

运放仿真方法整理

运算放大器的仿真包括直流工作点仿真(OP)、直流扫描仿真(DC)、交流小信号仿真(AC)、瞬态仿真(TRAN)等等。DC 仿真又包括共模输入和输出范围、输入失调电压仿真；AC 仿真包括开环增益、带宽、相位裕度、共模抑制比、电源抑制比等等；TRAN 仿真包括大、小信号摆率、过冲、建立时间等等。

1 直流扫描仿真

1.1 输入失调电压(V_{OS})仿真

图 1-1 所示为运放输入失调电压的实际测量方法。将运放接成单位负反馈的形式，并在正输入端加一个合适的直流电平 V_{CM} 。只要运放开环增益足够大则输出端电压即为输入直流电平加上输入失调电压。由此可很方便地测量得到 V_{OS} 。实际 CMOS 运放的 V_{OS} 约为 mV 量级，由非无限大开环增益引入的正、负输入端的压差为 $V_{CM}/(1+A)$ ，因此对于增益大于 10000(80dB)的运放该误差对 V_{OS} 测量造成的影响可以忽略。

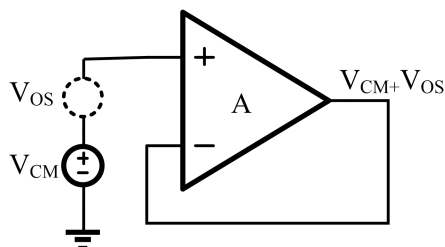


图 1-1 运放输入失调电压测量结构

必须注意的是，仿真得到的 V_{OS} 仅由偏置失配造成，属于系统失调。实际运放的输入失调电压的主要影响因素为元器件失配，而仿真器中会假设所有器件完全相同，因此仿真得到的失调电压并不能准确表征实际情况。

1.2 共模输入范围(ICMR)和输出摆幅(SW)仿真

将运放接成如图 1-2(a)所示的单位负反馈的形式，将正输入端的电压从 0 至 V_{DD} 进行直流扫描，观察输出端的电压变化曲线，即可观察该单位缓冲器的线性范围。在运放的线性工作区域内，直流扫描曲线的斜率为 45° ，即输出能够良好跟随输入；在线性范围之外，则曲线发生弯曲，如图 1-2(b)所示。

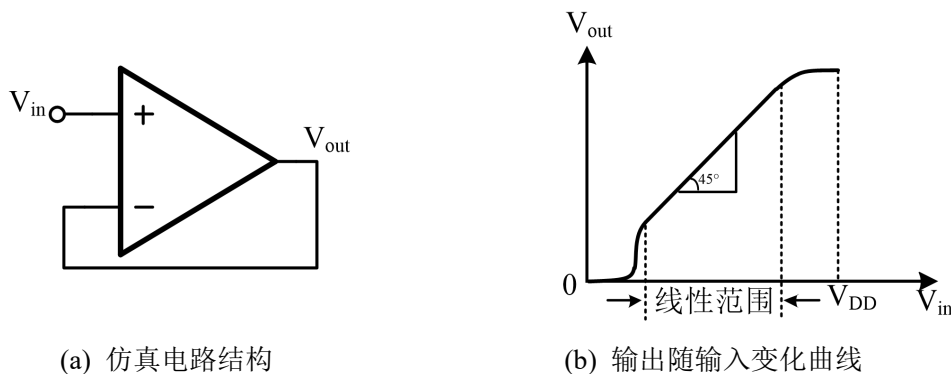


图 1-2 输入共模范围仿真

用该结构仿真得到的线性范围同时受到输入共模范围和输出摆幅的限制，因此无法用该结构精确测得ICMR。对于一般的运放，输出摆幅范围通常大于输入共模范围，故该方法能够大致预估输入共模范围。

图 1-3(a)所示的反相电压放大器增益为-10。将运放的供电电源改成 $\pm 0.5V_{DD}$ ，正输入端接 0 电位，从而给运放提供一个位于电源轨中间的共模输入电平，在此基础上仿真输出电压摆幅。在如图 1-3(b)所示的 DC 扫描曲线上的线性部分即为该供电条件下的输出电压摆幅，在此基础上整体加上 $0.5V_{DD}$ 即为单电源供电时的输出电压摆幅。

