2}}{f}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H2}}\right)} \frac{A_{us1}}{\left(1 - j \frac{f_{L1}}{f}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H1}}\right)} \\ &= \frac{A_{us}}{\left(1 - j \frac{f_{L1}}{f}\right) \left(1 - j \frac{f_{L2}}{f}\right) \left(1 - j \frac{f_{L3}}{f}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H3}}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H2}}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H1}}\right)} \end{aligned} \quad (5.2.49)$$

在多级放大电路中,由于电路中电容的存在,而对不同频率的信号产生不同的响应,对于高频信号的通过只会产生极少损失,对于低频信号则会表现出较大的容抗从而阻碍信号的通过。

对于任意一个放大电路,都可以找到一个确定的通频带,在通频带内放大电路对于

信号的传输放大有着最好的表现。放大电路的通频带就是其上限截止频率 f_H 和下限截止频率 f_L 的差值。上限截止频率是指当频率等于 f_H 时, $|\dot{A}_{us}|$ 下降至 0.707, 并且当频率增大, 幅值会继续下降, 在上限截止频率 f_H 处放大信号相移为 -45° ; 下限截止频率是指当频率等于 f_L 时, $|\dot{A}_{us}|$ 下降至 0.707, 并且当频率降低, 幅值会继续下降, 在下限截止频率 f_L 处放大信号相移为 $+45^\circ$ 。

多级放大电路, 增益等于各级放大电路增益之和, 放大信号的相移也等于各级放大电路相移之和。

1. 高频特性

上限截止频率:

$$\dot{A}_{us} = \frac{A_{us}}{\left(1 + j \frac{f}{f_{H3}}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H2}}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H1}}\right)}$$

$$|\dot{A}_{us}| = \frac{|A_{us}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{H1}}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{H2}}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{H3}}\right)^2}} \quad (5.2.50)$$

当 $f = f_H$ 时, $|\dot{A}_{us}| = \frac{|A_{us}|}{\sqrt{2}}$, 可得

$$\sqrt{1 + \left(\frac{f_H}{f_{H1}}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_H}{f_{H2}}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_H}{f_{H3}}\right)^2} = \sqrt{2}$$

$$\left[1 + \left(\frac{f_H}{f_{H1}}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{f_H}{f_{H2}}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{f_H}{f_{H3}}\right)^2\right] = 1 + \left(\frac{f_H}{f_{H1}}\right)^2 + \left(\frac{f_H}{f_{H2}}\right)^2 + \left(\frac{f_H}{f_{H3}}\right)^2 + \dots$$

$$\approx 1 + \left(\frac{f_H}{f_{H1}}\right)^2 + \left(\frac{f_H}{f_{H2}}\right)^2 + \left(\frac{f_H}{f_{H3}}\right)^2 = 2$$

$$\left(\frac{f_H}{f_{H1}}\right)^2 + \left(\frac{f_H}{f_{H2}}\right)^2 + \left(\frac{f_H}{f_{H3}}\right)^2 = f_H^2 \left(\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2} + \frac{1}{f_{H3}^2}\right) = 1$$

则

$$f_H = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2} + \frac{1}{f_{H3}^2}}}$$

若 $f_{Hi} \ll f_{Hj}$, 则 $f_H \approx f_{Hi}$; 若 $f_{Hi} = f_{Hj}$, 则 $f_H = \frac{1}{\sqrt{3}} f_{Hi}$ 。其中: $i, j = 1, 2, 3; i \neq j$ 。

2. 低频特性

下限截止频率:

$$\dot{A}_{us} = \frac{A_{us}}{\left(1 - j \frac{f_{L1}}{f}\right) \left(1 - j \frac{f_{L2}}{f}\right) \left(1 - j \frac{f_{L3}}{f}\right)}$$

则
$$|\dot{A}_{us}| = \frac{|A_{us}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{L1}}{f}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{L2}}{f}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{L3}}{f}\right)^2}} \quad (5.2.51)$$

