

## 实验九、 模拟 IC 设计基本仿真方法

### ● 实验目的

- \* 学习使用 Cadence Spectre 进行交流小信号 **AC 仿真**；
- \* 掌握使用 Calculator 工具进行电路频率特性分析、相位裕度以及噪声特性分析等模拟电路设计基本方法。

### ● 实验说明与预备知识

本实验为设计型实验，要求采用 SMIC 180nm CMOS 工艺，设计一个简单的电阻负载共源 CS 单级放大器。

电路设计时先通过理论计算获得器件 W/L 和直流工作点的初步设计值，然后根据各种仿真（tran、dc、ac、noise 等）结果的分析，修改电路器件参数或直流工作点，用尽量少的仿真次数达到放大器电路的设计指标。

仿真是设计的一部分。先前你已经通过 DC 直流仿真获得了 MOS 管的工艺物理参数，如阈值电压、工艺跨导（ $=\beta_{\text{eff}}/(W/L)$ ）、特定栅长下的沟道长度调制系数等，本实验主要进行的是瞬态 Tran 和交流 ac 仿真。

模拟集成电路仿真流程：

- 进入 ADE L 仿真界面，
- 设置工艺库（一般已设无需再设置，缺省为 tt 工艺角，25°），
- 设置扫描变量（如有需要的话），
- 设置仿真分析（DC、AC、Tran、Noise 等），
- 设置输出，
- 运行仿真。

电路幅频特性分析需要进行交流小信号分析即交变 AC 仿真。AC 分析中，EDA 工具首先自动计算直流工作点，AC 信号分析是基于该工作点的理想化线性模型进行的计算，工作点不受信号幅度影响，因此仿真结果仅代表电路的小信号频率响应，不能正确反映大幅度变化信号时的情况。

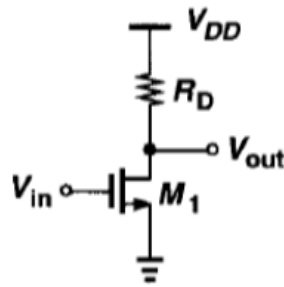
AC 仿真时要设置专门的交流信号源，也可以在 ADE 环境中设置激励源。  
AC 仿真有频率、设计变量、温度、元件参数、模型参数等扫描选项。

提前预习实验内容中的实验准备，做好手工设计工作。

### ● 实验内容

#### 一、实验准备

设计一个电阻负载 NMOS 单端共源 CS 放大器，满足以下技术指标：



输入信号：1k~1MHz 幅度 20mV 正弦波，直流工作点不限；

低频增益：~10，

3dB 带宽：~1.5M Hz，

负载电容：1pF，

电源电压：1.8V，

输出电压直流工作点：~0.8 V，

电源电流：~10uA。

注：技术指标中的“~”一般表示允许误差±10%之内，仅是本实验规定。

电阻负载 CS 单级放大电路小信号负载电阻约等于直流电阻，均为  $R_D$ ，导致增益、电流、输出直流电平、带宽之间相互关联，因此有可能不能完全符合设计指标，大致满足即可，体现在技术指标中的“~”误差。

器件指定：采用 0.18um CMOS 工艺库，n18MOS 管和 rhrpo 高阻。负载电容是假设的后级输入电容，因此可用理想器件库 analogLib 中 cap。

依据电路指标手工近似计算电路参数，包括器件尺寸和输入电压直流工作点，并估算 3dB 带宽。手工初步设计可按照下面提示（你也可用其它方法）：

设  $L=0.8\mu\text{m}$ ，根据先前实验获得阈值电压  $V_{th}$ ；

由直流输出电压工作点和  $I_D$  计算  $R_D$  和  $r_o$ ；

根据低频增益  $|A_{vo}|=g_m(R_D||r_o)$ ，近似计算  $g_m$ ；

由  $I_D=1/2*g_m*V_{OD}$  计算  $V_{OD}=V_{GS}-V_{th}$ ，得到输入电压工作点  $V_{GS}$ ；

查验  $V_{OD}$  应大于输入信号变化幅度（为什么？）；

由  $g_m=\mu_n*C_{ox}*(W/L)*V_{OD}$  得到  $W/L$ 。

3dB 带宽估算  $f_{3dB}=1/[2\pi(R_D||r_o)C_L]$ ，因未计入寄生电容和 MOS 输出电阻，实际带宽会减小一些。

## 二、 实验步骤

1.运行 EDA 系统：选择计算服务器(ssh -X c01n??, 这里??=01~14)、设置 EDA

软件环境 (setdt ic616 mmsim)、启动 virtuoso、在你的设计库 icbaslab 中新建一个电路单元 (Cell 可命名为 CSamp);

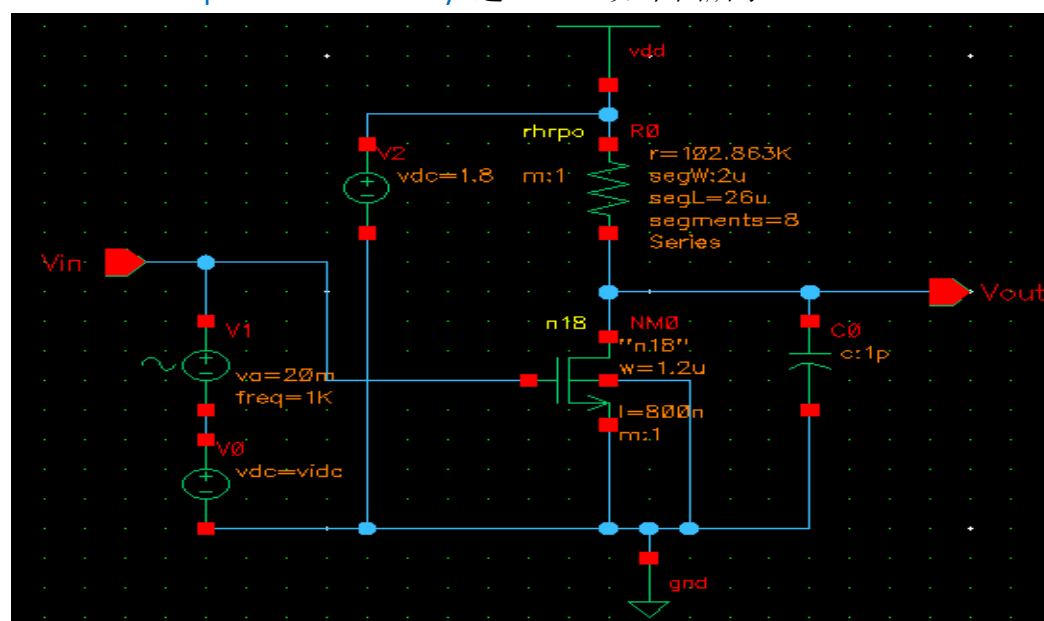
2.根据手工设计的器件参数,画出电阻负载单级共源放大器电路图;

负载电阻 R0 选 SMIC 0.18um 工艺库的 rhrpo, Segments 是指定串联分段个数,近似形成方形版图,并避免单个分段电阻长度超出工艺规定(违例有提示)。

信号源是理想器件库 analogLib 中 vsin 正弦波电压源,设置幅度与频率如下图;采用 vdc 直流电压源,设置 DC voltage 为 vidc 变量用于 dc 分析时扫描。



若你画的 schematic 电路图中器件标号与下图不一致,可在 Edit→Renumber Instances→Sequence Instances by 选 X+Y+。如下图所示。



### 3. tran 瞬态仿真

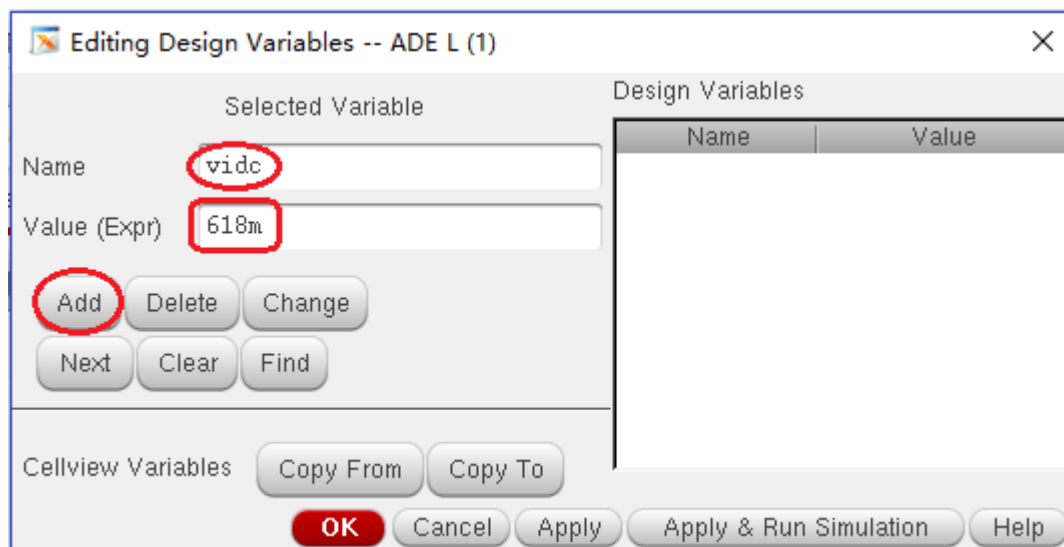
第一次进行瞬态分析,可大致判断是否存在尺寸参数设错、工作点偏离太大等问题。EDA 软件 spectre 在瞬态仿真前会自动计算 dc 工作点。

在 Schematic L Editing 窗口, Launch→ADE L 进入仿真设置 ADC L()窗口。

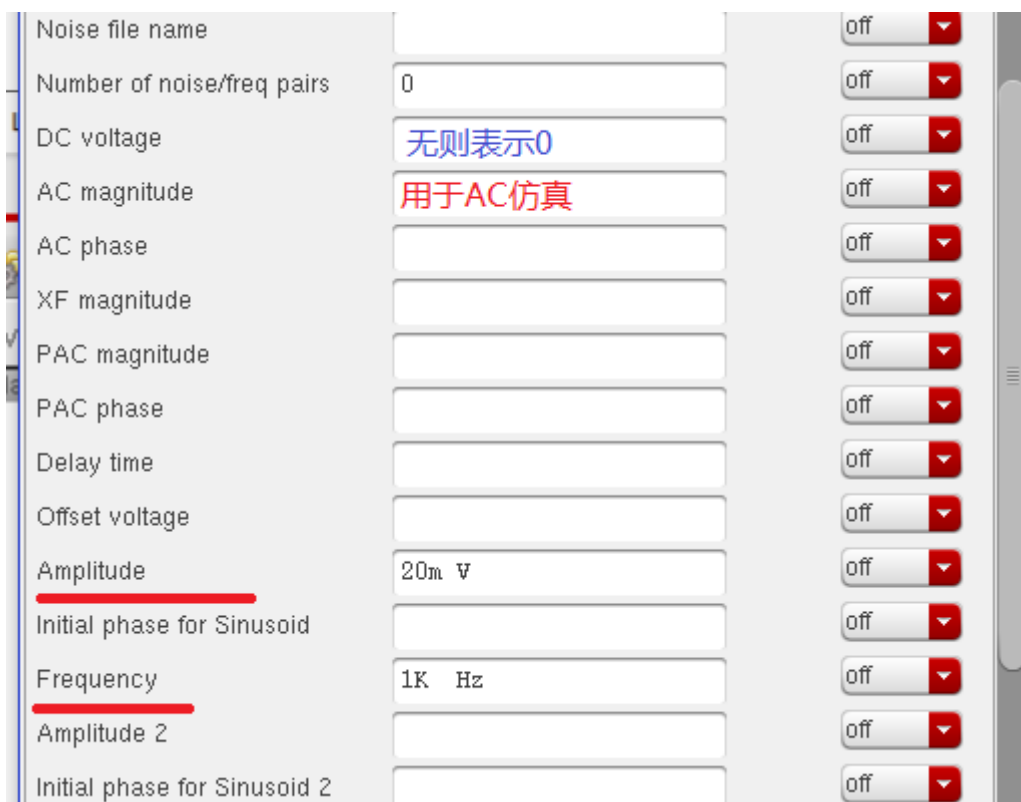
#### A. 设置瞬态 tran 仿真:

点击 ADE L 窗口右侧的 Choose Analyses 图标,选 tran 设置瞬态仿真分析,设置 Stop Time 为 10m (该值与仿真的输入信号周期时间有关。一般有电容负载时,前几个周期可能有电容逐渐充电的过程,大部分电路仿真在 10 个信号周期时间内能达到稳定波形),Accuracy 精度 moderate;底部 Enabled 应有效。

- B. 设置输入端的直流电压源 vdc（标号 V0）电平，即 vidc 变量电压值：点击 ADE L 窗口右侧的 [Edit Variables](#) 图标，vidc 变量的 Value 为先前计算得到的输入电压工作点  $V_{GS}$ 。



- C. 设置正弦信号源 vsin（标号 V1）的幅度 Amplitude 和频率 Frequency。在 Schematic 电路图中，Q 键修改 vsin 的参数如下：



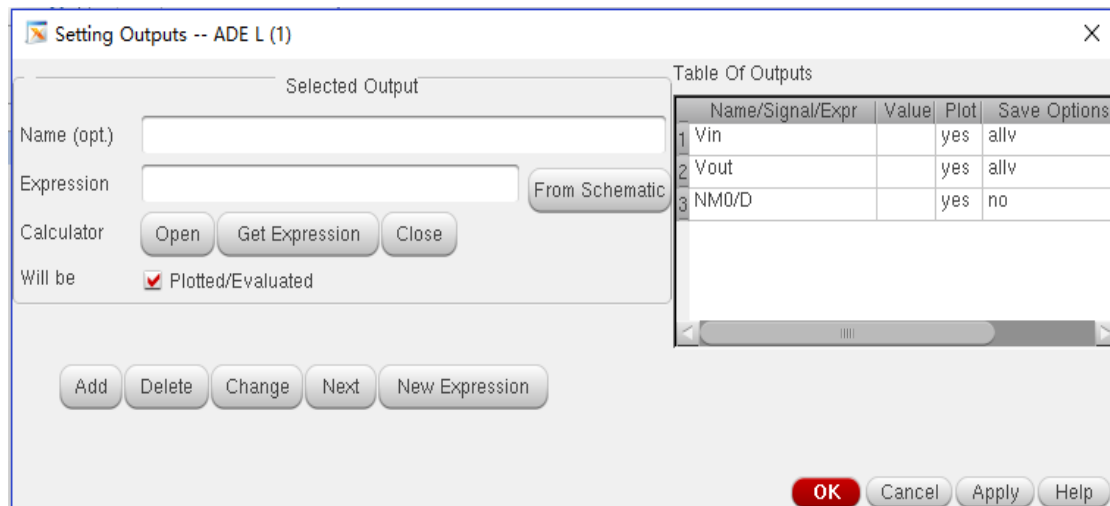
在 schematic 窗口，点击 [Check and Save](#) 保存。

