

## 实验四 差分放大电路（仿真）

独立完成，如发现雷同则重做或无成绩！图纸要求见实验内容，可将多张图片和波形拼接在一页 A4 纸打印，黑白打印，打印的图片或波形，细节必须能看清楚。下文中的图片或波形仅供参考，非标准答案！请自行绘制原理图和波形图，并在图中显示本人班级\_姓名（如信 123\_张三，短横可省去）！实验报告中图和表的标号顺序根据实际情况按序规范标记。

### 一、实验目的

1. 理解差分放大电路的基本性能特点。
2. 理解恒流源的结构特征与性能参数。
3. 掌握 OrCAD 软件的基本分析功能，分析电路的性能。

### 二、实验原理

#### 1. 差分的概念

差分式放大电路简称为“差分放大电路”、“差放电路”或者“差放”，是由两个基本反相放大电路组合而成，因此有两个输入端和两个输出端，也是基本放大电路之一。差分式放大电路具有很强的抑制零点漂移、噪声与干扰信号的能力，因此在直接耦合多级放大电路中得到广泛应用，几乎是所有集成运放、模拟乘法器和电压比较器等电路的输入级，又几乎决定着这些电路的差模输入特性、共模抑制特性、输入失调特性和噪声特性等。

#### 2. 差模信号和共模信号

将两个输入端的信号之差定义为差模输入信号，用  $v_{id}$  表示，即有

$$v_{id} = v_{i1} - v_{i2}$$

当电路输入的是差模电压  $v_{id}$  时，对应的输出称为差模输出电压，用  $v_{od}$  表示，则

$$v_{od} = A_{vd}(v_{i1} - v_{i2}) = A_{vd}v_{id}$$

式中的  $A_{vd}$  称作为差模电压增益。由于差放电路能有效的放大差模信号，因此  $A_{vd}$  的绝对值应大于 1，并尽可能大些。此外，将  $v_{i1} = -v_{i2}$  称作纯差模信号。

将两个输入端的信号的均值定义为共模输入信号，用  $v_{ic}$  表示，即有

$$v_{ic} = \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2}$$

当电路输入的是共模电压  $v_{ic}$  时，对应的输出电压称为共模输出电压，用  $v_{oc}$  表示，则

$$v_{oc} = A_{vc} v_{ic}$$

式中的  $A_{vc}$  称作为共模电压增益。由于差放电路应能有效的抑制共模信号，因此  $A_{vc}$  的绝对值应尽可能小，电路对称且为双端输出时可认为是零。

### 3. 单端输入（输出）和双端输入（输出）

差分放大器的输入、输出方式有单端和双端两种。若差分放大器的两输入端中的一端加信号，另一端接地，则成为单端输入；若两端都加信号则称为双端输入。

同样，若差分放大器中的输入信号从其中任一集电极对地取出，称为单端输出；若输出信号从两个集电极之间取出，称为双端输出或浮动输出。

### 4. 差模电压增益 ( $A_{vd}$ ) 的计算

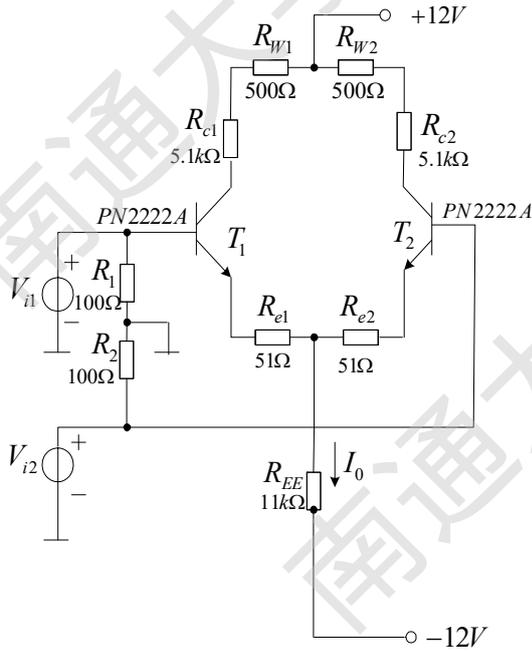


图 4.1 简单差分放大电路

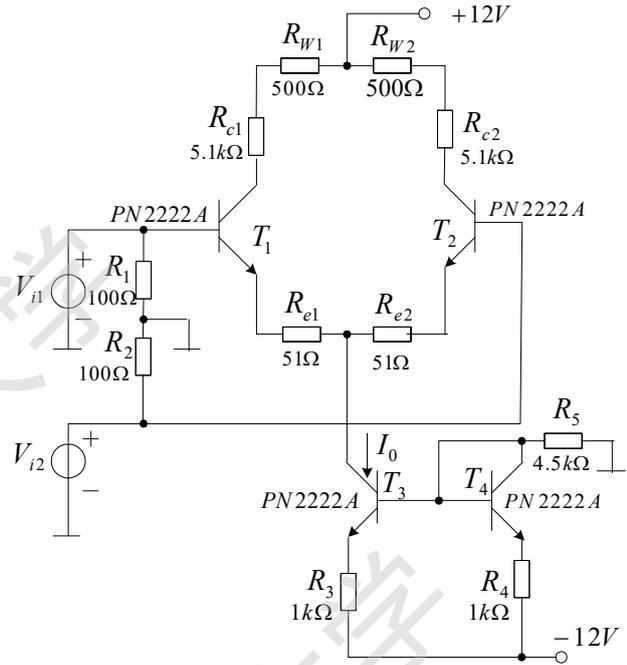


图 4.2 采用恒流源偏置的差分放大电路

图 4.1 中的简单差分放大电路，当发射机反馈电阻  $R_{e1}=R_{e2}=R_e$  时，双端输出的差模电压增益  $A_{vd}$  与单管共射放大电路的增益相同，即

$$A_{vd} = -\frac{\beta[R_C // (\frac{1}{2}R_L)]}{r_{be1} + (1 + \beta)R_e}$$

其中， $R_L$  为负载。

而单端输出的差模电压增益为双端输出的差模电压增益的一半，即

$$A_{vd1} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be1} + (1 + \beta)R_e}$$