当 $f = f_L$ 时, $|\dot{A}_{us}| = \frac{|A_{us}|}{\sqrt{2}}$, 可得

$$\begin{aligned} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{L1}}{f_L}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{L2}}{f_L}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{L3}}{f_L}\right)^2} &= \sqrt{2} \\ \left[1 + \left(\frac{f_{L1}}{f_L}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{f_{L2}}{f_L}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{f_{L3}}{f_L}\right)^2\right] &= 1 + \left(\frac{f_{L1}}{f_L}\right)^2 + \left(\frac{f_{L2}}{f_L}\right)^2 + \left(\frac{f_{L3}}{f_L}\right)^2 + \dots \\ &\approx 1 + \left(\frac{f_{L1}}{f_L}\right)^2 + \left(\frac{f_{L2}}{f_L}\right)^2 + \left(\frac{f_{L3}}{f_L}\right)^2 = 2 \\ \left(\frac{f_{L1}}{f_L}\right)^2 + \left(\frac{f_{L2}}{f_L}\right)^2 + \left(\frac{f_{L3}}{f_L}\right)^2 &= \frac{1}{f_L^2} (f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + f_{L3}^2) = 1 \end{aligned}$$

则
$$f_L = \sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + f_{L3}^2}$$

若 $f_{Li} \gg f_{Lj}$, 则 $f_L \approx f_{Li}$; 若 $f_{Li} = f_{Lj}$, 则 $f_L = \sqrt{3} f_{Li}$ 。其中: $i, j = 1, 2, 3; i \neq j$ 。

3. 全频率段频率特性

$$\begin{aligned} \dot{A}_{us} &= \frac{A_{us}}{\left(1 - j \frac{f_{L1}}{f}\right) \left(1 - j \frac{f_{L2}}{f}\right) \left(1 - j \frac{f_{L3}}{f}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H3}}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H2}}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H1}}\right)} \\ &= \begin{cases} \frac{A_{us}}{\left(1 - j \frac{f_{L1}}{f}\right) \left(1 - j \frac{f_{L2}}{f}\right) \left(1 - j \frac{f_{L3}}{f}\right)}, & f \leq 10 \max\{f_{L1}, f_{L2}, f_{L3}\} \ll \min\{f_{H1}, f_{H2}, f_{H3}\} \\ A_{us}, & \max\{f_{L1}, f_{L2}, f_{L3}\} \ll 10 \max\{f_{L1}, f_{L2}, f_{L3}\} \leq f \\ & \leq 0.1 \min\{f_{H1}, f_{H2}, f_{H3}\} \ll \min\{f_{H1}, f_{H2}, f_{H3}\} \\ \frac{A_{us}}{\left(1 + j \frac{f}{f_{H1}}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H2}}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{H3}}\right)}, & f \geq 0.1 \min\{f_{H1}, f_{H2}, f_{H3}\} \gg \max\{f_{L1}, f_{L2}, f_{L3}\} \end{cases} \end{aligned} \quad (5.2.52)$$

上限截止频率:

$$f_H = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2} + \frac{1}{f_{H3}^2}}} \quad (5.2.53)$$

下限截止频率:

$$f_L = \sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + f_{L3}^2} \quad (5.2.54)$$

通频带:

$$f_{BW} = f_H - f_L \approx f_H \quad (5.2.55)$$

阻容耦合场效应管共源-共源-晶体管共集放大电路:

$$f_{H1} = f_{H2}, \quad f_{H3} \rightarrow \infty$$

$$f_H = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2}}} = \frac{f_{H1}}{\sqrt{2}} \quad (5.2.56)$$

$$f_{L1} = f_{L2} \approx f_{L3}$$

$$f_L = \sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + f_{L3}^2} \approx \sqrt{3} f_{L1} \quad (5.2.57)$$

$$f_{BW} = f_H - f_L \approx \frac{f_{H1}}{\sqrt{2}} - \sqrt{3} f_{L1} \approx \frac{f_{H1}}{\sqrt{2}} \quad (5.2.58)$$