凡在 Schematic 图中修改过电路参数，必须 [Check and Save](#) 后才能仿真。

D. 设置仿真波形输出 **Outputs** 显示:

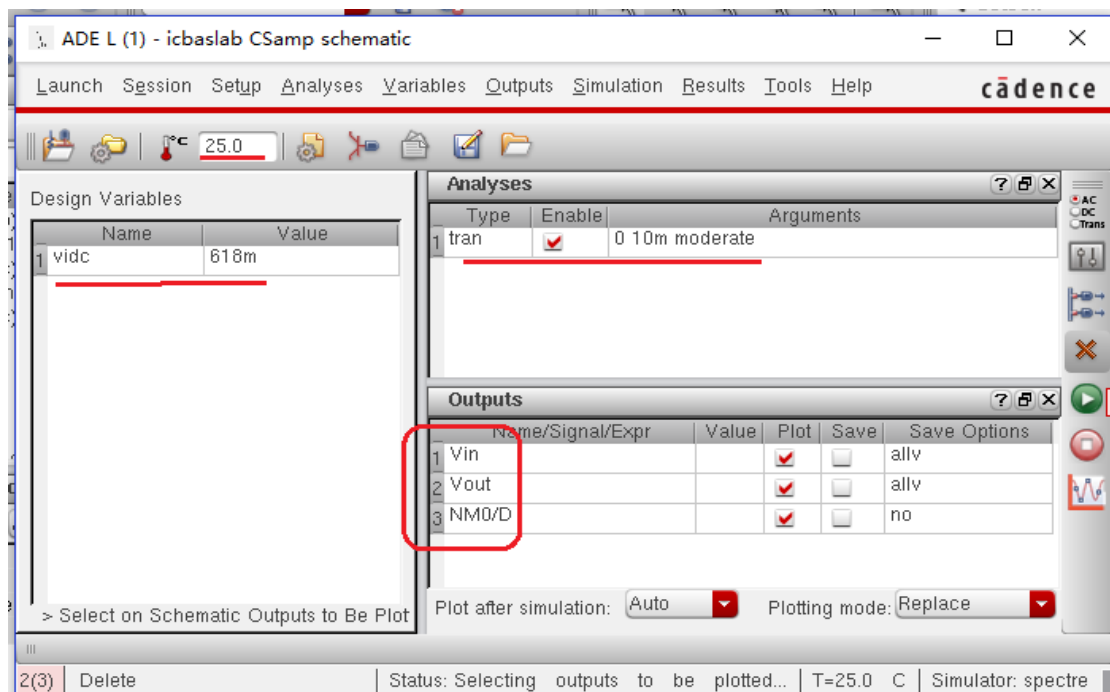
点击 ADE L 窗口右侧的 **Setup Outputs** 图标，点 **From Schematic** 在电路图选输入、输出线网电压、NM0 的 D 端口电流（点击**线网为电压**，点击**端口为电流**）。

选好显示信号后，**Setting Outputs** 窗口应如下:



也可不设置波形输出信号，直接仿真得到所有信号，然后选择线网显示波形，但数据文件比较大。

ADE L 窗口如下图:

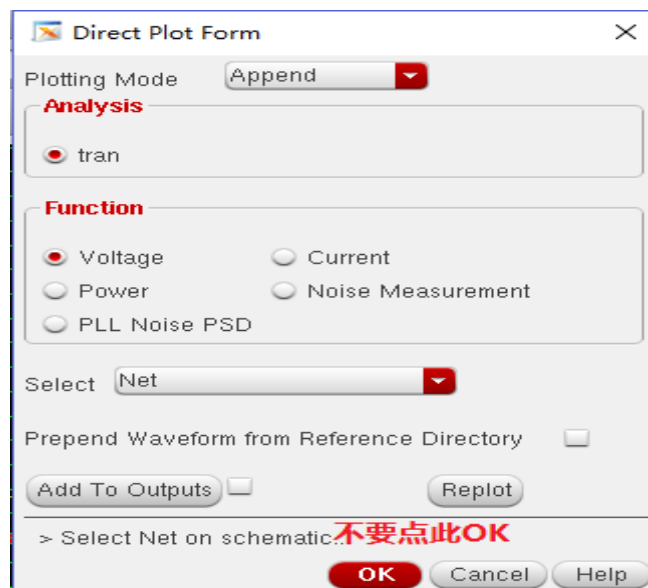
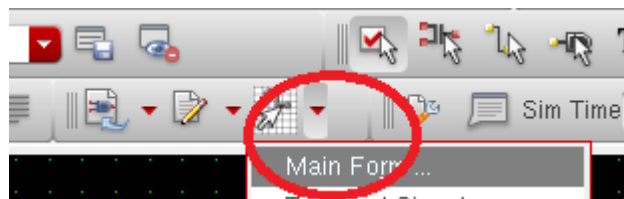


若仿真温度不是 25°，则在 **Setup** 下拉菜单中设置 **Temperature**。

E. 运行仿真:

在 ADE L 窗口 **Netlist and Run** 仿真，得到瞬态仿真结果波形。

如没有设置波形输出信号进行仿真，则在 ADE L Editing: 库名 单元名 schematic 电路图窗口，如下选择：



不要点击上图 OK，在电路图窗口中点击希望查看电压波形的线网，连续点击得到多个电压波形。

查看电源电流波形（可估算瞬时功耗）：

将上图 Direct Plot Form 中的 Function 设置为 Current，可查看电源电流。

#### F. 查看瞬态仿真结果：

工作点是否基本合适？低频增益大约多少？

在 ADE L 窗口，Results→Annotate→Transient Operating Point，查看 gm 等与先前设计的偏差，估算 MOS 管 W/L 大致修改为多少。

对电路和波形图屏幕截图备查，记录关键数据；

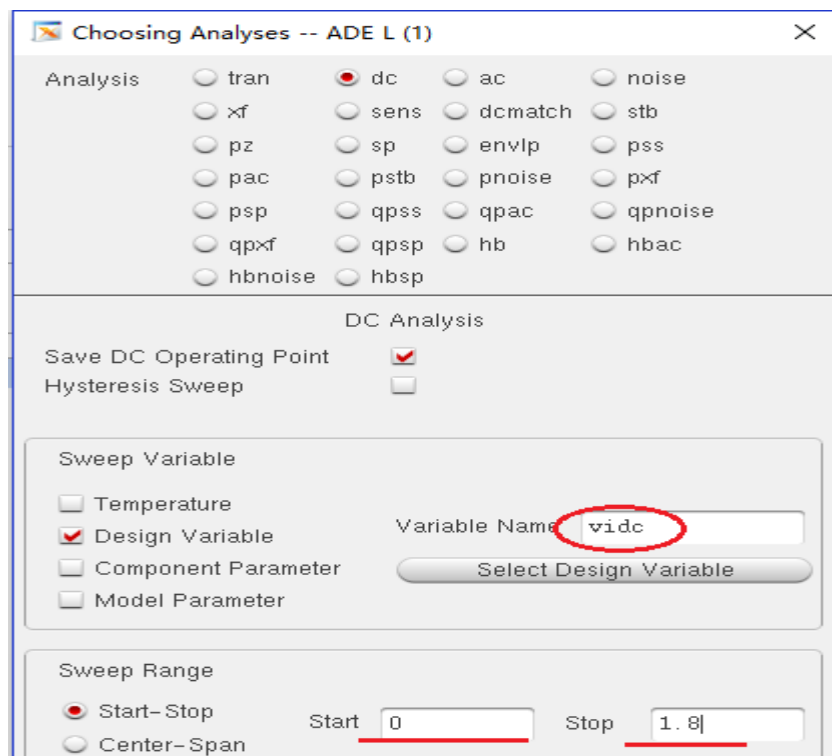
ADE L 窗口 Session→Save State 保存瞬态仿真设置。

### 4. DC 仿真分析

可获得大致的输入和输出动态范围。

#### A. 设置 dc 仿真：

ADE L 窗口 Choose Analyses 图标，选 dc 分析；对输入直流电压源（vidc 变量）设置扫描范围。



使 ADE L 窗口 Analyses 栏中的 tran 无效。

B. 设置仿真波形输出 Outputs 显示：

ADE L 窗口已有的 Outputs 列表中，删除不打算保留（以后不用且 Outputs 项较多）的 NM0/D 电流项显示：

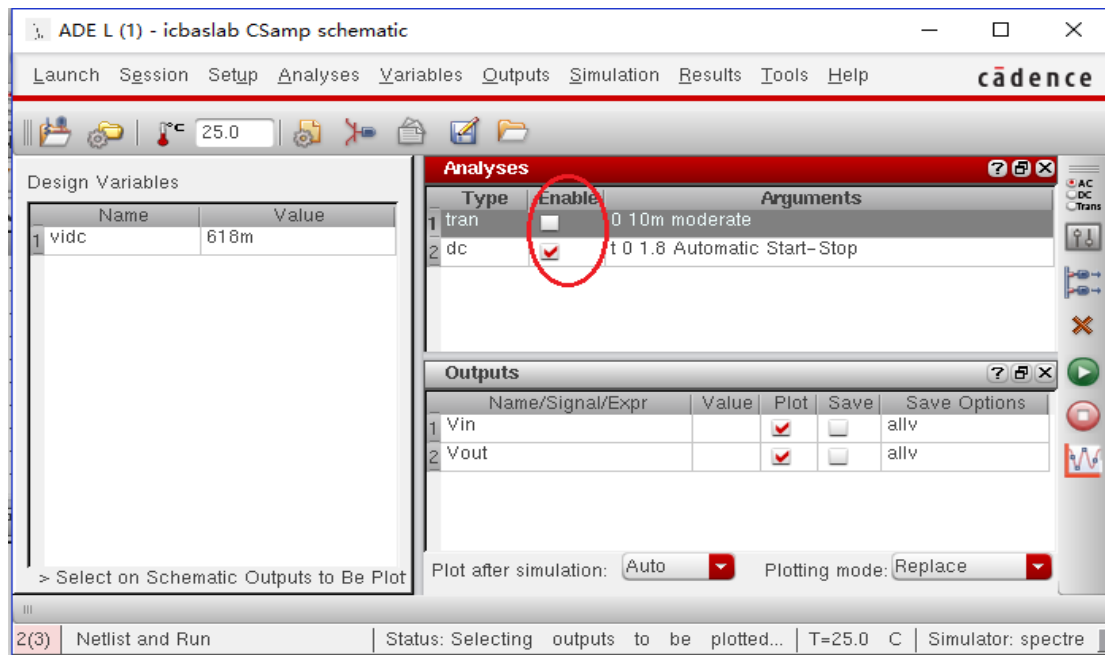


更常用方法是 Outputs 列表保留不需要的端口电流或网线电压，但是不选：

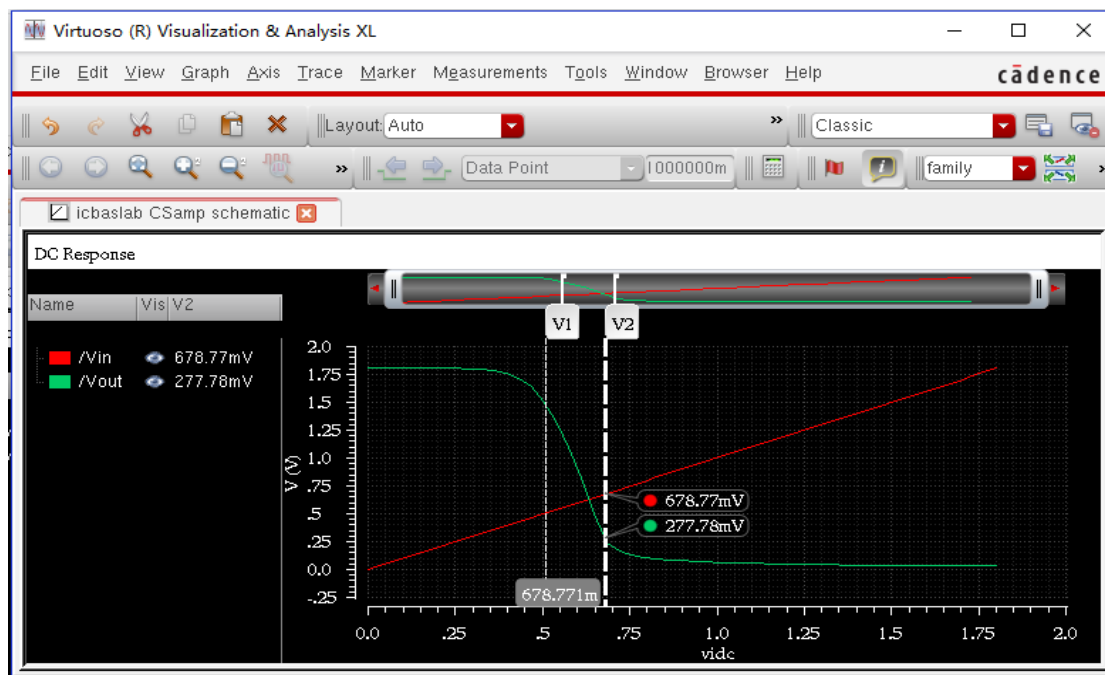


C. 运行 dc 仿真。

现在 ADE L 仿真设置窗口应如下图：



运行 **Netlist and Run**，仿真结果如下图，其中垂直标记线是通过 **Marker** → **Create Marker** → **Vertical**，在波形关注点上点击，得到大致的输入和输出范围，应大于设计指标要求，显示波形结果截图备查。

