

实验五 负反馈放大电路（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. 掌握负反馈放大电路的各种波形，以及各类负反馈对增益的影响。
2. 能利用负反馈改善放大电路的性能。
3. 能利用 OrCAD 软件的瞬态与交流分析功能，分析电路的性能。

二、实验原理

1. 反馈的概念

反馈：将放大电路输出量的一部分或全部、通过一定的电路、以一定的方式回送到输入端（回路）、并影响输入量。放大通道和反馈通道使电路构成一个闭环系统。

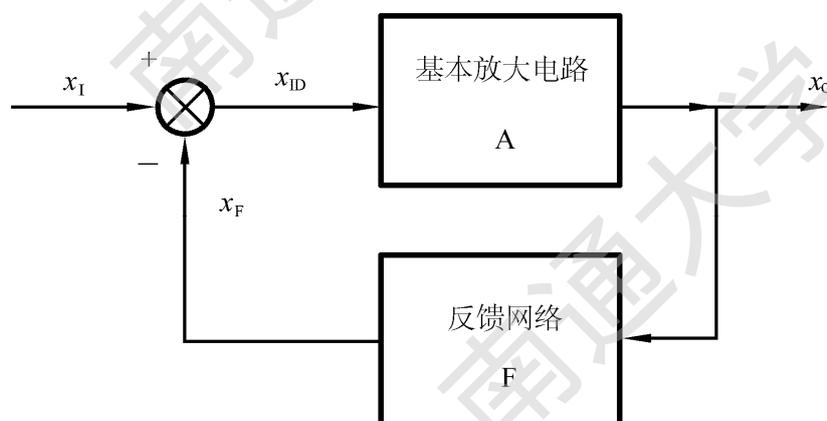


图 5.1 负反馈放大电路框图

当反馈量与输入量（电压或电流）以某种形式进行比较后，使放大电路的实际输入量减小进而影响输出量的反馈称为“负反馈”，反之称为“正反馈”。通常用瞬时极性法可判断反馈极性。负反馈的框图如图 5.1 所示，其闭环增益的基本方程式为：

$$\dot{A}_r = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{id} + \dot{X}_f} = \frac{\dot{X}_o}{\frac{\dot{X}_o}{A} + \dot{F}\dot{X}_o} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

通常把 $|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 称为反馈深度。当 $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ ，即 $|\dot{A}\dot{F}| \gg 1$ 时， $\dot{A}_r \approx \frac{1}{\dot{F}}$ ，称为深度负反馈。

同时，由此可引出 $\dot{X}_{id} = \dot{X}_i - \dot{X}_f \approx 0$ ($\dot{X}_i = \dot{X}_f$, $x_{id} \approx 0$) 的虚短、虚断概念。

在放大电路设计中，引入负反馈可以改善放大电路的性能。比如，稳定静态工作点，稳定放大增益，减小非线性失真，抑制噪声干扰，扩展频带，以及影响输入、输出电阻等。换句话说，放大电路借助于负反馈，可以更好的工作。负反馈在放大电路中起着很重要的工作。

负反馈改善放大电路性能的实质是反馈量通过反馈网络对放大电路实际输入量具有自动调节作用。负反馈在改善放大电路性能的同时是以牺牲电路增益为代价的。在电子电路中，性能的改善通常要比信号的放大更重要。

2. 负反馈的类型及稳定电量

根据反馈在输出回路中取样量的性质，可分为电压反馈（输出端取样电压）和电流反馈（输出端取样电流）。根据反馈量在输入回路中与输入量比较的形式，可分为串联反馈（电压回路比较）和并联反馈（电流结点比较）。因此，负反馈的类型可分为四种组态：电压串联负反馈、电压并联负反馈、电流串联负反馈、电流并联负反馈。典型电路如图 5.2 所示。

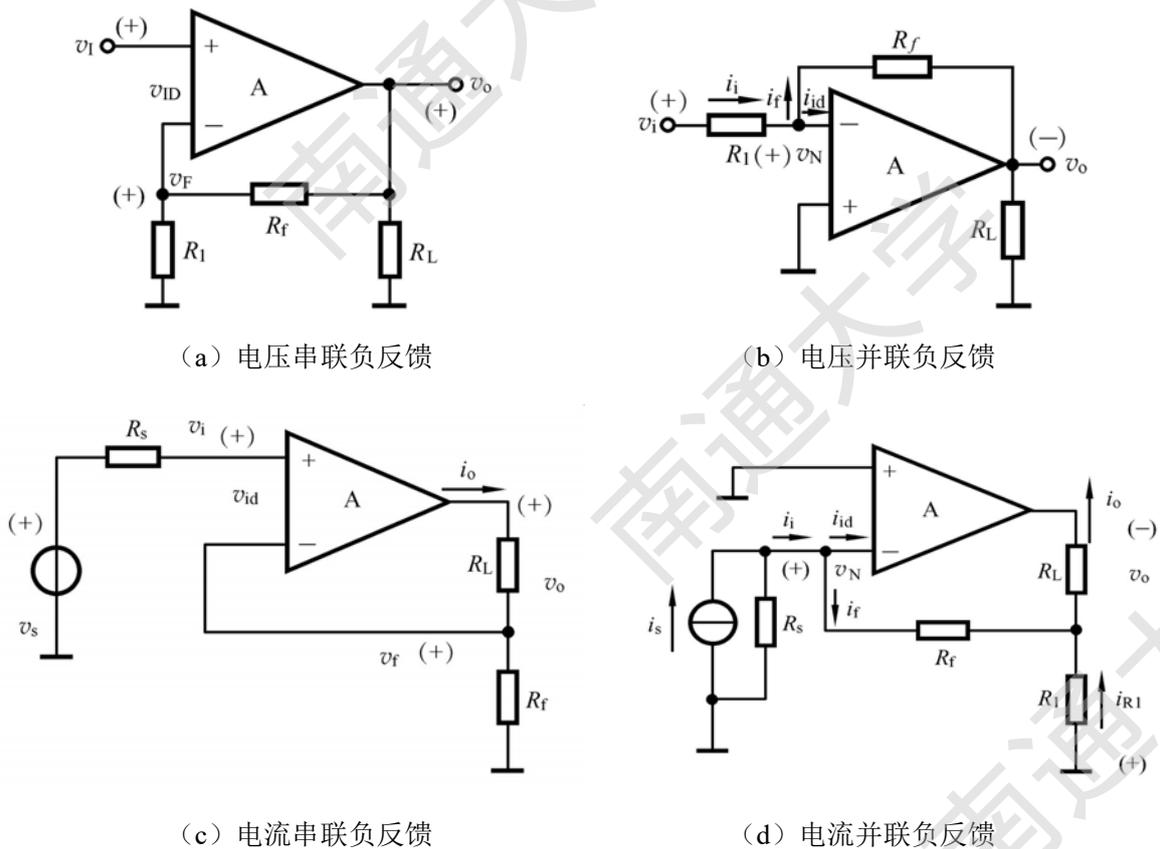
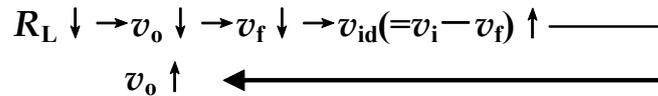


图 5.2 四种负反馈组态的典型电路

通过将 R_L 短路后反馈量的存在与否，可判断电压反馈还是电流反馈；通过反馈量与输入端形成回路还是结点，可判断串联反馈还是并联反馈。

当负载 R_L 变化时，输出量将会发生变化，这时负反馈将通过自动调节作用来稳定取样量。例如“电压串联负反馈”，其调节过程如下：



3. 负反馈改善放大电路的性能

(1) 稳定放大电路增益

放大电路的增益可能由于元器件参数的变化、环境温度的变化、电源电压的变化、负载大小的变化等因素的影响而不稳定，引入适当的负反馈后，可提高闭环增益的稳定性。

当放大电路中引入深度交流负反馈时， $A_f \approx \frac{1}{F}$ ，即闭环增益 A_f 几乎仅决定于反馈网络，而反馈网络通常由性能比较稳定的无源线性元件（如 R 、 C 等）组成，因而闭环增益是比较稳定的。而在一般情况下，为了从数量上表示增益的稳定程度，常用有、无反馈时增益的相对变化量之比来衡量。