对于多级放大电路,其下限截止频率比组成它的各单级放大电路都要高,上限截止频率比组成它的各单级放大电路都要低,而其通频带比组成它的各单级放大电路都要窄。

5.3 多级放大电路仿真

5.3.1 实验要求与目的

- (1) 利用波特图仪测量单级放大电路的波特图。
- (2) 利用波特图仪测量多级放大电路的波特图。
- (3) 对比它们的不同。

5.3.2 实验电路

单级放大电路和多级放大电路如图 5.3.1 和图 5.3.2 所示。

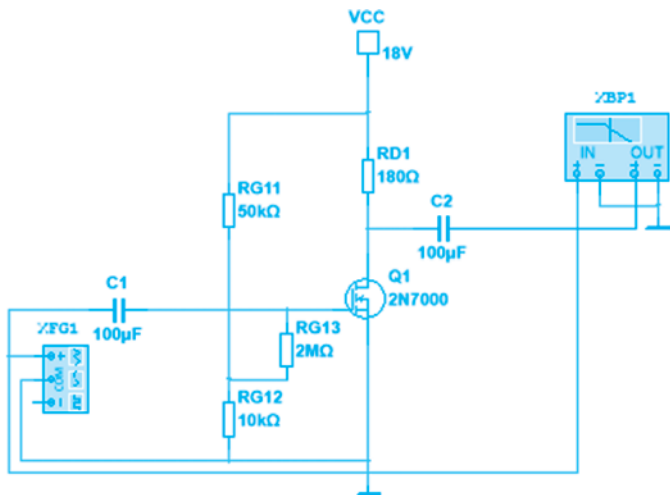


图 5.3.1 单级放大电路

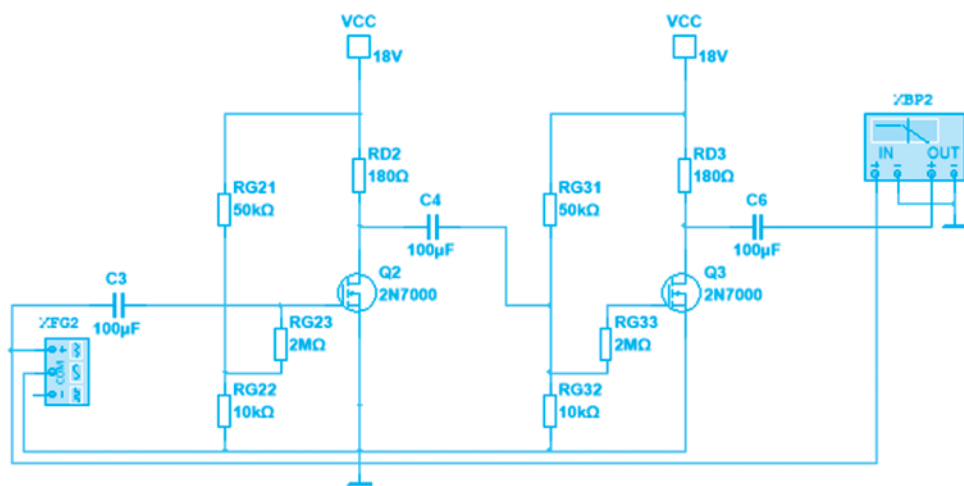


图 5.3.2 多级放大电路

5.3.3 实验步骤

(1) 测量单级放大电路。

如图 5.3.3 所示,中频放大倍数 $A_{u0}=25\text{dB}$ 。

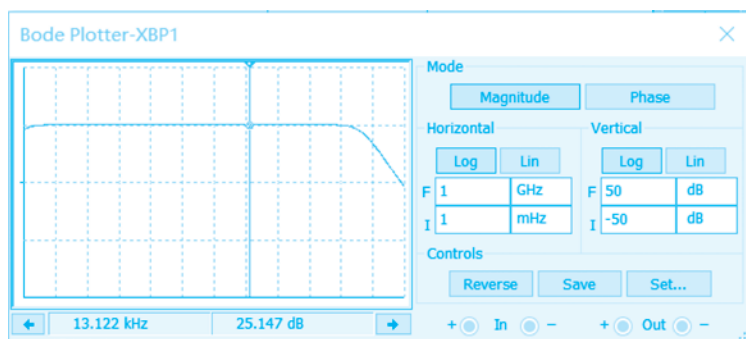


图 5.3.3 测量单级放大电路(1)