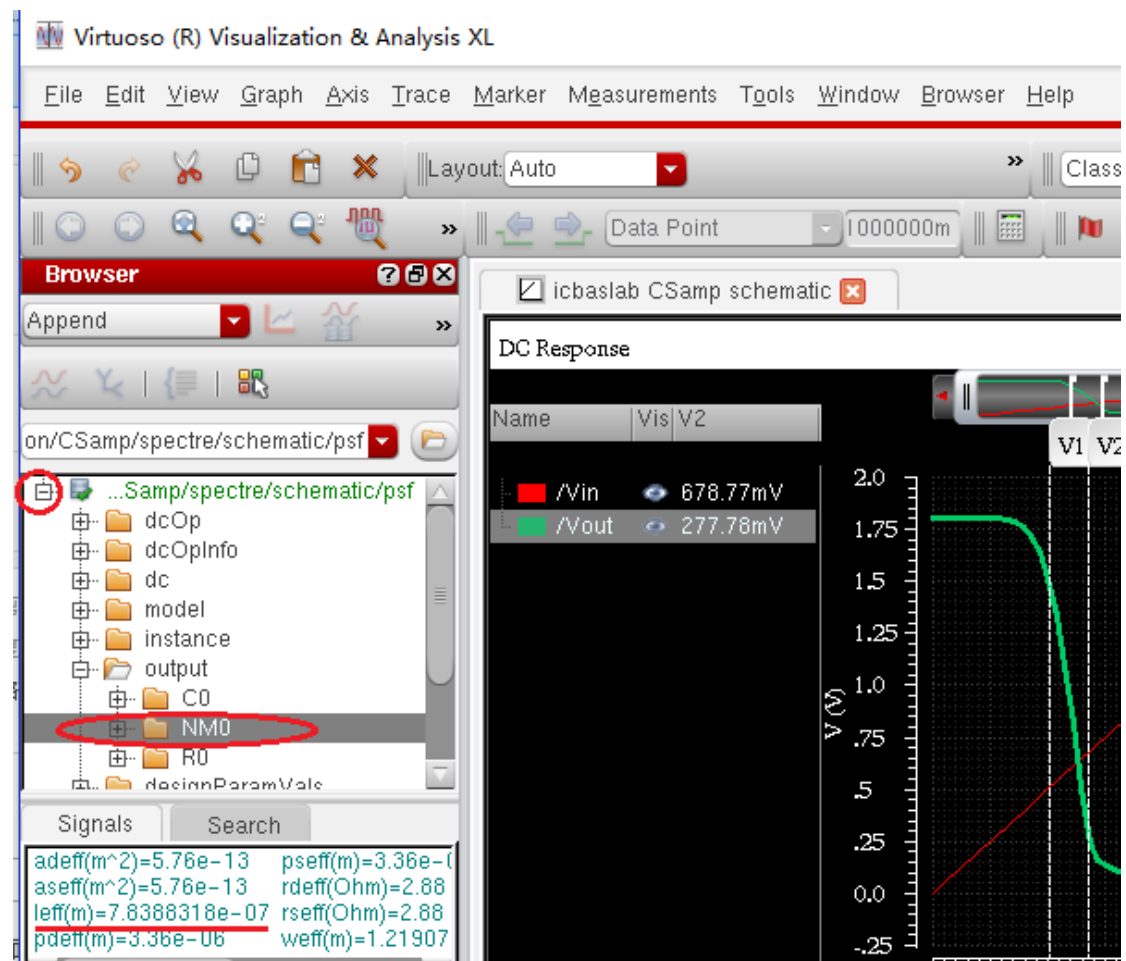


上图输入和输出范围表明其远超设计指标，因此可以增大  $W/L$  同时减小输入直流电平，以获得更大增益并保持单级 CS 电路的 MOS 直流电流基本不变。

可以顺便查看 MOS 有效沟道长度  $l_{eff}$ ，可得到源漏交叠长度  $LD$ ：

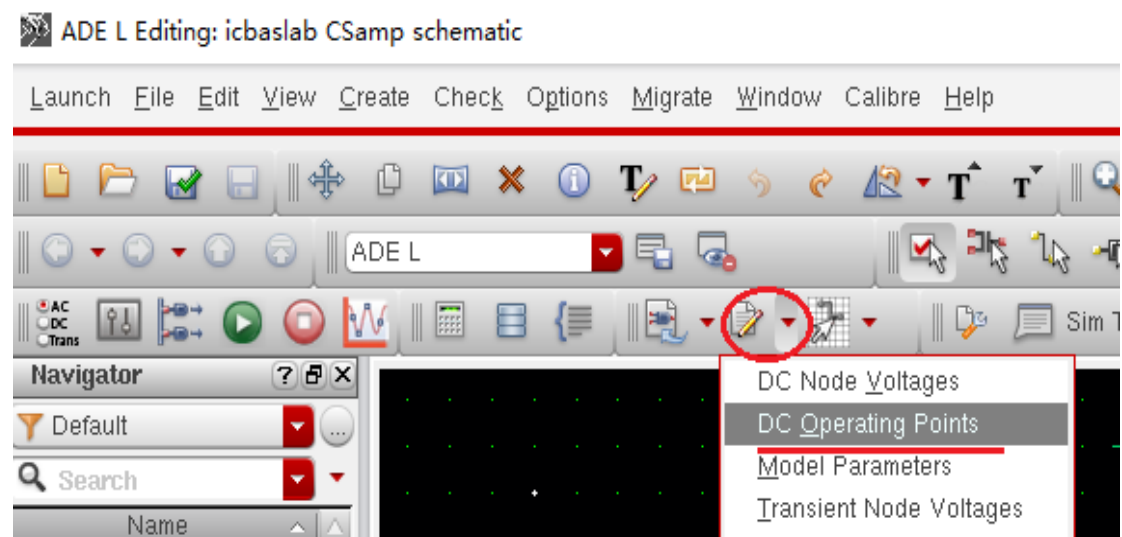
ADE L 窗口中，**Tools** → **Results Browser**。在波形图左侧出现 spectre 仿真信息，展开。。。/CSAMP/spectre/schematic/psf，点击 **output->NM0**，在 Signals 栏中得到  $l_{eff}$  参数。



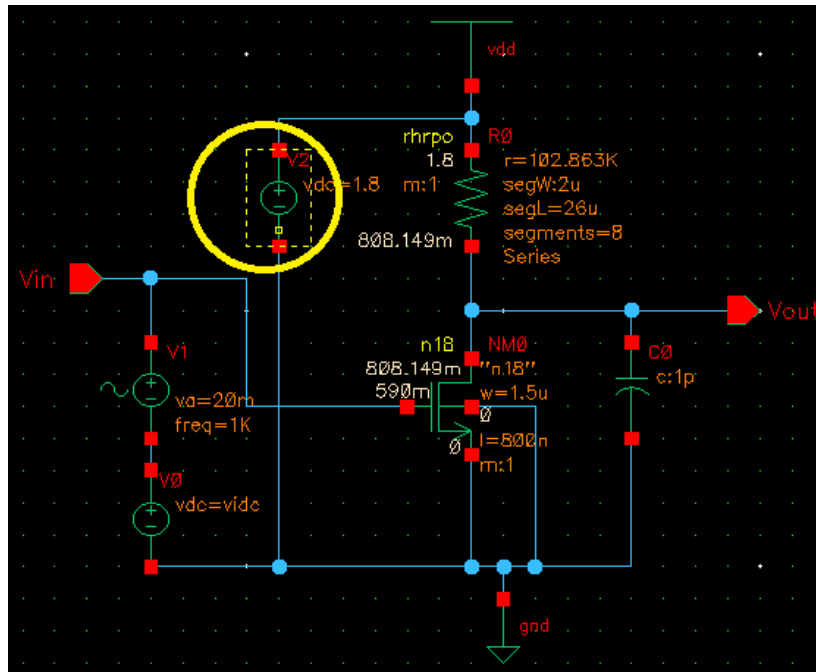


电路功耗:

DC 仿真后，在 schematic 窗口，选 Print 按钮的下拉菜单中 DC Operating Points，



然后选中电路图中的电源，



Results Display Window		
Window Expressions Info Help		
cadence		
signal	OP("/V2" "??")	
i	-9.6424u	
pwr	-17.3563u	
v	1.8	

说明：电流和功耗实际上为正值，但上图中为负，表示电流流出。

## 5. ac 交流分析频率响应

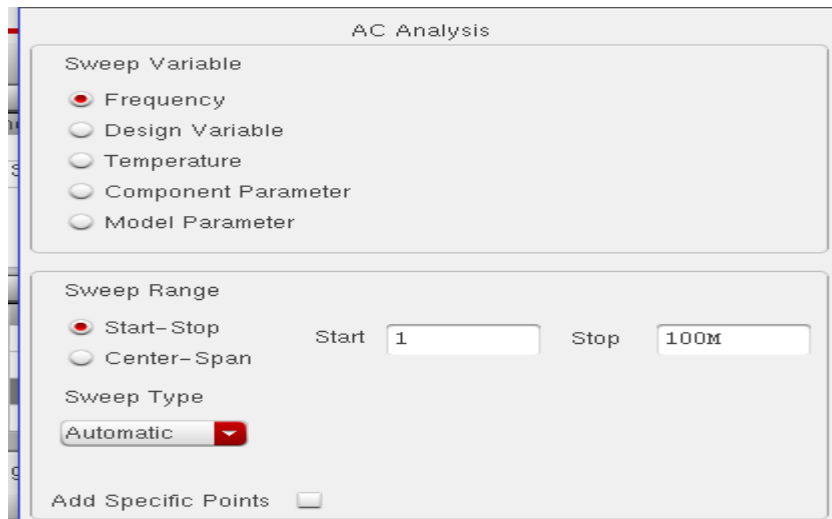
AC 仿真计算电路的小信号频率响应，获得与频率相应相关的电路性能参数。

当信号幅度较大时，幅频特性不能正确地反映实际增益，大幅度信号需要进行 tran 仿真。

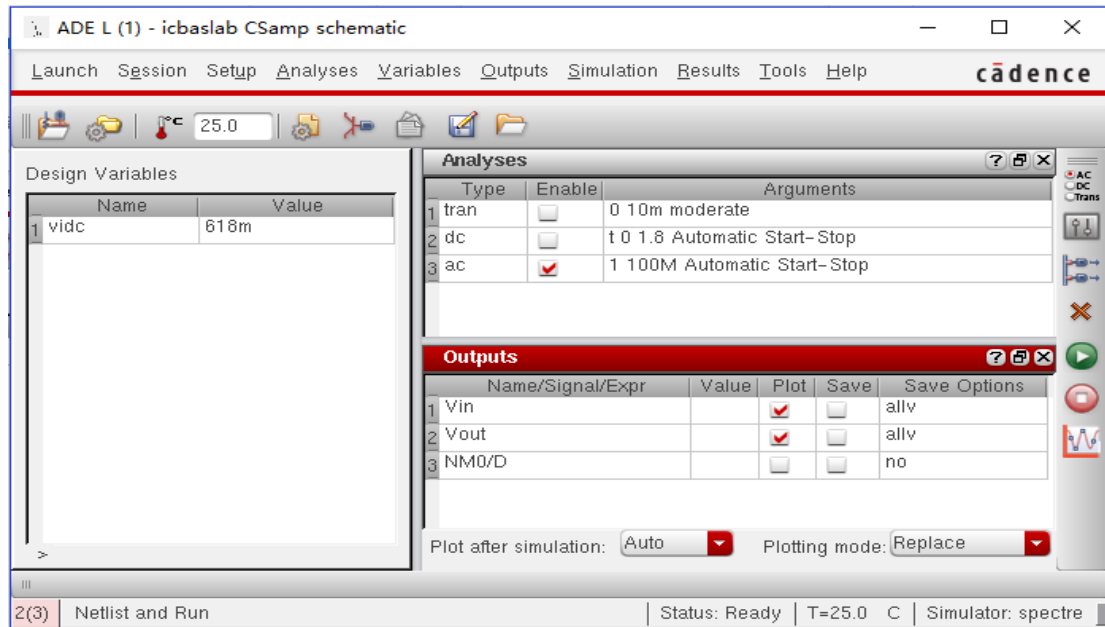
A. 在 Schematic 电路图中，用 **Q** 键编辑 vsin 属性，将 **AC magnitude** 设置为 **1**（为何要设置为 1V? ac 仿真结果波形能直观给出传递函数幅值）。因 ac 扫描分析时 AC 参数设置与 tran 分析时设置的 Amplitude 和 Frequency 无关，故可保留先前 tran 仿真时设置不做改变。修改后电路应 **Check and Save**；

B. 设置 ac 交流分析：

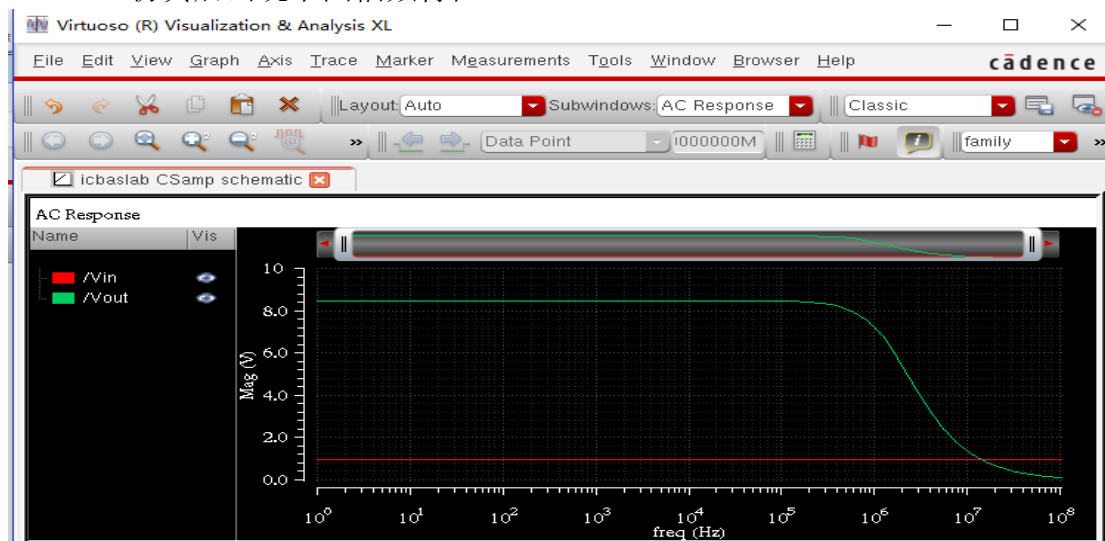
在 ADE L 窗口，**Choose analyses**，选 **ac**；Sweep Variable 窗口选 **Frequency** 有效，设置频率扫描范围如下：



ADE L 窗口应如下图（仅 ac 有效）：



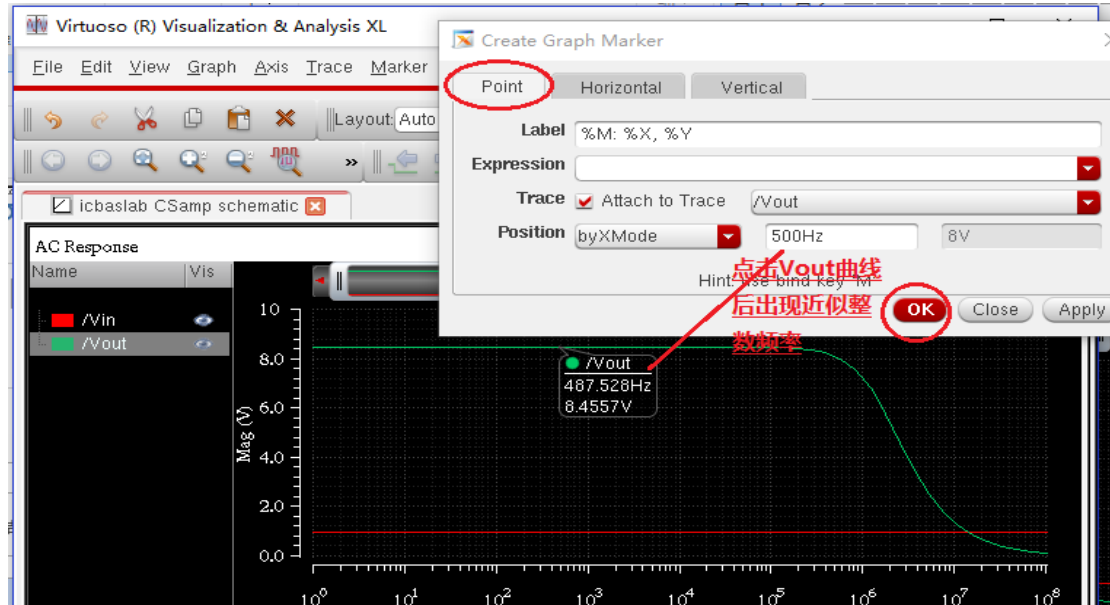
C. 仿真后出现下图幅频特性：



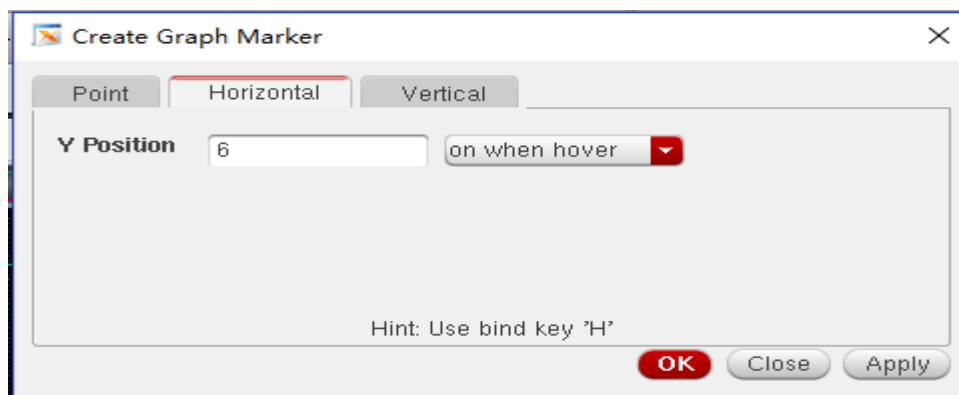
低频增益是多少？  $V_{out}$  大于电源电压的原因是 ac 仿真是假设工作点不变，按线性模型计算，与电压无关。