用 $\frac{dA}{A}$ 和 $\frac{dA_f}{A_f}$ 分别表示开环和闭环增益的相对变化量，此时用正实数 A 和 F 分别表示 A 和 F

的模，则闭环增益的表达式变为： $A_f = \frac{1}{1 + AF}$

对上式求导数得

$$\frac{dA_f}{dA} = \frac{1}{(1 + FA)^2} \quad (1)$$

$$dA_f = \frac{dA}{(1 + FA)^2} \quad (2)$$

将等式 (2) 两边分别除以 $A_f = \frac{1}{1 + AF}$ ，则得相对变化量形式，即

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{(1 + FA)} \frac{dA}{A} \quad (3)$$

由式 (3) 可见，加入负反馈后，闭环增益的相对变化量为开环增益相对变化量的 $\frac{1}{1 + AF}$ ，即

闭环增益的相对稳定度提高了， $|1 + AF|$ 愈大，即反馈越深， $\frac{dA_f}{A_f}$ 越小，闭环增益的稳定性越好。

① 负反馈不能使输出量保持不变，只能使输出量趋于不变。而且只能减小由开环增益变化而引起的闭环增益的变化。如果反馈系数发生变化而引起闭环增益变化，则负反馈是无能为力的。所以，反馈网络一般都由无源元件组成。

②不同类型的负反馈能稳定的增益也不同，如电压串联负反馈只能稳定闭环电压增益，而电流串联反馈则只能稳定闭环互导增益等。

(2) 减小非线性失真

三极管、场效应管等有源器件具有非线性的特性，因而由它们组成的基本放大电路的电压传输特性也是非线性的，如图 5.3 中的曲线 1 所示。当输入正弦信号的幅度较大时，输出波形就会产生非线性失真。

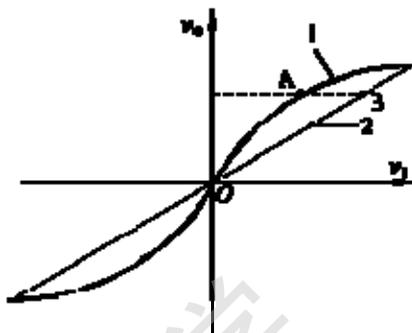


图 5.3 开环与闭环传输特性曲线

引入负反馈后，将使放大电路的闭环电压传输特性曲线变平缓，线性范围明显展宽。在深度负反馈条件下， $\dot{A}_f \approx \frac{1}{F}$ 。若反馈网络由纯电阻构成，则闭环电压传输特性曲线在很宽的范围内接近于直线，如图 5.3 中的曲线 2 所示，输出电压的非线性失真会明显减小。

需要说明的是，加入负反馈后，若输入信号的大小保持不变，由于闭环增益降至开环增益的 $\frac{1}{1+AF}$ ，基本放大电路的净输入信号、输出信号也降至开环时的 $\frac{1}{1+AF}$ 。显然，三极管等器件的工作范围变小了，其非线性失真也相应地减小了。为了去除工作范围变小对输出波形失真的影响，以说明非线性失真的减小是由负反馈作用的结果，必须保证闭环和开环两种情况下，有源器件的工作范围相同（输出波形的幅度相同），因此，应使闭环时的输入信号幅度加至开环时的 $|1+\dot{A}F|$ 倍，如图 5.3 中的 A、B 两点。另外，负反馈只能减小反馈环内产生的非线性失真，如果输入信号本身就存在失真，负反馈则无能为力。

(3) 负反馈对放大电路输入输出电阻的影响

①对输入电阻的影响

负反馈对输入电阻的影响取决于反馈网络与基本放大电路在输入回路的连接方式，而与输出回路中反馈的取样方式无直接关系。因此，分析负反馈对输入电阻的影响时，只需画出输入回路的连接方式，如图 5.4 所示。其中 R_i 是基本放大电路的输入电阻（开环输入电阻）， R_{if} 是负反馈放大电路的输入电阻（闭环输入电阻）。

对于串联负反馈，闭环输入电阻： $R_{if} = \frac{v_i}{i_i} = (1 + AF) \frac{v_{id}}{i_i} = (1 + AF)R_i$

可见，引入串联负反馈后，输入电阻增加了。

对于并联负反馈，闭环输入电阻： $R_{if} = \frac{v_i}{i_i} = \frac{v_i}{(1 + AF)i_{id}} = \frac{R_i}{1 + AF}$

可见，引入并联负反馈后，输入电阻减小了。

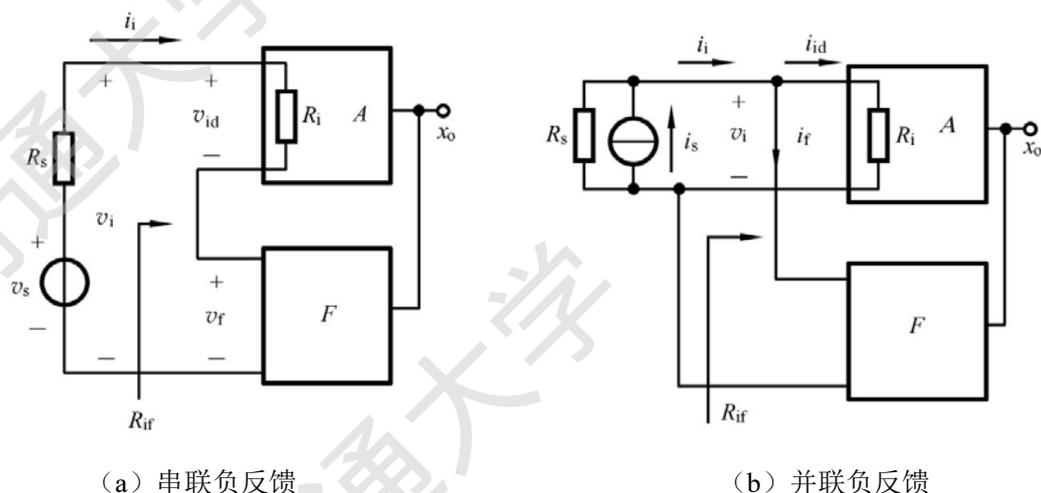


图 5.4 输入电阻的分析模型

②对输出电阻的影响

负反馈对输出电阻的影响取决于反馈网络在放大电路输出回路的取样方式，与反馈网络在输入回路的连接方式无直接关系。因为取样对象就是稳定对象，因此，分析负反馈对放大电路输出电阻的影响，只要看它是稳定输出信号电压还是稳定输出信号电流。

电压负反馈取样于输出电压，又能维持输出电压稳定，即是说，输入信号一定时，电压负反馈的输出趋于一恒压源，其输出电阻很小。反馈越深， R_{of} 越小。

电流反馈取样于输出电流，能维持输出电流稳定，就是说，输入信号一定时，电流负反馈的输出趋于一恒流源，其输出电阻很大。反馈越深， R_{of} 越大。

(4) 抑制反馈环内噪声

对放大电路来说，噪声或干扰是有害的，引入负反馈后，将使输出信号和环内的噪声输出一同减小，由于噪声信号是基本固定的，所以可以人为的提高输入信号，以提高信噪比，即抑制了噪声。

负反馈抑制噪声的作用仅限于反馈环内，对反馈环外噪声则无能为力。

三、实验内容

1. 多级放大电路性能参数测量

参考电路如图 5.5 所示（不含虚线部分的反馈通路）。按图 5.6 创建仿真电路，信号源选正弦信号源 VSIN，振幅（幅值）10mV，频率 10kHz；三极管选择 Q2N2222；R₁₁上方导线的别名 n1，通过绘图工具栏的别名工具  添加。