### 5. 共模电压增益 ( $A_{vc}$ ) 的计算

图 4.1 中的简单差分放大电路的单端输出共模电压增益为：

$$A_{vc1} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be1} + (1 + \beta)(R_{e1} + 2R_{EE})} \approx -\frac{R_{C1} // R_L}{2R_{EE}}$$

若图 4.1 中的  $R_{EE}$  用恒流源代替，如图 4.2，则只要将  $R_{EE}$  用恒流源输出管的交流输出电阻  $r_o$  代替，即可得到带有恒流源的差分放大电路的单端输出共模增益。

在满足理想对称的条件下，双端输出的共模电压增益趋近于零。

## 6. 输出电压 $v_o$ 和共模抑制比 $K_{CMR}$

当电路中同时存在差模、共模信号时，差分放大电路的输出电压为

$$v_o = v_{od} + v_{oc} = A_{vd}v_{id} + A_{vc}v_{ic}$$

理想情况下，双端输出时的共模电压增益  $A_{vc}=0$ ，则  $v_o=v_{od}$ ，即输出电压中只含有差模分量  $v_{od}$ ；单端输出时，共模电压增益  $A_{vc}\neq 0$ ，则  $v_o=v_{od}+v_{oc}$ ，即输出电压中除了差模分量  $v_{od}$  外还含有共模分量  $v_{oc}$ ，通常  $|A_{vd}| \gg |A_{vc}|$ ，因此共模分量  $v_{oc}$  很小。

共模抑制比  $K_{CMR}$  是衡量差分电路放大差模信号、抑制共模信号能力的重要指标，其定义为

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right|$$

如果用分贝表示，则为

$$K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \quad (\text{dB})$$

$K_{CMR}$  越大，表明差分放大电路抑制共模信号的能力越强、性能越好。

## 7. 差分放大电路的差模传输特性

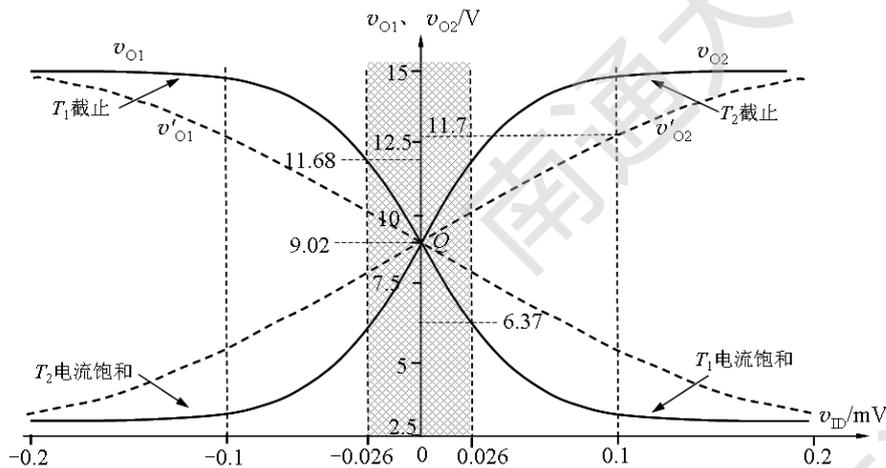


图 4.3 差模传输特性

若图 4.1 所示电路不接入反馈电阻  $R_{e1}$  和  $R_{e2}$ ，则差模传输特性的线性范围限制在  $\pm 26 \text{ mV}$ （图 4.3 中实线）；接入反馈电阻  $R_{e1}$  和  $R_{e2}$  后，差模传输特性的线性范围扩展到  $\pm 0.1 \text{ V}$ （图 4.3 中虚线），但此时单端输出电压增益明显下降（曲线斜率降低）。由此可见，线性范围的扩大是以牺牲增益为代价的。

## 8. 电路不对称对性能的影响

在电路两侧对称的理想情况下，输入差模信号时仅输出差模信号；输入共模信号时输出仅有共模信号。双端输出时，由于两管共模输出电压相抵消，因此差分放大电路对共模输入信号具有无限抑制能力。而当电路两侧不对称时（两管特性参数或集电极电阻  $R_c$  不相等），在差模输入信号作用下，两管输出电压不会严格等值相反。这样，两输出端电压除了差模分量外，还同时有了共模分量。同样，在共模输入信号作用下，两输出端电压除了共模分量外，还同时有了差模分量，双端输出时，由于输出端电压中的共模分量相抵消，因此输出电压仅有其中的差模电压分量，导致在多级放大电路中，由于前级差分电路不对称造成的误差，将被后级放大电路放大。因此在电路设计时应尽可能避免差分电路的不对称情况发生。

## 三、实验内容

### 1. 测量差分放大电路静态工作点参数

参考电路如图 4.2 所示，创建图 4.4 仿真原理图，信号源选择正弦信号源 VSIN，振幅（幅值）15mV，频率 2kHz，偏移为 0；三极管选择 Q2N2222。为方便测量，也可添加导线别名，如 n1~n4，通过绘图工具栏的别名工具  添加。差模输入时，V1 中交流分析电压 AC 为 1，V2 中交流分析电压 AC 为 -1。