D. 从波形图中获得小信号 3dB 带宽（估算）：

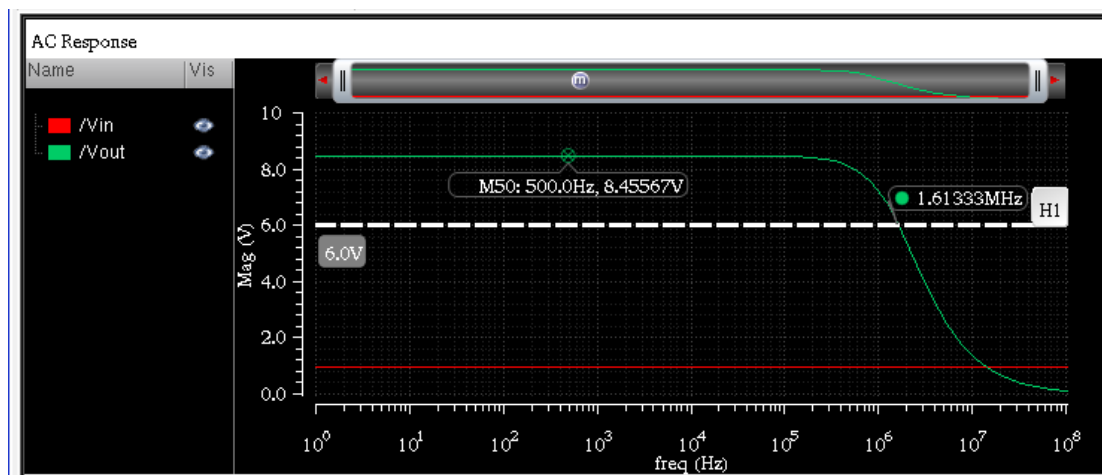
可标记低频某点(point)增益。Virtuoso(R) Visualization & Analysis XL 波形窗口中 **Marker**→**Create Marker**，在  $V_{out}$  波形低频段任意一处点击，Point 面板如下图：



低频点  $V_{out}/0.707$  得到 3dB 频率处的  $V_{out}$ ，再次 Marker，将-3dB 的  $V_{out}$  值填入 Horizontal 面板的 Y Position 如下图：



得到 3dB 带宽：



ADE L 仿真设置窗口，Session→Save State 保存仿真设置状态，以便以后仿真时直接 Load 加载（ADE L 仿真设置窗口 Session→Load State）。

#### E. 修改设计参数：

综合以上 tran、dc、ac 仿真分析结果，对 Schemaitc 电路中的 NM0 管 W/L、vdc 电压、R 参数进行合适的综合修改。

根据本实验具体情况，带宽接近设计指标，因此无需调整负载电阻 R0，仅修改 MOS 管宽度 W 并为保持漏极电流不变修改输入直流电压。

设新增增益是先前 k 倍，电流保持不变，输出电压也保持不变。

若增加 W 则减小 V<sub>GS</sub>；

设新宽度 W<sub>n</sub>=K\*W，下标 n 表示新改，W 为 NM0 的原先宽度。

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2 = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W_n}{L} (V_{GSn} - V_{th})^2$$

$$\text{新过驱动电压 } V_{GSn} - V_{th} = \text{原过驱动电压 } (V_{GS} - V_{th}) / \sqrt{K}$$

输入电压源 Vdc 单元设置为 vidc =Vth +新过驱动电压

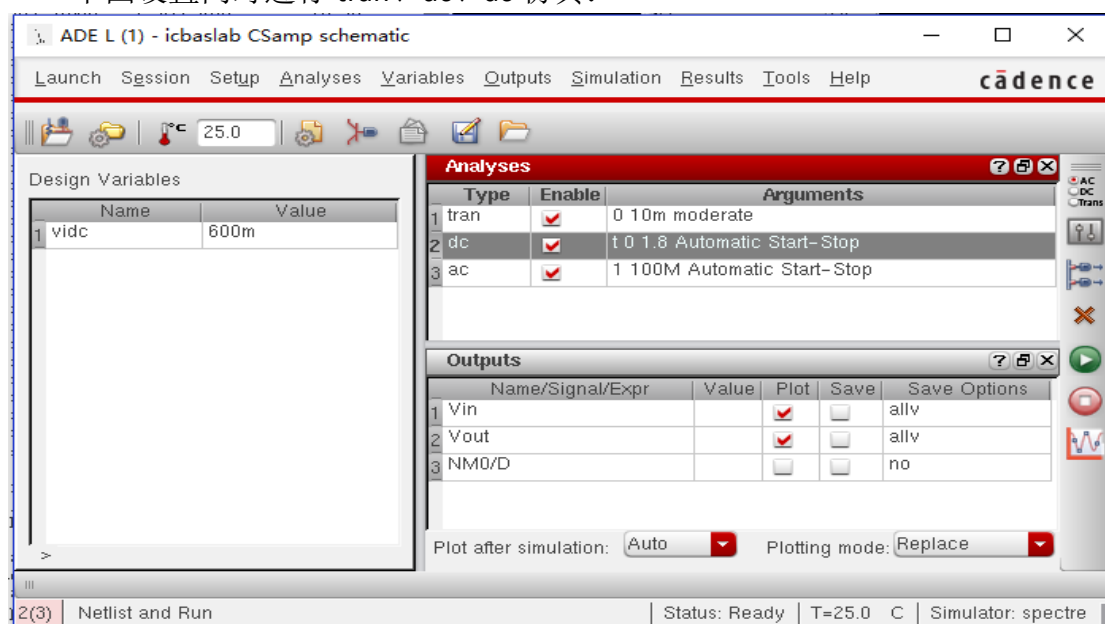
电路图上修改 NM0 的 W 参数后，一定要 Check and Save；

在 ADE L 仿真设置窗口，Edit Variables 修改 vidc 变量的 Value。

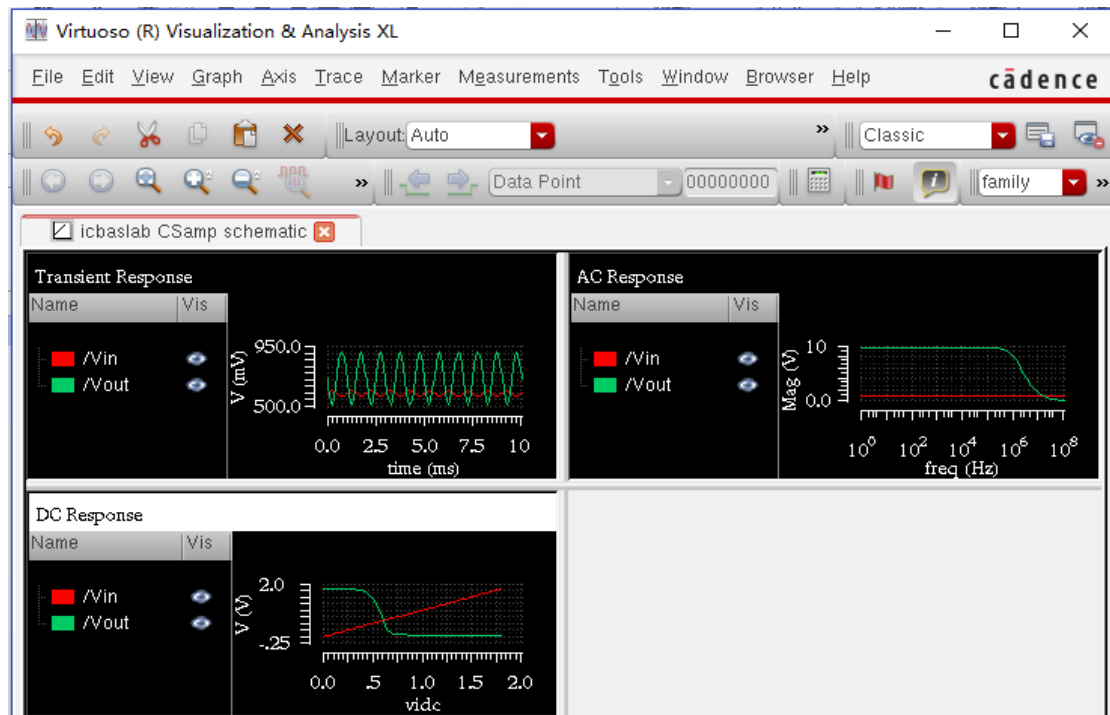
#### F. 再次仿真并进行设计参数验证：

利用先前 ADE L 仿真设置窗口，可每次进行一种仿真分析，也可同时完成多种或全部的分析仿真。

下图设置同时进行 tran、dc、ac 仿真：



得到波形图：



核对设计指标：

在 AC Response 仿真波形显示窗口，低频增益=?、小信号 3dB 带宽=?

在 ADE L 仿真设置窗口，Results→Annotate→DC Operating Points，输出电压直流工作点=? 在 DC Response 仿真波形显示窗口，判断输出动态范围是否满足设计要求。

电源电流=? (vdc=1.8v 电压源 V2 上的电流)

1~2 次修改后应得到满足设计指标要求的电路器件设计参数。

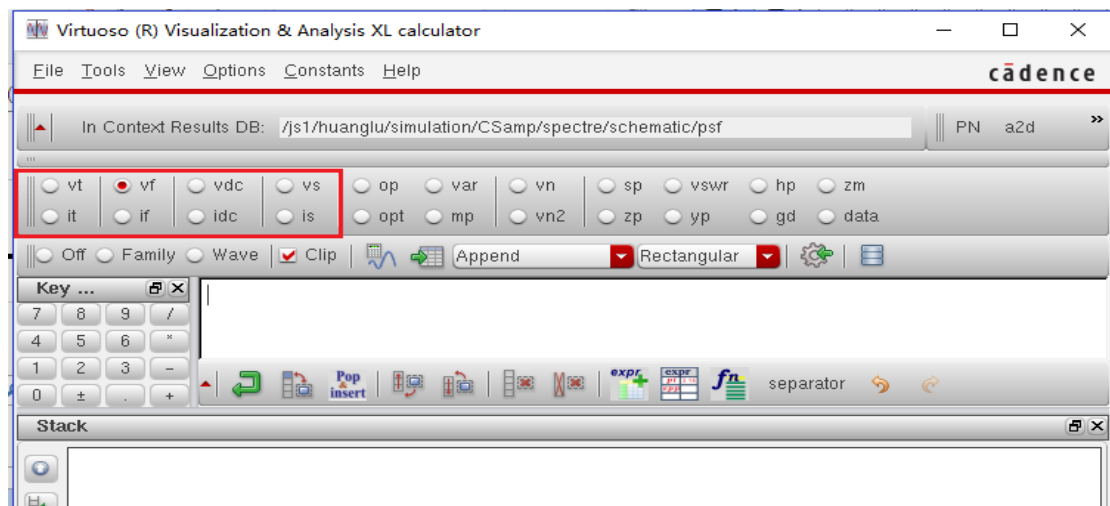
## 6. 利用计算器工具 Calculator 获得电路参数：

(1) calculator 精确计算带宽：

A. 近入 Calculator 窗口：

在 Virtuoso(R) visualization & analysis XL 波形显示窗口中 Tools→Calculator

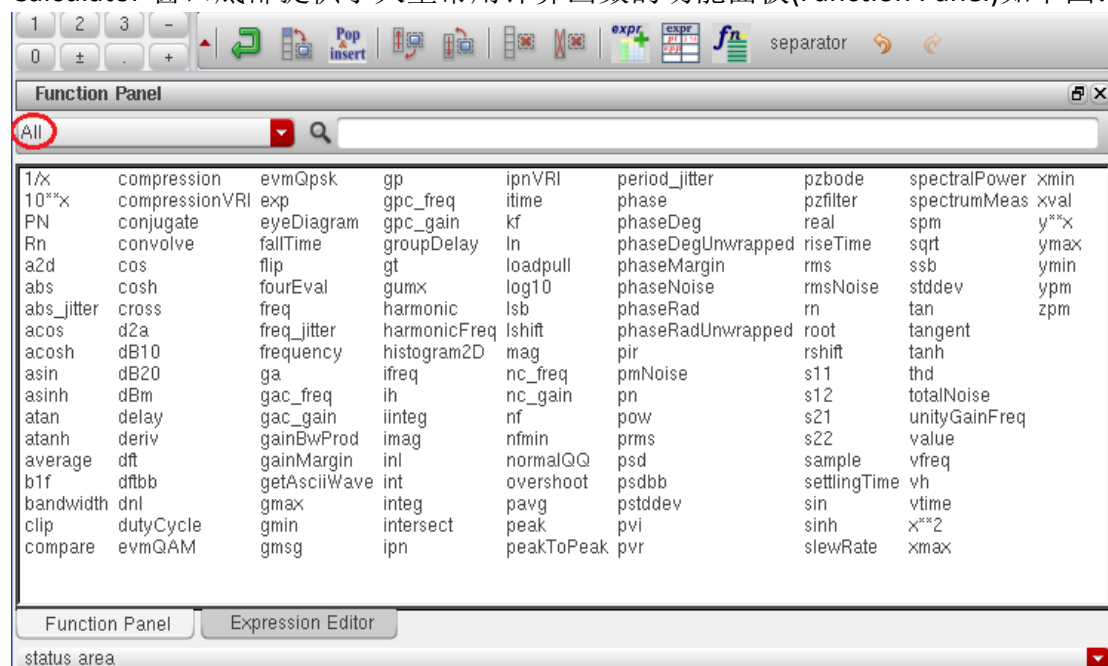
弹出 Calculator 窗口如下图，红色框内为模拟电路设计常用的工具按钮：



将鼠标放在电路图选择信号工具按钮名称上，即有电路图选择信号和计算功能提示；建议对上图红色方框标记的电路图选择信号工具按钮逐个查看一下。  
选择按钮字符的缩写规则：

