

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 27 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

1 基本设计要求	2
2 三极管基本参数测定及计算	2
2.1 NMOS 管	2
2.2 PMOS 管	3
3 设计参数的确定	4
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	6
3.2.1 仿真中遇到的问题	6
3.2.2 整体调整思路	6
3.3 参数确定	6
4 运算放大器仿真及性能测试	7
4.1 瞬态响应	7
4.2 传输特性曲线电压输出范围	8
4.3 频率响应	9
4.4 共模抑制比 CMRR	10
4.4.1 闭环测试方案	10
4.4.2 开环测试方案	11
4.5 输入共模范围 ICMR	11
4.6 压摆率 SR	12
5 电源纹波电压抑制比 PSRR	13

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} 、 μ_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。

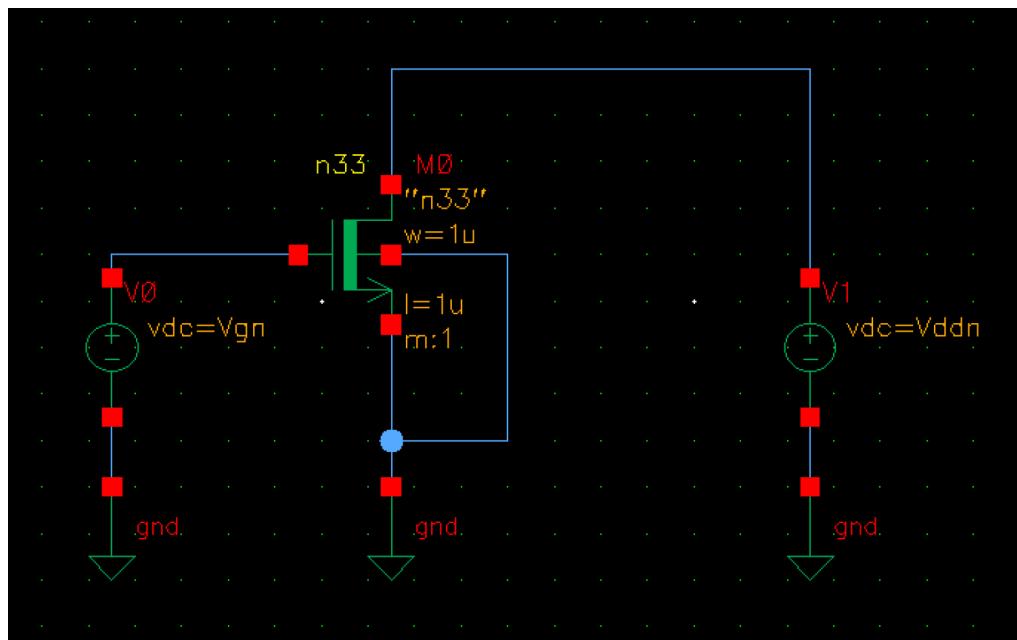


图 2.1.1: NMOS 管参数测量电路

T_{oxe}	6.65 nm
μ_n	$350 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
V_{th0}	695 mV
g_{ds}	336.983 nS
C_{ox}	$5.192\,68 \text{ mF}/\text{m}^2$
K_n'	$181.744 \text{ mA}/\text{V}^2$
λ	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。

