

# 运算放大器设计

电子科学与工程学院 刘时宜 201180078

实验日期: 2022 年 11 月 30 日

至 2022 年 12 月 24 日

指导老师: 张丽敏

点击目录、书签栏、以及行文中的图表标号的均可跳转至相应页面

## 目录

<b>1 基本设计要求</b>	<b>1</b>
<b>2 三极管基本参数测定及计算</b>	<b>2</b>
2.1 NMOS 管 . . . . .	2
2.2 PMOS 管 . . . . .	3
<b>3 设计参数的确定</b>	<b>4</b>
3.1 理论计算 . . . . .	4
3.1.1 运算放大器主体 . . . . .	4
3.1.2 偏置电流源 . . . . .	5
3.2 参数调整 . . . . .	5
3.2.1 仿真中遇到的问题 . . . . .	5
3.2.2 整体调整思路 . . . . .	6
3.3 参数确定 . . . . .	6

## 1 基本设计要求

本次设计的参数要求如表1.0.1所示:

$V_{dd} = 3.3\text{ V}$	$V_{ss} = 0\text{ V}$	$GB = 3\text{ MHz}$	$SR = 3\text{ V}\mu\text{s}^{-1}$
$\varphi_m = 45^\circ$	$0.4\text{ V} < V_{out} < 2.6\text{ V}$	$P_{diss} \leq 5\text{ mW}$	$A_v > 5000$
	$ICMR = 1.25\text{ V to } 2.5\text{ V}$	$C_l = 10\text{ pF}$	

表 1.0.1: 设计指标要求

## 2 三极管基本参数测定及计算

### 2.1 NMOS 管

NMOS 参数测定电路图如图2.1.1所示。使用直流分析后打印模型参数 (Results - Print - Model Parameters) 以及直流工作点 (Results - Print - DC Operating Points) 即可得 NMOS 管的  $T_{oxe}$ 、 $\mu_n$ 、 $V_{th0}$ 、 $g_{ds}$ ，利用公式

$$C_{oxe} = \frac{\epsilon_{ox}}{T_{oxe}}$$

$$K'_n = \mu_n \cdot C_{oxe}$$

$$g_{ds} = \lambda \cdot I_d$$

可得  $C_{oxe}$ 、 $K'_n$ 、 $g_{ds}$  三参数。以上测量以及计算所得的参数列在表2.1.1中。

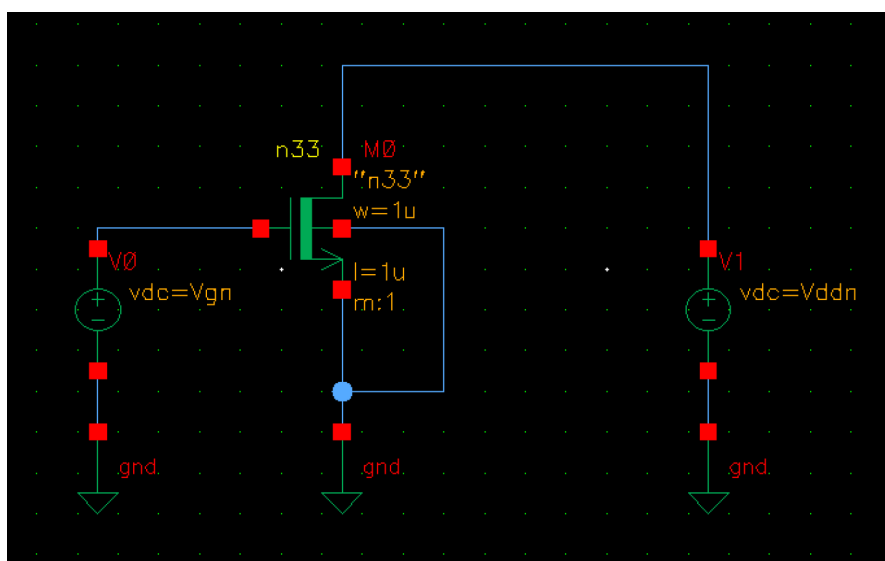


图 2.1.1: NMOS 管参数测量电路

$T_{oxe}$	6.65 nm
$\mu_n$	$350 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
$V_{th0}$	695 mV
$g_{ds}$	336.983 nS
$C_{ox}$	$5.19268 \text{ mF}/\text{m}^2$
$K'_n$	$181.744 \text{ mA}/\text{V}^2$
$\lambda$	0.05778