首字母表示选电压、电流，或其它某种对象：v 线网电压，i 端口电流；  
尾字母表示仿真类型：t 瞬态，f 交流；dc 直流，s 直流扫描，n 噪声。

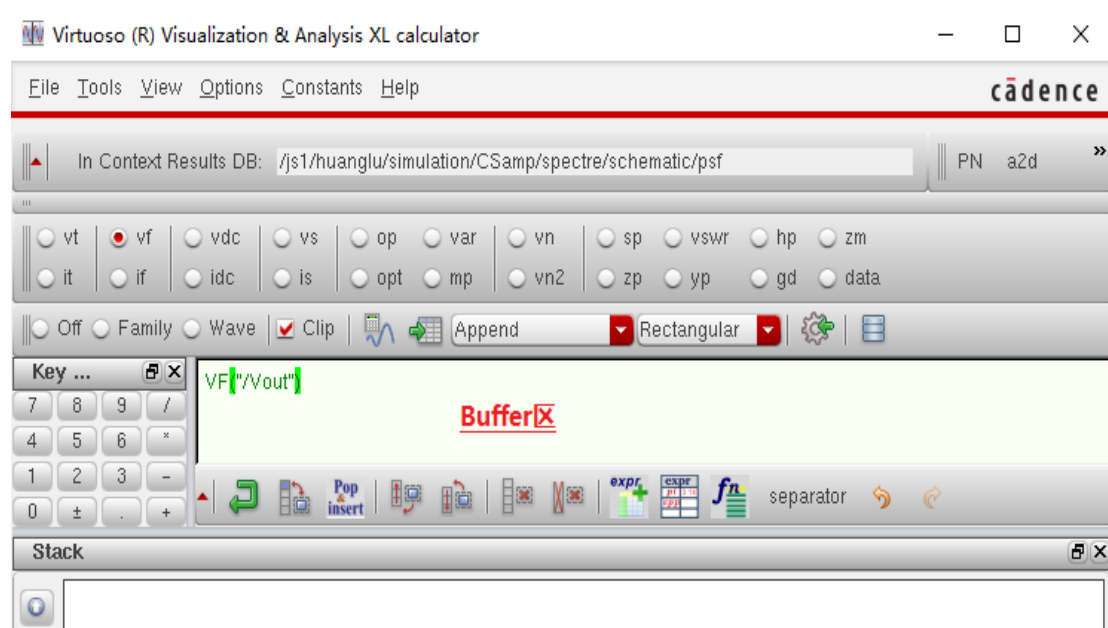
Calculator 窗口底部提供了大量常用计算函数的功能面板(Function Panel)如下图：



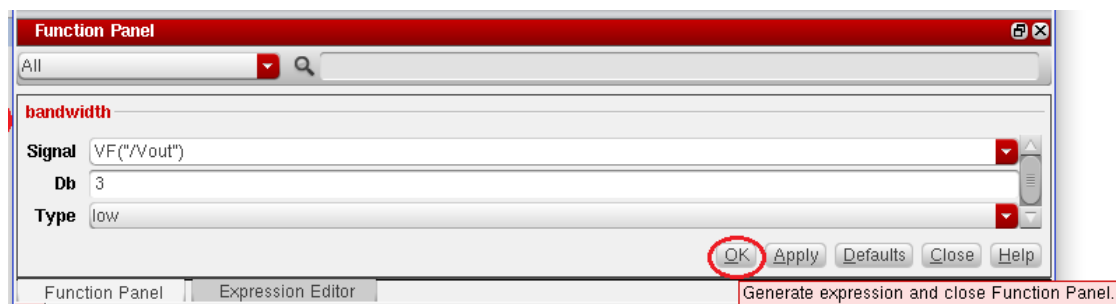
计算功能需要依据先前相应仿真得到的结果数据，在 **buffer** 中列出计算表达式进行计算（参考下面的函数计算步骤）。

## B. 电路图选择信号工具按钮 vf 有效并选择 vout 线网电压信号

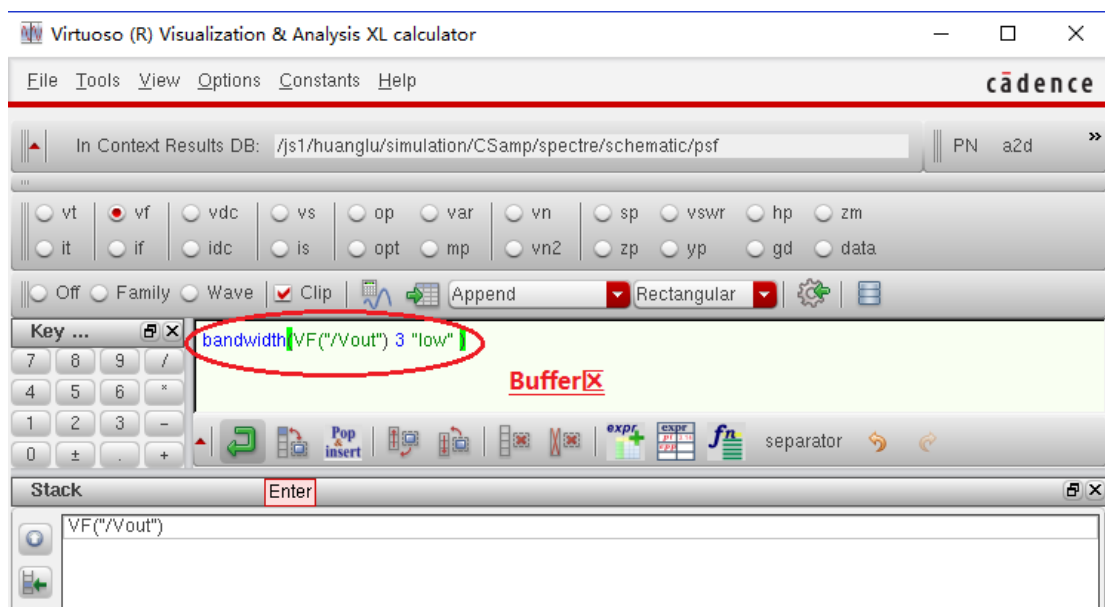
因 3dB 带宽根据 ac 仿真的 Vout 电压信号计算得到，因此使 **vf** 选择信号工具按钮有效，在电路图中选输出 **Vout** 线网。



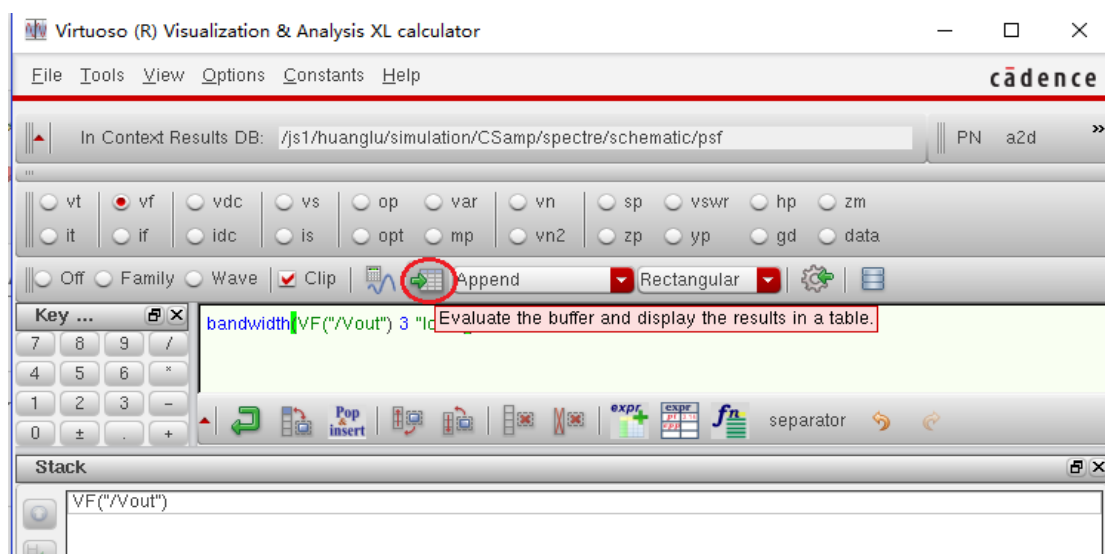
C.在 Calculator 窗口 Function Panel 中选 **bandwidth** 函数：  
则 Function Panel 出现下图 bandwidth 信息：



OK 后，在 Buffer 区显示计算公式，下图 buffer 区表示：Vout 电压 ac 仿真(VF) 3(db) 低通 (low) 带宽 (bandwidth)。

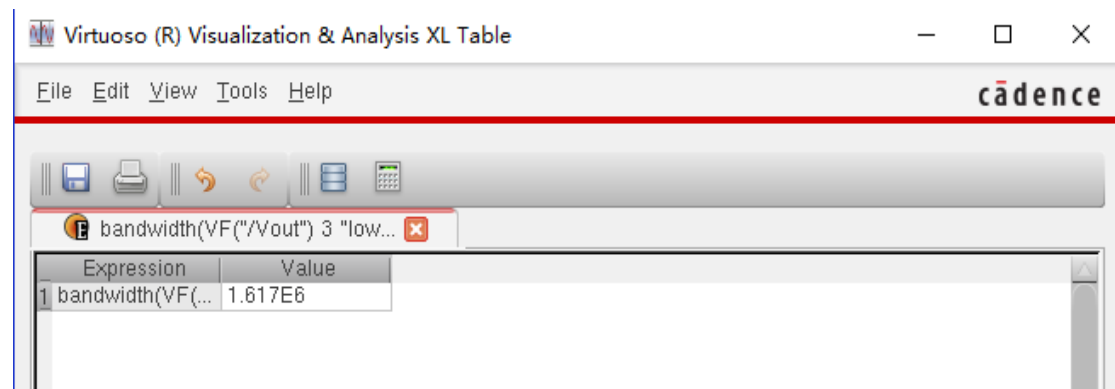


F. 对 buffer 区表达式进行求值(Evaluate):

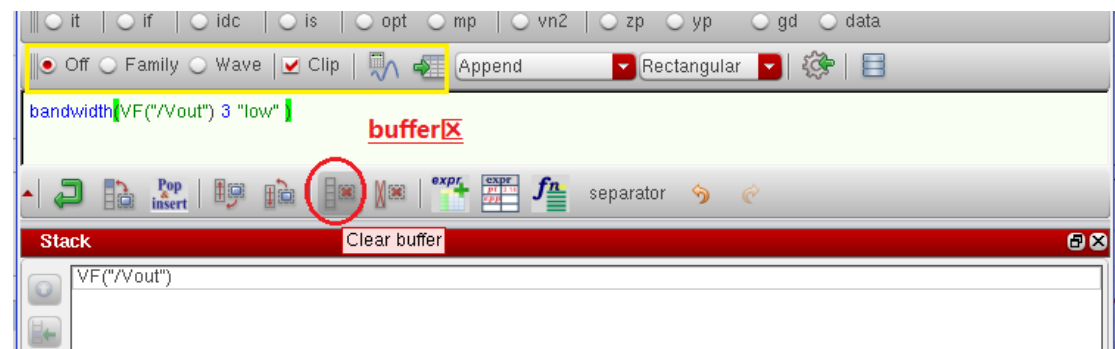




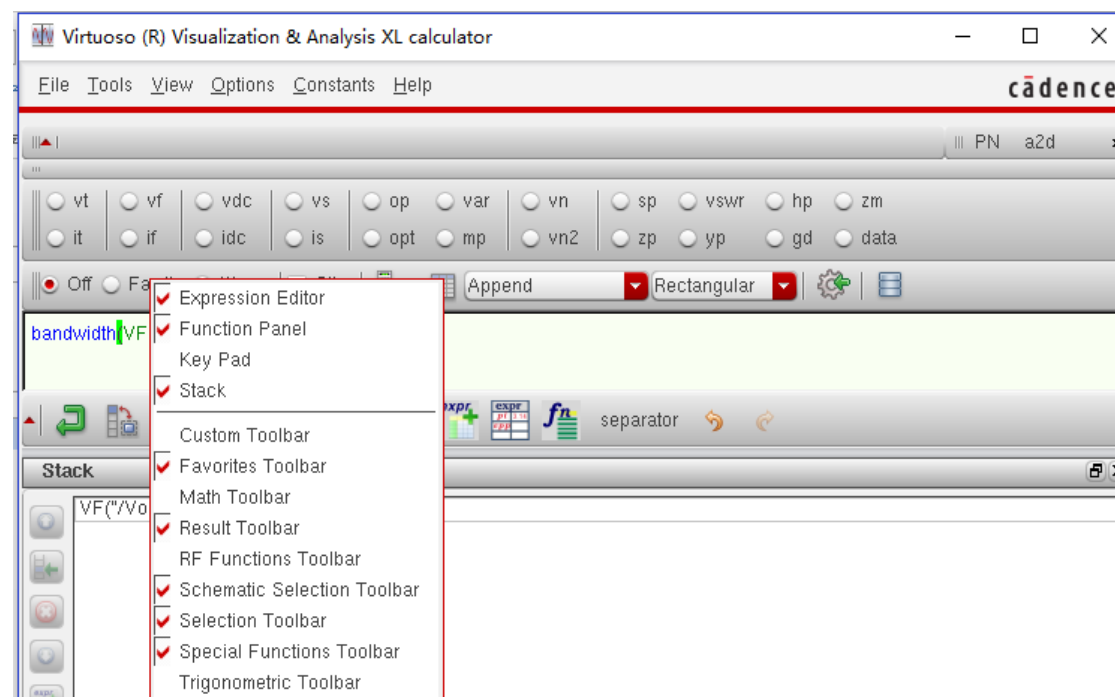
得到 3 dB 小信号带宽(Hz)的计算结果:



若要清除计算器 Buffer 窗口内容, 点击 [Clear buffer](#):

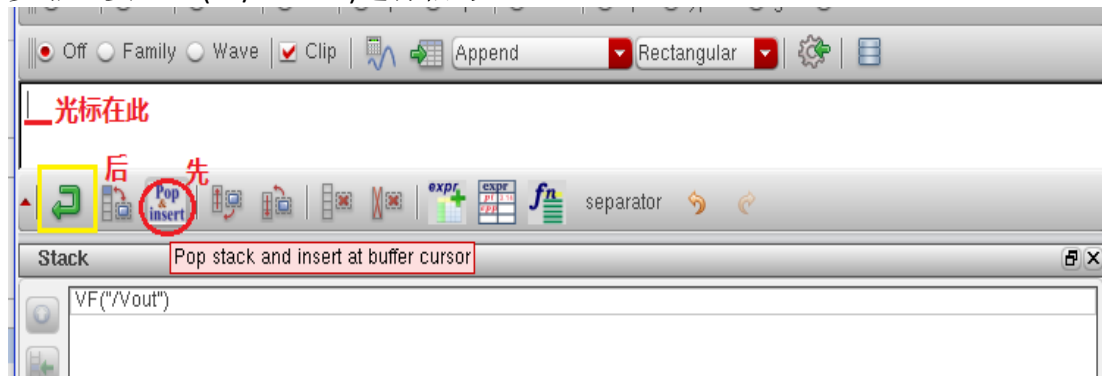


若需在 calculator 窗口显示或隐藏一些子窗口, 在上图黄色方框位置点鼠标右键, 弹出下图设置工具表选项, 比 calculator 窗口 View 菜单多几个工具条。