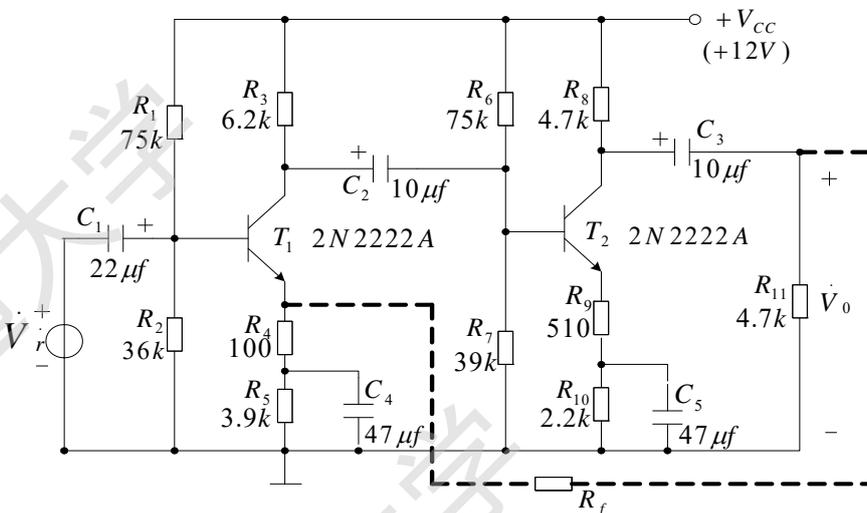


图5.5 两级放大参考电路

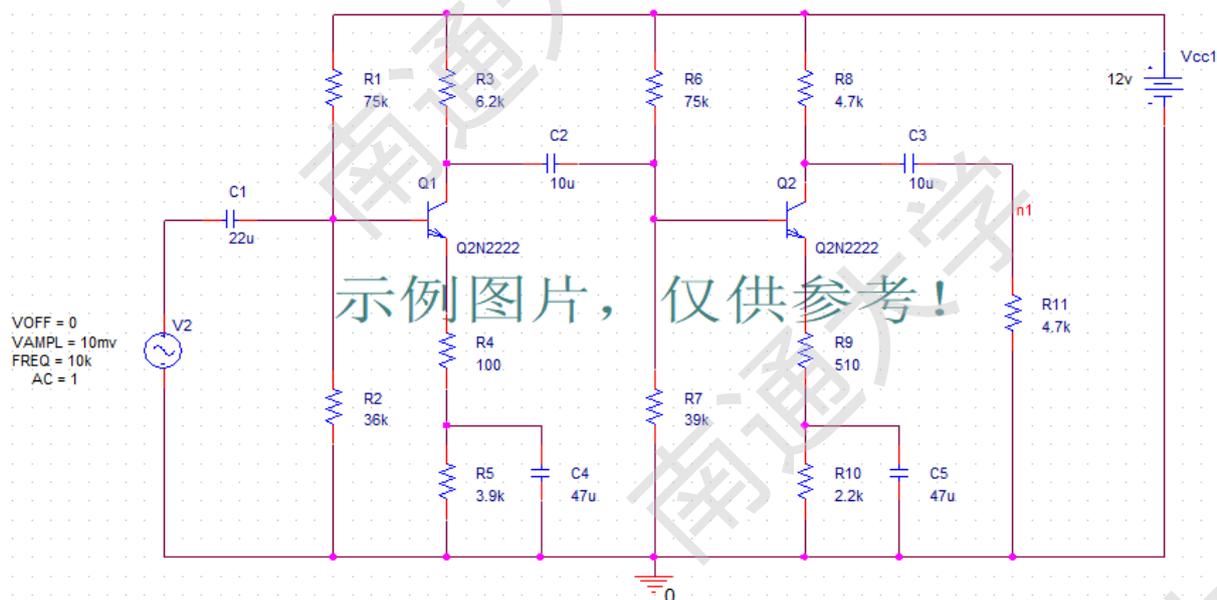


图5.6 两级放大电路仿真原理图

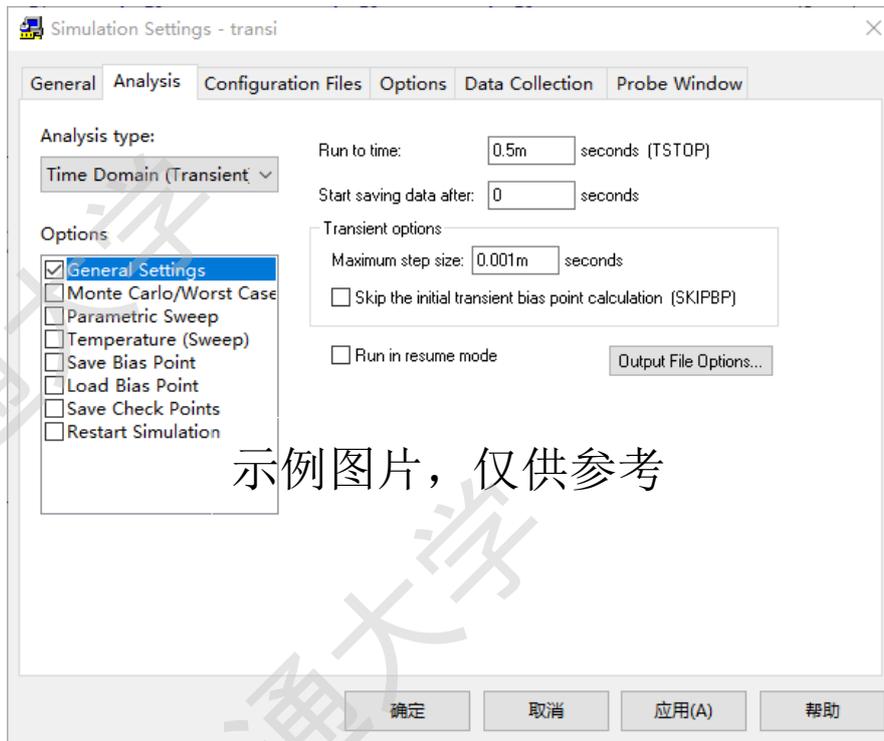
注意：

(a) 图 5.6 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 5.6 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。

(1) 测量放大电路输出电压 V_o 。

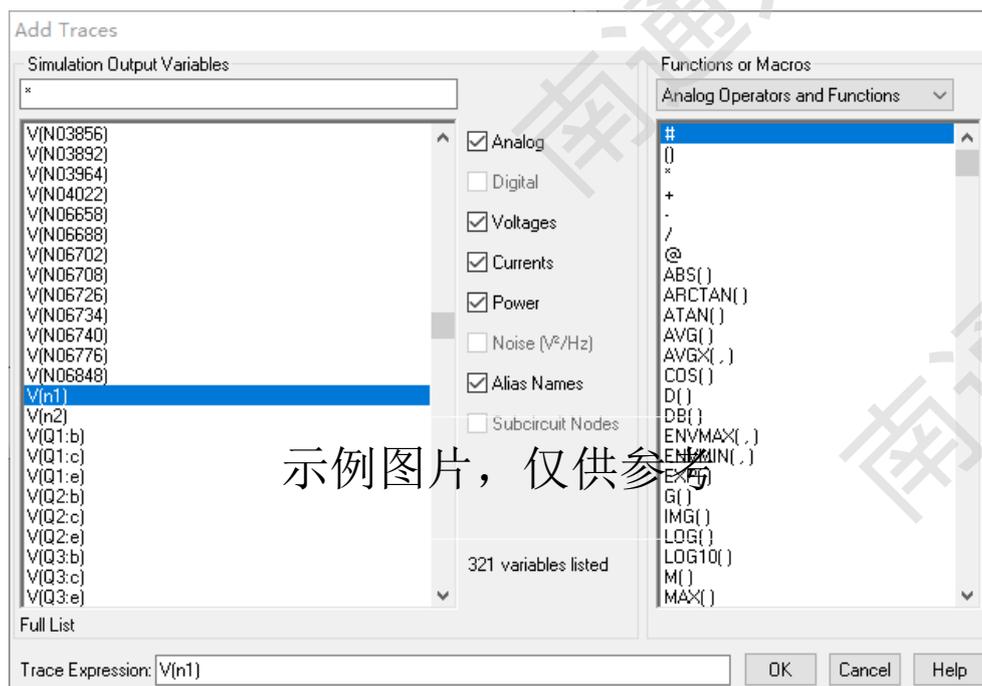
① 电路仿真参数设置。新建仿真并命名，点击“Create”，然后选择瞬态分析，参数如图5.7，时长设为0.5ms（通常，显示3-5个完整周期即可）。