表 2.1.1: NMOS 管关键性能参数

## 2.2 PMOS 管

与 NMOS 管同理，测量电路图如 2.2.1 所示，测量以及计算所得的 PMOS 管关键参数列在表 2.2.1 中。

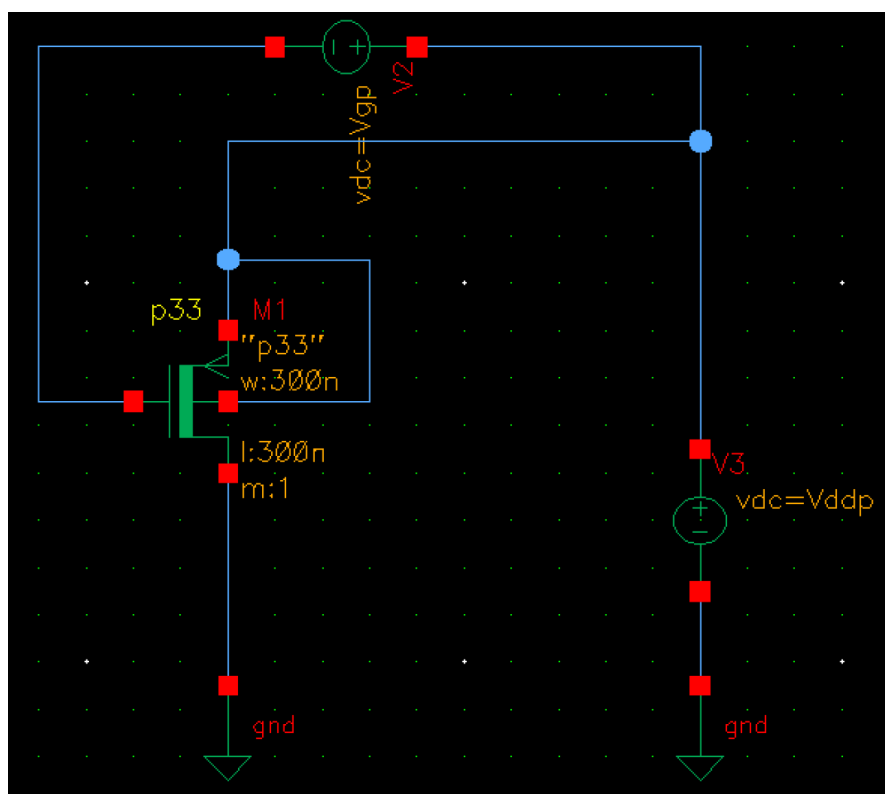


图 2.2.1: PMOS 管参数测量电路

$T_{oxe}$	6.62 nm
$\mu_n$	92.5 cm <sup>2</sup> /V · s
$V_{th0}$	-672 mV
$g_{ds}$	230.227 nS
$C_{ox}$	5.216 21 mF/m <sup>2</sup>
$K'_n$	48.2499 mA/V <sup>2</sup>
$\lambda$	0.05676