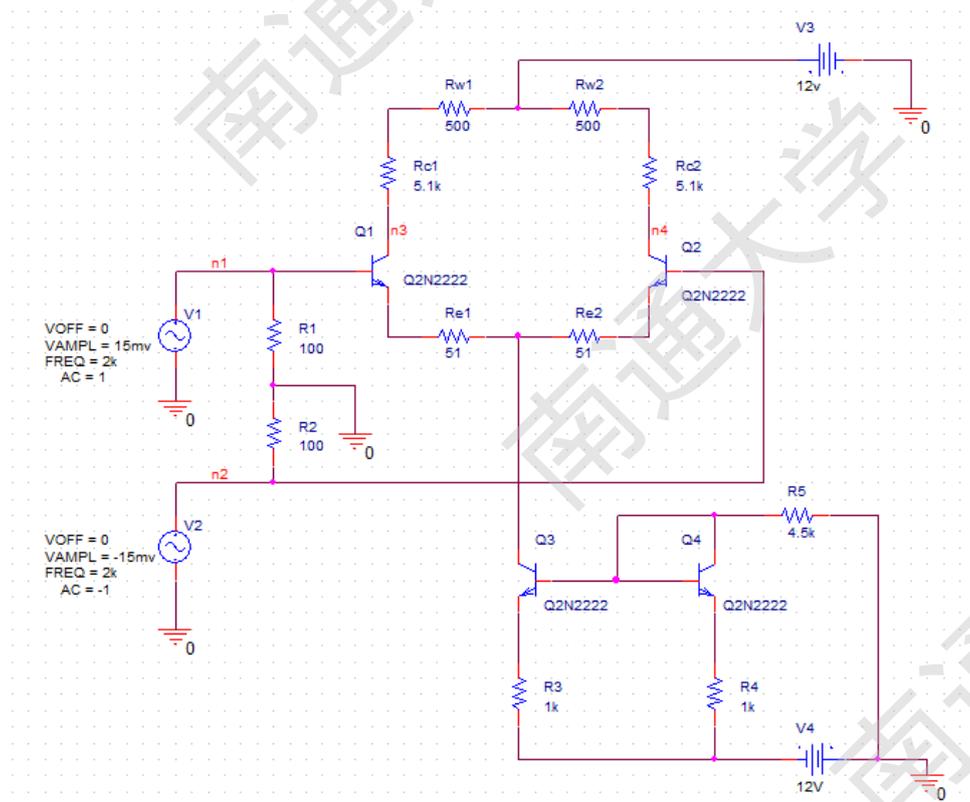


图4.4 差分放大电路原理图

(1) 电路仿真参数设置。新建仿真并命名，点击“Create”，选择静态工作点分析，如图 4.5。

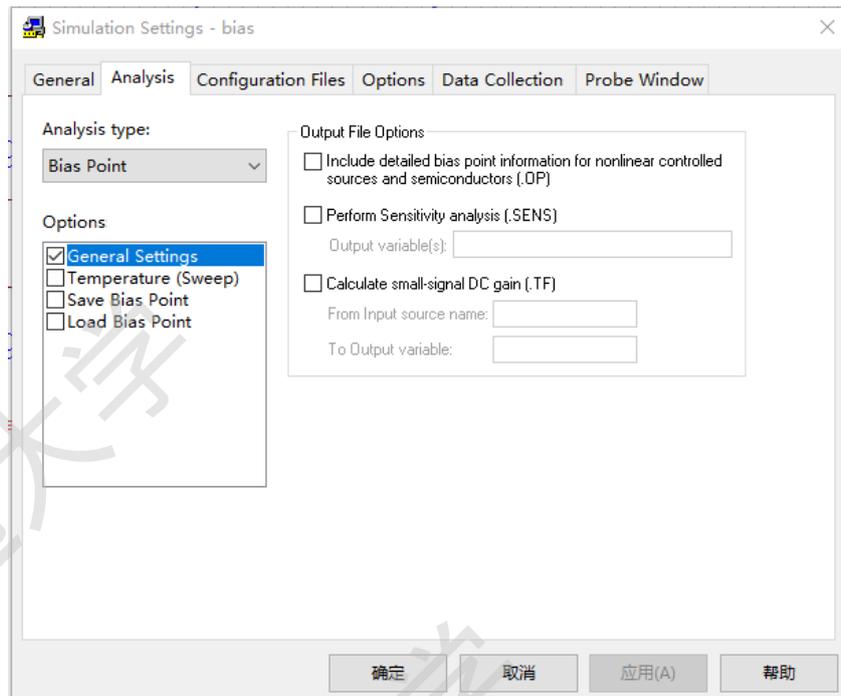


图4.5 静态工作点仿真参数设置

(2) 运行仿真。点击确定，按  ,点击  、 ，得到各管静态工作点，如图 4.6，数值框可使用鼠标调整位置，以方便读取。或在弹出的仿真窗口，点击菜单栏 View - Output File，得到各个静态工作点，如图 4.7。