如图 5.3.4 所示,上限截止频率 $f_H=41.794\text{MHz}$ 。

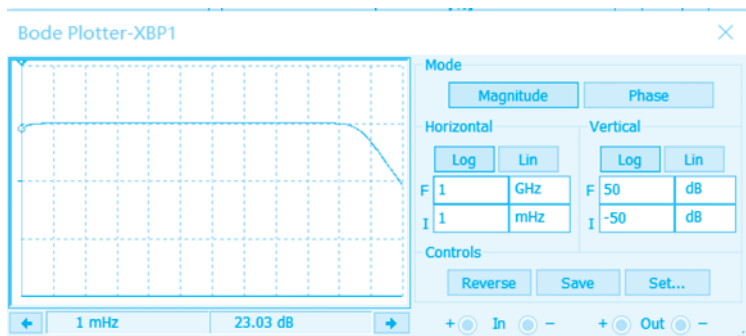


图 5.3.4 测量单级放大电路(2)

下限截止频率 $f_L \approx 0\text{Hz}$;

通频带 $f_{BW} = f_H - f_L \approx f_H = 41.794(\text{MHz})$ 。

(2) 测量多级放大电路。

如图 5.3.5 所示,中频放大倍数 $A_{u0} = 50\text{dB}$ 。

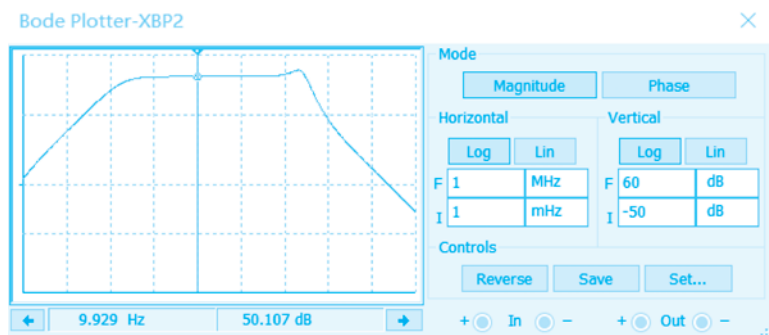


图 5.3.5 测量多级放大电路(1)

如图 5.3.6 所示,上限截止频率 $f_H = 4.209\text{kHz}$ 。

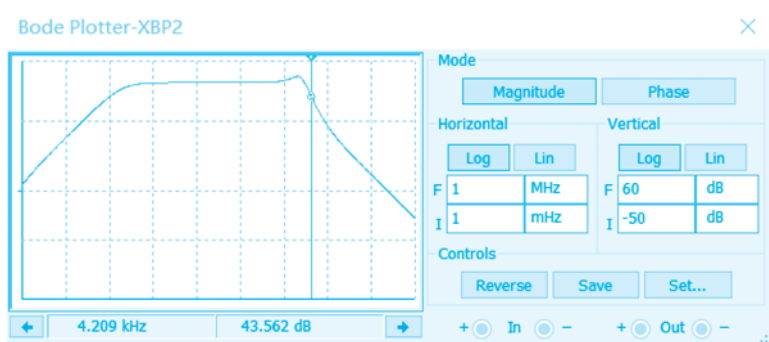


图 5.3.6 图 5.3.5 测量多级放大电路(2)

如图 5.3.7 所示,下限截止频率 $f_L \approx 0.1\text{Hz}$ 。

通频带 $f_{BW} = f_H - f_L \approx f_H = 4.209(\text{kHz})$ 。

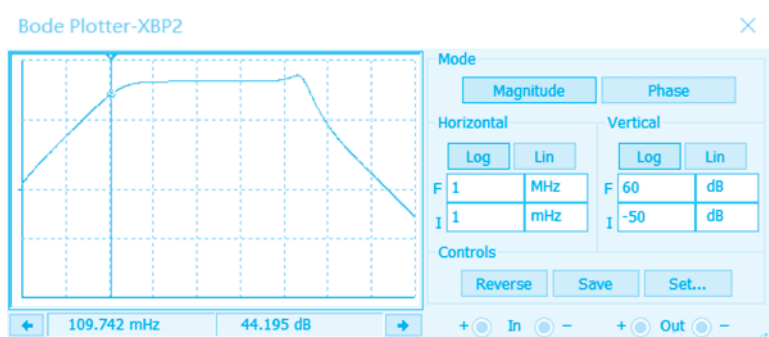


图 5.3.7 图 5.3.5 测量多级放大电路(2)