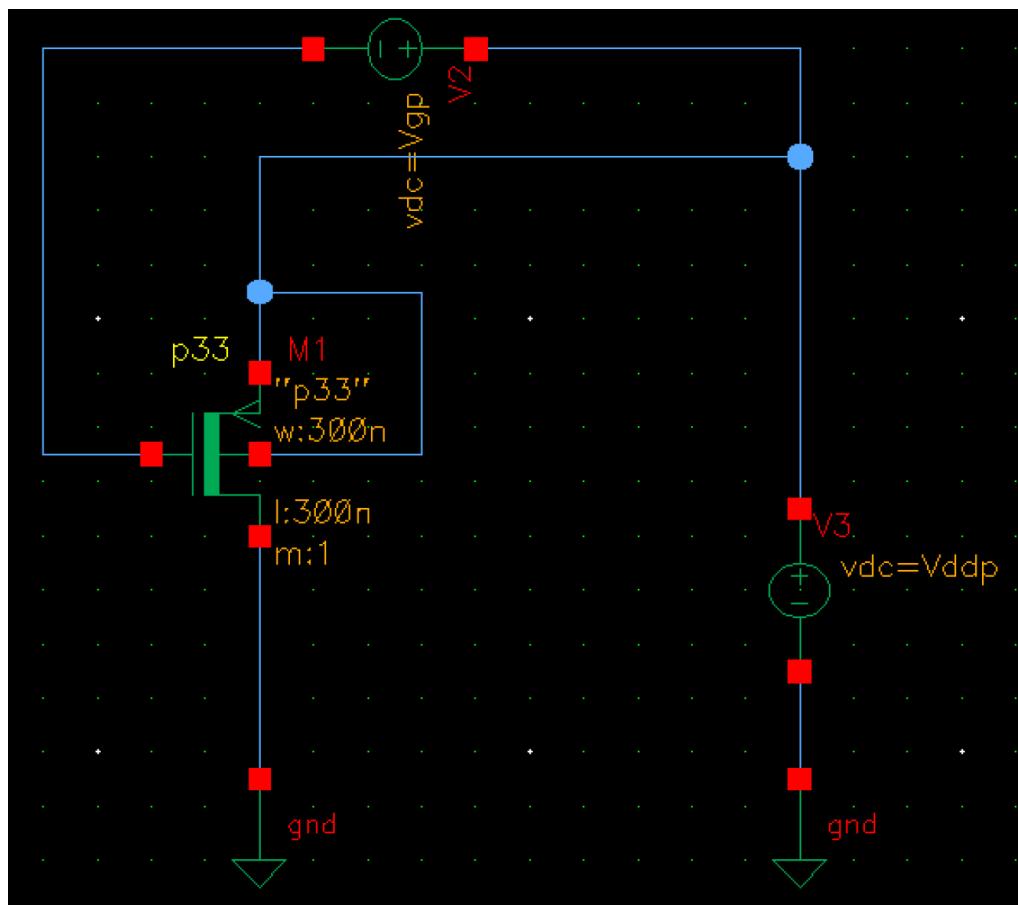


图 2.2.1: PMOS 管参数测量电路

T_{oxe}	6.62 nm
μ_n	$92.5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
V_{th0}	-672 mV
g_{ds}	230.227 nS
C_{ox}	5.21621 mF/m ²
K'_n	48.2499 mA/V ²
λ	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。

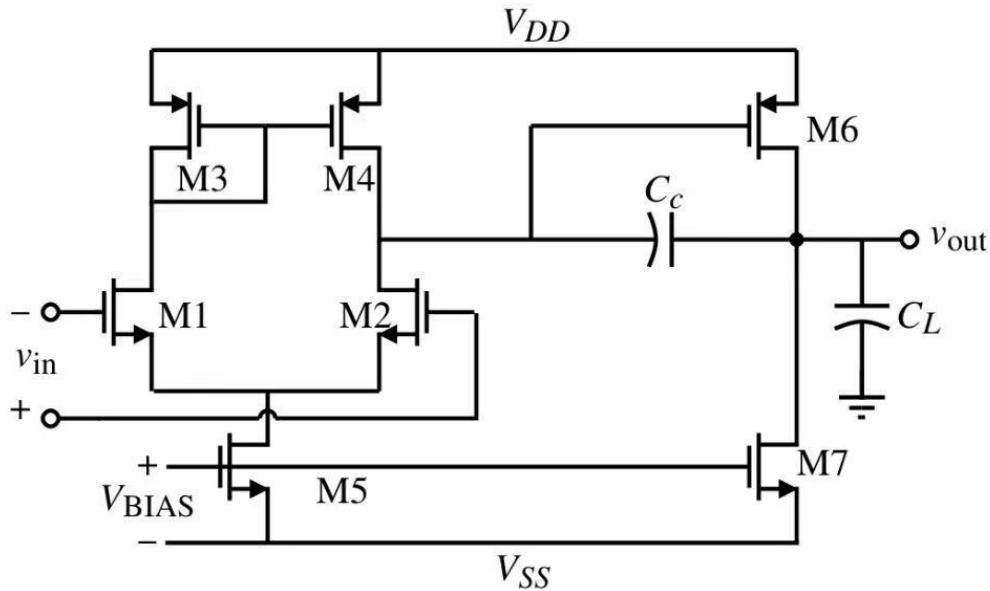


图 3.1.1: 选用的运算放大器整体结构

按顺序计算各参数如下：

- 选取沟道长度为 $1 \mu\text{m}$
- 由 60° 的相位裕量条件，要求 $C_c > 0.22 C_l$ ，此处取 $C_c = 3.3 \text{ pF}$
- 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, $g_{m6} > 2.2g_{m2}\frac{C_L}{C_c}$, 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。