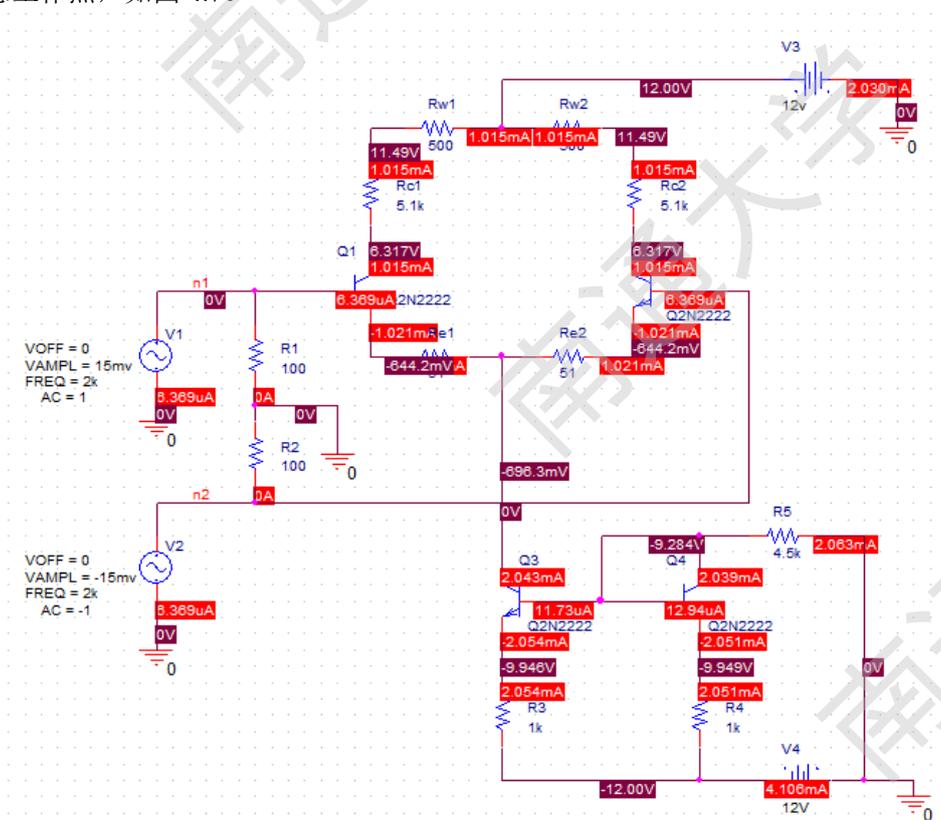


图 4.6 静态工作点参数

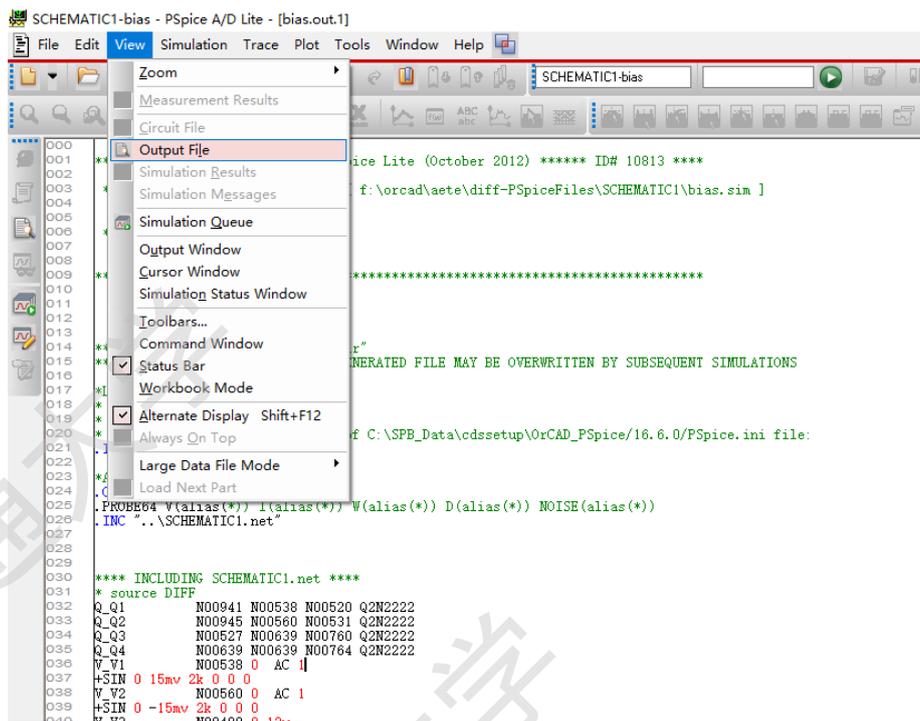


图 4.7 静态工作点参数网表

根据各对应值，测出 T1~T4 各管的静态工作点电压和各管的静态工作点电流（静态工作点电压为集电极与发射极之间的电压差，静态工作点电流为集电极上的电流），将所测结果记入表 4.1。

表4.1 各晶体管静态工作点参数

	T1	T2	T3	T4
Ic (mA)				
Vce (V)				

**注意：**

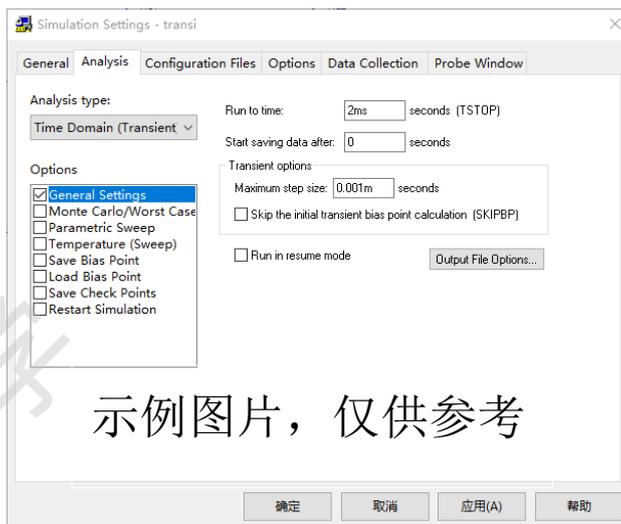
(a) 图 4.4 与图 4.6 在撰写报告时要求打印，在菜单栏选择 Place—Text...添加图注文本，显示班级\_姓名信息。

(b)图 4.4 与图 4.6 所示原理图在保存时不要直接在编辑界面截图,使用菜单栏 File - Print Area - Set, 选择打印区域, 然后选择 File - Print..., 打印为 PDF 或者 XPS 格式后(矢量图)再截图。

File - Print Area - Clear, 可取消选择打印区域

2. 测量差模输出信号与增益（瞬态扫描法）

(1) 电路仿真参数设置。新建仿真并命名，点击“Create”，然后选择瞬态分析，参数如图4.8，时长设为2ms（通常，显示3-5个完整周期即可）。可设置最大步长“Maximum step size”，时间越短，输出曲线越平滑。



示例图片，仅供参考

图4.8 仿真参数设置

(2) 运行仿真，添加波形，Add Trace...，如图4.9。选择输出电压V(Q1:c)或V(n3)，如图4.10，点击“OK”，弹出波形，如图4.11。再Add Trace选择V(Q2:c)或V(n4)，点击OK，如图4.12，比较两输出端的相位关系。

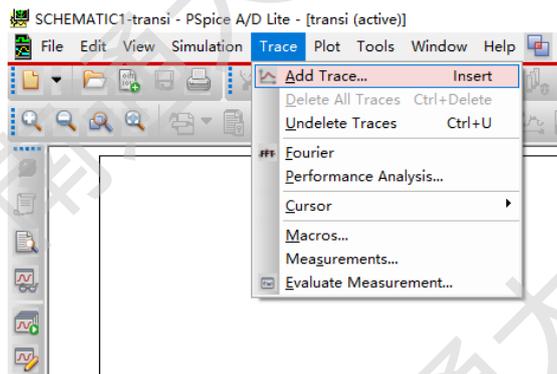
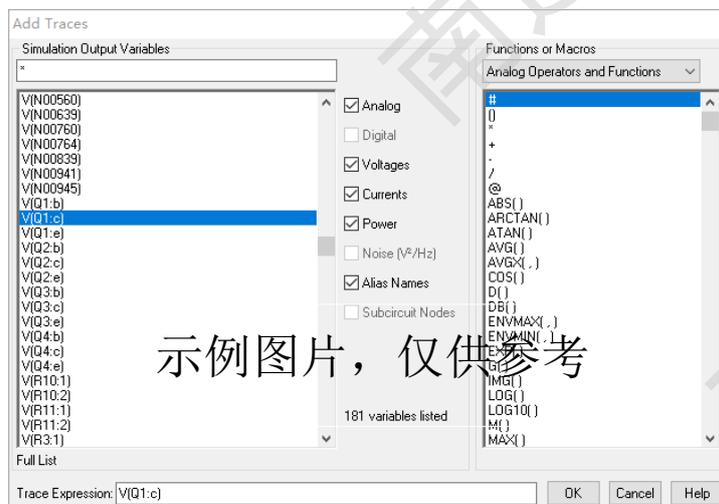