示例图片，仅供参考

图5.7 仿真参数设置

② 运行仿真，添加波形，Add Trace...，如图5.8，选择输出电压V(n1)。点击“OK”，弹出波形，如图5.9。选择File-Print...，打印为PDF或XPS格式（矢量图，可任意放大缩小），如图5.10。选择游标工具（Cursor Peak），在右下角游标窗口读取输出电压峰值（Y1值），即 V_o ，如图5.11。



示例图片，仅供参考

图5.8 输出电压仿真函数设置

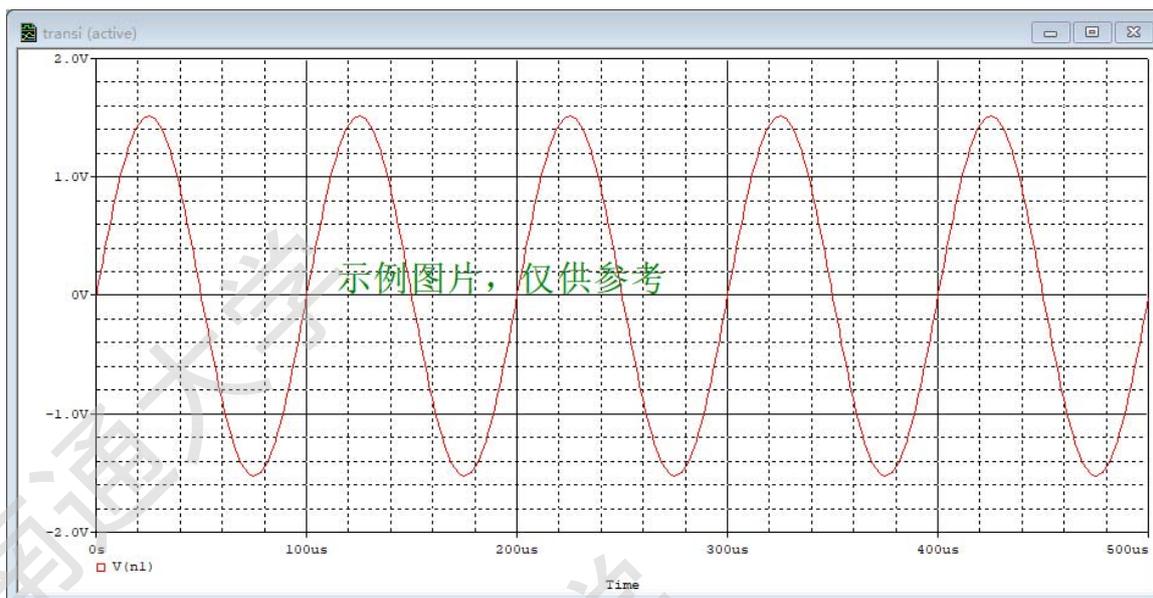


图5.9 输出电压Vo波形

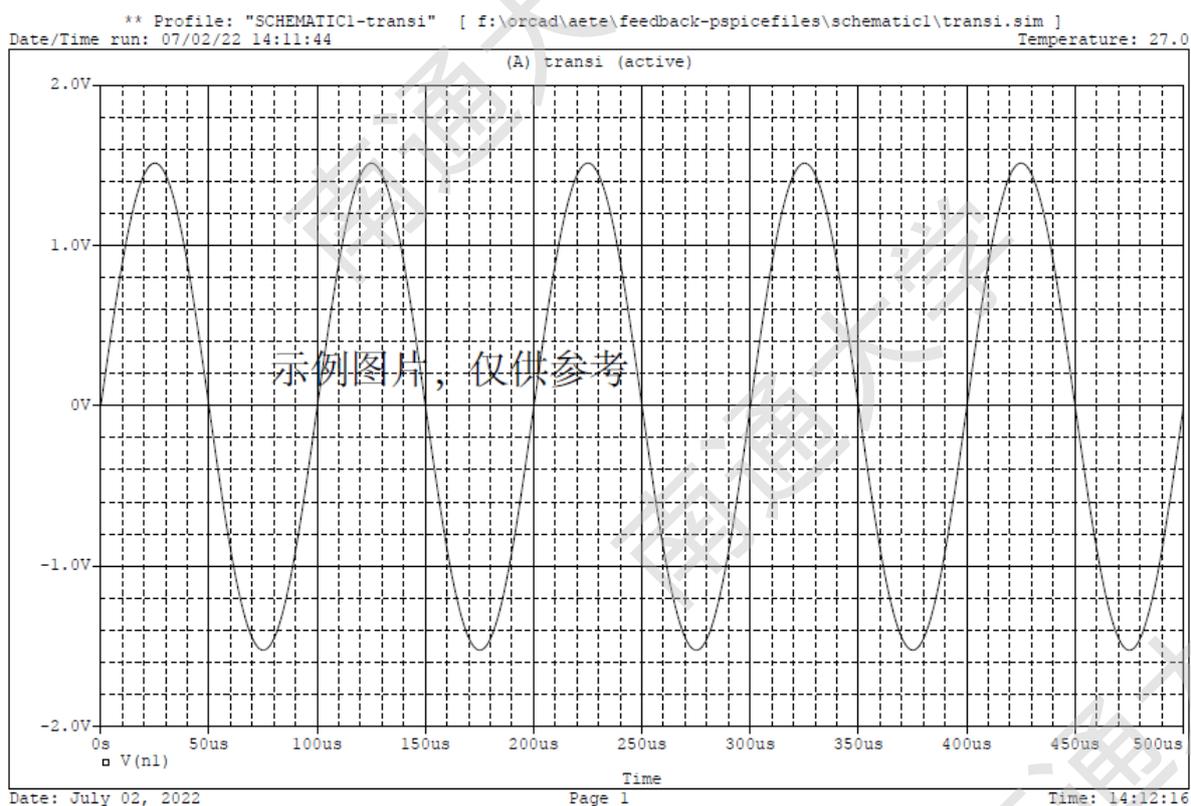


图5.10 打印输出波形

Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2	Y1(Cursor)	Y1 - Y1(Cursor)
	X Values	225.285u	0.000	225.285u		
CURSOR 1,2	V(n1)	1.5124	0.000	1.5124		0.000

示例图片，仅供参考

图5.11 游标参数窗口

注意：

(a) 本实验所有仿真波形图（如图5.10）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，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5.10），需要白色背景，黑色前景，软件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。