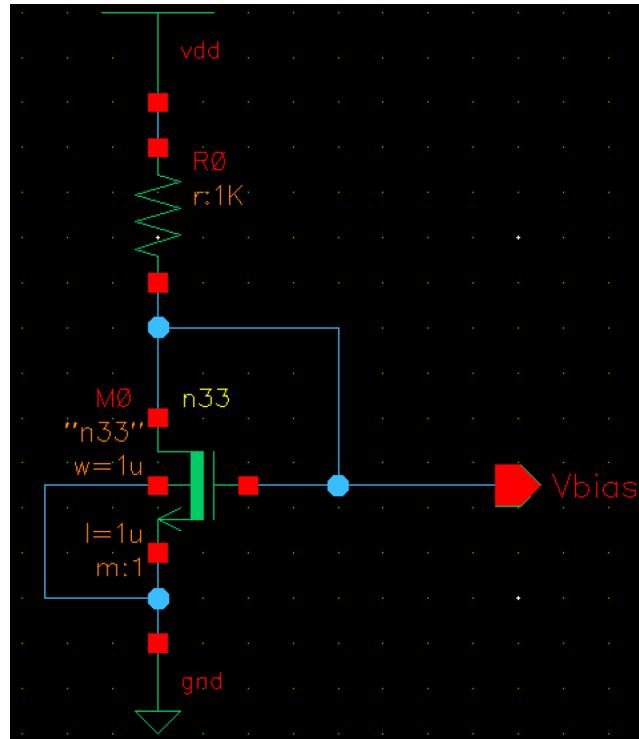


图 3.1.2: 偏置电流源结构

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。

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：

- a. 增大 C_c ，保证充足的相位裕量。
- b. 增大 I_5 ，保证有足够的压摆率。
- c. 增大 S_1, S_2 ，抵消掉 I_5 增大带来的增益下降，同时保证有足够的单位增益带宽 GB 。
- d. 调整 S_3, S_4 ，使得差分级处于正常的偏置状态。
- e. 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。

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 kΩ

表 3.3.1：设计参数

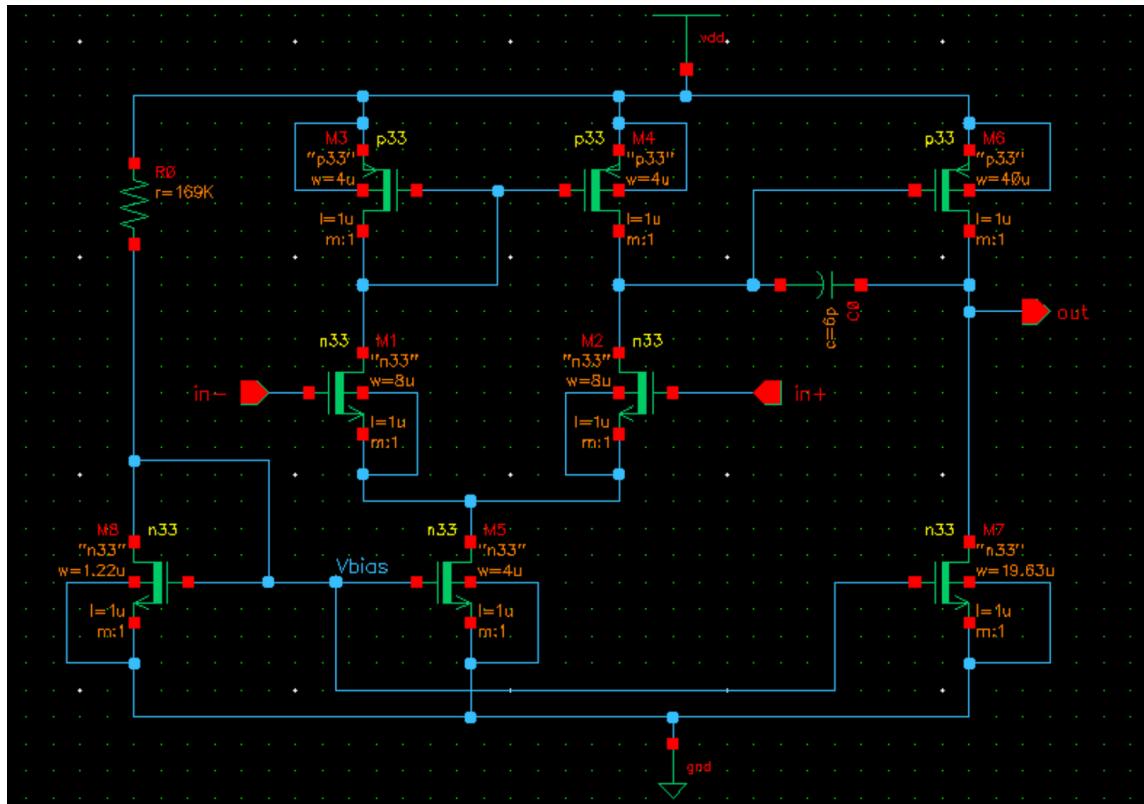


图 3.3.1: 运算放大器电路

4 运算放大器仿真及性能测试

4.1 瞬态响应

仿真电路、仿真设定与仿真结果均展示在图4.1.1中。可以看到，输出电压振荡中心大约在1.65 V处，且正弦波形无明显失真，说明运算放大器整体工作正常，能够起到放大作用。由输入电压振幅 $10 \mu\text{V}$ ，输出电压振幅 0.53 V ，可以得到准静态状态下的 $A_v = 50344$ ，远高于设计要求。

