

## 实验二十、运算放大器设计指标的验证优化与应用电路设计

### 实验目的:

(1) 对前次实验设计的运放核心电路, 构成反馈应用电路, 加载合理设计的激励信号, 通过适当的仿真验证方法, 验证所要求的各个设计指标;

(2) 构建一个增益为-10 的反向放大器, 培养学生运用理论知识, 进行电路前端设计、分析与解决问题的能力。

### 实验要求:

1. 实验过程中采用合理的输入激励, 利用常用的应用电路(如电压跟随器、反向放大电路等), 验证和完善核心电路的性能指标仿真和电路优化设计;
2. 核心电路的仿真与优化: **设计各种仿真方法和负反馈应用电路(如电压跟随器和反向器等电路), 加载合适的激励型号, 验证各项性能设计指标**, 分析误差主要原因, 误差较大的(超过 10%, PM 不满足  $45^\circ$ ) 修改设计参数后重新仿真, 直至符合设计指标。
3. 要求: 单个电阻不超过 10M 欧姆, 构建反向放大器, 增益约为-10; 仿真其闭环增益和输入、输出电压动态范围。

### 设计指标:

- (1) 优化设计: 修改器件参数和工作点, 使运算放大器核心电路较好的满足性能指标:

电源电压: 1.8V;

直流增益: >90dB;

单位增益带宽: ~80MHz;

负载电容: 2 pF;

输入电容: <0.2pF;

相位裕量: ~ $60^\circ$  ;

压摆率: > 25V/ $\mu$ s;

输出共模电平: 1V; (电压跟随器)

输出摆幅: > $\pm 0.3V$  ;

输入共模电压范围: ~ 0.7-- 1.3V; (电压跟随器)

功耗: <1.6mW;

提示: 采用电压跟随器结构, 瞬态仿真验证是否满足输入和输出电压范围、各管  $V_{DS}$  >过驱动电压, 从仿真结果报告得到输入电容值, 需要加上密勒效应使输入电容增加的数量。

大信号(转换速率、输入输出范围等)采用瞬态仿真, 增益、带宽、PM

采用 AC 仿真。

仅仿真 27° 和 tt 工艺角。

问题：为什么运算放大器核心电路输出级可以是电流源负载？输出电平如何确定？（注意：负反馈应用时输入虚短）

## 仿真结果分析：

仿真得到开环放大器的零极点是多少？

反向放大器的零极点是多少？3DB 带宽是否符合预期？误差多少？

参考以下理论分析：

$R_z$  和  $C_c$  串联组成频率补偿电路。

以下公式是仅有  $C_c$  频率补偿电路时推导出来的，可以用来近似地估算本实验电路的主极点和单位增益频率（下于第 2 极点频率，与补偿电路  $C_c$  有关）， $R_z$  较小时公式较准。

$$\text{单位增益频率 } \omega_u \approx \frac{g_{m1}}{C_c}, \text{ 应 } \omega_z > \omega_u$$

$$\text{单位增益频率 } f_u = \frac{\omega_u}{2\pi} \approx \frac{g_{m1}}{2\pi C_c},$$

单位增益频率即  $\beta=1$  时增益交点。

相位裕度  $60^\circ$  要求单位增益角频率小于第 2 极点角频率（约  $-135^\circ$  相移），

第2极点（也称为最小次极点或第1次极点） $\omega_{p2} > \sqrt{3}\omega_u \approx 2\omega_u$

$$\text{主极点 } \omega_{p1} \approx \frac{1}{R_{out1} g_{m1} (r_{op5} || r_{on1}) C_c},$$

这里  $R_{out1}$  是第一级放大电路的输出阻抗， $g_{m1} (r_{op5} || r_{on1})$  是输出级低频增益。

实际上，只要给出低频增益和单元增益带宽，主极点值就确定了。

实验报告中给出理论计算所得零极点（开环和闭环形成反相放大器），分析解释与仿真结果存在误差的主要原因。

(2) 采用所设计运放核心电路，设计一个低频增益(3dB)为-10 的反相放大电路。

画出 virtuoso 电路图，加载输入信号源。

## 实验报告要求

1. 完成实验后，申请教师或助教查看电路图和仿真与结果；

2. 实验完成后写出实验报告，需包含以下几部分内容：

- (1)、电路结构分析及公式推导；
- (2)、运放电路设计依据和步骤；
- (3)、原则上要对每个指标进行仿真，给出波形或数据图，写明**激励信号**，仿真设置，进行结果（包括电路性能指标和单位增益零极点）分析；对严重不满足设计指标的要进行误差原因分析；
- (4)、表格形式每个 MOS 管的宽长比（与电路图对应）；
- (5)、闭环应用电路低频增益(3dB)为-10 的反向放大电路，反馈系数=? 闭环增益仿真结果的主要误差原因是什么？
- (6)、（选）结合实验和理论教学中给老师的建议或意见；
- (7)、文档名：运放设计**学号姓名**；
- (8)、报告中给出设计和仿真结果文件存放的服务器路径。