图4.9 添加波形设置



示例图片，仅供参考

图4.10 输出电压仿真函数设置

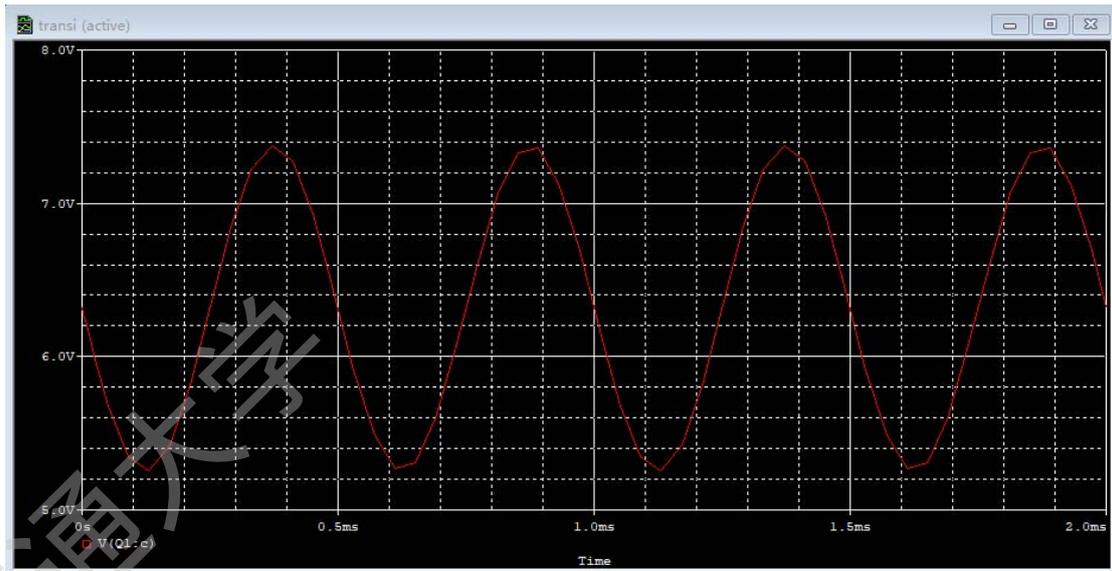


图4.11 输出电压V(Q1:c)波形

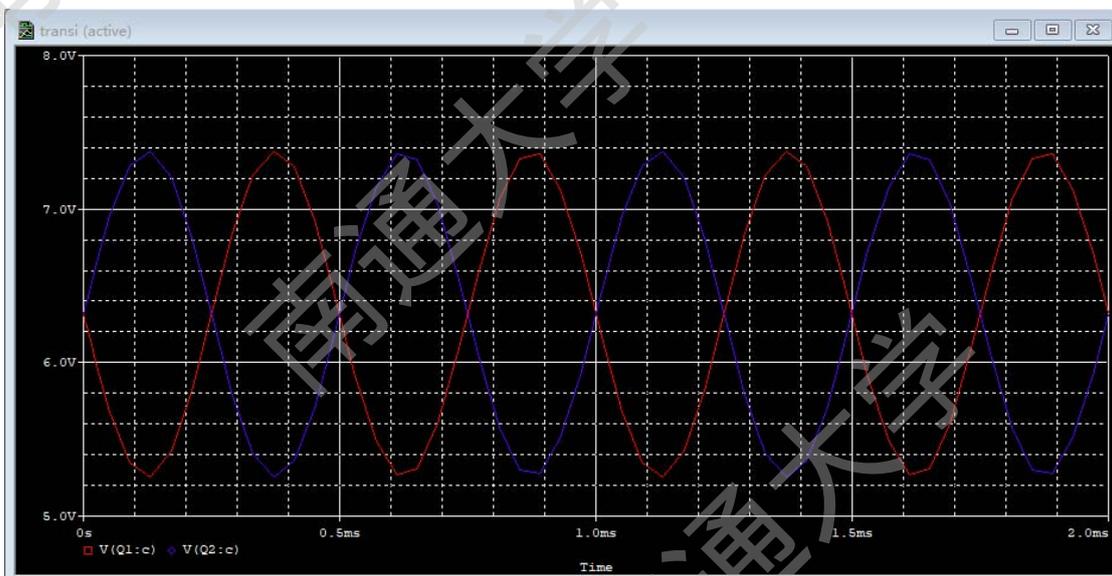


图4.12 输出电压V(Q1:c)与V(Q2:c)波形

**注意：**

默认输出波形为黑色背景，可以在Tools-Options中更换波形图前景色与背景色。更改为白色背景，黑色前景（注意与灰色区分，灰色打印会比较模糊）。

点击图形，按鼠标右键，在下拉菜单中选择Cursor on，或在工具栏选择游标工具 （Cursor），在右下角游标窗口读取输出电压峰一峰值，如图4.13和图4.14。选择File-Print...，打印为PDF或XPS格式（矢量图，可任意放大缩小），如图4.15。