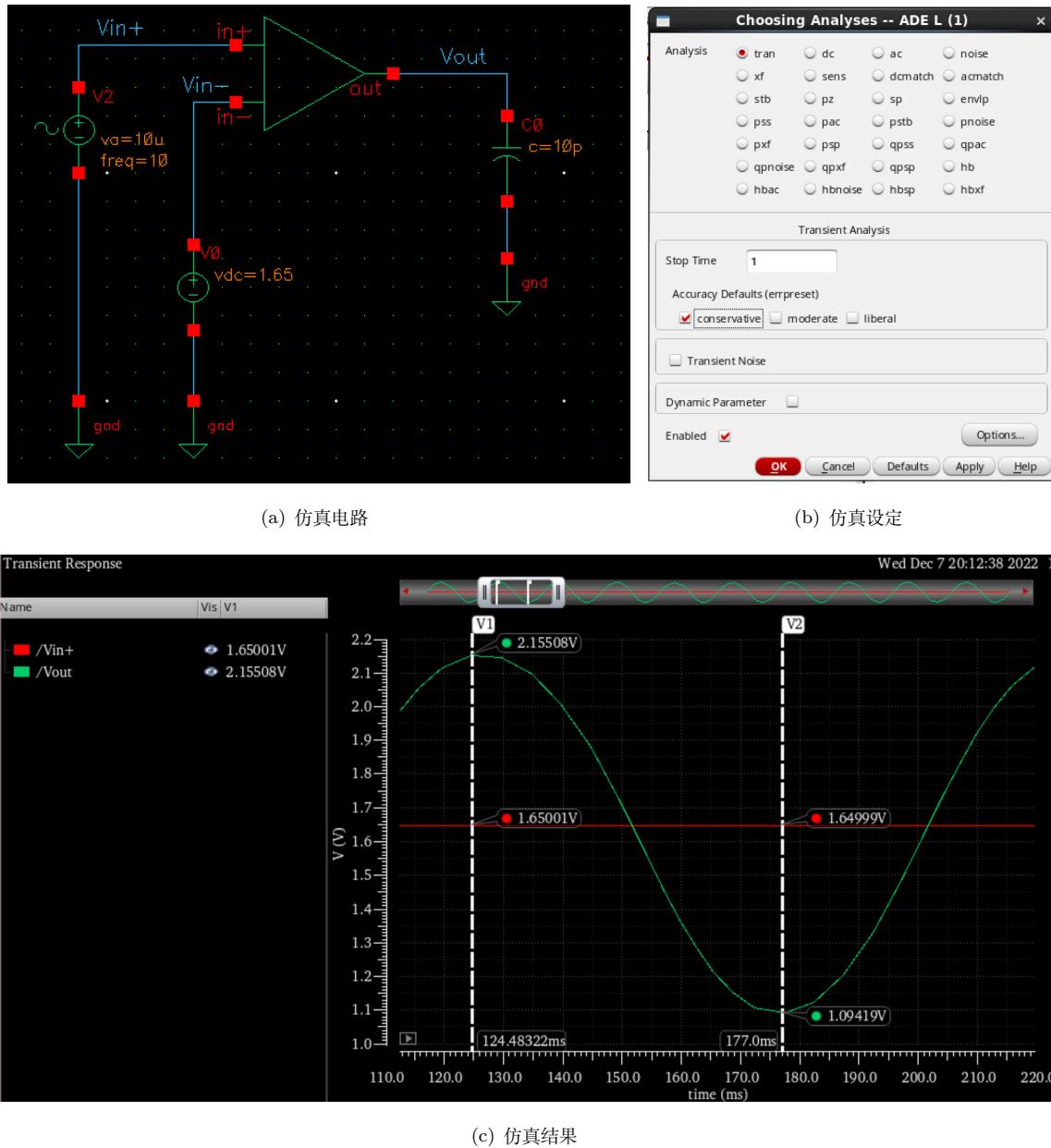


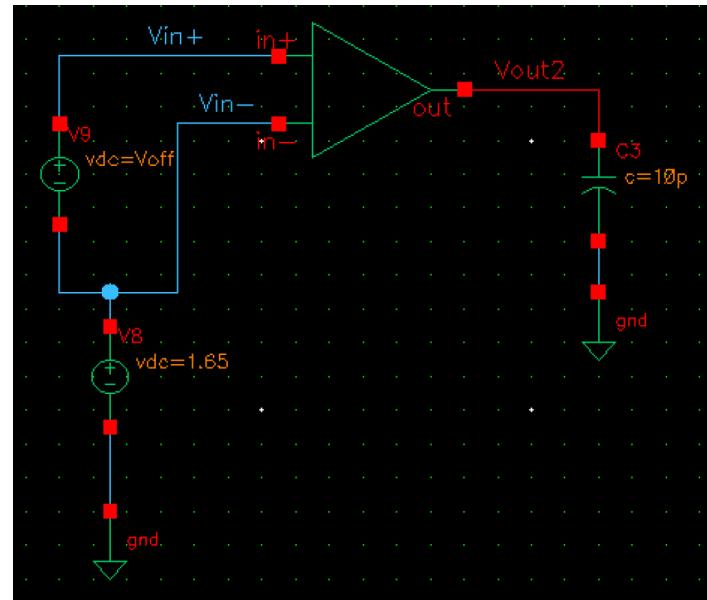
图 4.1.1: 仿真: 瞬态响应

4.2 传输特性曲线电压输出范围

仿真电路及仿真结果展示在图4.2.1中。仿真结果中同时选取了电路中一些关键节点进行画图。可以看到，运算放大器正常工作时，所有 MOS 均正常偏置，工作在饱和区。

同时，对于要求的输出范围：

- 当 $V_{out} = 0.4 \text{ V}$ 时， $V_{g7} = V_{bias} = 1.1073 \text{ V}$, $V_{s7} = 0 \text{ V}$, $V_{d7} = V_{out} = 0.4 \text{ V}$, $V_{th} = 695 \text{ mV}$ 。关系 $V_{ds} > V_{gs} - V_{th}$ 成立，工作在饱和区。