表 2.2.1: PMOS 管关键性能参数

### 3 设计参数的确定

#### 3.1 理论计算

##### 3.1.1 运算放大器主体

由于本次时间较为紧张，选用相对来讲更为简明的不带输出缓冲 (unbuffered) 的双级运算放大器结构。运算放大器整体结构如图3.1.1所示。

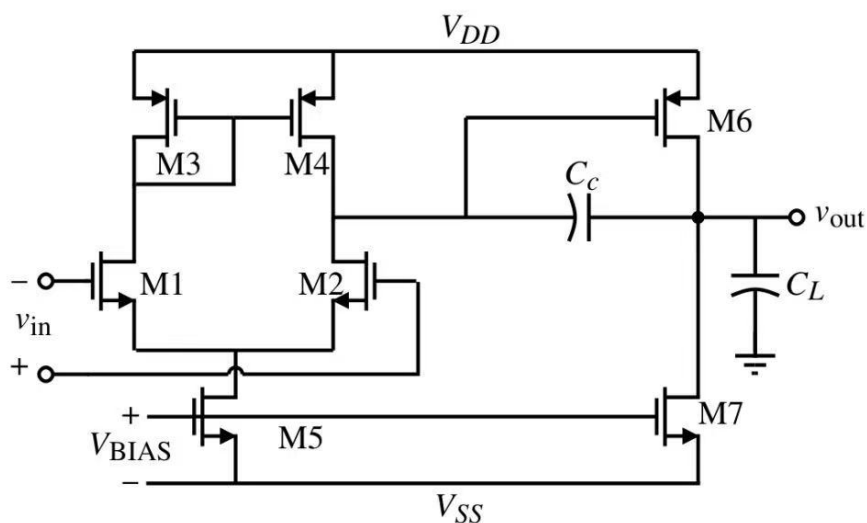


图 3.1.1: 选用的运算放大器整体结构

按顺序计算各参数如下：

- 选取沟道长度为1 μm

- b. 由60°的相位裕量条件, 要求  $C_c > 0.22 C_l$ , 此处取  $C_c = 3.3 \text{ pF}$
- c. 由压摆率限制, 得最小的  $I_5 = SR \cdot C_c = 9 \mu\text{A}$ 。此处取  $I_5 = 10 \mu\text{A}$
- d. 要求的输入最高共模电压2.5 V, 取  $V_{inc,max} = 3 \text{ V}$ , 由  $\frac{2I_3}{K'_p[V_{dd} - V_{inc,max} - V_{tp} + V_{th}]^2} = 0.3 \text{ V}$  可得  $S_3 = S_4 = 2.138$
- e. 由  $g_{m1} = GB \cdot C_c$ , 可得在单位增益带宽限制下, 最小的  $g_{m1} = 56.55 \mu\text{S}$ 。取  $g_{m1} = g_{m2} = 80 \mu\text{S}$ 。则可得  $S_1 = S_2 = \frac{g_{m2}^2}{K'_n I_5} = 3.52$ 。
- f. 在输入最小共模电压约束下,  $V_{dsat5,max} = V_{inc,min} - V_{ss} - \sqrt{\frac{I_5}{K'_n S_1}} - V_{thn} = 0.43 \text{ V}$ 。取  $V_{dsat5} = 0.3 \text{ V}$ , 则有  $S_5 = \frac{2I_5}{K'_n V_{dsat5}} = 1.22$ 。
- g. 由相位裕量条件,  $g_{m6} > 2.2 g_{m2} \frac{C_L}{C_c}$ , 此处取  $g_{m6} = 0.15 \text{ mS}$ , 由偏置的平衡条件, 有  $V_{gs4} = V_{gs6}$ , 则  $S_6 = S_4 \frac{g_{m6}}{g_{m4}} = 7.99$
- h.  $I_6 = \frac{g_{m6}^2}{2K'_p S_6} = 29.182 \mu\text{A}$ , 由镜像电流源电流关系,  $S_7 = S_5 \frac{I_6}{I_5} = 3.56$
- i. 验证输出级的饱和压降满足输出范围要求
- j. 验证  $A_v = \frac{2g_{m2}g_{m6}}{I_5 I_6 (\lambda_p + \lambda_n)^2} = 6269.19$ 、 $P_{diss} = (I_5 + I_6)V_{dd} = 129.29 \mu\text{W}$ 均满足设计要求

### 3.1.2 偏置电流源

由于本次时间较为紧张, 且对于不含折叠共源共栅结构的运算放大器结构来说, 单级镜像电流源已经能够满足性能需求, 故采用如图3.1.2的电路结构。

通过  $I_5$ ,  $S_5$  可以反推出  $V_{gs5} = 0.995 \text{ V}$ 。由

$$\begin{cases} I_d = \frac{1}{2} K'_n \cdot 1 \cdot (V_{gs} - V_{th})^2 \\ V_{gs} = V_{dd} - I_d \cdot R \end{cases} \quad (3.1.1)$$

可以解得  $I_d = 8.18 \mu\text{A}$ ,  $R = 281.8 \text{ k}\Omega$

## 3.2 参数调整

### 3.2.1 仿真中遇到的问题

在 Cadence 中搭建电路并仿真后, 主要遇到了以下问题:

- a. 推测可能是由于电路中存在其他寄生电容的原因, 仿真时按照如上过程选取的一组参数无法达到45°相位裕量的要求。
- b. 可能是由于存在细微误差的原因, 输出级未能处于正常偏置状态。

