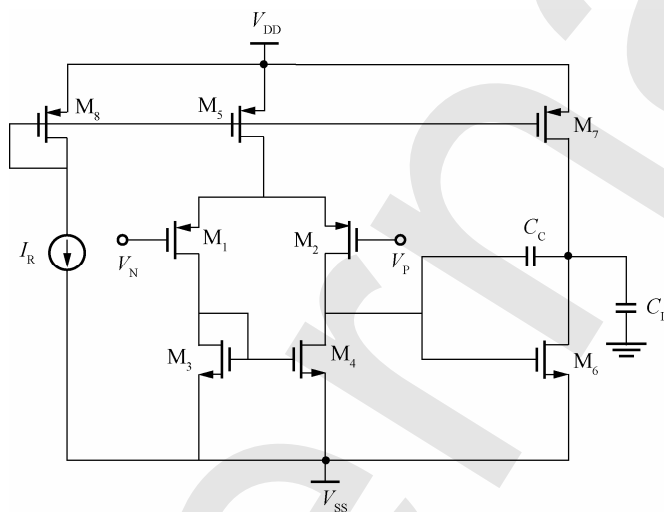


第 6 章 习题答案

6.22 题图 6.22 所示二级运放，差分放大级以 NMOS 电流镜作负载，采用双电源供电：

(1) 简要说明该电路反馈网络的作用。

(2) 针对题图 6.22 所示电路，列出该电路的设计方程。



题图 6.22

解：

(1) 电路反馈网络作用的分析，参考 6.10.1 节，不再赘述。

(2) 设计方程 (6.10.26) 针对图 6.10.5 所示电路结构：第一级 NMOS 差分放大，采用 PMOS 电流镜负载；第 2 级 PMOS 共源放大，采用 NMOS 电流源负载。本题中 MOS 管的极性正好相反。注意到这一点把对应公式 (6.10.26h、6.10.26i) 修正一下即可。详见 6.23 题解。

6.23 选择题图 6.22 所示电路拓扑结构，以及在题 6.22 中所列出的设计方程，采用 $0.8\mu\text{m}$ CMOS 工艺，设计一个简易二级运放并进行仿真验证。

提示： $0.8\mu\text{m}$ CMOS 工艺，典型工艺参数参考 6.10.3 节。

设计指标：增益 $A_v > 5000$ ；增益带宽积 $\text{GBW} = 5\text{MHz}$ ；负载电容 $C_L = 10\text{pF}$ ；转换速率 $\text{SR} > 10\text{V}/\mu\text{s}$ ；共模输入范围 ICMR ：1 到 -2V ；输出电压摆幅 $V_{\text{out}} = \pm 2\text{V}$ ；电源电压 $V_{\text{DD}} = 2.5\text{V}$ ， $V_{\text{SS}} = -2.5\text{V}$ ；功耗 $P_{\text{diss}} \leq 2\text{mW}$ 。假定沟道长度为 $1\mu\text{m}$ 。

解：

手工设定器件的初始参数：

① 选定补偿电容 C_c 。

按式 (6.10.26a), $C_c \geq 0.22C_L$, 将 $C_L=10\text{pF}$ 代入, 得 $C_c \geq 2.2\text{pF}$, 选 $C_c = 3\text{pF}$ 。

②计算 $(W/L)_3$, $(W/L)_4$

由摆率方程 (6.10.26c) 计算 I_5

$$SR \approx \frac{I_5}{C_c} \rightarrow I_5 = C_c \times (SR) = (3 \times 10^{-12}) \times (10 \times 10^6) = 30\mu\text{A}$$

然后按式 (6.10.26h) 计算 $(W/L)_3$ 。首先对式 (6.10.26h) 进行修正:

$$\begin{aligned} V_{\text{cm,min}} &= V_{\text{SS}} + V_{\text{GS3}} - |V_{\text{TH1}}| \\ &= V_{\text{SS}} + \sqrt{\frac{I_5}{\beta_3}} + V_{\text{TH3}} - |V_{\text{TH1}}| \\ \sqrt{\frac{I_5}{\beta_3}} &= V_{\text{cm,min}} - V_{\text{SS}} - V_{\text{TH3,max}} + |V_{\text{TH1,min}}| \\ (W/L)_3 &= \frac{I_5}{\mu_{\text{on}} C_{\text{ox}} [V_{\text{cm,min}} - V_{\text{SS}} - V_{\text{TH3,max}} + |V_{\text{TH1,min}}|]^2} \end{aligned}$$

将 $V_{\text{cm,min}}=-2\text{V}$, $\mu_{\text{n}}C_{\text{ox}}=110\mu\text{A/V}^2$, $V_{\text{SS}}=-2.5\text{V}$, $V_{\text{TH3,max}}=0.85\text{V}$, $|V_{\text{TH1,min}}|=0.55\text{V}$, $I_5=30\mu\text{A}$ 代入上式得到

$$(W/L)_3 = \frac{30 \times 10^{-6}}{(110 \times 10^{-6})[2.5 - 2 - 0.85 + 0.55]^2} = 6.8$$

取 $(W/L)_3 = 7$

$$(W/L)_4 = (W/L)_3 = 7$$

③计算 $(W/L)_1$, $(W/L)_2$

先按式 (6.10.26c) 计算 g_{m1} 。

$$g_{\text{m1}} = GB \times C_c = 5 \times 10^6 \times (2\pi) \times 3 \times 10^{-12} = 94.25\mu\text{S}$$

