

# 《模拟集成电路设计实验》指导

中科大微电子学院 黄 鲁 编写

## 实验六、运算放大器性能指标验证与应用电路设计

——实验参考

### ● 实验目的：

- (1) 对前次实验设计的开环运放 OP 电路，加载合理的激励信号，并采用合适的仿真方法，验证输出转换速率、输入电容等设计指标；
- (2) 设计 2 种负反馈应用电路，获得电路的主要性能，理解虚短概念，验证开环 OP 输出直流电平能通过外部电阻反馈与输入共模确定。

### ● 实验内容：

- (1) 开环运放 OP 单元的输出转换速率和输入电容的验证；
- (2) 构建电压跟随器，获得输入输出变化范围、带宽等性能指标；
- (3) 构建电压增益为-10 的反相放大器，获得增益、带宽等性能指标。

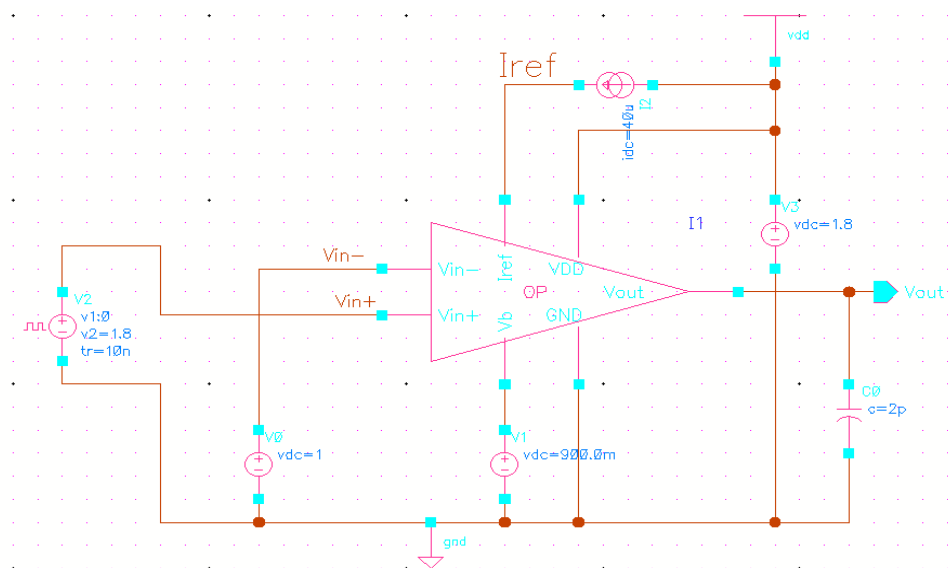
### ● 实验参考步骤

#### 1) 开环运放 OP 转换速率设计指标的验证

转换速率设计指标： $SR > 25V/\mu s$ 。

输出转换速率属于大信号，采用瞬态分析。

创建 OP 转换速率的测试单元 OPtestSR。

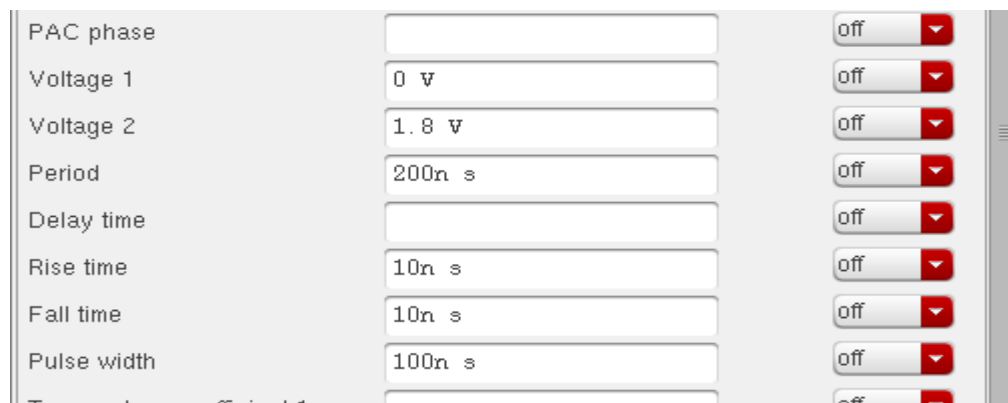


输入激励为：

Vin+到 GND，加载 analogLib 库中的 vpulse 脉冲信号源；

Vin-到 GND，加载 vdc 直流电压源，DC voltage = 1 (V)。

输入激励 **vpulse** 波形属性设置如下图：



为何输入脉冲的高电平和低电平宽度设为约 100ns？

原因：若输出 Vout 的转换速率 SR 为 25V/us，

则 Vout 从 0→1.8V 的时间不低于  $1.8 / 25(\text{us}) = 72\text{ns}$ 。

进入 ADE L ( ) 仿真设置窗口，设置 tran 仿真 600n (s)；

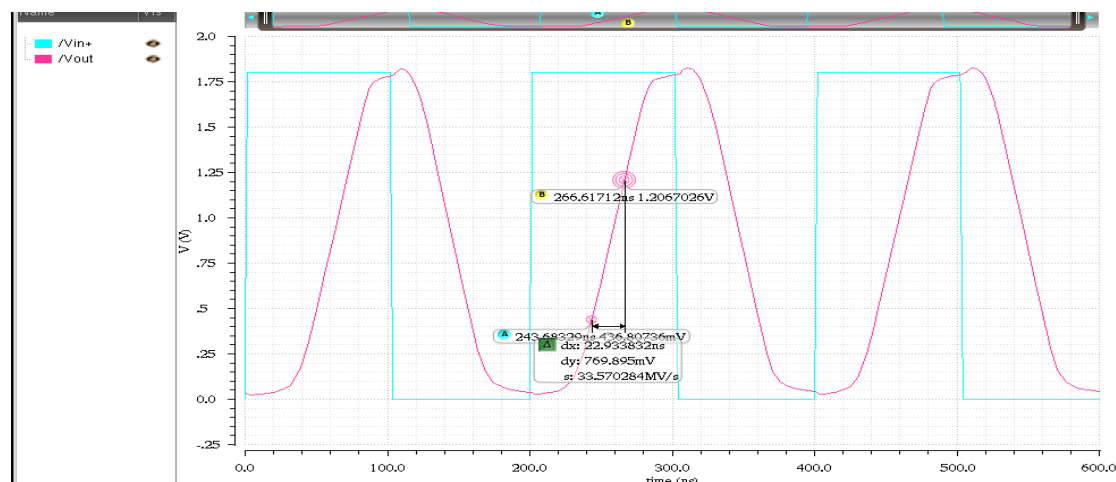
选定 Vin+和 Vout 为仿真波形的显示输出信号。

若希望看到 OP 内部节点的信号波形，则 **E** 进入 OP 子电路，点选相应信号线网。

仿真后测量 SR 转换速率：

在 Vout 波形上升沿的线性段，任选第一点 **A** 键和第二点 **B** 键，A 点和 B 点不重叠即可。

波形图中显示 A 和 B 两点的 dx 时间差(dt)，dy 电压差(dV)， $s=dy/dx=dV/dt$  是边沿的上升或下降速率；边沿直线段上的任意 A 和 B 两点不影响比值 s。



在下降沿的线性段，也任意选两点 A 键与 B 键，求下降沿的比值 s。

比值  $s = dV/dt$  的量纲为 MV/s, 与转换速率的设计指标 V/us 实际上是一致的。

OP 转换速率 SR 取上升沿和下降沿最小值  $s$ , 核对是否符合设计指标。

若将输出的斜坡上升大幅度信号近似看作为大幅度的正弦信号的上升沿, 则最大斜率为:

$$V_{out} = A_m \sin \omega t, \quad A_m = V_{dd} = 1.8V$$

$$s = \frac{dy}{dt} = \left. \frac{dV_{out}}{dt} \right|_{t=0} = V_{dd} \omega = 2\pi f V_{dd}$$