- 当 $V_{out} = 2.6 \text{ V}$ 时， $V_{g6} = 2.0828 \text{ V}$, $V_{s6} = 3.3 \text{ V}$, $V_{d6} = V_{out} = 2.6 \text{ V}$, $V_{th} = 672 \text{ mV}$ 。关系 $|V_{ds}| > |V_{gs}| - |V_{th}|$ 成立，工作在饱和区。



(a) 仿真电路

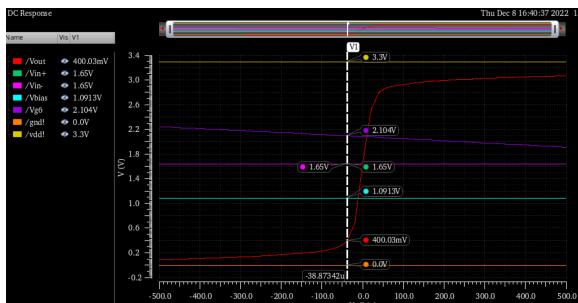
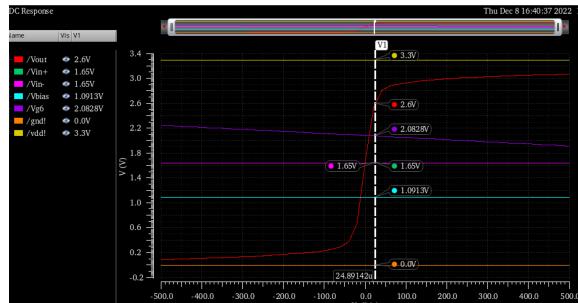
(b) 仿真结果 - $V_{out,min}$ (c) 仿真结果 - $V_{out,max}$

图 4.2.1: 仿真: 传输特性曲线 电压输出范围

4.3 频率响应

仿真电路及仿真结果展示在图4.3.1中。可以看到，静态时增益 $95.207 \text{ dB} = 57590$ ，远超设计标准。相位裕量 $\varphi_m = 47.01^\circ$ ，满足设计标准。单位增益带宽 $GB = 5.31657 \text{ MHz}$ ，远超设计标准。