(2) 测量放大电路增益 A_v

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5.12。注意“兆”的符号为“meg”，不是“m”。

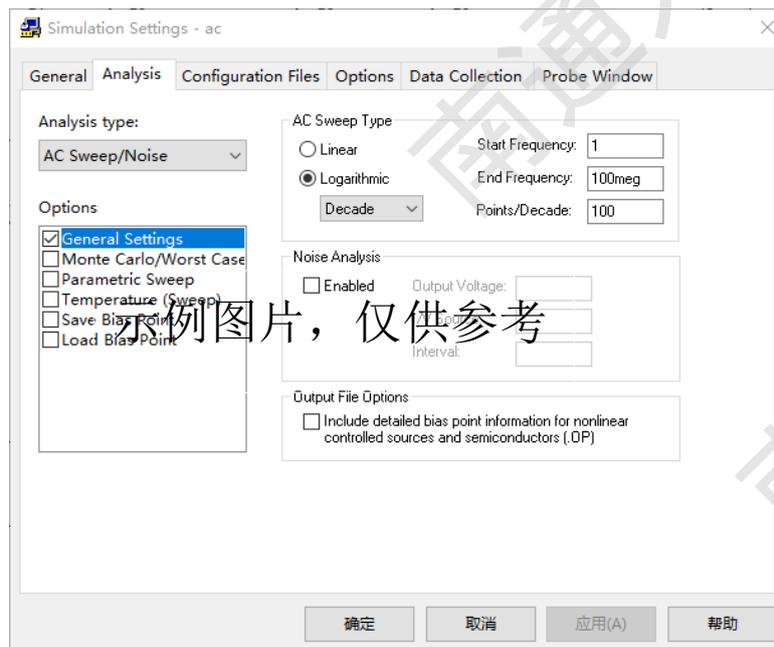


图5.12 交流分析参数设置

② 运行仿真，添加波形，Add Trace...，如图5.3，参数设置为电路增益 $V(n1)/V(V2:)$ 。点击“OK”，弹出波形。选择游标工具（Cursor Peak），读取输出电压峰值，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。在最大增益值的0.707倍位置，使用“Mark Label”标记出上限频率与下线频率 f_H 和 f_L ，则 $BW = f_H - f_L$ 。如图5.14。



图5.13 增益仿真参数设置

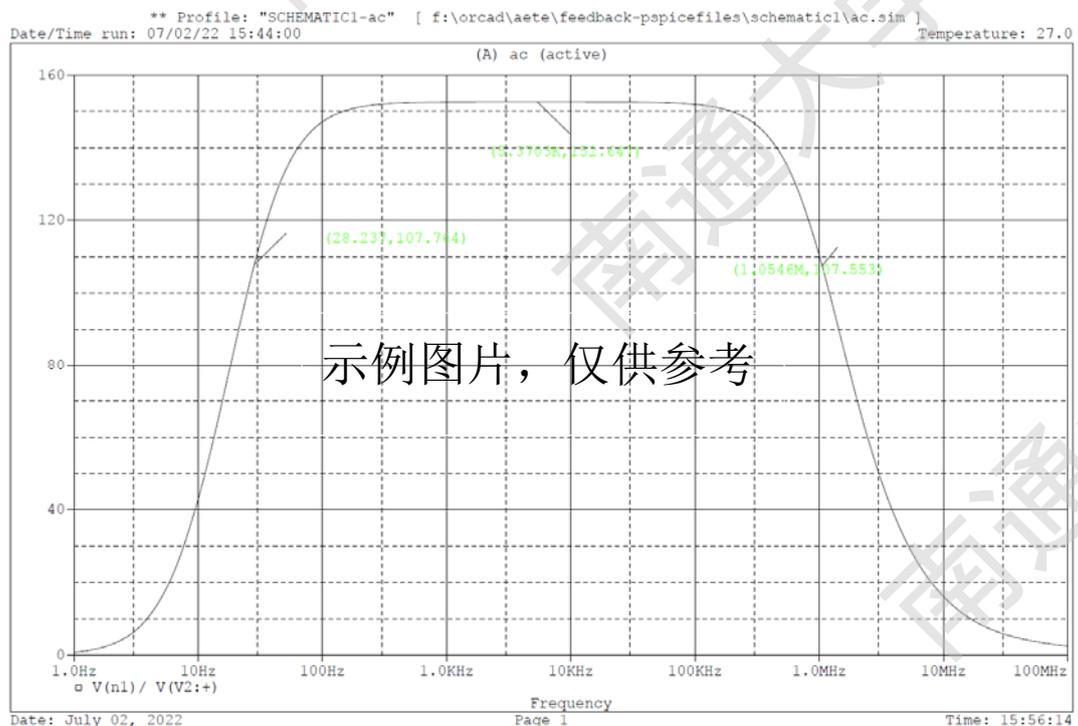


图5.14 放大电路增益（幅频响应）波形与带宽

(3) 测量输入电阻 R_i

与测量增益的相同方法测量输入电阻，波形参数设置修改为 $V(V2:+)/ I(V2:)$ ，如图5.15。在中频区用游标选取一点，获得输入电阻值，并用“Mark Label”标记出频率与电阻值，打印后如图5.16。



图5.15 输入电阻波形参数设置

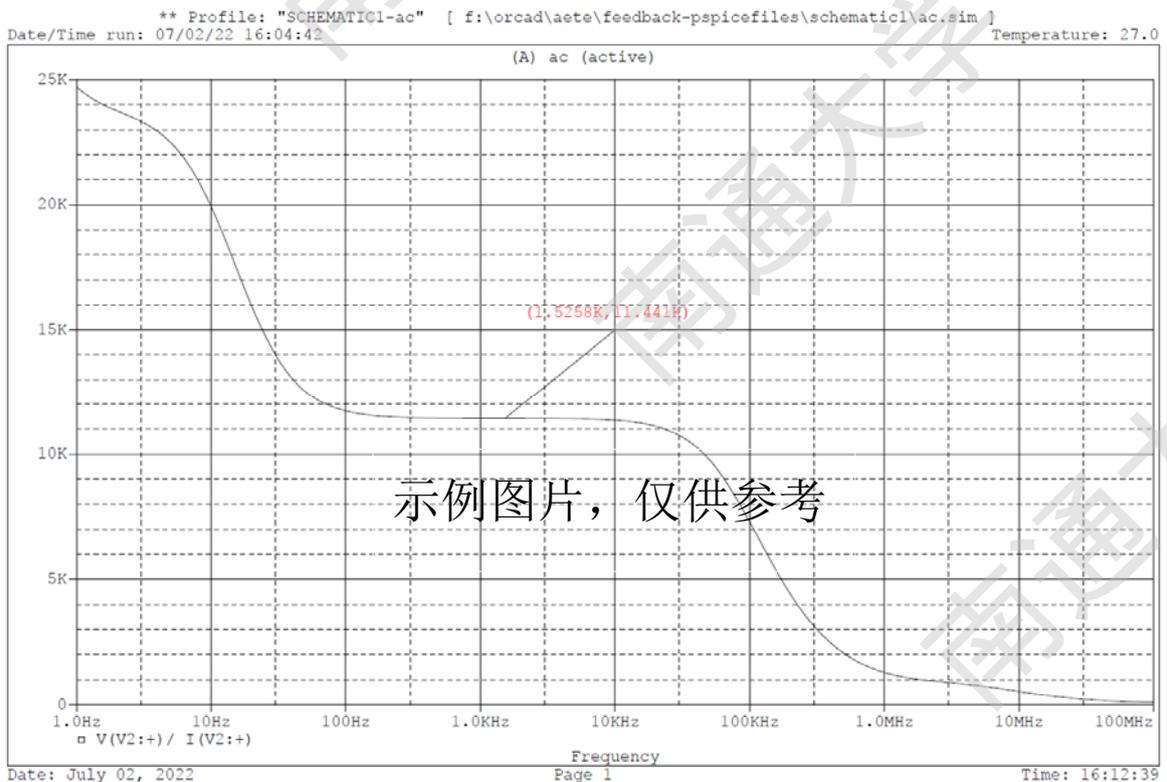


图5.16 输入电阻波形与中频区输入电阻值

(4) 测量输出电阻 R_o 。

输出电阻的测量可采用外加电源法：输入端电源置零（电压源短路，电流源断路），输出端加交流电源（本实验外加电压源，参数与输入信号相同），测出输出电阻。仿真原理图如图5.17。