即等效的正弦大信号带宽约为

$$\frac{s}{2\pi V_{dd}} \approx \frac{s}{11.3}$$

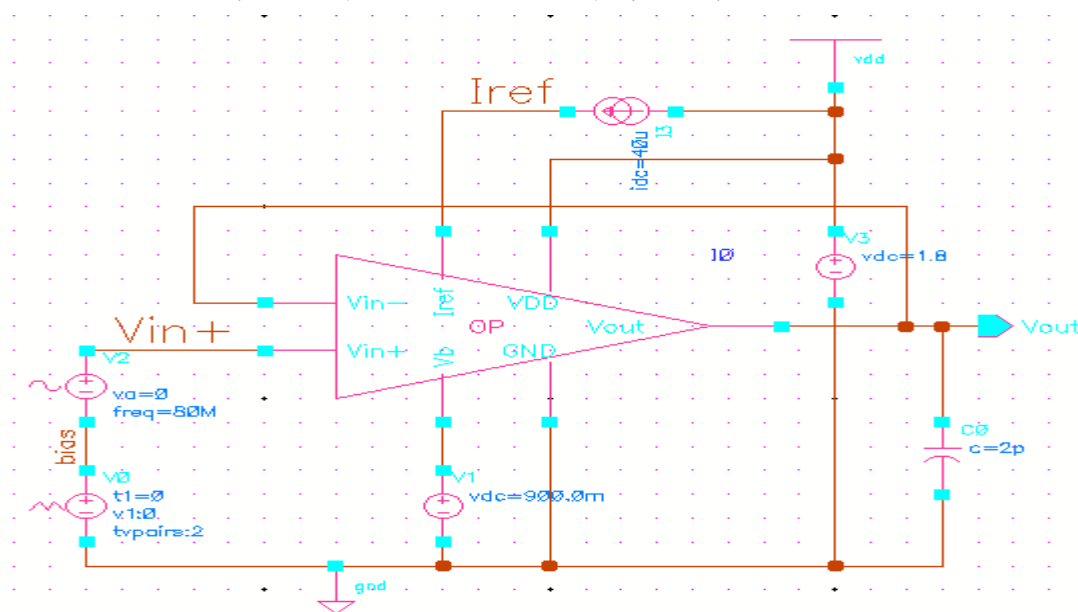
例如上图  $s$  约为 33MV/s, 则电路大信号带宽约为 3M Hz, 这表明电路的大信号带宽远小于小信号带宽。如同跑步, 步幅大则频率小, 因此高速数字信号传输都是采用幅度比电源电压小很多的低摆幅信号。

关闭与 OPtestSR 相关的各个窗口, 仅保留 Library Manager 和 Virtuoso CIW 窗口。

## 2) 设计电压跟随器, 获得输入输出范围、带宽性能。

创建 volt\_follower 单元。

提示: 可由先前某个 OP 性能测试电路拷贝后改造。



电压跟随器 volt\_follower 电路图

Vin+输入端的两个串联电源器件 V2 和 V0, 分别是 vsin 正弦信号源和 vpwl 斜波电压源。

设置器件 V2 正弦信号幅度 Amplitude 为 0，即 V2 (vsin 单元) 短路；  
无需关注 V2 属性表中的 AC magnitude，此参数只有当 AC 仿真时才有效。

### A、获得电压跟随器输入输出范围

设置 V0 为电压源 vpwl，加载 20ms 时间从 0→1.8V 的斜坡电压，相当于加载约 8Hz 的低频输入信号。

Cell Name	vpwl	
View Name	symbol	
Instance Name	V0	
	Add	Delete
User Property	Master Value	Local Value
Ivsignore	TRUE	

CDF Parameter	Value
Frequency name for 1/period	
Number of pairs of points	3
Time 1	0 s
Voltage 1	0 V
Time 2	20m s
Voltage 2	1.8 V
Time 3	30m s
Voltage 3	1.8 V

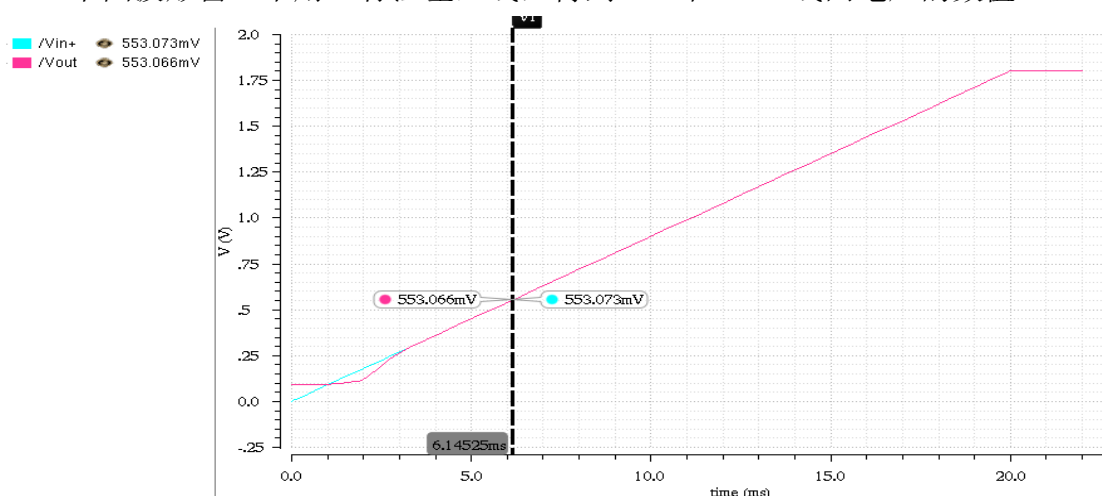
进入 ADE L ( ) 仿真设置窗口，

设置 tran 仿真，Stop time = 22ms；

Setup Outputs 列表中显示 Vin+、Vout；

保存电路后仿真，

下图波形窗口中用 V 标注垂直线，得到 Vin+ 和 Vout 线网电压的数值：



可见，电压跟随器的输入 Vin+ 上限电压约为 1.8V；

电压跟随器的输入 Vin+ 下限电压基于所允许的跟随误差，上图显示若允许误差 < 10μV，输入下限为 553mV。

判断谐波信号等效于正弦频率  $f$  的公式如下：

设正弦信号  $V_{sig} = V_{DD} \sin \omega t$ ，正值范围为  $0 \sim V_{DD}$

$$\text{转换速率 } SR = \left. \frac{dV_{sig}}{dt} \right|_{\max} = V_{DD} \omega = 2\pi V_{DD} f = \frac{V_{DD}}{t}$$

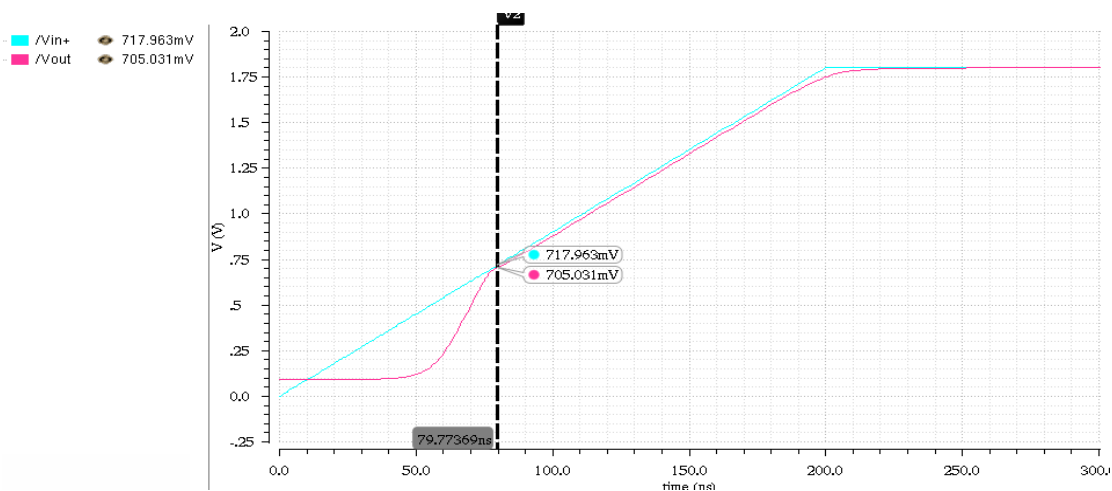
$$\therefore \text{上升时间 } t = \frac{1}{2\pi f}, \text{ 或 } f = \frac{1}{2\pi t}$$