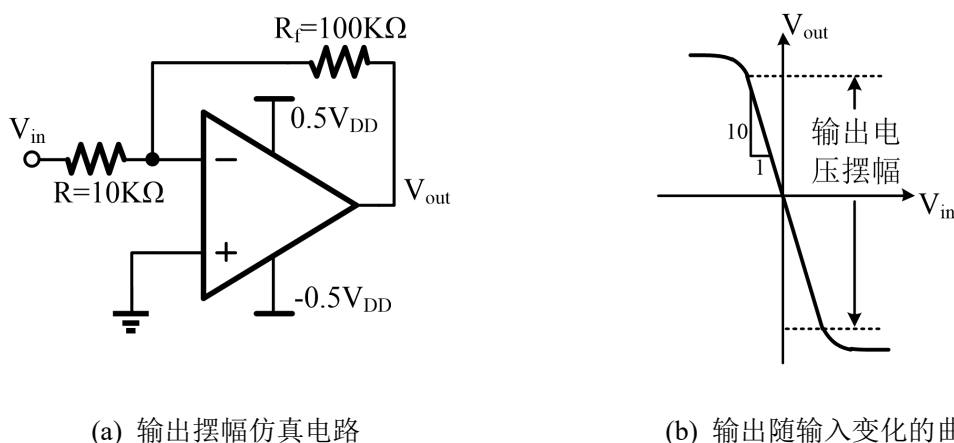


图 1-3 输出电压摆幅的仿真

2 交流小信号仿真

2.1 开环频率响应仿真

由于运放开环增益很大，且存在失调电压，故很难通过开环方法直接测量其增益。图 2-1(a)是一种测量测量开环 AC 参数的实用电路。其中 V_{CM} 为输入电压的直流分量，用以给电路提供静态偏置； v_{in} 为一个单位的交流小信号分量，是需要被放大的有用信号； R 、 C 构成低通反馈网络，且阻容值非常大，其截止频率远低于运放的主极点频率 ω_1 ，使得正、负输入端直流电平相等，且负输入端交流接地； C_L 为运放预期的负载。

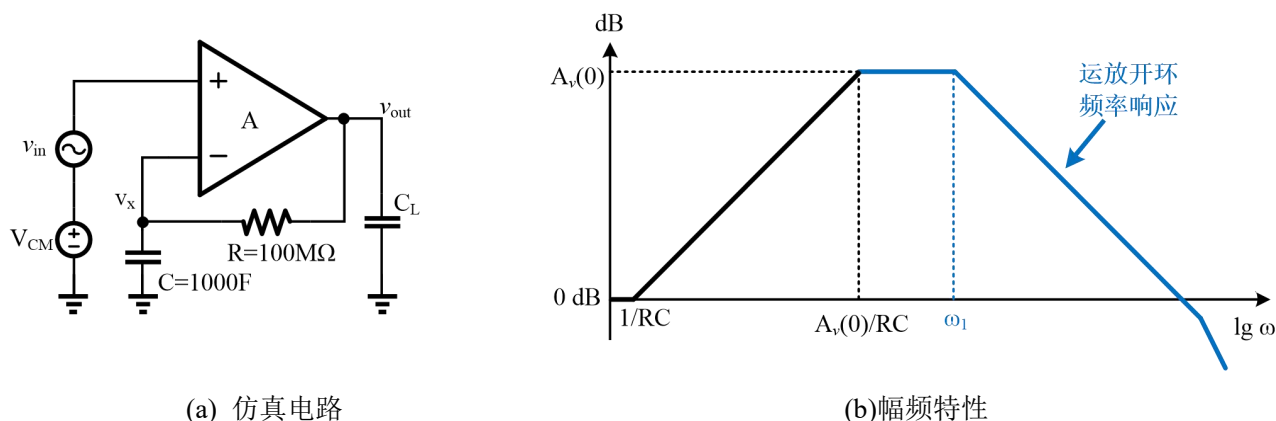


图 2-1 具有稳定直流偏置的开环特性仿真方法及其波特图

假设运放的开环传递函数为 $A_v(s)$ 。在图 2-1(a)中，系统的反馈系数为：

$$F(s) = \frac{1}{1 + sRC} \quad (2.1)$$

于是系统闭环传递函数表示为：

$$A_{v,close}(s) = \frac{A_v(s)}{1 + \frac{1}{1 + sRC} A_v(s)} = \frac{1 + sRC}{1 + A(s) + sRC} A_v(s) \quad (2.2)$$