5.3.4 结论

此处多级放大电路增益是单级放大电路增益的 2 倍,所以多级放大倍数是单级放大倍数的乘积,但多级放大电路频带会变窄。

习题

5.1 多级放大电路的输入电阻基本上等于_____级的输入电阻,而多级放大电路的输出电阻约等于_____级的输出电阻。

5.2 简述阻容耦合多级放大电路的优缺点。

5.3 存在零点漂移现象的是哪一种常见耦合方式?

5.4 为什么变压器耦合电路现在没能得到广泛应用?

5.5 在光电耦合多级放大电路的传输过程中,经历了哪些形式的能量转换?

5.6 在前级均未出现失真的情况下,多级放大电路的最大不失真电压等于_____。

5.7 在图 P5.7 中,用什么元件取代 R_e 。既可设置合适的静态工作点 Q 点,又可使第二级放大倍数不至于下降太大?

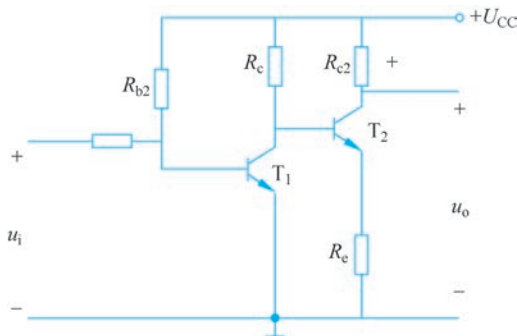


图 P5.7

5.8 二级放大电路如图 P5.8 所示, MOS 管阈值电压为 U_{TN} , 试求放大电路静态工作点。

5.9 当 M_1 和 M_2 均工作在静态工作点时,画出如图 P5.9 所示放大电路的交流小信号等效模型。

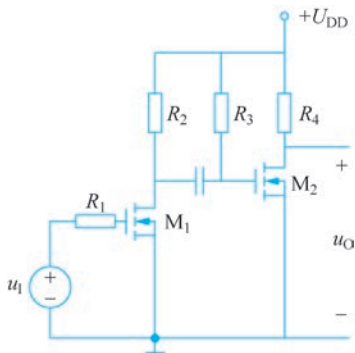


图 P5.8

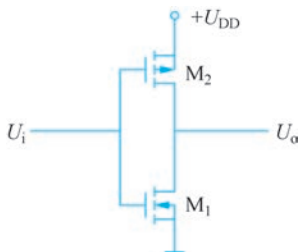


图 P5.9

5.10 求出图 P5.9 所示放大电路的电压增益表达式。

5.11 由场效应管和晶体管组成的电路如图 P5.11 所示, 已知 M_1 的 g_m 和 T_1 的 β 、 r_{be} 。当放大电路工作在合适的静态工作点时, 试画出相应的交流等效模型, 并写出电压放大倍数 A_u 的表达式。

5.12 多级放大电路如图 P5.12 所示, 试求:

(1) 在 A 点与地之间接入 $1k\Omega$ 电阻 R_L (T_2 断开) 时的 A_{u1} ;

(2) R_L 接在 B 点时的输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o , 设 $r_{be}=1k\Omega$, $\beta=100$ 。假设 C 足够大。