跟随器误差与输入频率有关。

依据下式可知，将信号源  $V_0$  设置为 Time2=200n (s) 的  $0 \rightarrow 1.8\text{V}$  上升斜坡，相当于加载约 800KHz 的正弦输入信号，

Number of pairs of points	3
Time 1	0 s
Voltage 1	0 V
Time 2	200n s
Voltage 2	1.8 V
Time 3	300n s
Voltage 3	1.8 V

保存后，将 tran 仿真改为 Stop time =300n (s)，仿真。



电压跟随器输入  $V_{in+}$  的下限电压比低频时抬高，上图显示输入下限约为 700mV；电压跟随状态下输出与输入之间有超过十几至几十 mV 的差值，是由于高频相移的缘故（可看到在仿真的后段时间即输入不变时段  $V_{out}=V_{in+}$ ），导致闭环输入的虚短（跟随特性）变差；总之，电压跟随器在高频时输入输出范围减小，跟随特性变差。

结论：采用电压跟随器方法获得的输入输出范围，以及闭环的输入虚短特性与信号频率有关。低频时输入输出范围增大，闭环输入的虚短（电压跟随器的输出跟随）特性好；高频时输入输出范围减小，虚短（跟随）特性变差。

**B、电压跟随器的频率响应和 3dB 带宽**

对 volt\_follower 进行 ac 仿真：

在电路图窗口，检查器件 V2 输入正弦信号是否 AC magnitude = 1 (V)，  
 先前设置的 Amplitude 和 Frequency 对 ac 仿真没有影响，无需改变。

将 V0 改为 vdc 直流电压源，DC Voltage=1 (V)；

在 ADE L ( ) 仿真设置窗口，选 AC 仿真，扫描频率范围 1~300MHz。

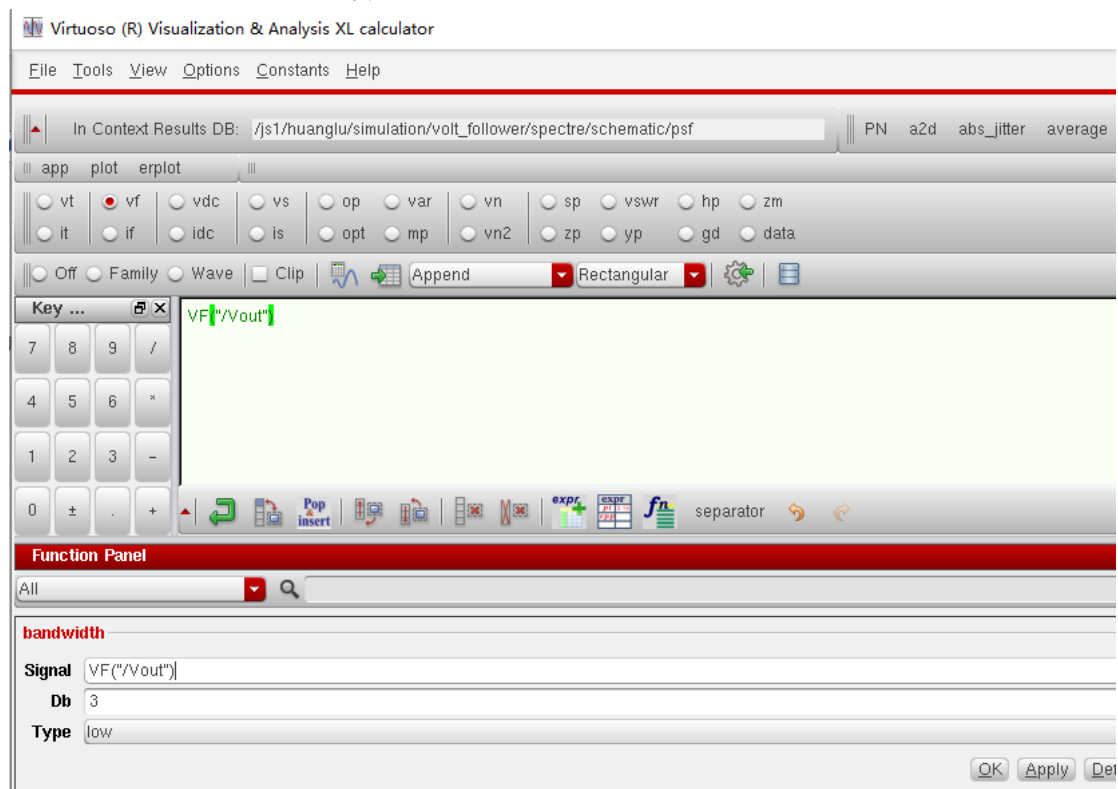
起始扫描频率 Start 不要为 0，否则频率轴不能按 Logarithmic 尺度显示；  
 Stop 频率要远大于单位增益频率。

在 ADE L ( ) 窗口 Analyses 面板中，仅选 ac 仿真，不选原先的 tran 仿真；

ac 仿真后获得电压跟随器 volt\_follower 电路的幅频特性曲线。

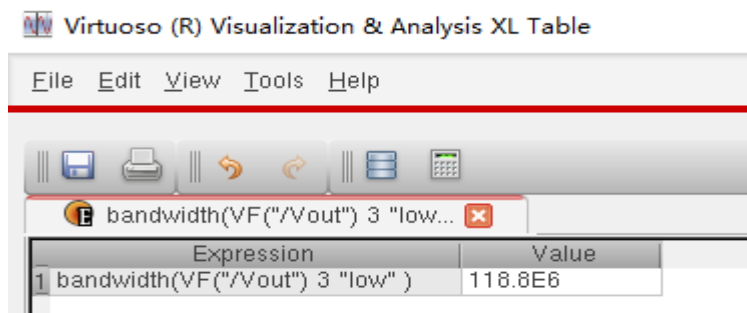
在波形窗口，“Tools”→“Calculator”

求 Vout 的 3dB 带宽：vf 后电路图中选 Vout 线网，或参考最下面的截图（即在 OK 后的截图）键入计算公式也可，



OK 后：

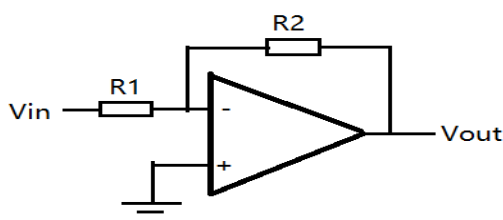




电压跟随器的 3dB 带宽比开环运放 OP 的单位增益带宽大，为什么？

关闭与 volt\_follower 相关的各个窗口，保存测试电路和仿真结果的截屏。

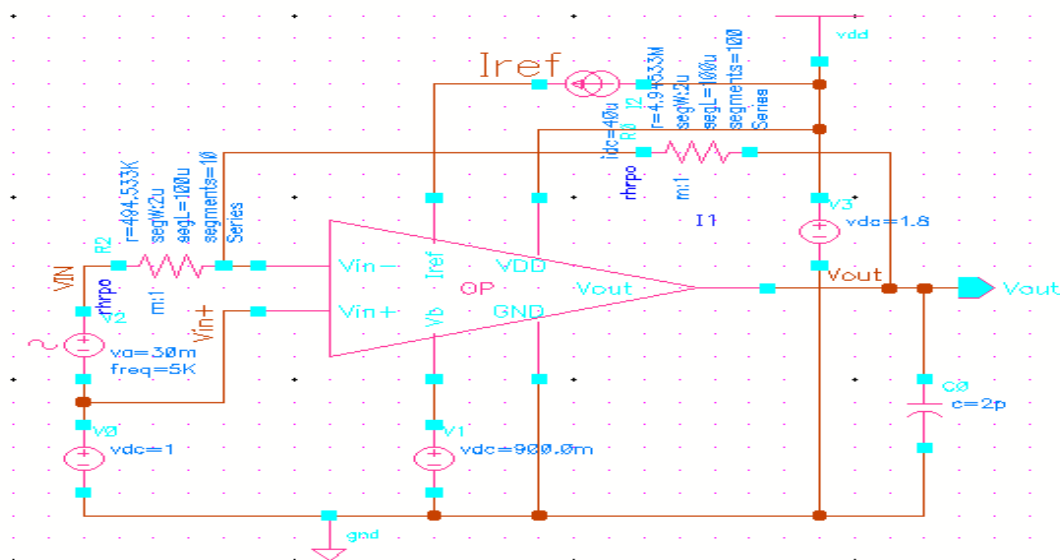
### 3) 设计一个增益为-10 的反相放大器 OPamp\_10 单元:



理想反相放大器增益为  $-R2/R1$ ，上图中接“地”是指交流地。

在 Library Manager 窗口，从 OPtest 电路图 Copy 改造成为 OPamp\_10 单元，如下图所示。

标注 VIN、Vin+、Vin-和 Vout 线网名。



OPamp\_10 电路图

电阻采用 smic18mmrf 库中的 rhrho 高阻，限制单个电阻不超过 10M 欧姆。

增益为-10 的反相放大器 OPamp\_10 增益为 10，若 OP 的单位增益频率为 80MHz，则反相放大器 OPamp\_10 的 3dB 频率约为 8M (Hz)。

设输入正弦信号源  $v_{sin}$  (器件名 V2):

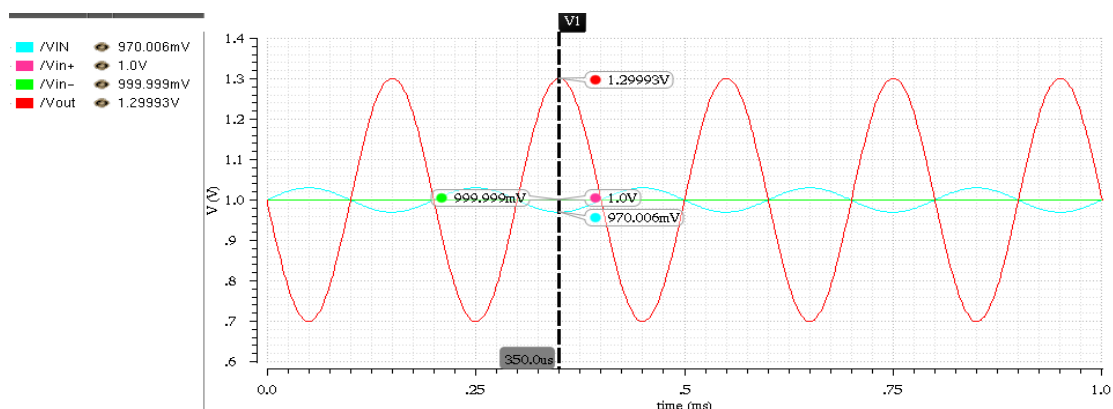
Frequency = **5K** (Hz), Amplitude = **30m** (V)。

输入设为 30mV 是为了放大-10 倍后输出不会失真，方便查看正常波形。

V0 是输入直流偏置，仍为 DC Voltage = 1 (V) 的直流电压源 vdc 单元。

在仿真设置窗口，设置 tran 瞬态仿真，Stop Time = 1m (s)，

Setup Outputs 选 VIN、Vin+、Vin- 和 Vout。

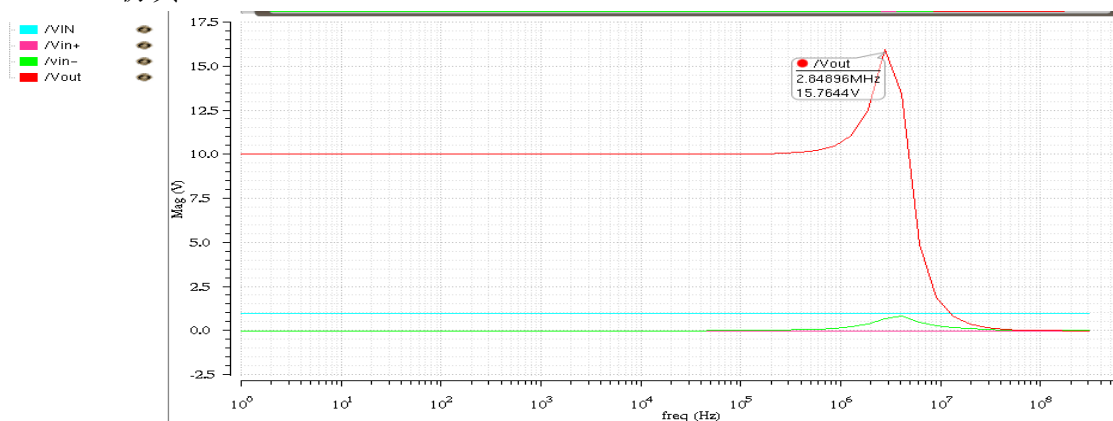


OPamp\_10 仿真波形中正弦波输出 Vout 幅度 0.3V，低频增益正确。

并表明 OP 输出的直流电平是通过外部电阻反馈与输入共模电平确定。

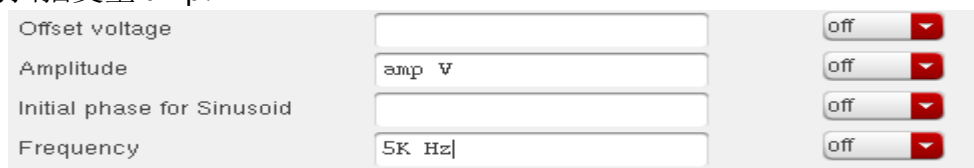
#### A、OPamp\_10 反相放大器的低频增益和 3dB 带宽

ac 仿真:



#### B、OPamp\_10 反相放大器的输入输出范围

在 OPamp\_10 电路图中，将器件 V2 激励 ( $v_{sin}$  正弦信号源) 幅度 Amplitude 设为扫描变量 amp:



Check and Save 电路。



在 ADE L ( ) 仿真设置窗口，设置变量 **amp**, Value 为 10mV。  
Outputs 栏 Plot 列中仅保留 VIN 和 Vout 有效，使显示更清晰。

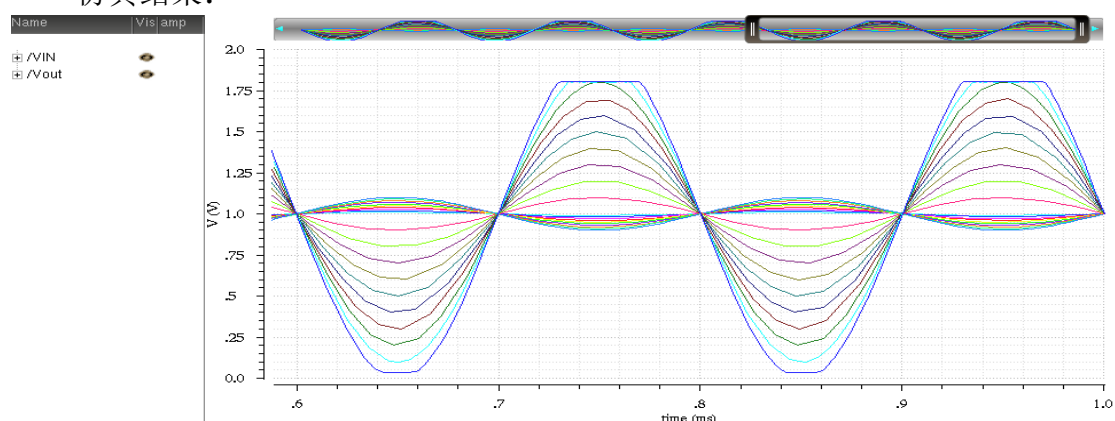
设置瞬态仿真对信号幅度 **amp** 参数进行扫描分析：

在 ADE L()仿真设置窗口，“Tools” → “Parametric Analysis”，

扫描变量 **amp**,

设置扫描 10mV ~100mV，Total Steps=10 条，每条对应输入间隔幅度 10mV。

仿真结果：



Vout 输出范围几乎轨到轨（电源到地），输出波形底部电压约为 0.1V，顶部约为电源电压，接近顶部和底部时输出正弦波有失真。

分开波形，点左侧/Vout 前+，展开得到扫描 **amp** 数值的显示眼，依据 Vout 不失真波形的 **amp** 近似值（闭眼试一试），从 VIN 得到输入范围。