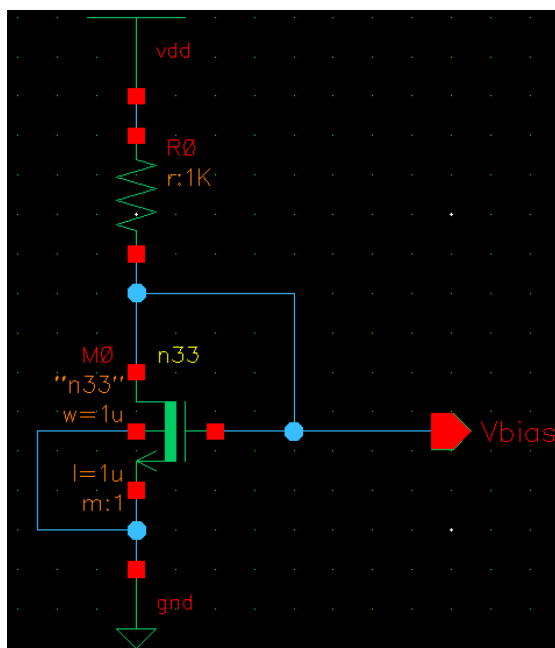


图 3.1.2: 偏置电流源结构

### 3.2.2 整体调整思路

针对以上问题，对电路参数做了以下调整：

- 增大  $C_c$ ，保证充足的相位裕量。
- 增大  $I_5$ ，保证有足够的压摆率。
- 增大  $S_1, S_2$ ，抵消掉  $I_5$  增大带来的增益下降。
- 调整  $S_3, S_4$ ，使得差分级处于正常的偏置状态。
- 调整  $S_6, S_7$ ，增大增益并使输出级正常偏置。

### 3.3 参数确定

经过一系列结合仿真结果的调整后，最终确定设计如3.3.1所示，其中的各参数整理在表3.3.1中。

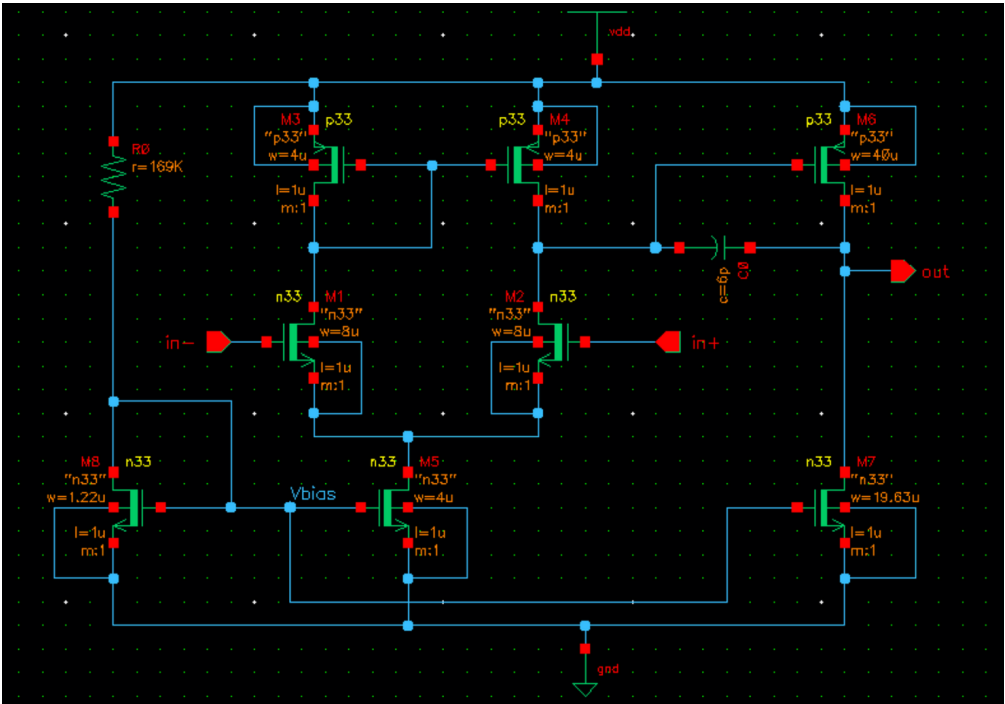


图 3.3.1: 运算放大器电路

$S_1$	8
$S_2$	8
$S_3$	4
$S_4$	4
$S_5$	4
$S_6$	40
$S_7$	19.63
$S_8$	19.63
$C_c$	6 pF
$R_0$	169 k $\Omega$

表 3.3.1: 设计参数