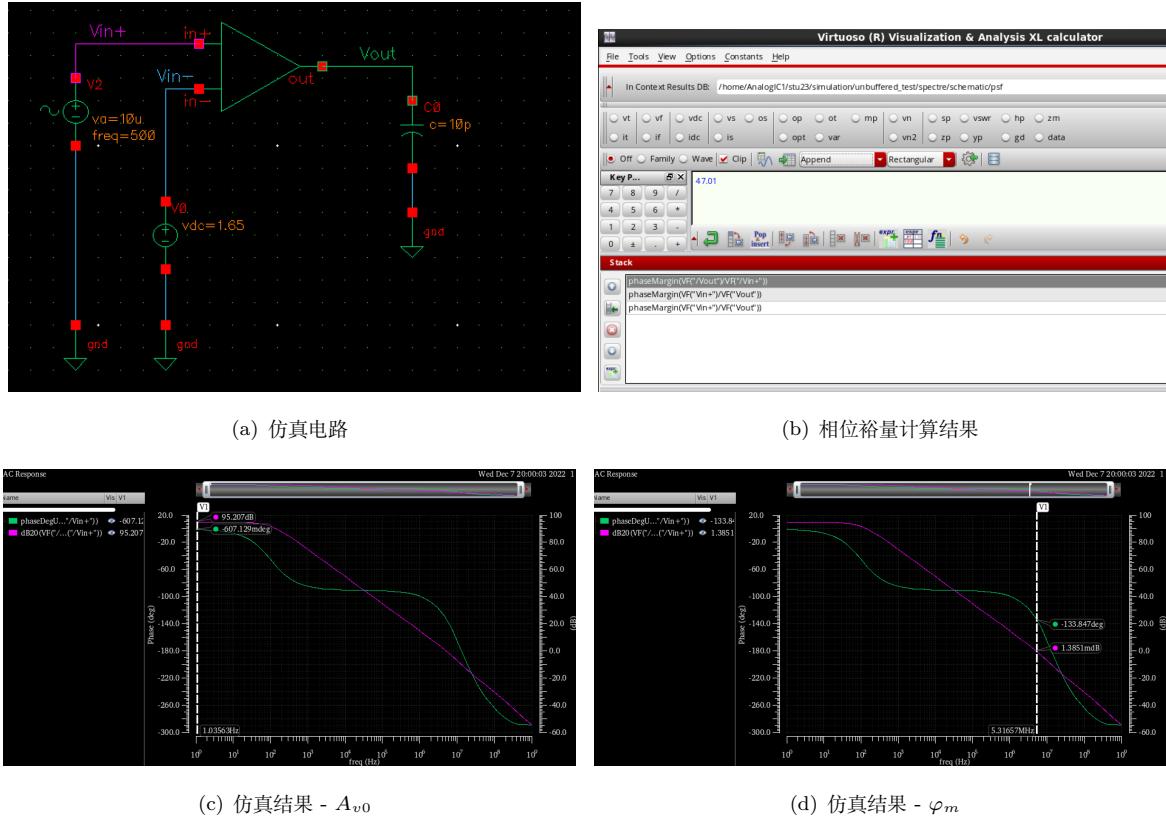


图 4.3.1: 仿真: 频率响应

4.4 共模抑制比 CMRR

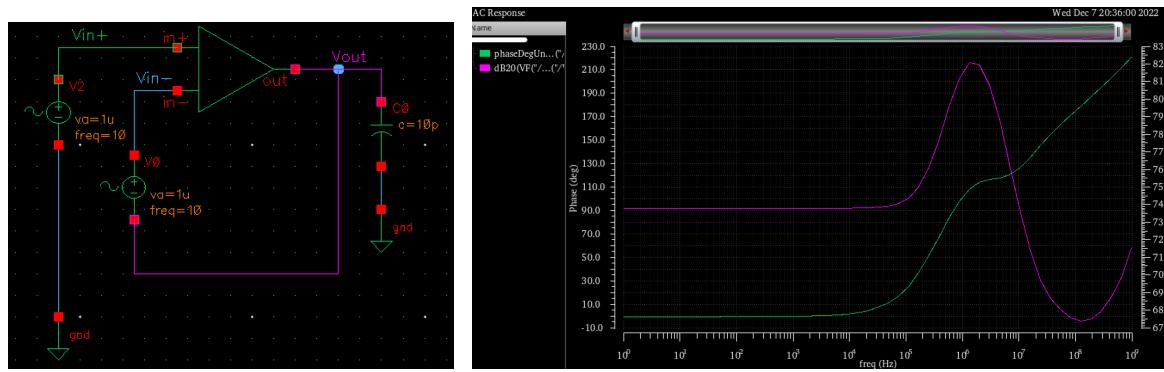
4.4.1 闭环测试方案

仿真电路及仿真结果展示在图4.4.1中。由电路连接方式，则有关系

$$\frac{V_{cm}}{V_{out}} = \pm \frac{1 + A_v \mp \frac{A_c}{2}}{A_c} \simeq \frac{A_v}{|A_c|} = CMRR$$

其中的 V_{cm} 即为 V2 与 V0 的共模输入。

从仿真结果看，低频处 $CMRR \simeq 74 \text{ dB}$ ，不算十分优秀，但大致可以满足一般电路需求。另外该测量方法在存在失调电压的情况下有测量偏差。



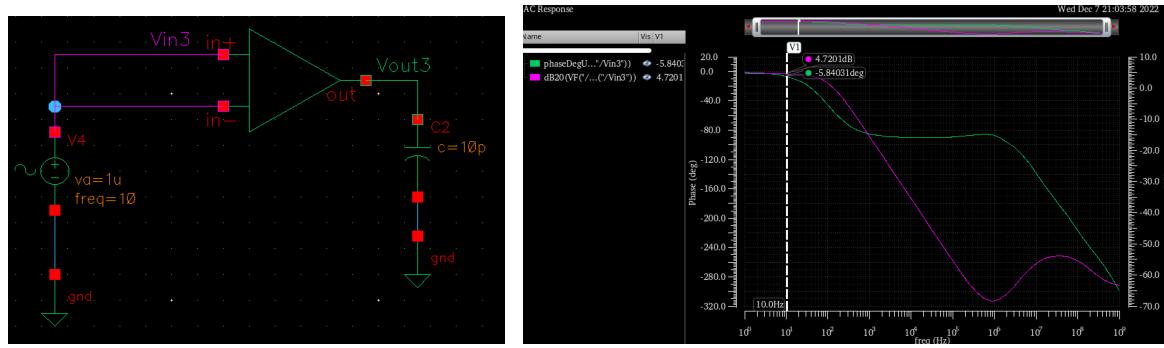
(a) 仿真电路

(b) 仿真结果

图 4.4.1: 仿真: 共模抑制比 闭环测法

4.4.2 开环测试方案

仿真电路及仿真结果展示在图4.4.2中。从仿真结果中可以读出, 低频时 $A_{cm} \simeq 4.72 \text{ dB}$ 。由 $CMRR = \frac{A_v}{A_{cm}}$ 可知低频处 $CMRR \simeq 90.5 \text{ dB}$, 指标能够满足一般电路需求, 且高于闭环测试方案所得的结果。