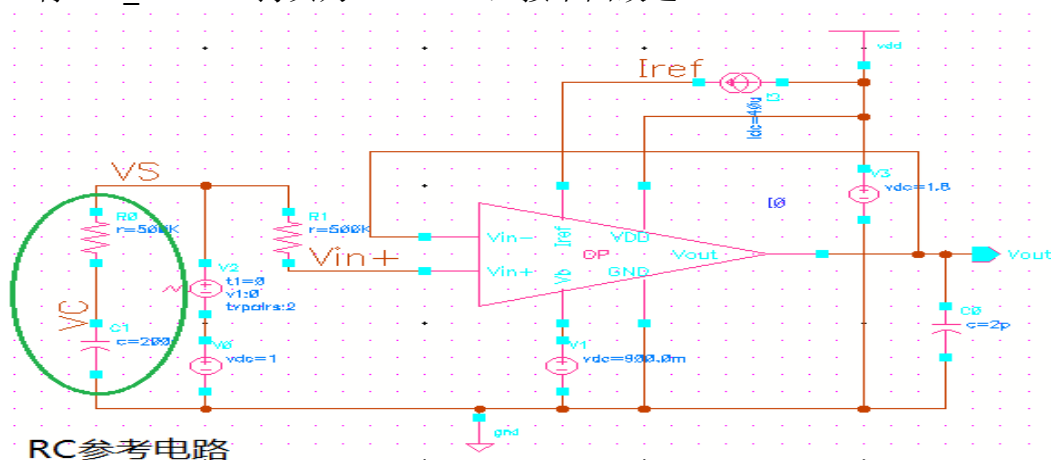
与 OP 对比可知，由于闭环，除非幅度因受限削波，不同幅度输入时反相放大器增益变化不大。

#### 4) OP 输入电容 Cin 的仿真

Cin 设计指标：< 0.2pF。

输入电容涉及多个寄生电容，而且由于密勒效应，总的输入电容 Cin 还与输入级的增益有关。下面通过与标准电容响应比较的方法，直观定性验证输入电容是否符合设置指标。

将 volt\_follower 拷贝为 OPtestCin，按下图改造。



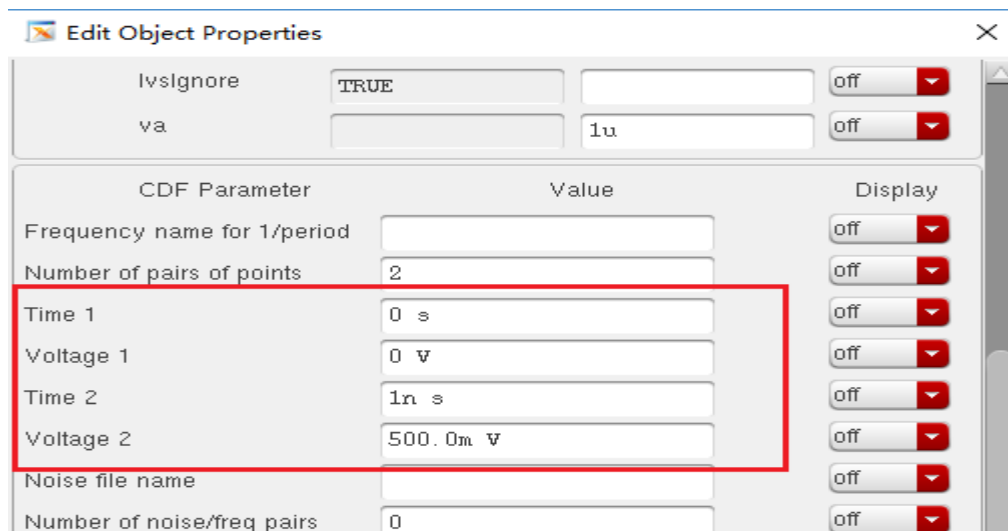
OP 输入电容的定性测试电路

测试电路的要点是构建一个位于上图左侧的 RC 参考电路。

直流电源 V0 串联脉冲电源 V2 形成阶跃信号源，V0+V2 同时输入给左侧的 RC 参考电路（R0 串联 C1）和输入电容测试电路（R1 与其后输入端的寄生电容）。

直流输入电源 V0 的 DC 电压 = 1V；

输入信号源 V2 改为 vpwl 脉冲电压源：



用 L 或 “Create Wire Name”，键入 VS、Vin+、RC 参考电路的 VC 线网名。

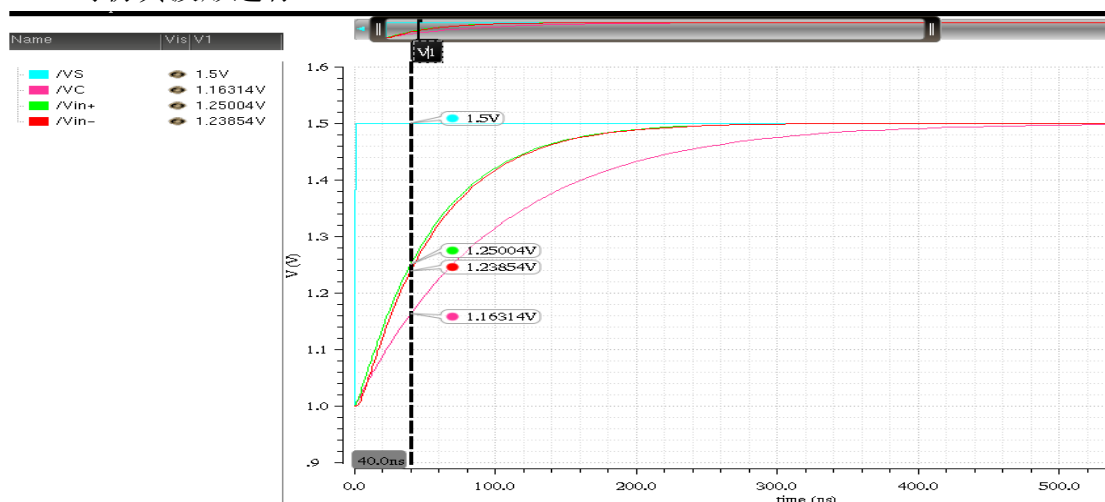
R0=500K 欧电阻，C1=200f F 电容，形成时间常数为 100ns 的 RC 电路。

设置瞬态仿真：

Stop Time = 1 $\mu$ ，Accuracy 仿真精度为 “conservative”；

Setup Outputs 在电路图中选 VS、VC、Vin+和 Vout 线网。

对仿真波形进行 Marker:



OP 输入电容指标的定性判断

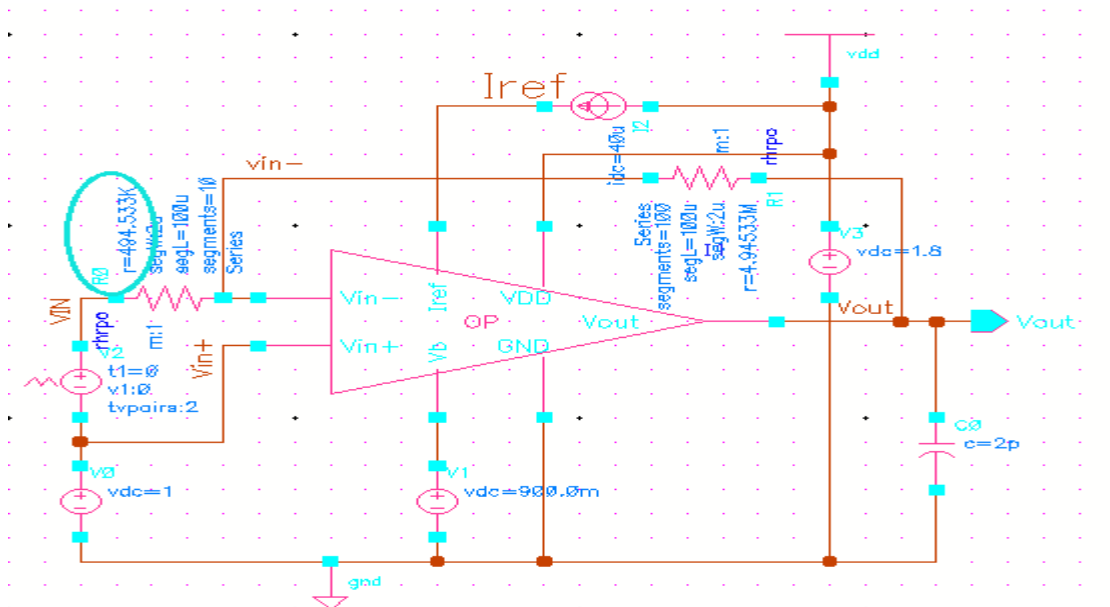
由于 VC（参考电路的 C1=0.2pF）上升慢于 Vin+。

因此 OP 电路的  $C_{in} < C = 0.2\text{pF}$ ，满足输入电容的设计指标。

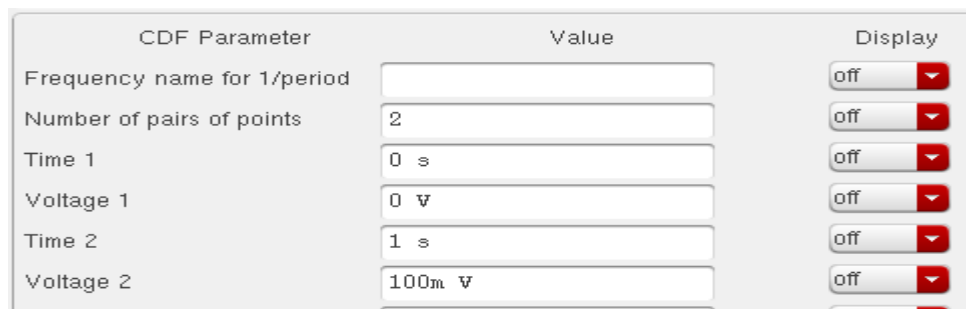
以下实验选做：

(1) 反相放大器的输入阻抗

在 Library Manager 窗口，将 icbaslib 库中的 OPamp\_10 单元拷贝为 OPamp\_inz\_test 单元，进行改造如下：

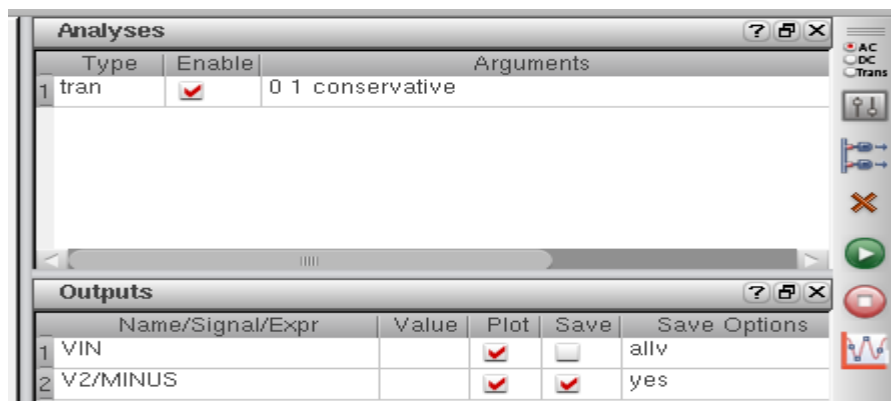


将电路中 V2 从正弦激励  $V \sin$  改为多线段电压源  $vpwl$ ，如下设置：

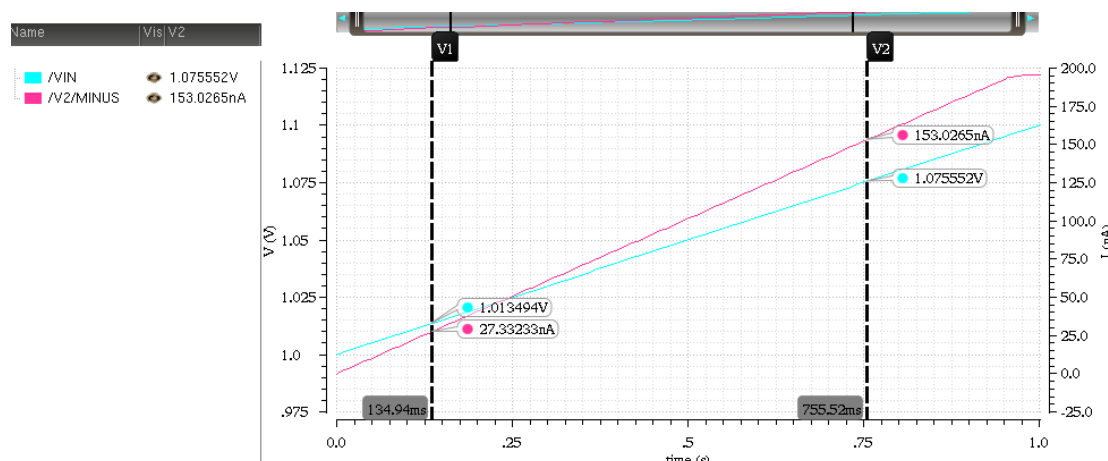


设置 1 秒上升斜坡，即设输入信号为低频。

ADE L()仿真设置窗口参照下图，Setup Outputs 时在电路中选 V2 的负端：



瞬态仿真结果为：



在两点进行 **V** 标记，获得输入端 VIN 线网电压和相应电流值。

输入阻抗计算： $R_{in} = \text{两点电压差/电流差} = 494K \Omega$

与电路图上 R0 阻值相同，符合理论预期。

此电路为电压电流负反馈，

总输入阻抗 = 电路图上 R0 串联闭环输入阻抗，闭环输入阻抗很小忽略不计。