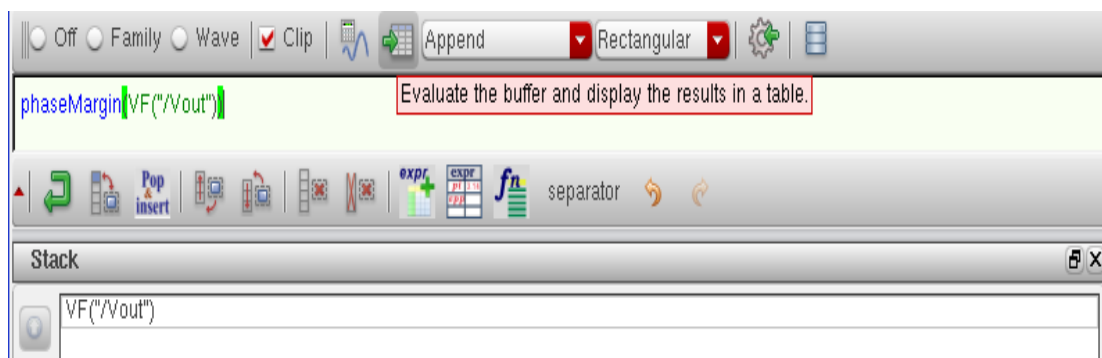


(2) 精确计算相位裕度:

相位裕度也是根据 ac 仿真的 Vout 电压信号计算得到。清除掉缓冲区 (Clear buffer) 原先的 bandwidth 带宽计算公式, 再先后使用 Pop&insert 和 Enter 恢复 (此步非必要) VF(“/Vout”) 选择信号,

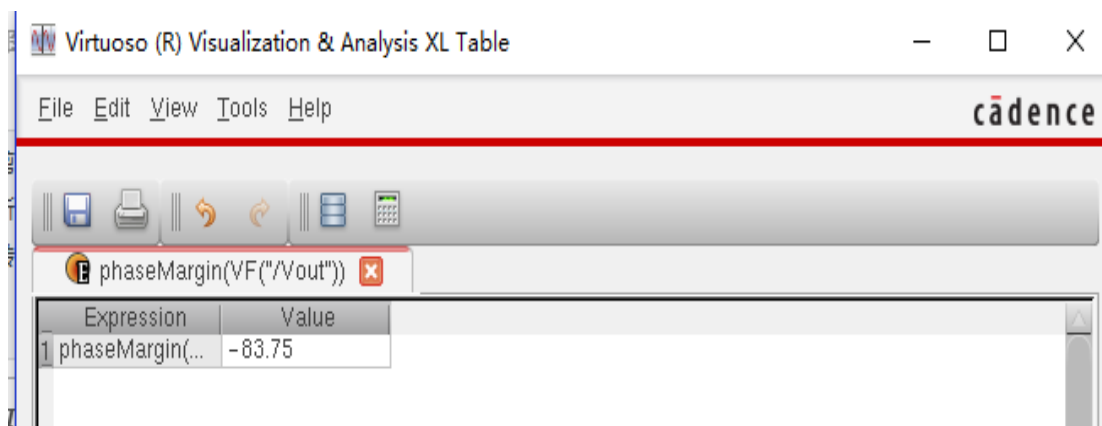


点击 Function Panel 中的 **phaseMargin** 函数, 得到下图:



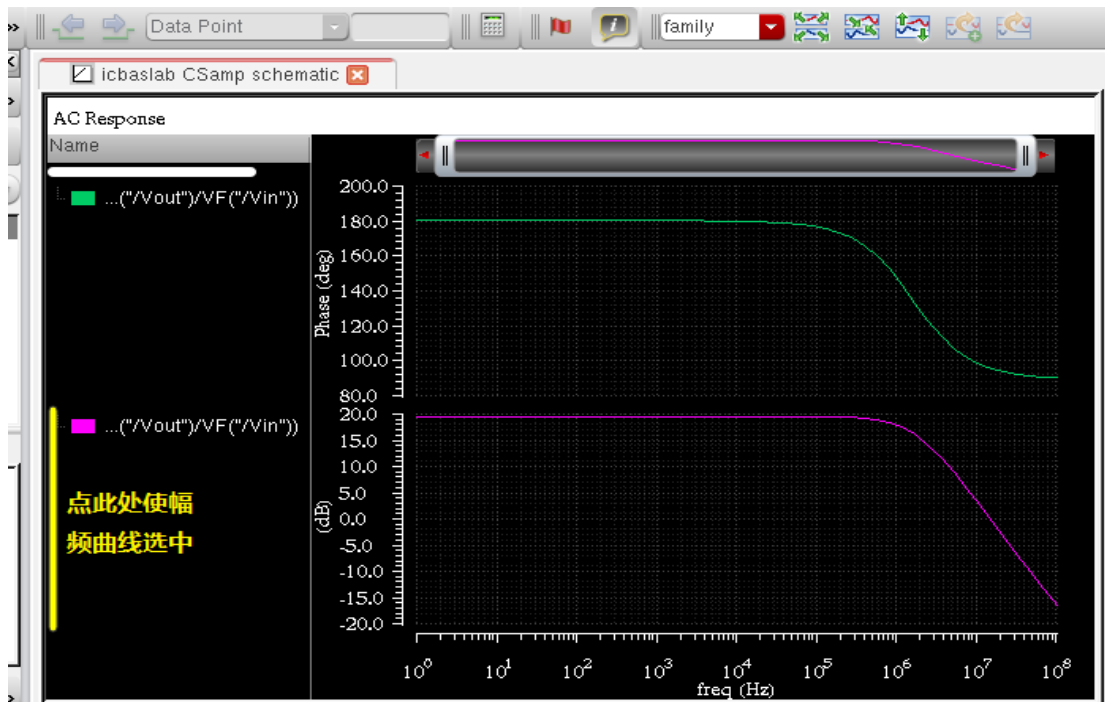
最后计算缓冲区公式 (Evaluate the buffer and display the results in a table 工具), 得到相位裕度参考值。

特别注意: 这里得到的相位裕度不正确, 需要订正 ( $+180^\circ$ )。原因如下: 相位裕度是针对负反馈环路的性能参数,  $PM=180^\circ + \angle \beta H(\omega_{GX})$ , 这里定义的  $H$  低频增益为正,  $\beta=1$ 。但是, 本实验 CS 电路为反相放大电路, 本身固有  $-180^\circ$ ; 另外, 3 极点或以上电路的相位裕度才是有意义的。

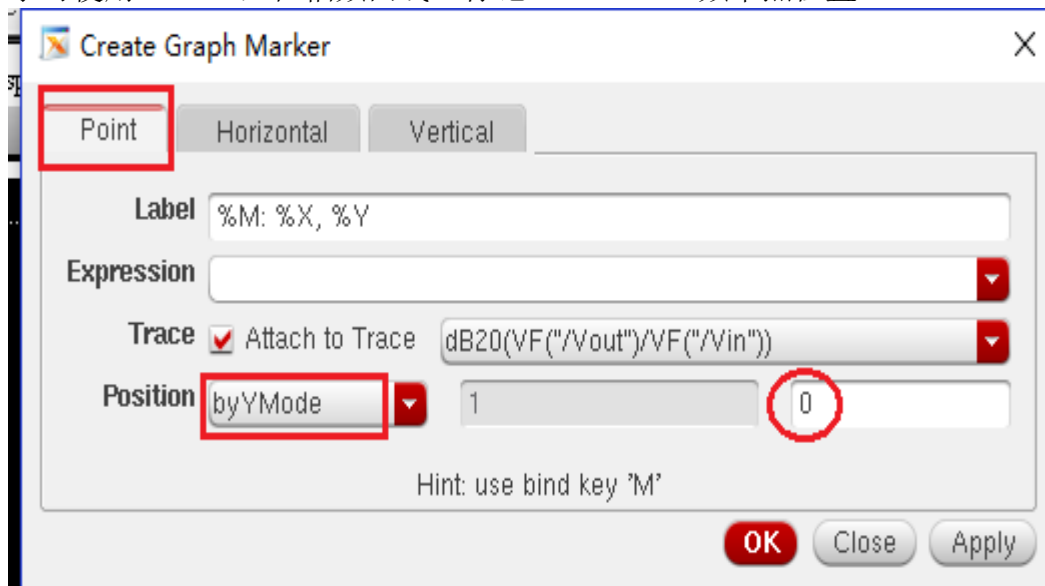


也可根据波形图，直观得到相位裕度：

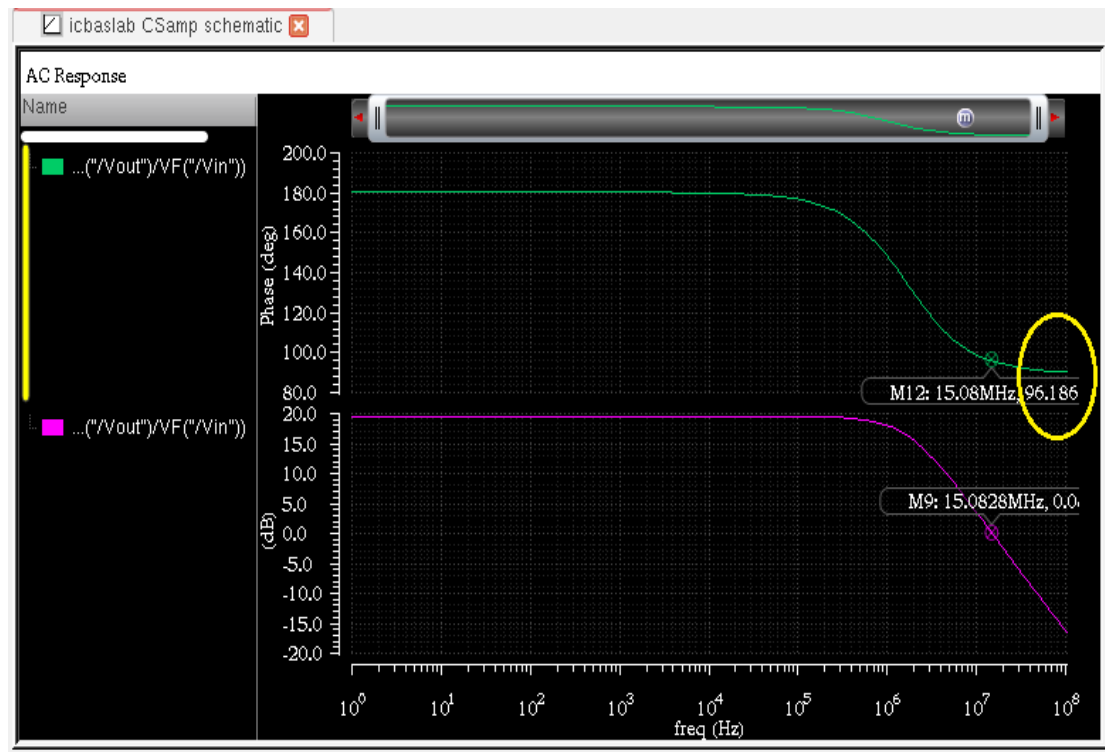
ADE L 仿真设置窗口，仅 ac 仿真有效，仿真后 Results→Direct Plot→AC gain & Phase，在电路图上先后选择输出 Vout 和输入 Vin 线网，出现波形窗口：



学习使用 Marker，在幅频曲线上标记 0dB (=1) 频率点位置：



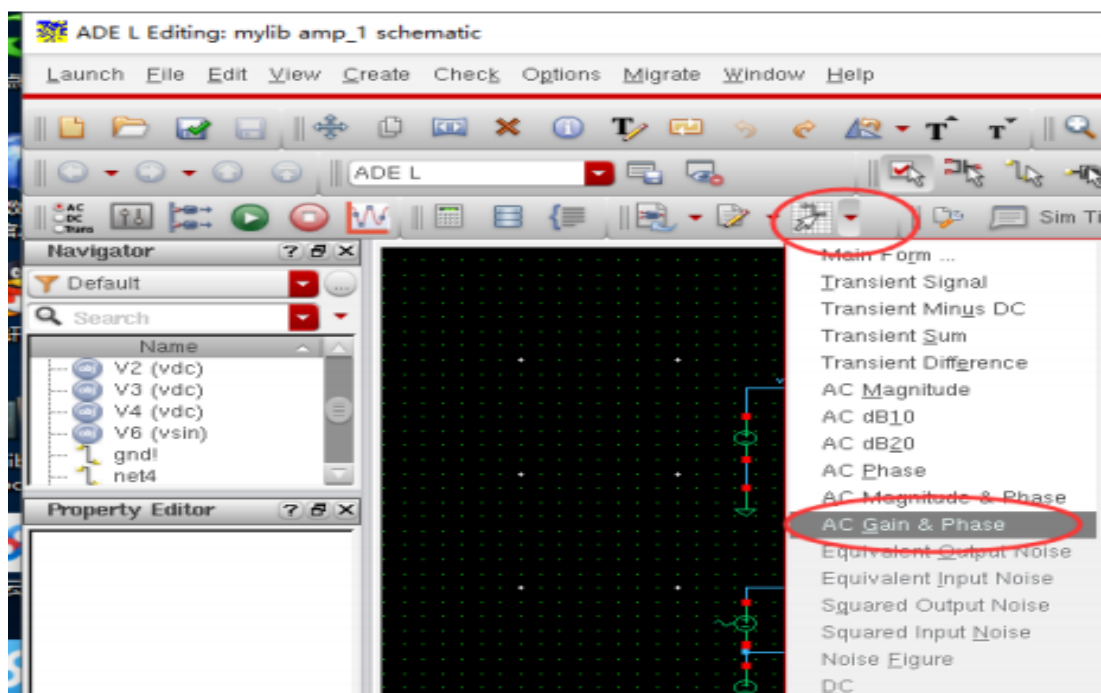
使波形图上相频曲线选中有效，使用 Marker 如前图，Posion 选 byXmode，键入对应幅频曲线 0dB 增益的频率数值（兆为 M），得到相位裕度。



进行另一个仿真前关闭先前仿真的多个结果窗口，只保留电路图和仿真设置窗口。

使用 Cadence 工具仿真同一功能，通常都有多种方法，本讲义一般只是介绍其中一种方法，鼓励你会使用其它方法。以相位裕度为例，也可如下进行：

AC 仿真后，在电路图 schematic 窗口，选 Direct Plot 下拉菜单中的 **AC Gain & Phase**：



分别在电路图上先后点击输出 Vout 和输入 Vin。如前所述，注意电路输出方向并根据相位裕度的定义，才能得到正确的相位裕度数值。

## 7. 噪声 noise 分析

噪声分析基于电路线性化模型，将电路内部各个互不相关的噪声源输出进行功率叠加，得到输出端的噪声“频谱”。不仅可以计算得到总噪声，也可分别得到电路的输出噪声、等效输入噪声，以及射频电路的噪声系数。