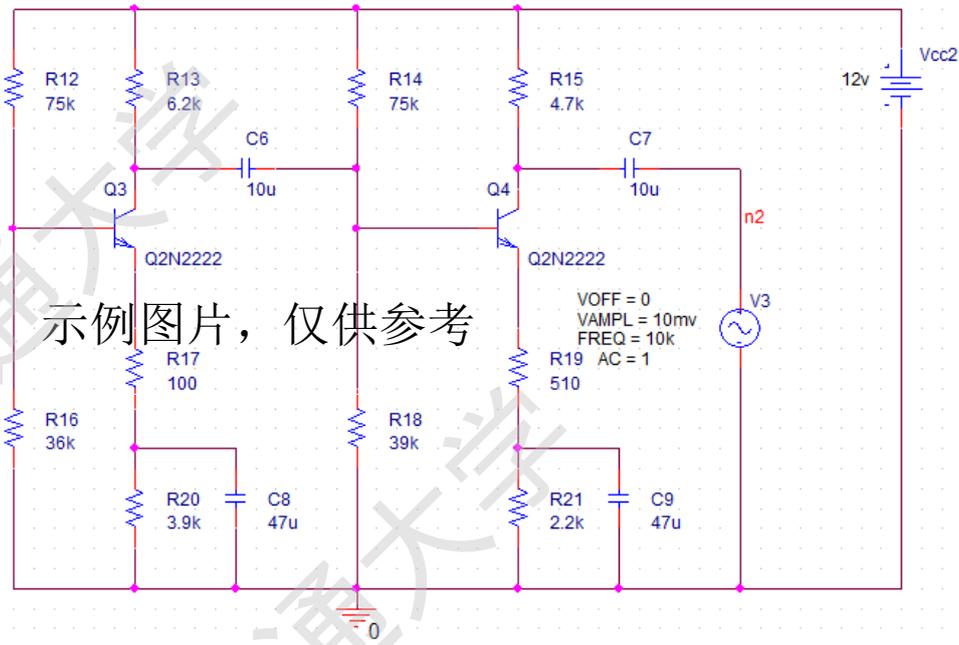


图5.17 测量输出电阻原理图

与测量输入电阻的相同方法测量输出电阻，新建仿真并命名，然后选择AC分析，仿真参数与测量输入电阻相同，波形参数设置修改为V(V3:+)/ I(V3:+) 或 V(n2)/ I(V3:+)，如图5.18。在中频区用游标选取一点，获得输出电阻值，并用“Mark Label”标记出频率与电阻值，打印后如图5.19。

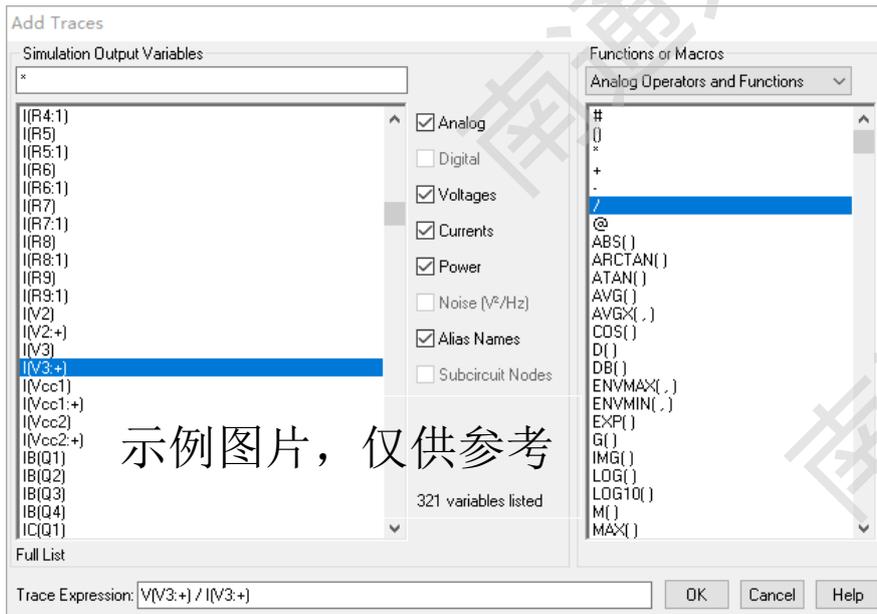


图5.18 输出电阻波形参数设置

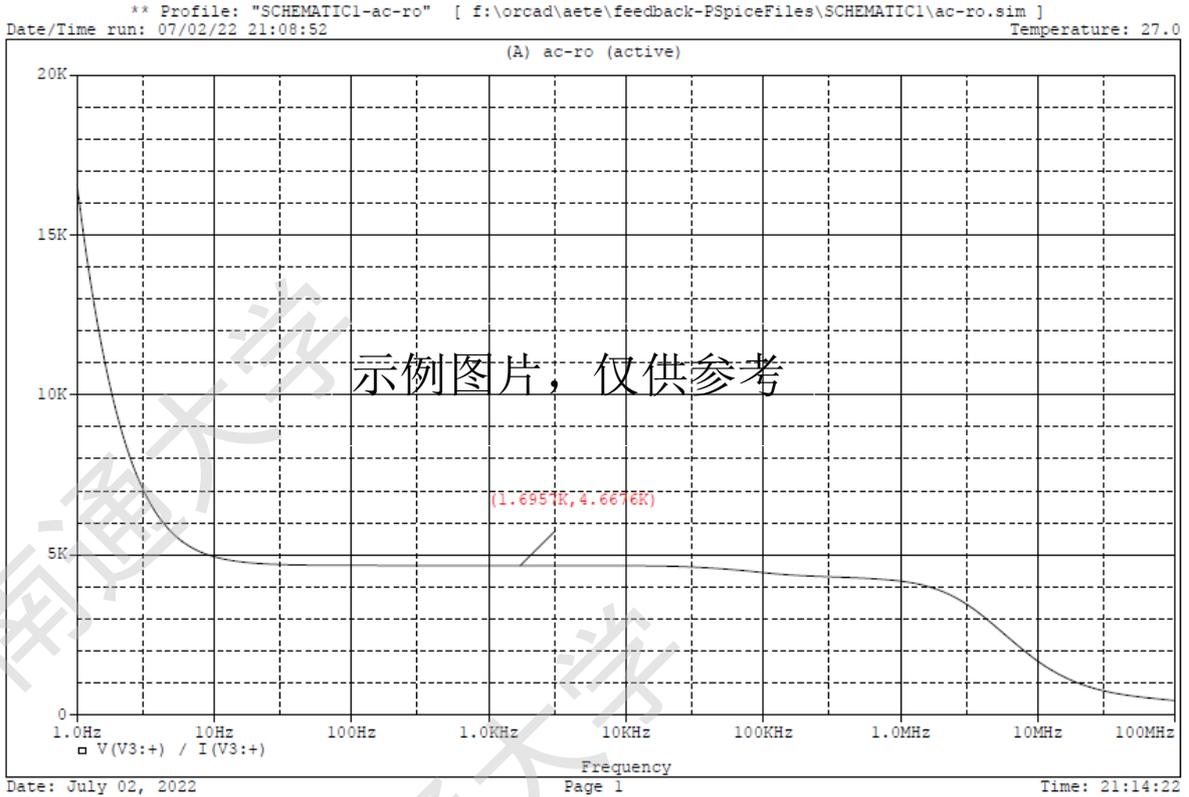


图5.19 输出电阻波形与中频区输出电阻值

(5) 将上述测量值填入表5.1（注意各参数的单位）。

表5.1 两级放大电路性能参数

V_i (幅值)	V_o (幅值)	$A_v = \frac{V_o}{V_i}$	$R_i = \frac{V_i}{I_i}$	R_o
10mV				
f_L	f_H	$BW = f_L - f_H$	\	\
			\	\

2. 多级放大电路性能参数测量

参考电路如图 5.5 所示，引入电压串联负反馈（含虚线部分的反馈通路）。按图 5.20 创建仿真电路，信号源参数不变； R_{32} 上方导线的别名 n3，通过绘图工具栏的别名工具  添加，取 R_f 为 $1k\Omega$ 。