(3) 将各数据按表4.2要求记录，并计算出各差模电压放大倍数，并将双端输出放大倍数转换为增益。

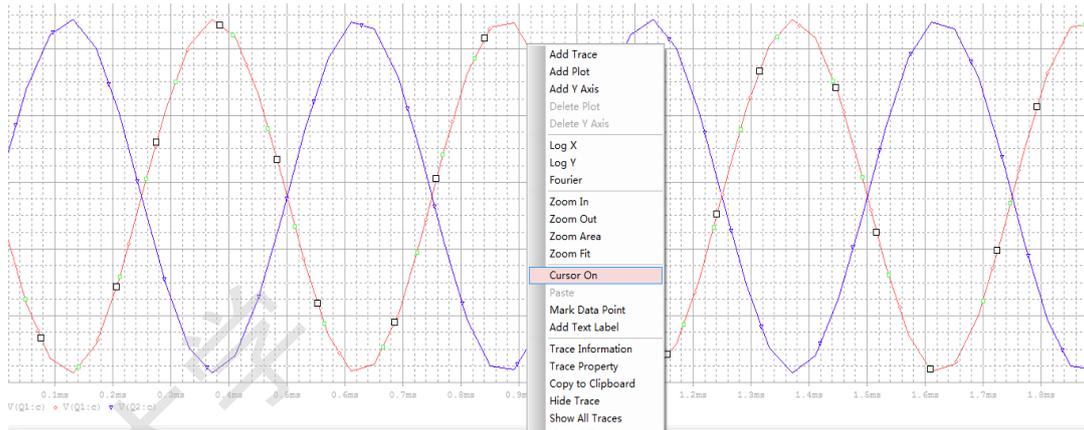


图 4.13 游标工具选取界面

Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2	Y1(Cursor)
	X Values	632.295u	0.000	632.295u	Y1 - Y1(Cursor)
CURSOR 1,2	V(Q1:c)	5.2577	6.3167	-1.0589	0.000
	V(Q2:c)	7.3757	6.3167	1.0590	2.1179

图4.14 游标参数窗口

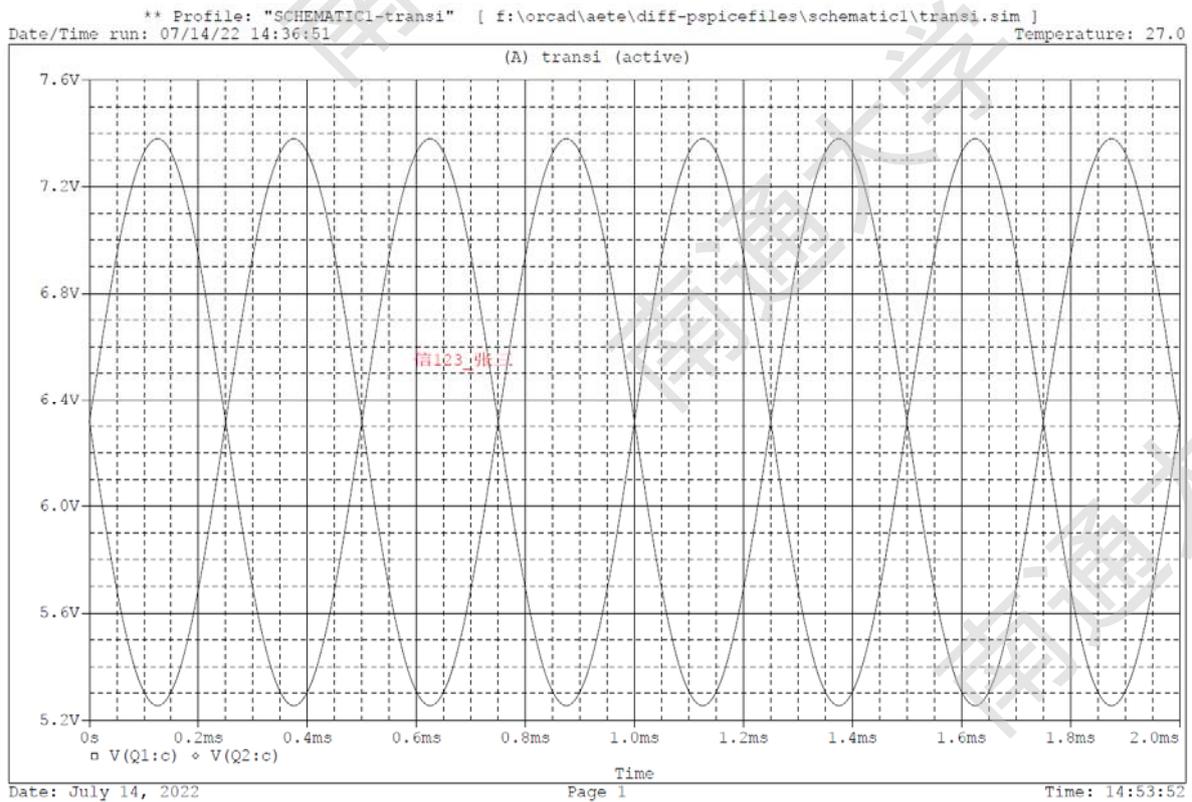


图4.15 打印输出波形

注意：

(a) 本实验所有仿真波形图（如图4.15）在撰写报告时要求打印，在输出为PDF或者XPS格式后再截图，不要在软件仿真界面直接截图。图中要添加班级\_姓名文本框（菜单栏Plot-Label-Text），保留图片上方和下方的打印日期和文档路径。