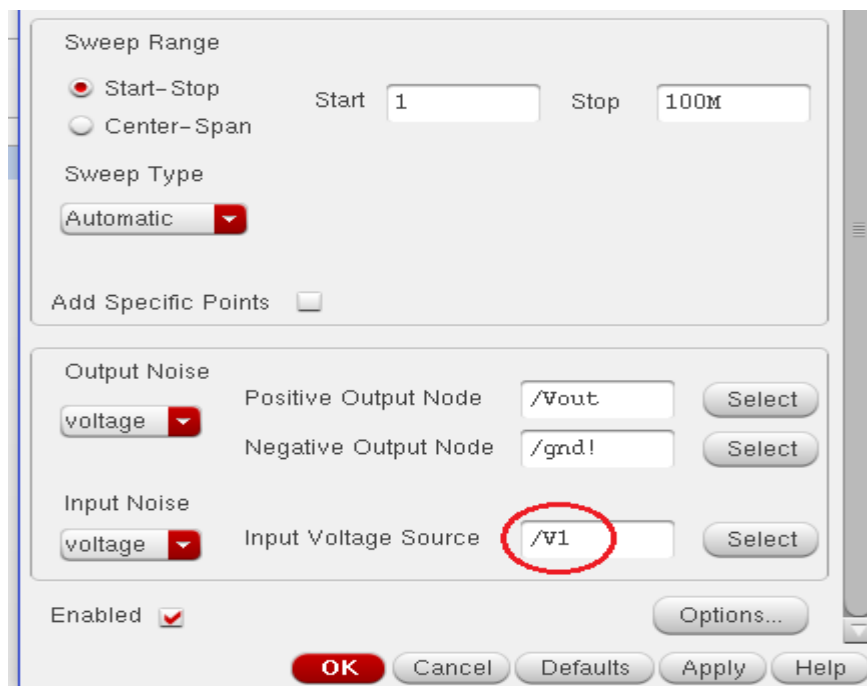
噪声分析中各种参数扫描的设置与 AC 仿真相同，因此可同时得到传递函数。

注意：射频电路中计算**噪声系数**或噪声因子时 input Noise 需要选用 50 欧姆 port(analogLib 库)作为激励源。

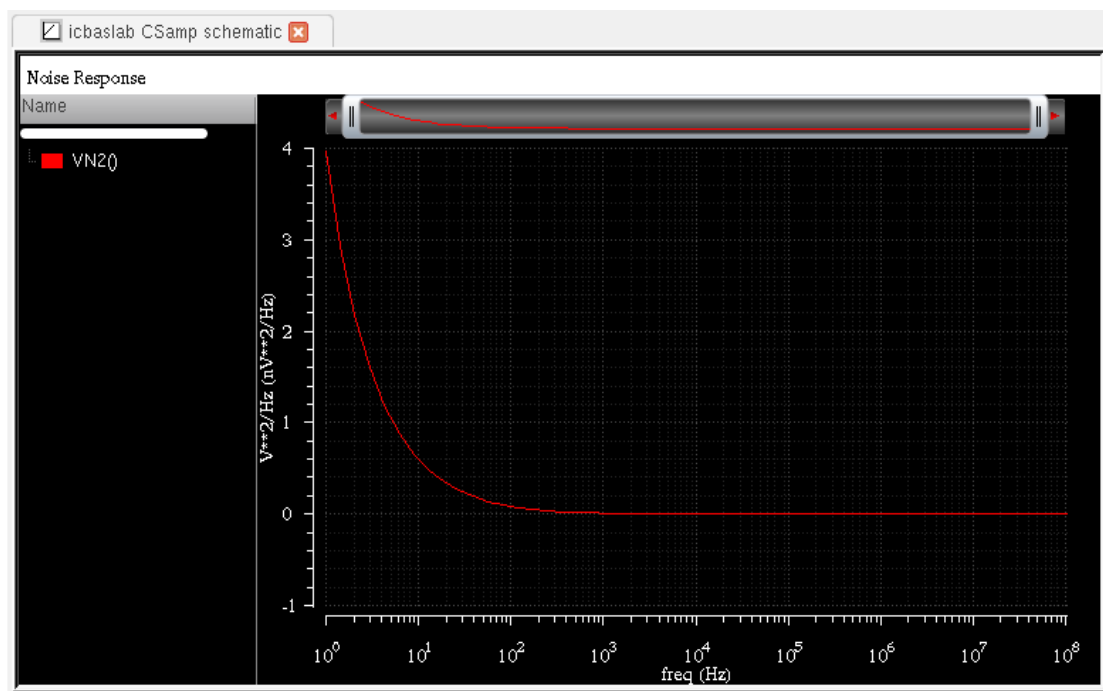
A. 在 ADE L 仿真设置窗口中选择 Choose Analyses 为 **noise**。

Sweep Variable 为 Frequency 有效，Sweep range 为 start=**1**，stop=**100M**。

若要计算输出噪声“功率”谱或等效输出噪声电压（随机电压有效值）、以及等效输入噪声电压，则 Choose analyses 窗口底部的 Output Noise 设置为 **voltage**，在电路图中选线网 Vout 和 gnd!；Input Noise 设置为 **voltage**，在电路图中选 V1 信号源。



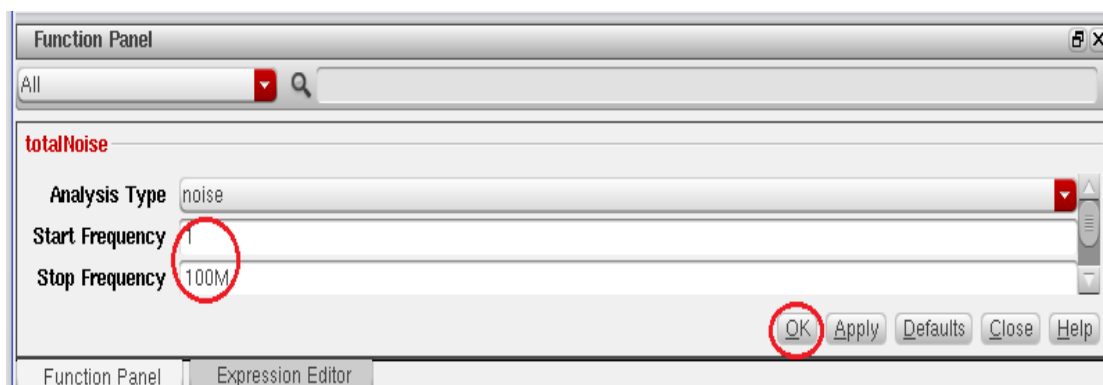
B.使 ADE L 仿真设置窗口的其它分析(tran、dc、ac)无效，仅 noise 分析有效（勾号），**Netlist and Run** 仿真 noise 分析，显示输出噪声“功率”谱波形：



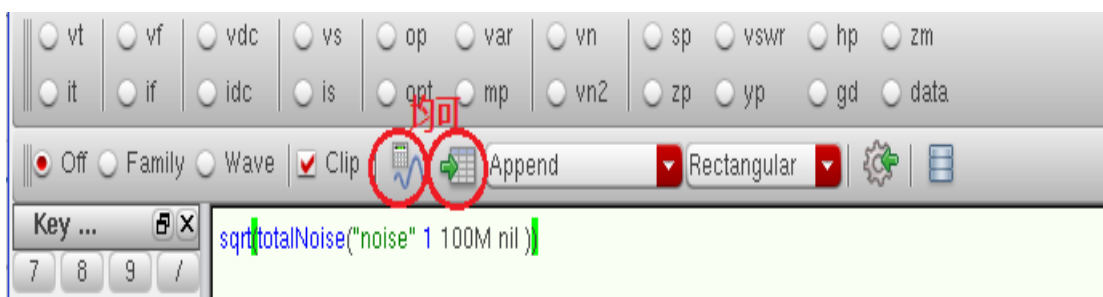
纵轴单位量纲为  $\text{nV}^2/\text{Hz}$ 。

### C. 用 Calculator 计算输出噪声总电压

在 Virtuoso(R) Visualization & Analysis XL 波形图窗口中，**Tools**→**Calculator**  
在 function Panel 中点击 totalNoise（如选错功能，则点下图 Close 恢复 function Panel），按下图设置起始和终止频率：



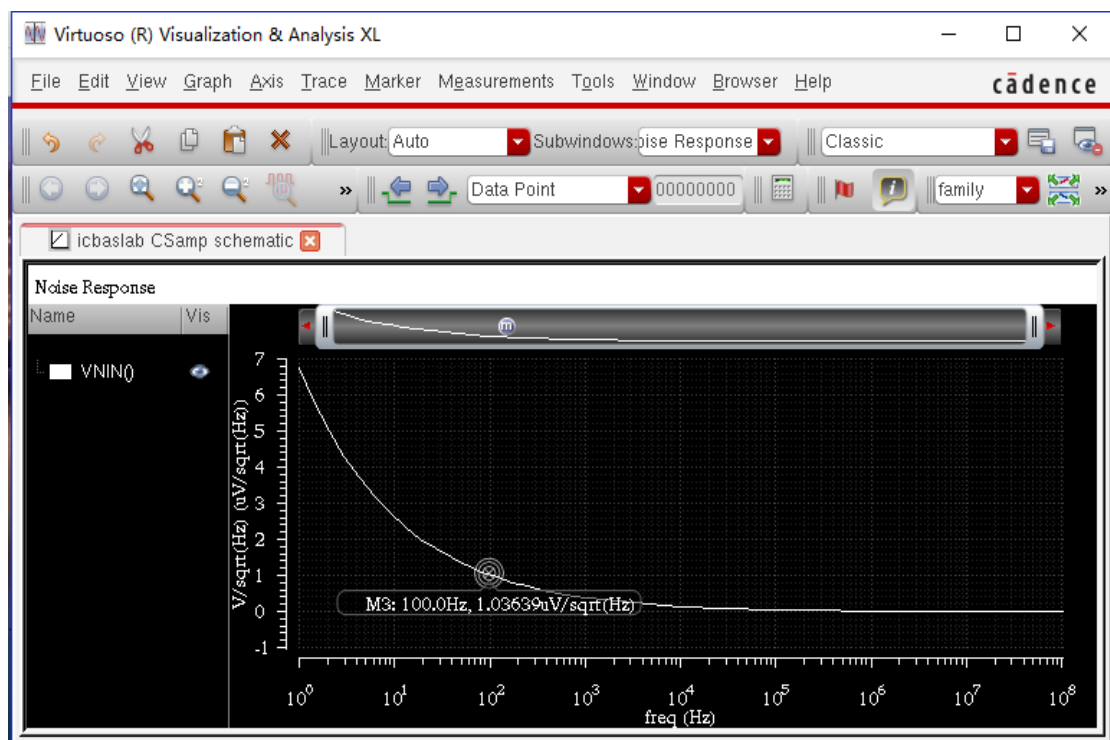
再选平方根计算 sqrt，得到下图：



计算得到的输出噪声电压是多少？

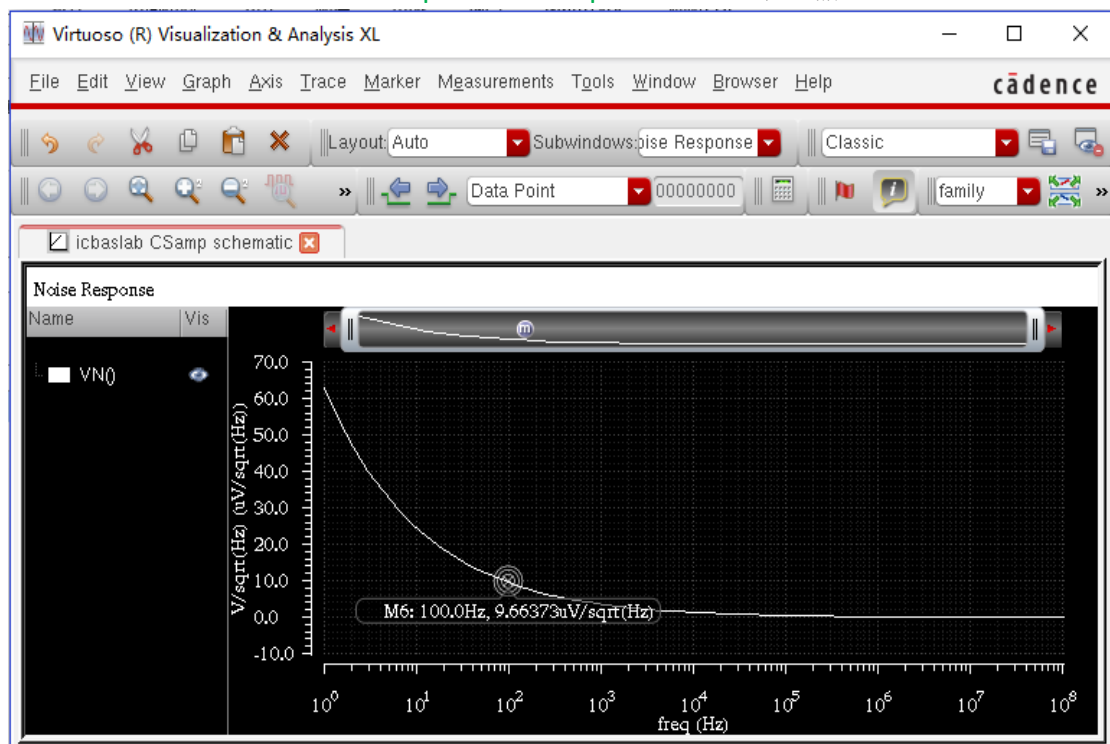
D. 求等效输入噪声电压“谱”和等效输出噪声电压“谱”:

ADE L 窗口, **Results**→**Direct Plot**→**Equivalent Input Noise**, 等效输入噪声电压“谱”