重复测量实验步骤 1 中的 (1) ~ (5)，参考波形如图 5.21 至图 5.24，并将测量值填入表 5.2。

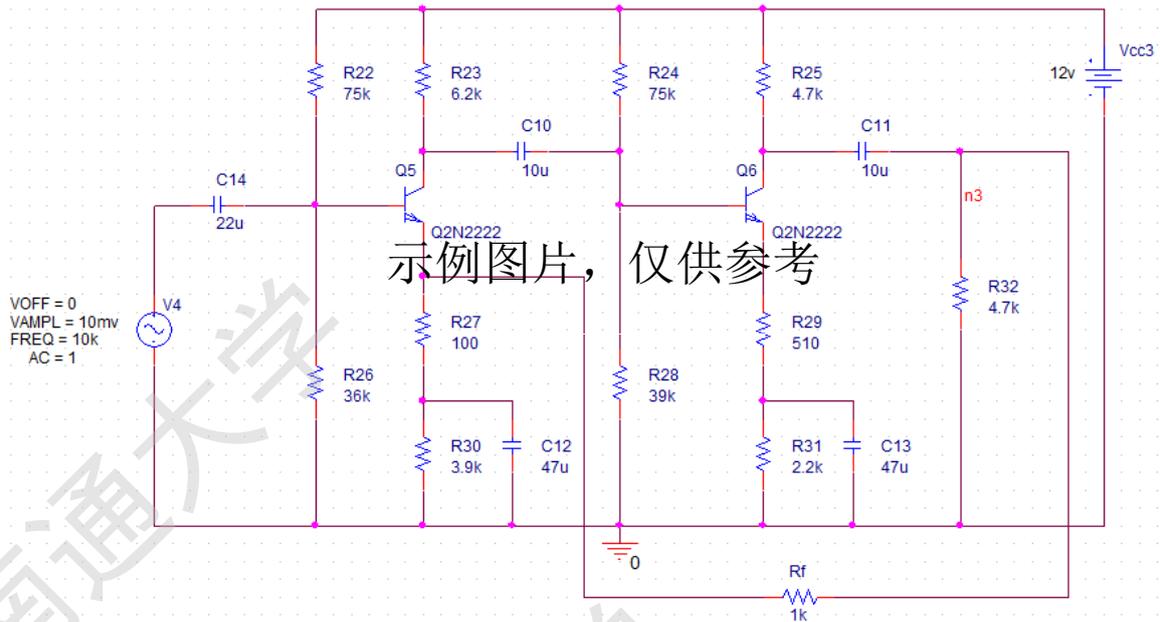


图 5.20 反馈放大电路仿真原理图

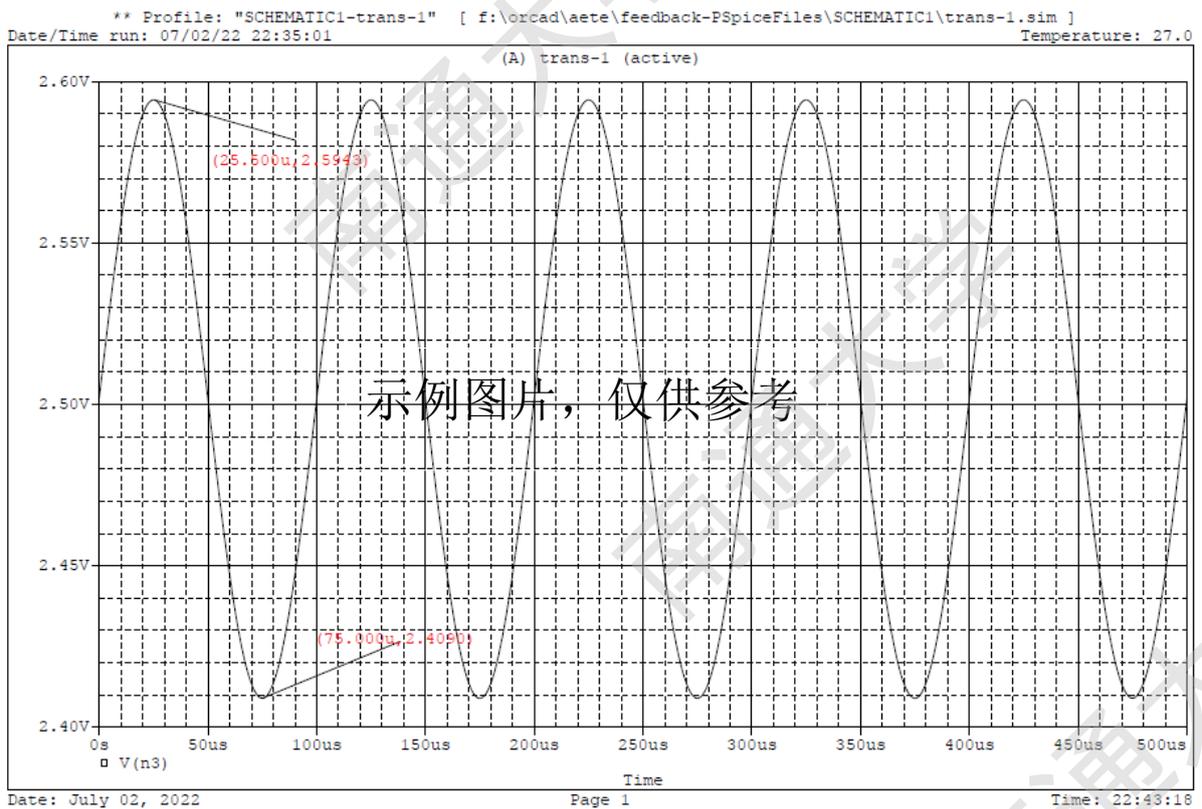


图 5.21 反馈电路输出电压波形

图 5.21 中，需要注意，由于输出端引入了前级发射极静态电位，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，得出输出幅值。如示意图 5.21 中，波峰电位 2.594V，波谷电位 2.409V，则峰-峰值为 0.185V，即输出电压幅值为 0.0925V（92.5mV）。