而根据饱和区电流方程可得

$$(W/L)_1 = (W/L)_2 = \frac{g_{\text{m1}}^2}{2\mu_{\text{p}}C_{\text{ox}}I_1}$$

将 $\mu_{\text{p}}C_{\text{ox}}=50\mu\text{A/V}^2$, $g_{\text{m1}}=94.25\mu\text{S}$, $I_1=I_5/2=15\mu\text{A}$ 代入上式得到

$$(W/L)_1 = (W/L)_2 = \frac{(94.25 \times 10^{-6})^2}{2 \times 50 \times 10^{-6} \times 15 \times 10^{-6}} \approx 5.9$$

取 $(W/L)_1 = (W/L)_2 = 6$

④计算 $(W/L)_5$

按设计方程 (6.10.26i) 计算 V_{DS5} 之前, 首先对式 (6.10.26i) 进行修正:

$$\begin{aligned} V_{cm,max} &= V_{DD} - |V_{DS5}| - |V_{GS1}| \\ &= V_{DD} - |V_{DS5}| - \sqrt{\frac{I_5}{\beta_1}} - |V_{TH1}| \\ |V_{DS5}| &= V_{DD} - V_{cm,max} - \sqrt{\frac{I_5}{\beta_1}} - |V_{TH1,max}| \end{aligned}$$

将 $V_{cm,max}=1V$, $V_{DD}=2.5V$, $V_{TH1,max}=0.85V$, $I_5=30\mu A$, $\beta_1=\mu_p C_{ox}(W/L)_1=50 \times 6V$ 代入上式, 使得

$$V_{DS5} = (-1) - (-2.5) - \sqrt{\frac{30 \times 10^{-6}}{50 \times 10^{-6} \times 6}} - 0.85 = 0.334V$$

由工作在饱和区的电流表达式, 得到

$$(W/L)_5 = \frac{2 \times (30 \times 10^{-6})}{50 \times 10^{-6} \times (0.334)^2} \approx 10.8$$

取 $(W/L)_5 = 11$

⑤计算 $(W/L)_6$

根据设计方程 (6.10.26b)

$$g_{m6} > 10g_{m2} \rightarrow g_{m6} \geq 10 \times 94.25 = 942.5\mu S$$

取 $g_{m6} = 942.5\mu S$, 并计算 g_{m4}

$$g_{m4} = 2 \sqrt{\frac{\mu_n C_{ox}}{2} \left(\frac{W}{L}\right)_4 I_4} = 2 \sqrt{\frac{110 \times 10^{-6}}{2} \times 7 \times (15 \times 10^{-6})} \approx 152\mu S$$

设 $V_{GS4}=V_{GS6}$, 则有

$$\left(\frac{W}{L}\right)_6 = \left(\frac{W}{L}\right)_4 \frac{g_{m6}}{g_{m4}} \rightarrow \left(\frac{W}{L}\right)_6 = 7 \times \frac{942.5}{152} = 43.4$$

取 $\left(\frac{W}{L}\right)_6 = 44$

⑦计算 $(W/L)_7$

先计算 I_6

$$I_6 = \frac{g_{m6}^2}{2 \times \mu_n C_{ox} \times (W/L)_6} \rightarrow I_6 = \frac{(942.5 \times 10^{-6})^2}{2 \times (110 \times 10^{-6}) \times 44} = 92 \mu A$$

而 M_5 与 M_7 栅源压相同, 故有

$$\left(\frac{W}{L}\right)_7 = \left(\frac{W}{L}\right)_5 \times \frac{I_6}{I_5} \rightarrow \left(\frac{W}{L}\right)_7 = 11 \times \left(\frac{91.8}{30}\right) = 33.7$$

取
$$\left(\frac{W}{L}\right)_7 = 34$$

⑧计算 $(W/L)_8$

设电流源电流为 $30 \mu A$, 故

$$\left(\frac{W}{L}\right)_8 = \left(\frac{W}{L}\right)_5 = 11$$

至此, 8 个晶体管的宽/长比 (W/L) 及补偿电容 C_c 的值均已确定。

以上凭手工设定的 MOS 管尺寸和电流如表 1 所示, 表 2 为仿真结果。代码不提供, 请参考教材附录 B: chap6/chap6.10.2。

表 1 手工设置的 MOS 管尺寸和电流

MOS 管	$W/L(\mu m/\mu m)$	$I_D(\mu A)$
M_1, M_2	6/1	15
M_3, M_4	7/1	15
M_5	11/1	30
M_6	44/1	92
M_7	34/1	92
M_8	11/1	30

表 2 仿真结果

设计指标	设计要求	仿真结果
静态功耗	$\leq 2mW$	0.4mW
开环直流增益	$\geq 80dB$	80.3dB
单位增益带宽	5MHz	5MHz
相位裕量	$\geq 60^\circ$	66°

转换速率	$\geq 10\mu\text{V/s}$	$+7.3, -10.9 (\text{V}/\mu\text{s})$
共模抑制比	$\geq 80\text{dB}$	85dB
输出电压摆幅	$\pm 2\text{V}$	$+2.25, -2.3 (\text{V})$
输入共模范围	$-2\sim 1\text{V}$	$+1.2, -2.37 (\text{V})$