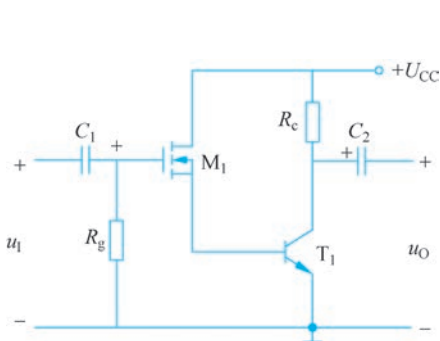


图 P5.11

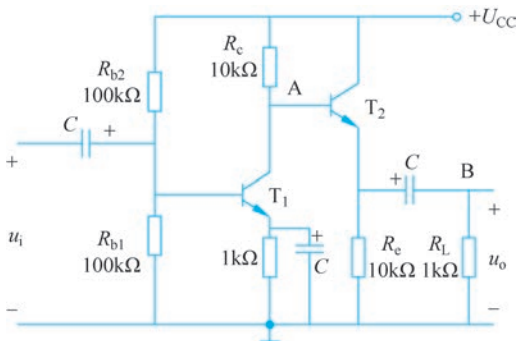


图 P5.12

5.13 如图 P5.13 所示, 放大电路工作在合适的静态工作点, 试画出其交流等效模型, 并求出放大电路增益以及输入输出电阻表达式。

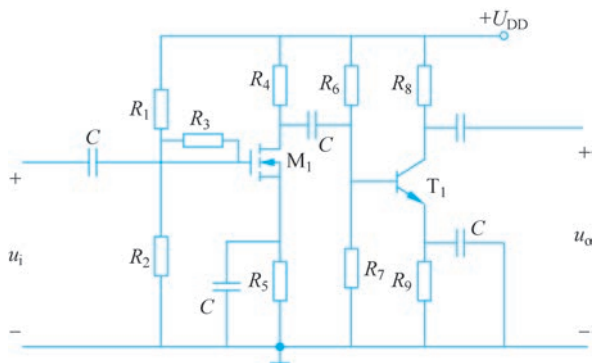


图 P5.13

5.14 二级交流放大电路如图 P5.14 所示, 已知场效应晶体管的 $g_m=2mA/V$, 晶体管的 $\beta=50$, $r_{be}=600\Omega$ 。要求:

(1) 画出放大电路的在合适工作点下的交流小信号等效模型;

(2) 计算多级放大电路放大倍数;

(3) 说明前级采用场效应晶体管、后级采用射极输出放大电路的作用。

5.15 场效应管与晶体管组成的多级放大电路如图 P5.15 所示。已知场效应管的 $g_m=0.8mS$, 晶体管的 $\beta=40$, $r_{be}=1k\Omega$ 。假设放大电路工作在合适的静态工作点试画出放大电路的交流小信号模型, 并求出电压增益 A_u 和输入电阻 R_i 。

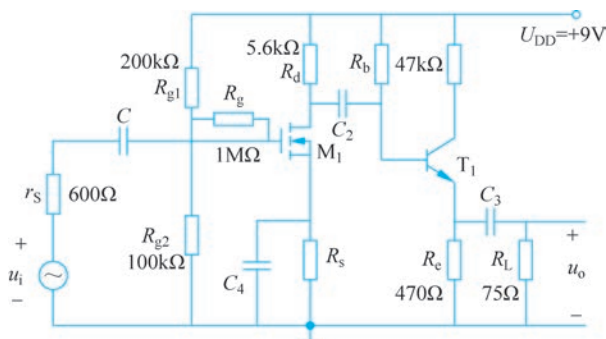


图 P5.14

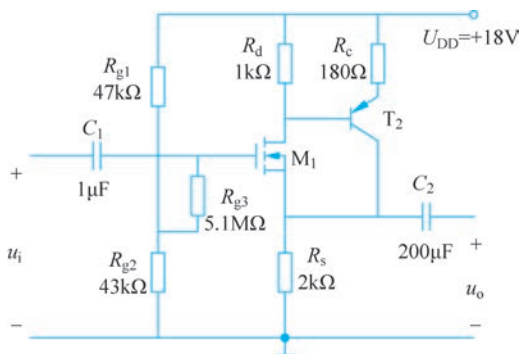


图 P5.15

5.16 直接耦合放大电路如图 P5.16 所示,假设 T_1 、 T_2 、 T_3 管特性相同,且有 $\beta=50$, $U_{BE}=0.7\text{V}$,电源电压 $U_{CC}=12\text{V}$,电阻 $R_s=62\Omega$, $R_{e1}=3\text{k}\Omega$, $R_{b11}=3.6\text{k}\Omega$, $R_{b12}=8.2\text{k}\Omega$, $R_{c1}=3.9\text{k}\Omega$, $R_{e2}=15\text{k}\Omega$, $R_{e3}=2\text{k}\Omega$,电容器对交流信号均可视为短路。要求:

- (1) T_1 、 T_2 、 T_3 管分别组成哪种组态的放大电路?
- (2) 估算静态工作点 I_{EQ1} 、 I_{EQ2} 、 I_{EQ3} 、 U_{CEQ1} 、 U_{CEQ2} 、 U_{CEQ3} 。
- (3) 写出输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 的表达式。

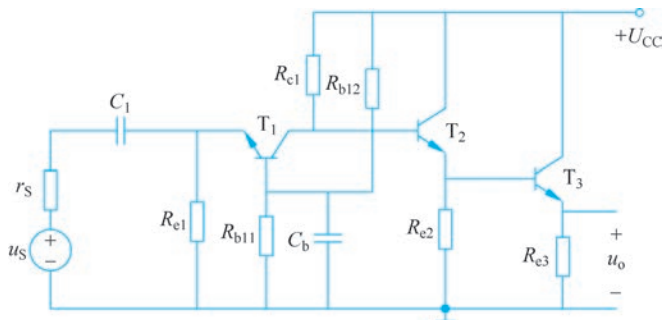


图 P5.16

5.17 多级放大电路如图 P5.17 所示,试画出交流分析时该电路的小信号等效模型。

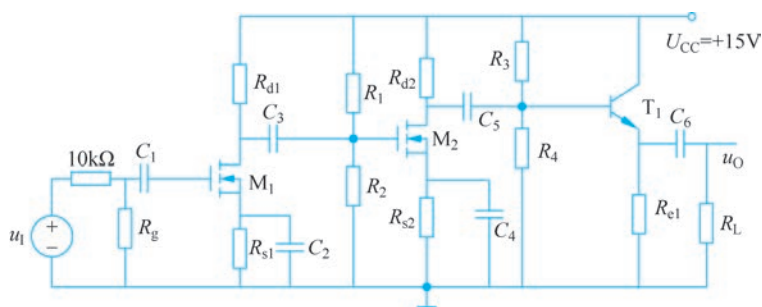


图 P5.17

5.18 根据如图 P5.18 所示电路,不考虑沟道调制长度,试说明图中 7 个 MOSEFT 在电路中的作用。

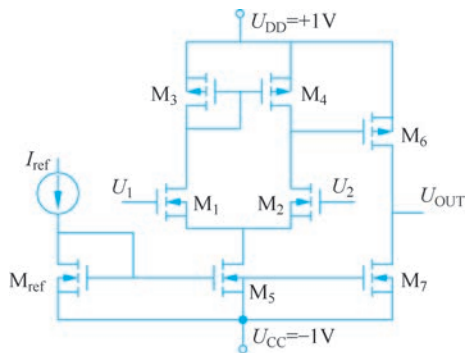


图 P5.18

5.19 多级放大电路的通频带宽度为什么比任意单级电路的通频带要窄?

5.20 二级放大电路中各级放大电路的上、下限截止频率关系为 $f_{H1} \approx 10f_{H2}$, $f_{L2} \approx 10f_{L1}$, 试估计该多级放大电路总通频带 f_{BW} 。

5.21 二级放大电路中各级放大电路幅频特性分别如图 P5.21(a)、(b)所示,试画出该多级放大电路总的幅频特性波特图。

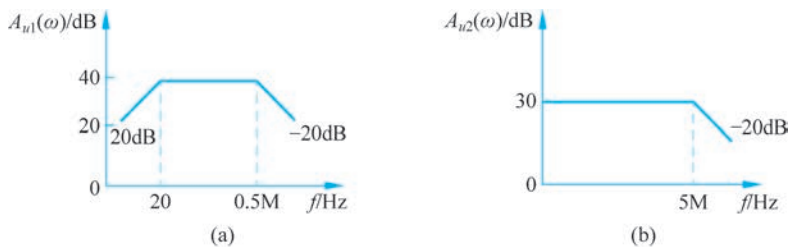


图 P5.21