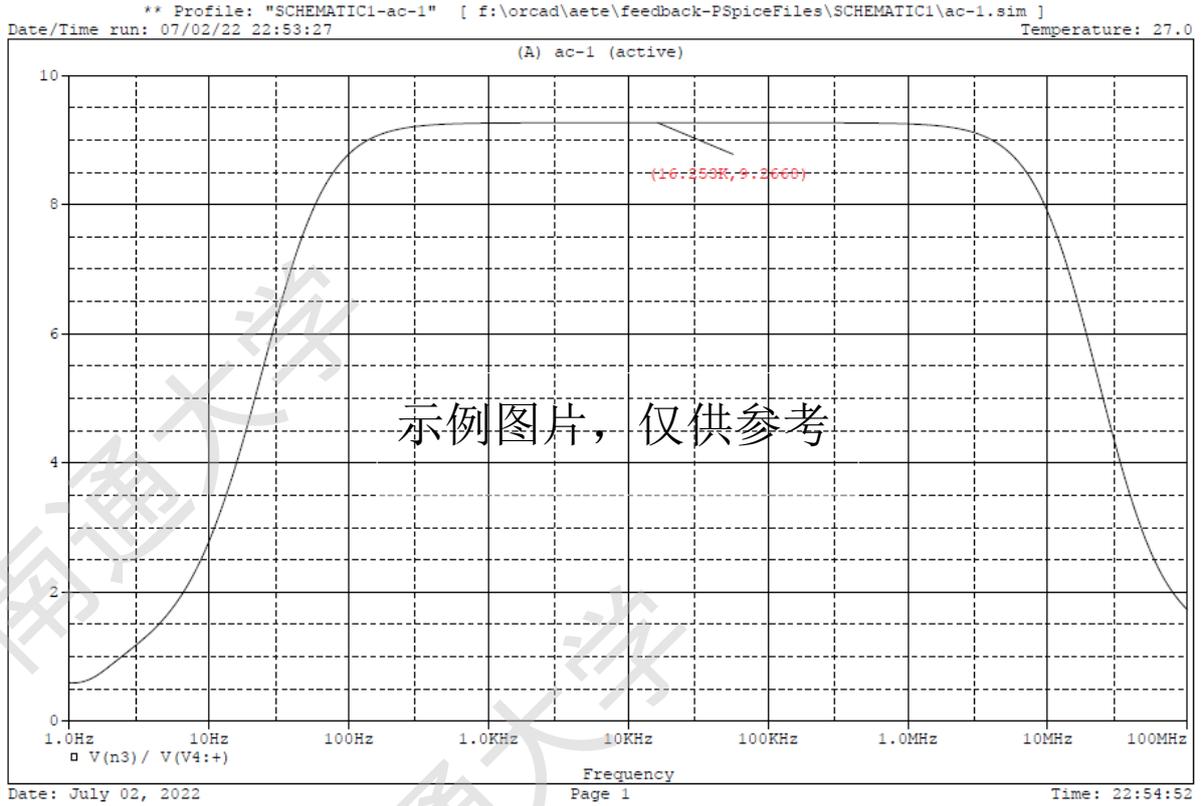


图 5.22 反馈放大电路增益

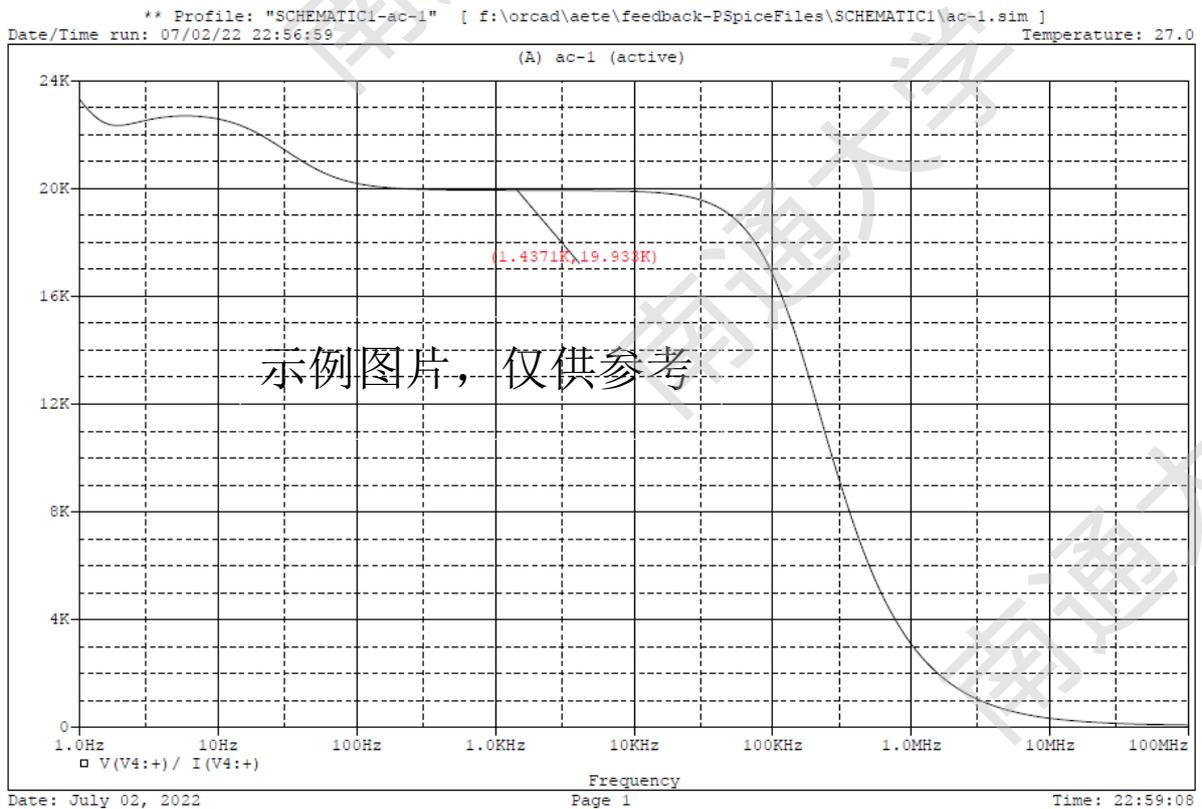


图 5.23 反馈放大电路输入电阻波形与中频区电阻

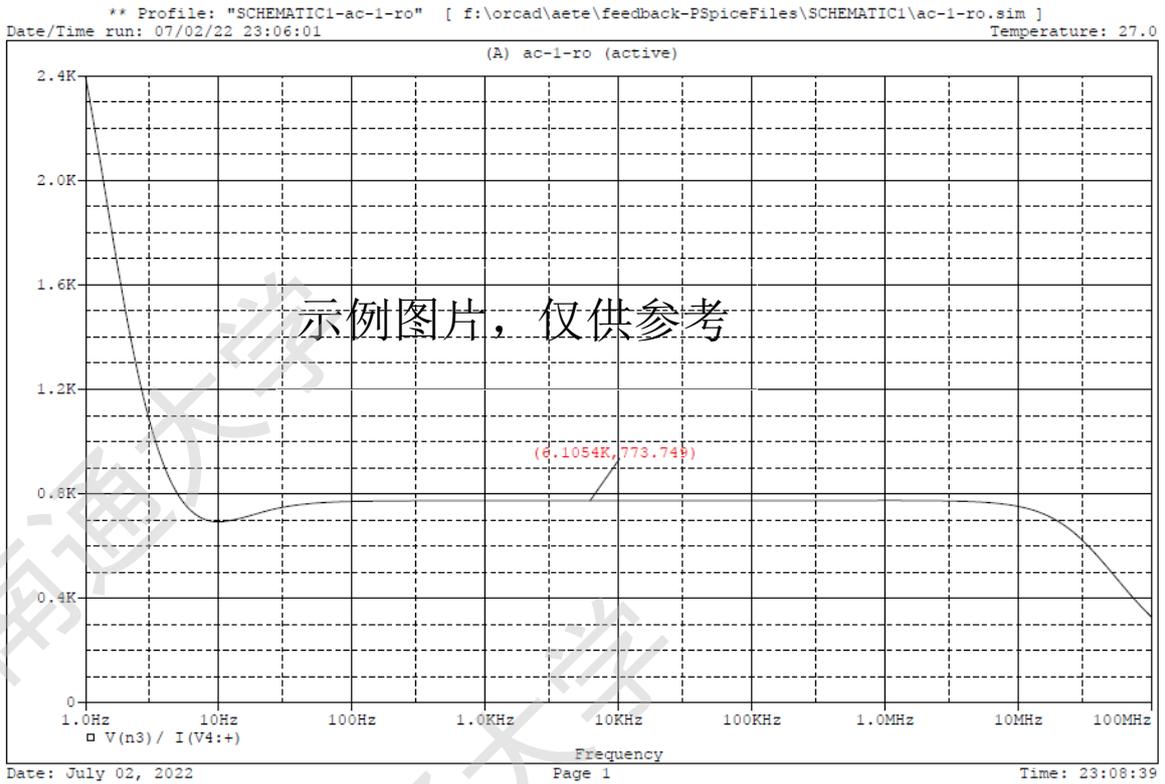


图 5.24 反馈放大电路输出电阻波形与中频区电阻

表5.2 负反馈放大电路性能参数

V_i (幅值)	V_o (幅值)	$A_v = \frac{V_o}{V_i}$	$R_i = \frac{V_i}{I_i}$	R_o
10mV				
f_L	f_H	$BW = f_L - f_H$	\	\
			\	\

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 5.1 和表 5.2，分析讨论引入负反馈后对放大电路性能的影响。

五、思考题

1. 图 5.5 中，电路开环时，是否存在交直流反馈？如存在，请指出它们的类型。
2. 负反馈放大电路中，反馈深度是否越大越好？