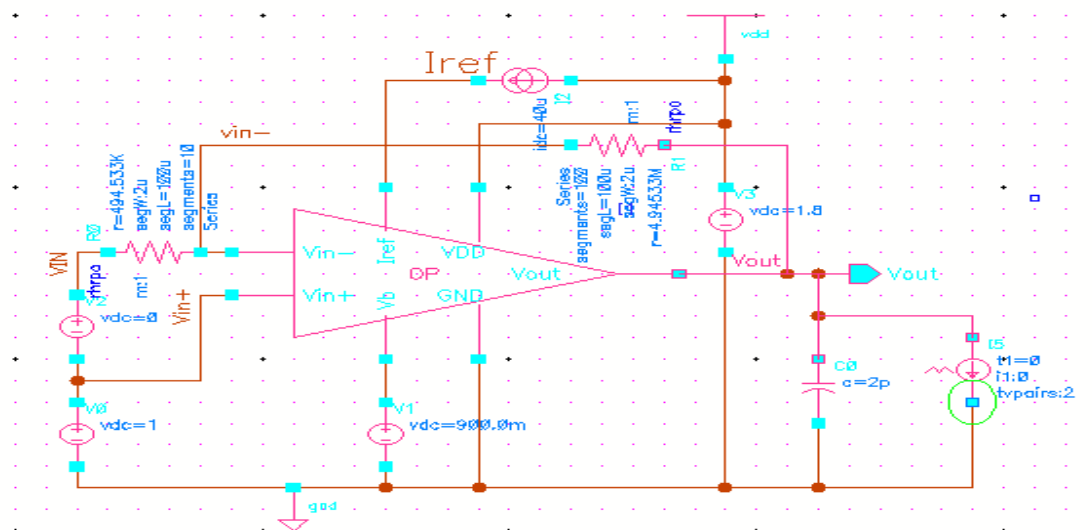
关闭与 OPamp\_inz\_test 相关的窗口。

## (2) 反相放大器的输出阻抗

将 OPamp\_inz\_test 拷贝为 OPamp\_outz\_test 单元。

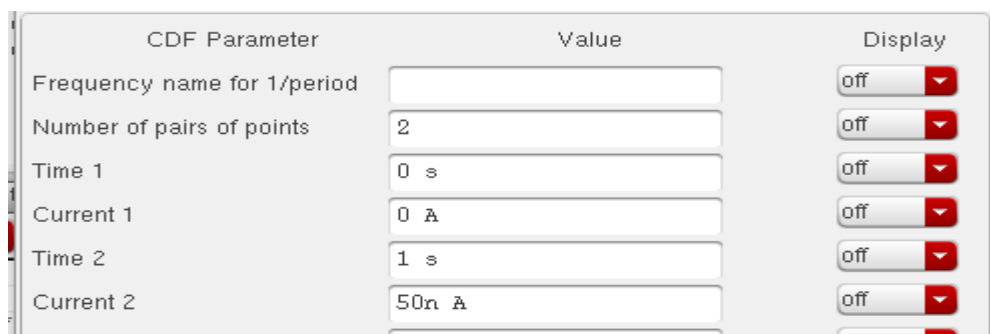
在 OPamp\_outz\_test 电路图将器件 V2 信号源改为 vdc，DC Voltage = 0；

在输出端添加电流源 ipw1 脉冲电流源。



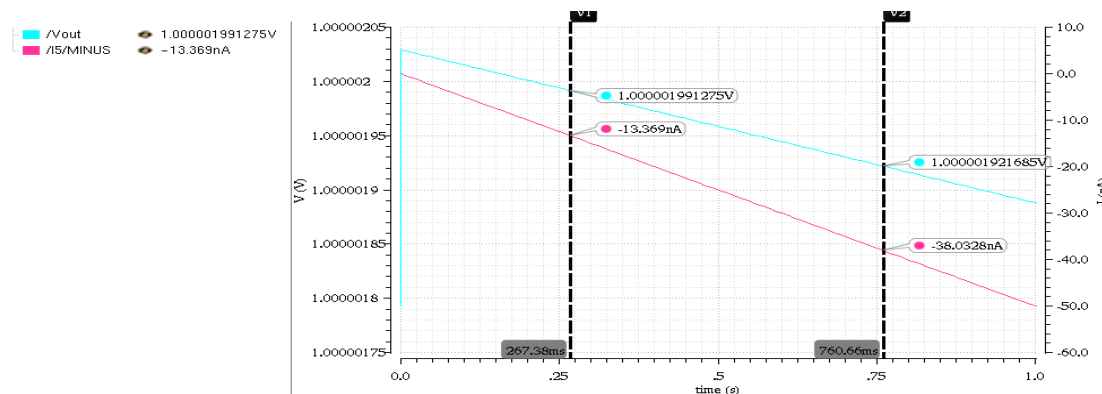
测输出电阻的 OPamp\_outz\_test 单元

设置电路图中右侧的电流源 ipw1：



仿真设置窗口 **Setup Outputs** 时，在电路中选脉冲电流源的箭头输出端，参见先前 OPamp\_outz\_test 单元电路。

瞬态仿真: Stop Time = 1 (s):



输出阻抗 =  $dv/di = 3\Omega$ , 检测电压的负反馈输出阻抗很小, 符合预期。  
关闭与 OPamp\_outz\_test 单元相关的窗口。

### (3) 反相放大器的输入等效噪声电压功率谱

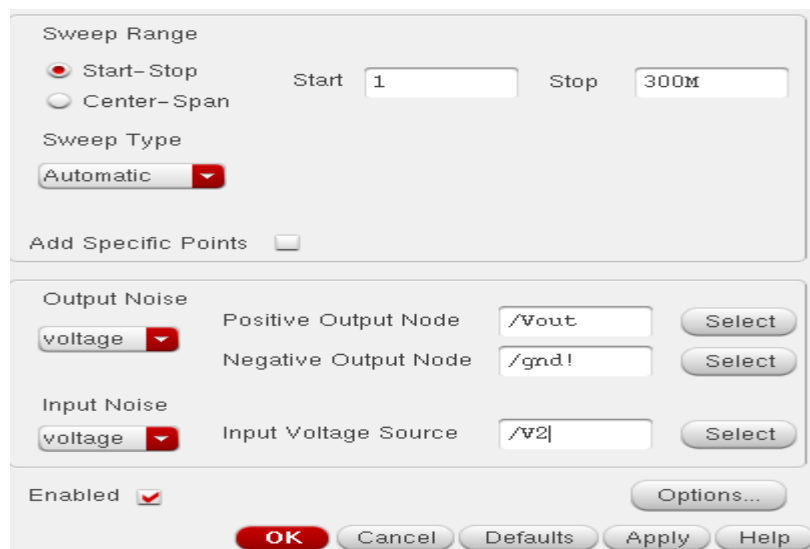
打开 OPamp\_10 单元。

在 ADE L() 仿真设置窗口, "Session" → "Load State...";

选择 Choose Analyses 为 "noise".