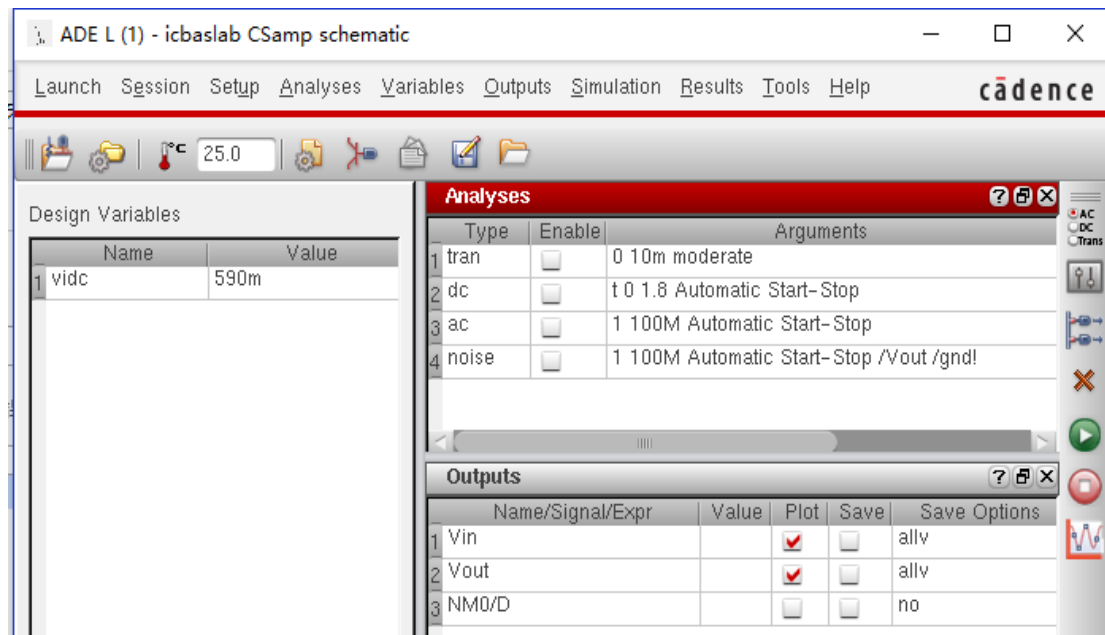


Marker 标记 100Hz 频率处的等效输入噪声电压“谱”量纲为 uV/sqrt(Hz)。

**Results**→**Direct Plot**→**Equivalent Output Noise**, 等效输出噪声电压“谱”:



关闭先前仿真结果的多个窗口，保留 schematic 和仿真设置窗口，以后不再累述。在 ADE L 仿真 设置窗口中，使所有 Analyses 仿真无效如下图。

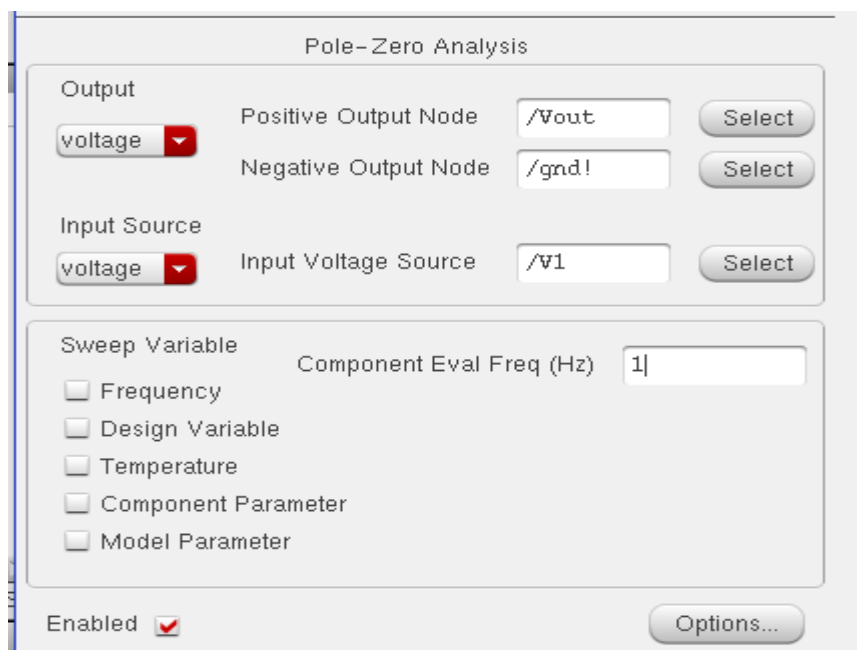


## 8. 零极点 pz 分析

零极点是与小交变信号相关的概念，仅用于非时变电路。

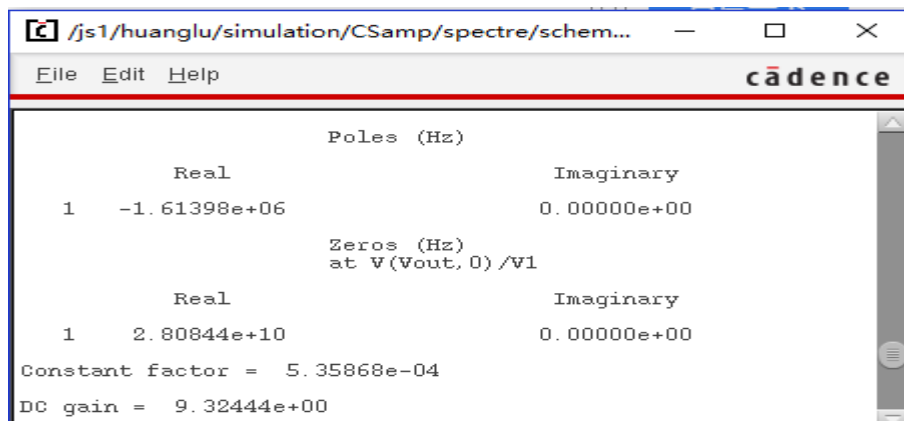
- A. 在 ADE L 仿真窗口中 choose Analyses 选 pz，  
Output 和 Input source 均为电压，  
规则：若输出为电压则 output 选择 voltage，  
若输出为电流则 output 选择用 probe。

设置如下图：





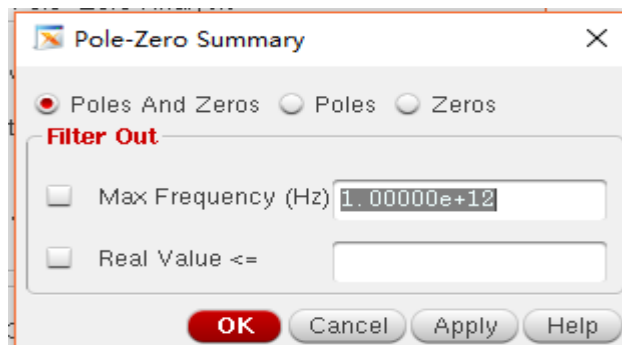
运行仿真后，得到结果：



极点频率  $f_p=3\text{dB}$  带宽  $=1/(2\pi(R||r_o)C)=?$

B. 查看零极点的另一种方法：

在 ADE L 仿真设置窗口 **Results**→**Print**→**Pole-Zero Summary**



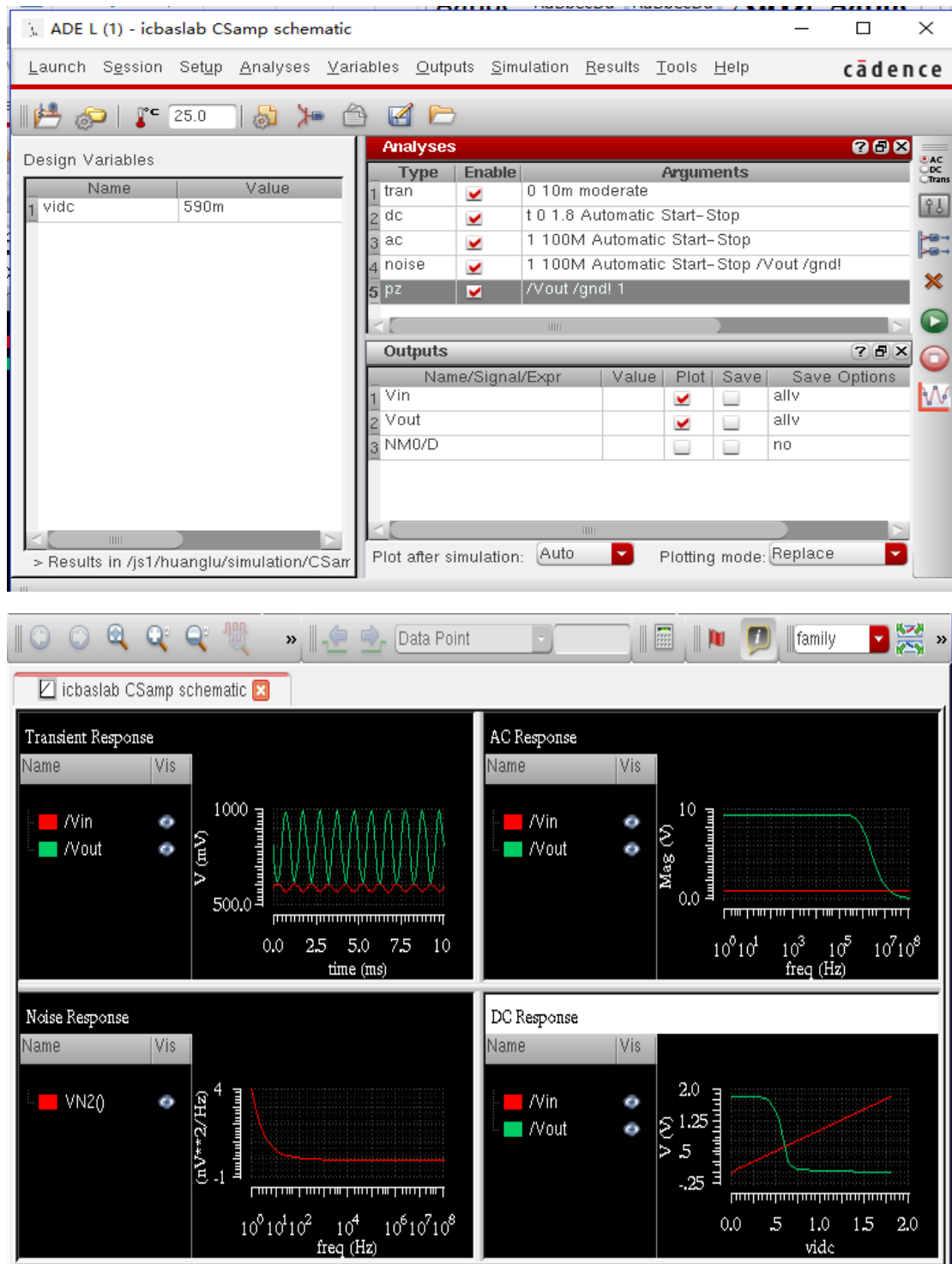
得到 Results display window。

$$\frac{1}{1 + \frac{s}{2\pi f_p}}$$

说明：传递函数  $\frac{1}{1 + \frac{s}{2\pi f_p}}$ ，因此极点实部为负值。

在**射频电路 LNA（低噪放）**设计中，噪声分析和零极点分析需要在电路图中将输入信号源换成 **port 器件**（50 欧姆特征阻抗的天线输入）**symbol**。

进行合成分析，仿真结果图写入实验报告。



## 9. 扫描仿真

模拟电路设计中常用的 dc、ac 分析仿真均可进行多种变量扫描，以便快速找到合适的器件设计参数或直流工作点。

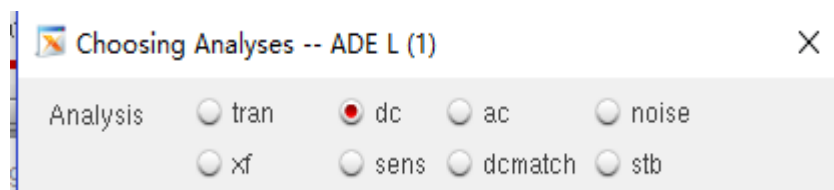
直流 dc 分析可扫描 Temperature、Design Variable、Component Parameter;

交流 ac 分析可扫描 Frequency、Design Variable、Temperature、Component Parameter，以及 Model Parameter（确定工艺下对设计无用）。

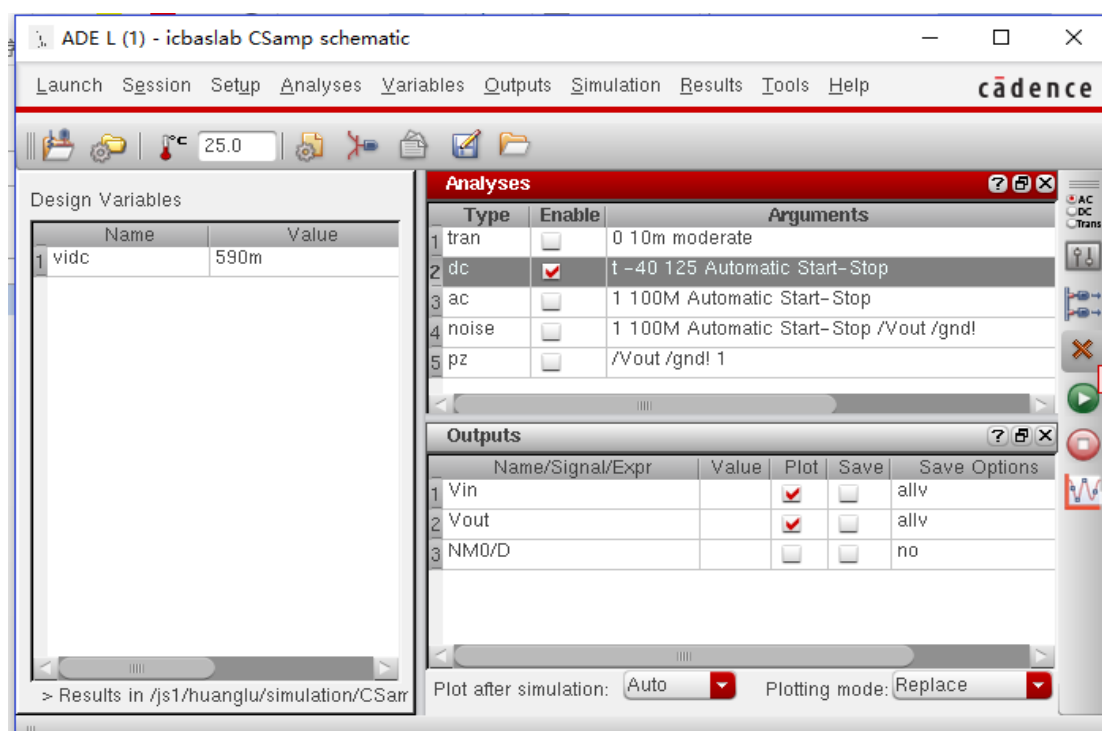
对应于选定的扫描变量，需要输入相应合适的扫描范围。

进行直流 dc 分析温度扫描，温度扫描范围设置为-40~125°（有效温度范围需要在工艺说明文件中查找，例如：

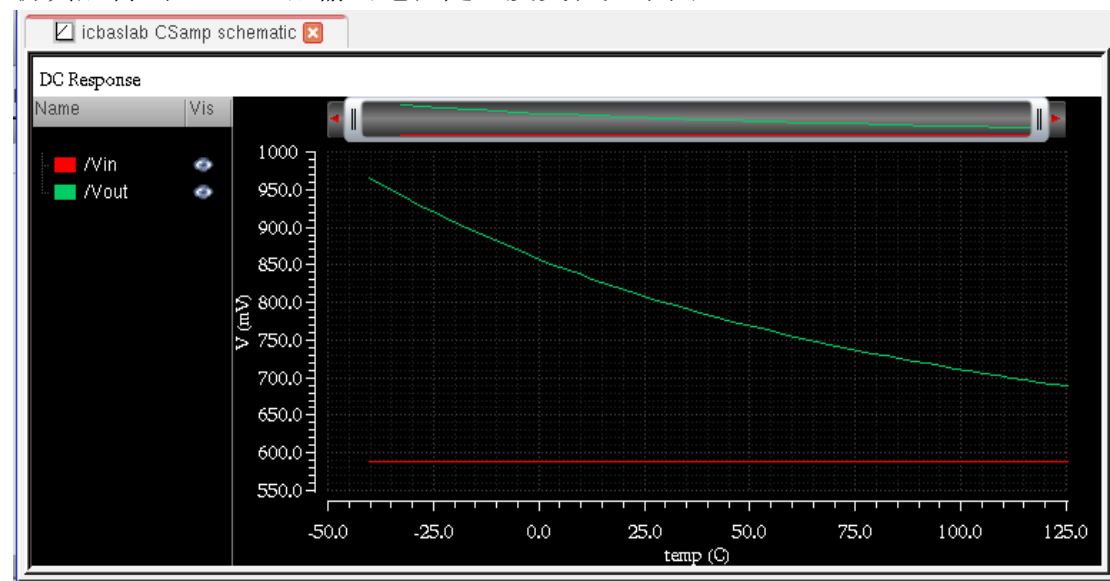
.../smic180/foundry/SMIC18MIX/spice\_model/TD-MM18-SP-2002v0T，超出有效温度范围的仿真可能无效）：



使 ADE L 仿真设置窗口中的其它分析无效，仅 dc 仿真有效。



仿真后得到  $V_{out}$  直流输出电位随温度变化如下图：



## ● 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.实验报告包括：
  - A.最终设计电路图的器件参数表；
  - B.低频小信号电压增益、输入和输出直流电平、电路电流、共源放大器的带宽、相位裕度、零极点值；
  - C. 简要总结获得相位裕度的仿真流程；
  - D.实验步骤中的各个仿真波形与说明；如与设计指标相差较大（>10%）需合理解释原因。