(a) 仿真电路

(b) 仿真结果

图 4.4.2: 仿真: 共模抑制比 开环测法

4.5 输入共模范围 ICMR

仿真电路及仿真结果展示在图4.5.1中。从仿真结果中可以看到, 输入与输出曲线约在 $0.3 \text{ V} < V_{in} < 2.8 \text{ V}$ 的范围内均重合, 表明 ICMR 为 0.3 V 至 2.8 V , 远超设计标准。同时, 这个范围也可视为输出不失真的范围, 表明此设计满足输出电压范围的设计标准。

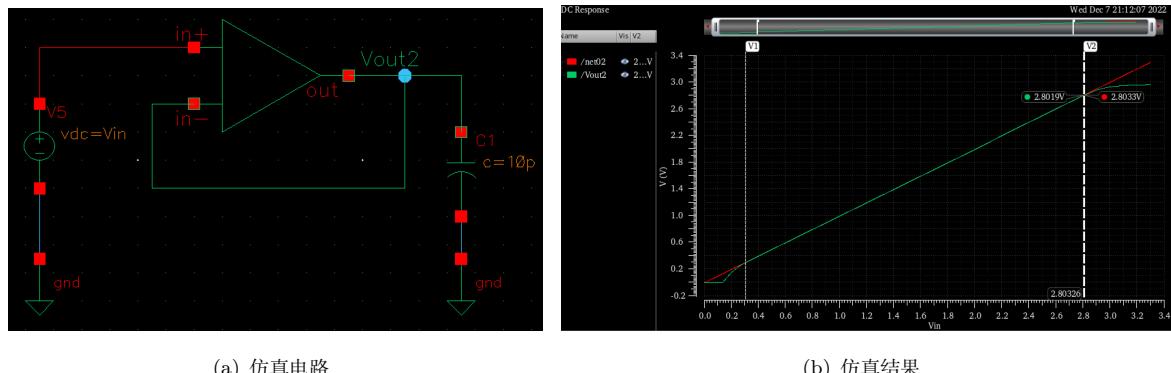


图 4.5.1: 仿真: 输入共模范围

4.6 压摆率 SR

仿真电路、仿真电流源以及仿真模式的设定如图4.6.1所示。其中脉冲电流源的高电压设为2V，低电压设为1V，周期设为 $10\text{ }\mu\text{s}$ ，上升和下降时间均设定为 10 n sec 。瞬态仿真3个周期的波形。

仿真结果展示在图4.6.2中。从总仿真结果看，运算放大器工作正常，输出能较好跟随输入。选取其中一个上升沿，选择其中输出电压最大速率上升的一段，可得 $SR = \frac{\Delta U}{\Delta t} = 6.966 \text{ V}/\mu\text{s}$ 。同理，选择其中一个下降沿， $SR = 6.758 \text{ V}/\mu\text{s}$ 。故 SR 满足设计需求。