(b) 部分波形坐标轴标尺字号偏小，波形交细，需要加大字号，加粗波形，再截图打印。

(c) 波形打印（如图4.15），需要白色背景，黑色前景，软件在白色背景时，默认的前景色为灰色，打印后会不太清晰，请参考教材里方法修改。

### 3. 交流扫描法测量增益与带宽

电路如图4.4，双端输入双端输出，测量交流扫描法增益  $A'_{vd}$  和带宽  $BW$ ，并与步骤2中的瞬态法测量增益  $A_{vd}$  比较。

(1) 电路仿真参数设置。新建仿真并命名，然后选择AC分析，参数如图4.16。注意“兆”的符号为“meg”，不是“m”。

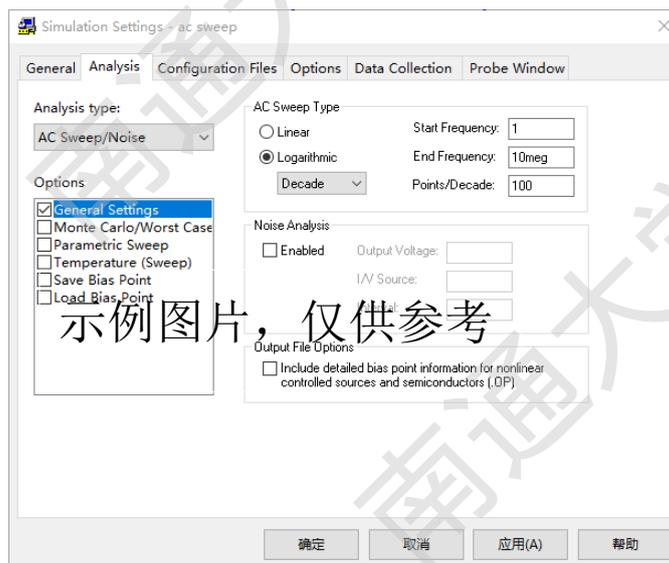


图4.16 交流分析参数设置

(2) 运行仿真，点击确定，按run 。添加波形，Add Trace...，如图4.17，在Trace Expression输入DB公式，点击“OK”，弹出波形，如图4.18。选择游标工具（Cursor），在中频区读取增益峰值，并使用“Mark Label”标记出此时频率与增益值，数值文本框可移动，防止被网格线遮挡，影响阅读。移动光标线，使之指向下降3DB（纵坐标从约37DB降到约34DB）处，从图4.19中读出在下降到34.057时横坐标为7.4538M，对应上限频率  $f_H$ 。即带宽  $BW = f_H - f_L$  为7.4538M。

(3) 将数据记录到表4.2。

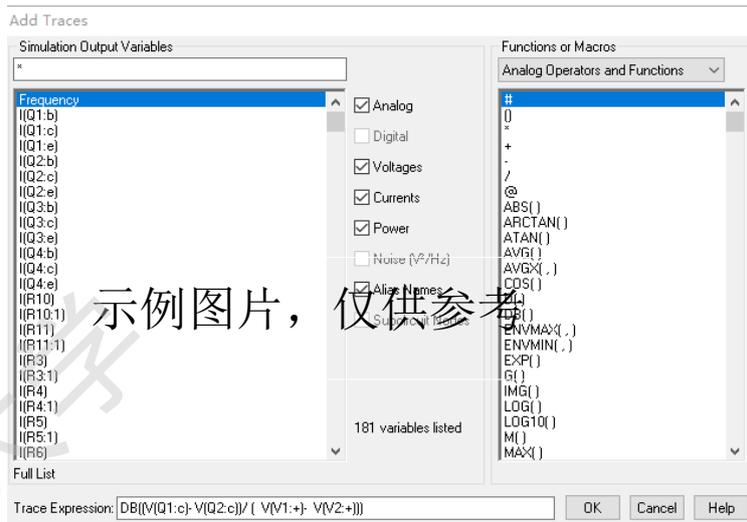


图4.17 增益仿真参数设置

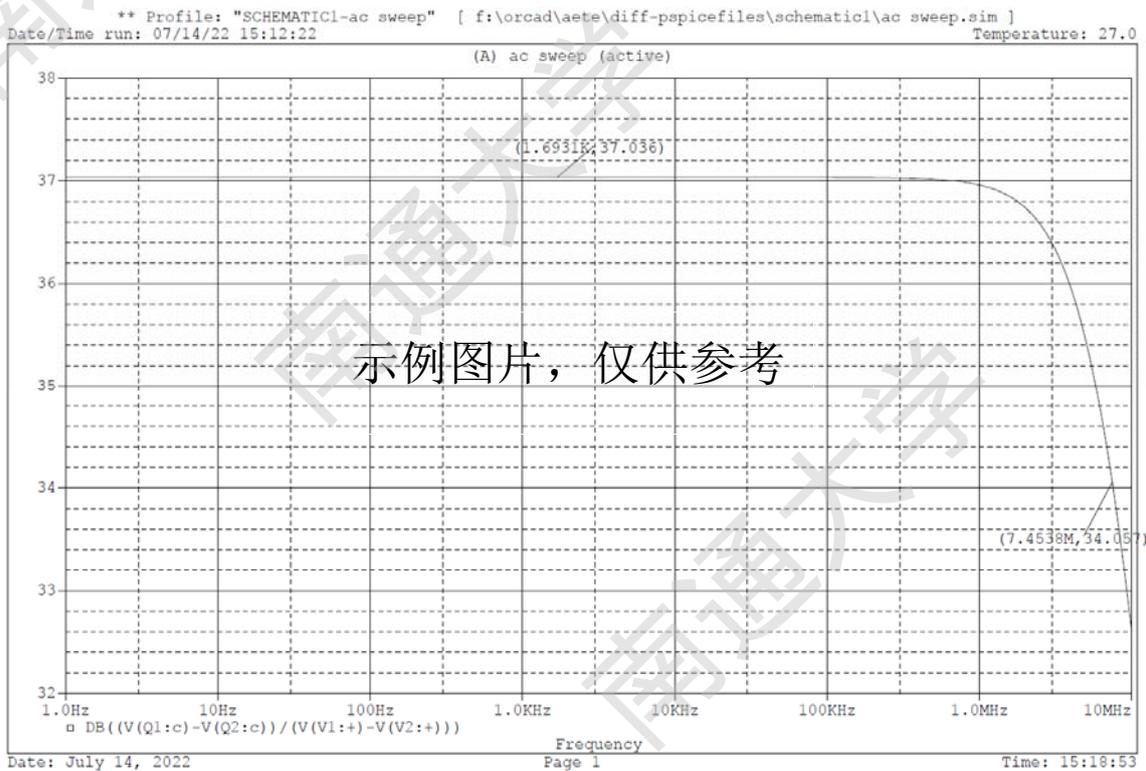


图4.18 放大电路增益（幅频响应）波形与带宽

Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2
	X Values	7.4538M	1.0000	7.4538M
CURSOR 1.2	DB((V(Q1:c)-V(Q2:c))/(V(V1:+) - V(V2:+)))	34.057	37.036	-2.9788

图4.19 游标参数窗口

表 4.2 差模输入参数

$V_{od1}$ (p-p)	$V_{od2}$ (p-p)	$V_{od}$ (p-p)	$V_{id}$ (p-p)
$A_{vd1}$	$A_{vd2}$	$A_{vd}$ (放大倍数, 瞬态)	$A_{vd}$ (dB, 瞬态)
$A'_{vd}$ (dB) (交流扫描)	$f_L$	$f_H$	$BW = f_L - f_H$