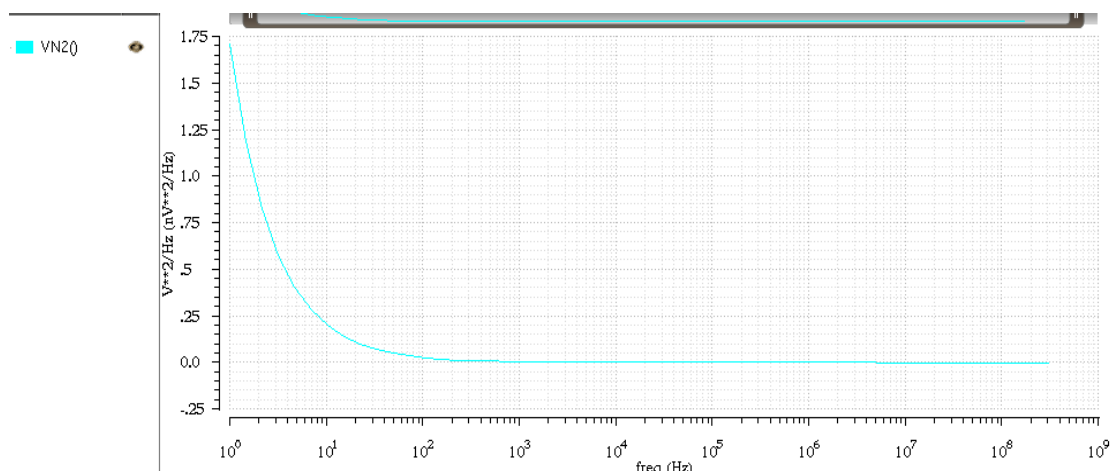
Sweep Variable 为 Frequency 有效,

Sweep Range 为 Start=1, Stop 为 **300M** (Hz),



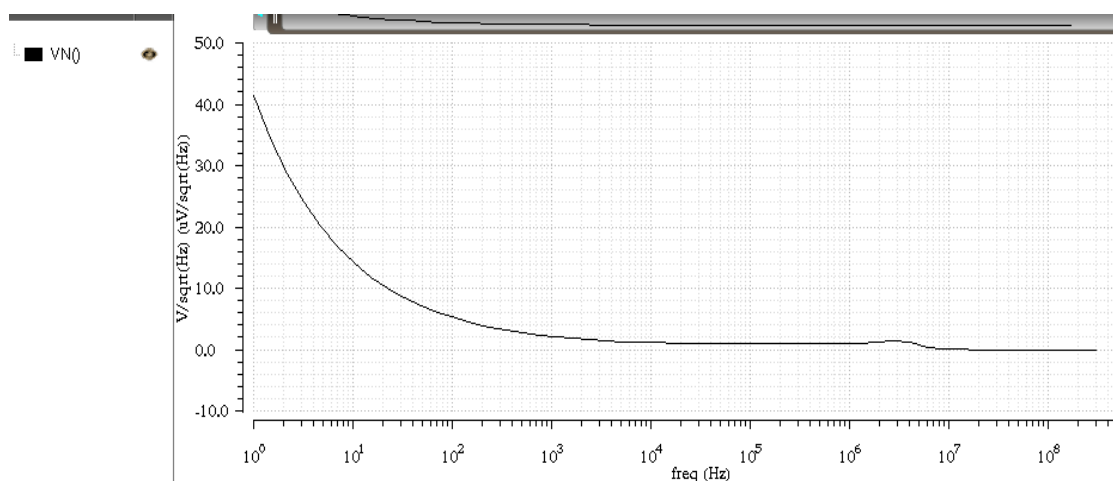
Output Noise 选 Voltage, Positive Output Node 和 Negative Output Node 格中, 可点 Select 后在电路图中点选线网, 也可直接键入;  
Input Noise 选 Voltage; Voltage Source 为 V2, 即等效输入噪声加在放大器输入端上。

ADE L()仿真设置窗口中仅选 noise 仿真,  
Setup Outputs 任选一个或多个线网。  
仿真得到输出噪声电压“功率”谱 VN2():



输出噪声电压“功率”谱 VN2() 纵轴单位为  $(nV * *2) / Hz = (nV)^2 / Hz$ 。

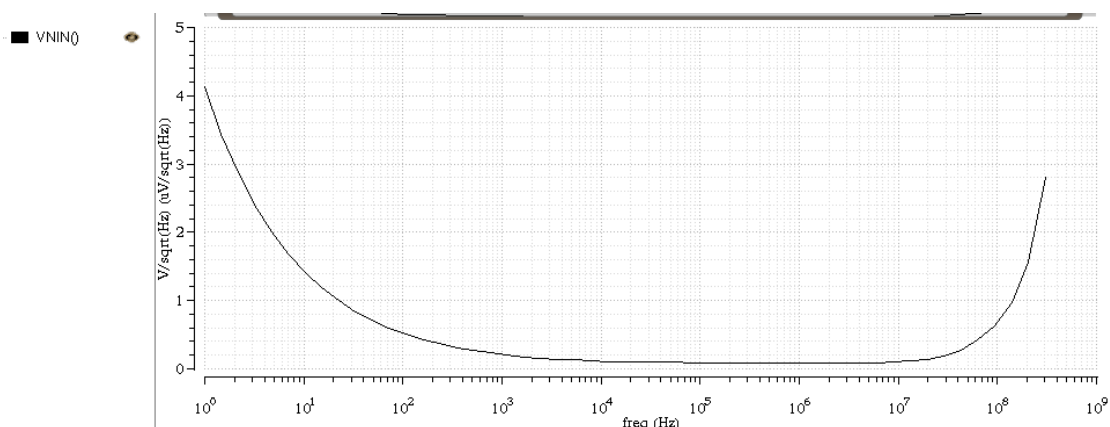
在 ADE L()仿真设置窗口, “Results” → “Direct Plot”  
等效输出噪声电压谱 Equivalent Output Noise:



纵轴单位为  $uV/\sqrt{Hz}$ , 等效输出噪声电压谱 VN(), 其平方是输出噪声电压功率谱。

反相放大器的等效输入噪声电压谱 (加在 V2 输入信号源上):

在 ADE L ( ) 仿真设置窗口, “Results” → “Direct Plot” → “Equivalent Input Noise”, 得到等效输入噪声电压谱 VNIN()。



等效输入噪声电压谱 = 等效输出噪声电压谱/增益。

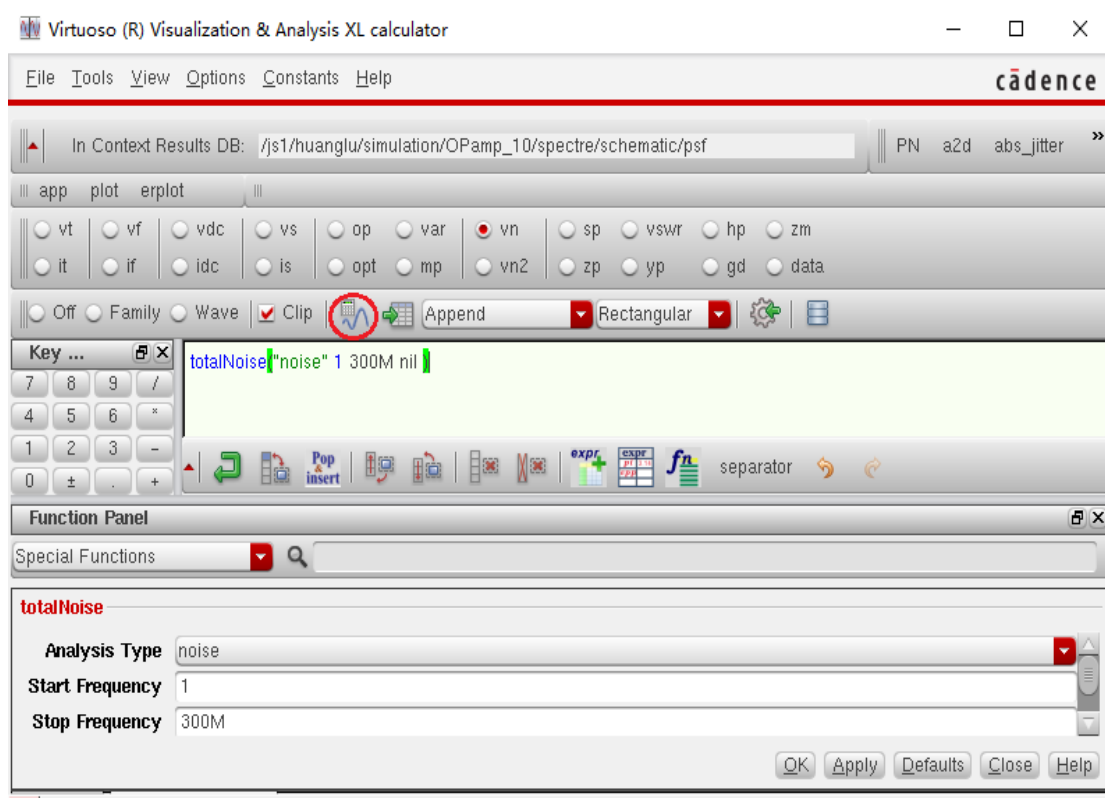
低频时，等效输入噪声电压谱 = 等效输出噪声电压谱/增益 10，符合预期。

高频时，增益与频率有关，频率高时增益小，等效输入噪声电压谱 VNIN() 高频段上翘。

反相放大器的输入参考噪声电压有效值：

在输入噪声 VNIN() 波形窗口，“Tools” → “Calculator”，

Function Panel 中 All，选 totalNoise 计算，Apply 得到下图。



点 Evaluate the buffer... 工具任一图标计算, 得到 v2 信号源处的等效输入噪声电压有效值。

由于放大器在 3dB 带宽以外仍有噪声，因此总噪声是全频段谱的积分，这里选择 1~300MHz，远大于单位增益频率，近似看作频率积分上限是无穷大。