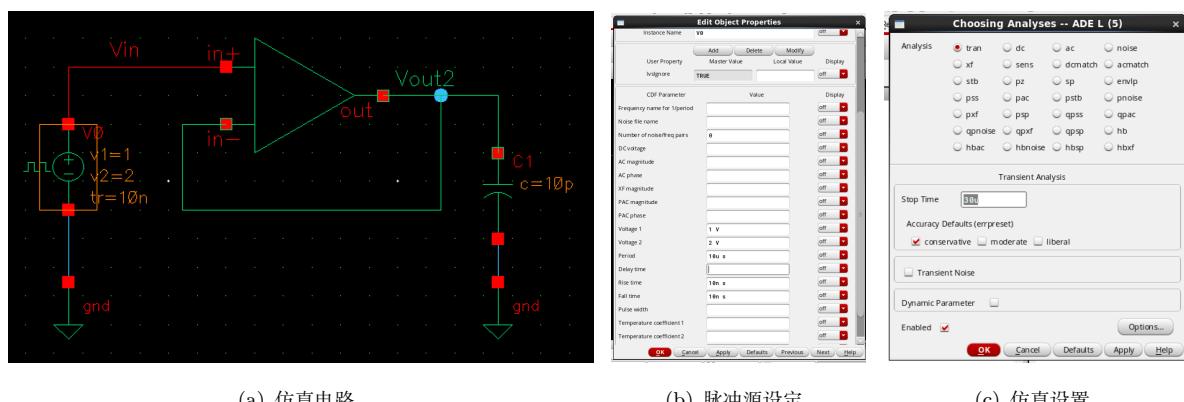
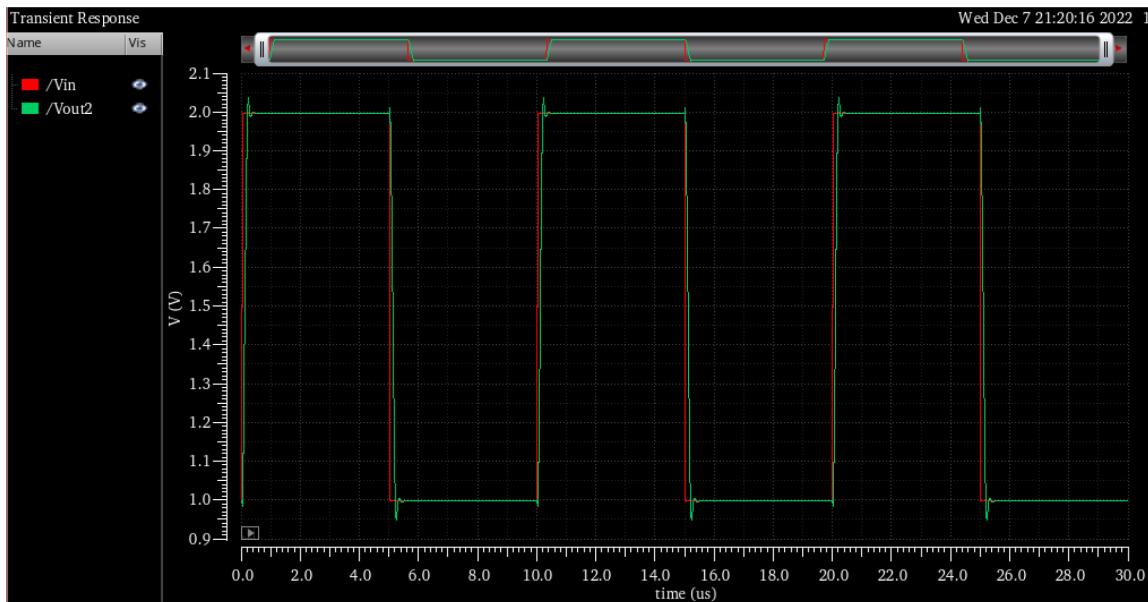


图 4.6.1: 仿真设定: 压摆率



(a) 仿真结果

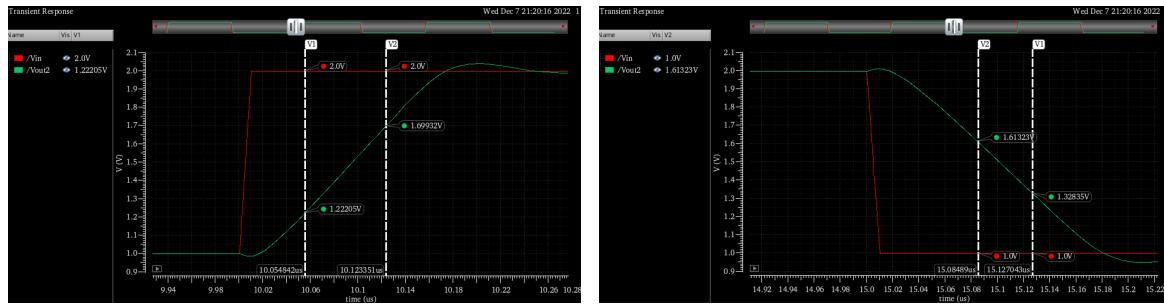
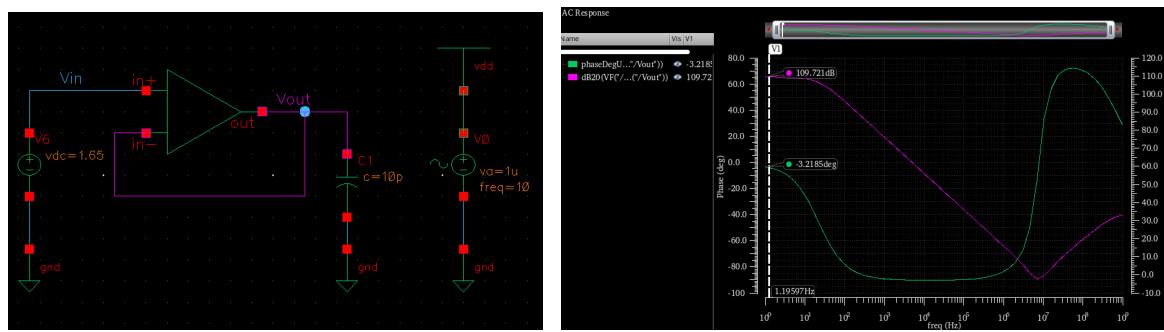


图 4.6.2: 仿真设定: 压摆率

5 电源纹波电压抑制比 PSRR

由于运算放大器采用单电源供电形式，故只需要测量 $PSRR+ = \frac{V_{dd,ac}}{V_{out,ac}}$ 即可。仿真电路以及仿真结果展示在图5.0.1中。低频时， $PSRR \approx 110$ dB。



(a) 仿真电路

(b) 仿真结果

图 5.0.1: 仿真: 电源纹波电压抑制比