#### 4. 共模参数测量

将图4.4两输入端短接（或设为相同输入），加入幅值为500mv，频率为2KHz的共模正弦信号，AC参数改为1，如图4.20，进行Transient Analysis，参数同前（可比较步长不变或空缺时，波形区别）。观察两集电极单端输出波形，读出两电压幅值，比较两者的相位，计算Avc1, Avc2, Avc和KCMR。

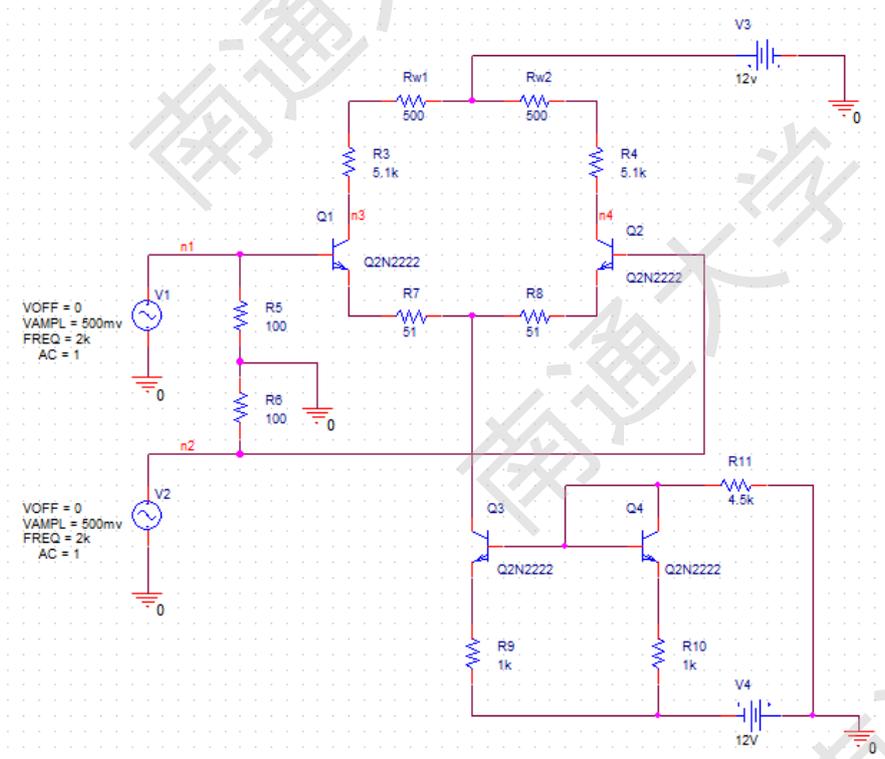


图 4.20 共模输入原理图

- (1) 电路仿真参数设置。选择瞬态分析，参数如图4.8，时长设为2ms。
- (2) 运行仿真。与步骤 2 中瞬态法测输出波形类似，得到输出电压 V(Q5:c)与 V(Q6:c)波形，如图 4.21，比较两输出端的相位关系。

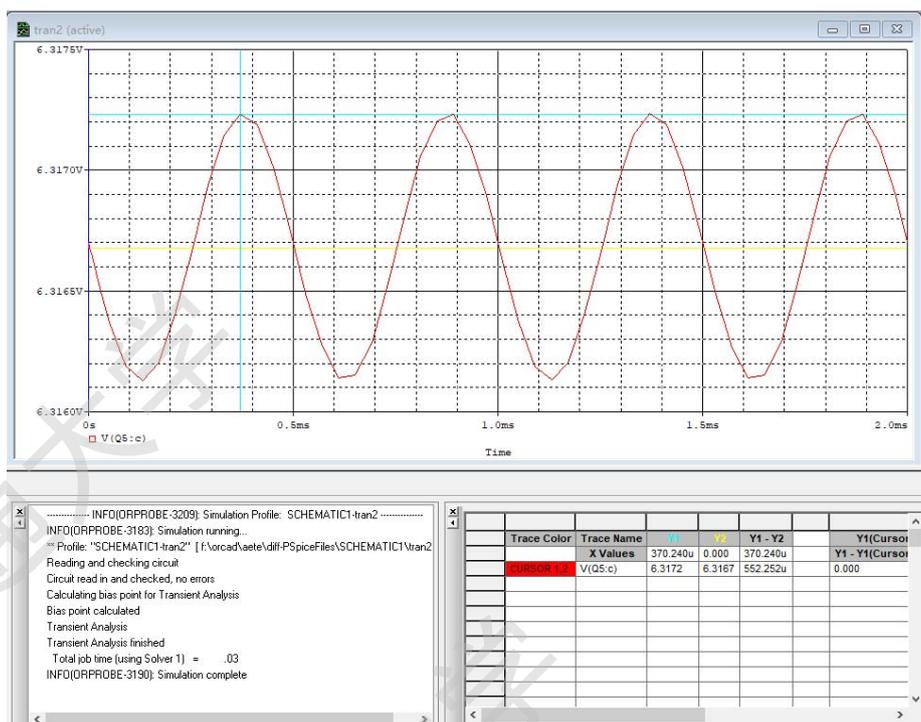


图4.21 单端输出电压波形

图 4.21 中，需要注意，由于输出端没有隔直电容，所以输出端有一静态偏移量。可通过测量输出波形的峰—峰值，峰—峰值的一半即为输出幅值。

(3) 将上述测量值填入表 4.3（注意各参数的单位）。

表 4.3 共模输入参数

$V_{oc1}$ (p-p)	$V_{oc2}$ (p-p)	$V_{oc}$ (p-p)	$V_{ic}$ (p-p)
$A_{vc1}$	$A_{vc2}$	$A_{vc}$	$K_{CMR}$ (单端输出)

#### 四、报告要求

1. 通过 Cadence OrCAD 软件，根据实验内容中的要求绘制并打印电路原理图和仿真波形图。
2. 完成表 4.1、表 4.2 和表 4.3，计算相关参数，保留参数计算过程。
3. 比较瞬态分析与交流分析在测量输出电压上的区别与各自特征。

#### 五、思考题

1. 图 4.2 中，输入差模信号时，有何缺陷，如何修改？
2. 实验步骤 3 中，测量带宽时，对输入信号有什么要求？