该系统除了原运放的传递函数 $A_v(s)$ 本身的零极点外还存在一个极点和一个零点。零点频率为：

$$\omega_{z,close} = \frac{1}{RC} \quad (2.3)$$

为求极点频率，对 $A_v(s)$ 做单极点近似，并令式(2.2)分母为零，即

$$1 + \frac{A_v(0)}{1 + s/\omega_1} + sRC = 0 \quad (2.4)$$

假设令上式成立的极点频率远小于 ω_1 ，则可求得极点频率约为：

$$\omega_{p,close} \approx \frac{1 + A_v(0)}{RC} \approx \frac{A_v(0)}{RC} \quad (2.5)$$

图 2-1(a)所示电路中， $RC=10^{11}$ ，远远大于运放的低频增益 $A_v(0)$ ，因此上述假设成立。

根据式(2.3)、(2.4)所述的额外零极点，可以画出如图 2-1(b)所示的近似幅频特性曲线。在实际仿真过程中，必须将 RC 设置的足够大，从而令式(2.5)所示的闭环极点频率远远小于运放的开环主极点频率。可将频率扫描初值设置成大于 $\omega_{z,close}$ ，从而略去图 2-1(b)中左半部分，仅观察运放开环频率响应曲线。

2.2 共模抑制比(CMRR)仿真

根据共模抑制比 CMRR 的定义，可以先后单独仿真运放的差模和共模电压增益，作商得到运放的共模抑制比。一种更简单直接的仿真方法如图 2-2 所示。将运放接成单位负反馈结构，在输出端与负输入端之间加入一个单位的交流小信号激励 v_{cm} ，正输入端也加一个同样的信号； V_{CM} 为电路提供直流工作点，对该结构进行 AC 频率扫描即可求得 CMRR。

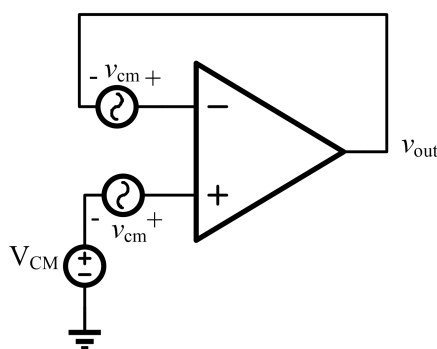


图 2-2 CMRR 的直接仿真结构

在计算交流参数时， V_{CM} 被视为短路，于是加在运放正端的电压为 v_{cm} ，而加在运放负端的电压为 $v_{out} + v_{cm}$ ，则运放输出交流电压幅度为：

$$v_{out} = A_{CM}v_{cm} + A_v[v_{cm} - (v_{out} + v_{cm})] \quad (2.6)$$

因此

$$\frac{v_{out}}{v_{cm}} = \frac{A_{CM}}{1 + A_v} \approx \frac{A_{CM}}{A_v} = \frac{1}{CMRR} \quad (2.7)$$

该方法仿真得到的是 CMRR 的倒数的幅频曲线，故采用 dB 为纵坐标时大小均为负值。可以使用“Calculator”中的“1/x”函数对仿真结果取倒数即可。

2.3 电源抑制比(PSRR)仿真

与共模抑制比的仿真类似，电源抑制比的仿真同样可以通过先后单独仿真差模增益和电源电压到输出的增益，再作商求得电源抑制比 PSRR。利用图 2-3 所示的结构可以更方便地获得结果。将运放接成单位负反馈形式，并在电源电压上添加一个单位的交流分量 v_{dd} ，观察运放输出端的频率响应即可求得 PSRR。

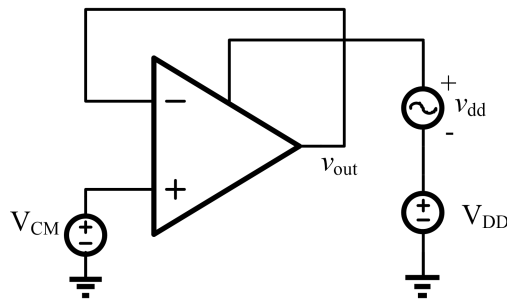


图 2-3 电源抑制比的直接仿真结构

运放的输出交流电压可以表示为：

$$v_{out} = A_v(0 - v_{out}) + A_{DD}v_{dd} \quad (2.8)$$

其中 A_v 为差模电压增益， A_{DD} 为电源电压至输出端的增益。上式变形为：

$$\frac{v_{out}}{v_{dd}} = \frac{A_{DD}}{1 + A_v} \approx \frac{1}{PSRR} \quad (2.9)$$

对(2.9)式仿真结果取倒数即可观察 PSRR 的幅频特性。对于负电源电压 V_{SS} 的仿真只需将交流量 v_{ss} 加在负电源电压上并采用相同的方法即可。

3 瞬态仿真

转换速率：如果输入阶跃足够大，运算放大器将因为没有足够的电流为补偿和负载电容充放电而摆动。在输出的上升或下降期间，运放输出电压对时间的变化率，即输出波形的斜率为摆率。

建立时间 (Setup time)：表示大信号工作时运放性能的一个重要参数，是指运放接成跟随时，输入阶跃大信号 (V_i)，输出电压从开始响应到稳定值为止的时间。稳定值的误差范围一般为 $0.1\%V_i$ 。建立时间

既表示了运放的转换速率，又表示了其阻尼特性（与 Phasemargin 有关）。

转换速率和建立时间的定义可参考图 3-1 所示

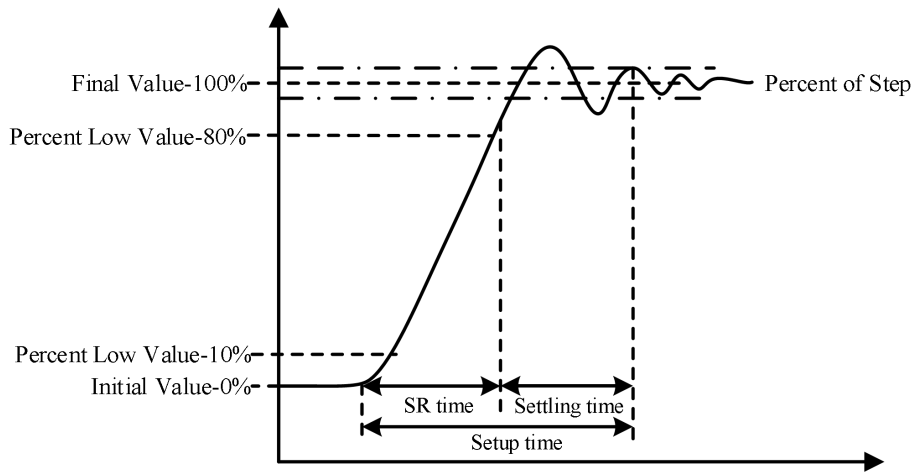


图 3-1 电路瞬态响应曲线示意图

对运放的建立时间和转换速率进行仿真时，需将运放接成单位负反馈结构，然后在运放的正向输入端接一个大的阶跃信号，仿真电路图如图 3-2 所示

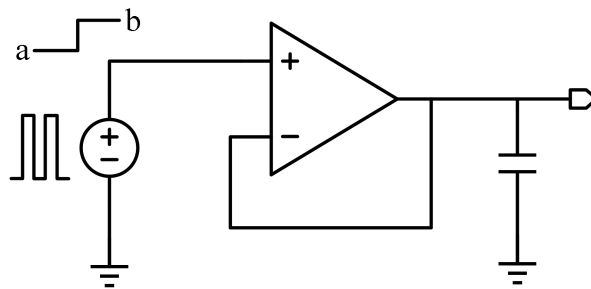


图 3-2 瞬态仿真电路图