

负反馈放大器

12 户雅楠 PB24061257

贾迎乐 PB24061270

实验日期：2025年12月17日

1 实验目的

- 加深理解负反馈放大器的工作原理，以及负反馈对放大器性能的影响。
- 掌握负反馈放大器各项性能指标的测量。
- 进一步熟悉和正确使用常用电子仪器。

2 实验原理

2.1 反馈系数

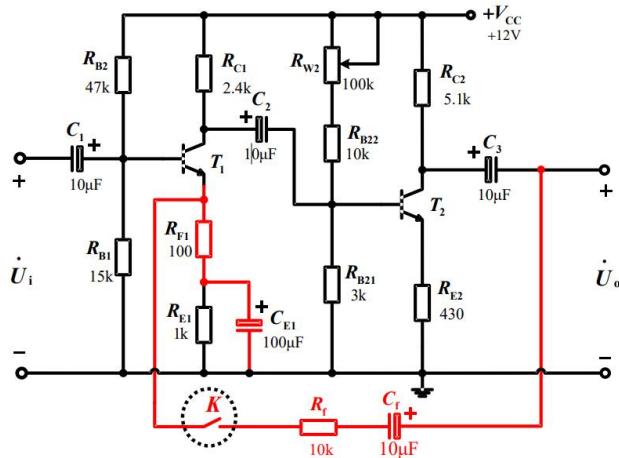


图 1 电压串联负反馈

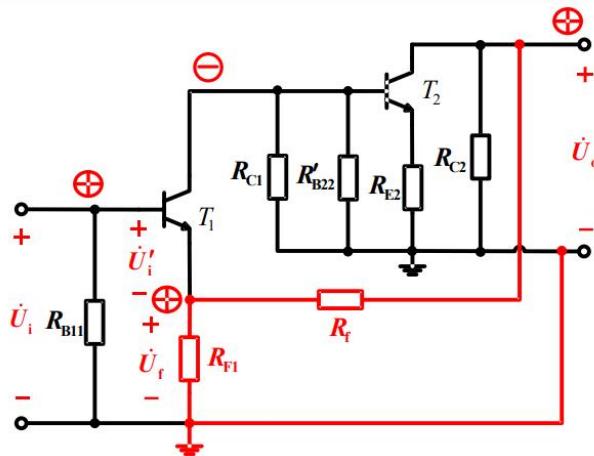


图 2 R_f 、 R_{f1} 组成负反馈网络

$$F = \frac{U_f}{U_o} = \frac{R_{F1}}{R_{F1} + R_f} = \frac{100}{100 + 10000} = 9.9 \times 10^{-3}$$

2.2 负反馈放大器对电路影响

2.2.1 放大倍数下降

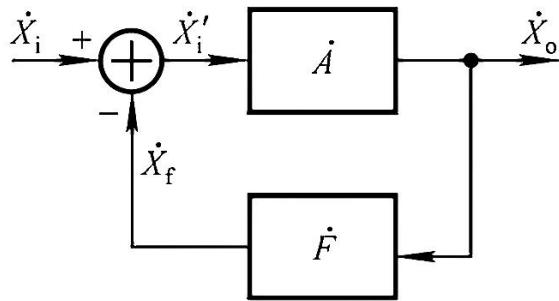


图 3 反馈放大器示意图

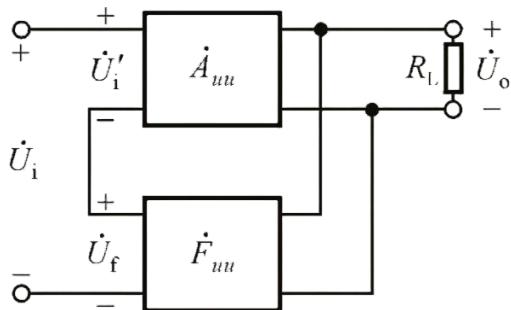


图 4 电压串联负反馈示意图

$$A_u = \frac{U_o}{U'_i} \quad F_u = \frac{U_f}{U_o} \quad A_{uf} = \frac{U_o}{U_i}$$

$$U'_i = U_i - U_f$$

$$A_f = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\dot{A} U'_i}{U'_i + U_f} = \frac{\dot{A} U'_i}{U'_i + \dot{F} U_o} = \frac{\dot{A} U'_i}{U'_i + \dot{A} \dot{F} U'_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A} \dot{F}}$$

$$A_{uf} = \frac{A_u}{1 + A_u F}$$

2.2.2 提高增益稳定性

引入负反馈后，可以由其变化量与自身比值来反映放大倍数的稳定性提升了多少。

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

$$\frac{dA_f}{Af} = \frac{1}{1+AF} \cdot \frac{dA}{A}$$

$$\frac{dA_f}{Af} < \frac{dA}{A}$$

引入负反馈后，增益稳定度提升了 $(1+A_uF)$ 倍。

2.2.3 对输入电阻影响

$$R_i' = \frac{U_i'}{I_i}$$

$$R_{if}' = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i' + U_f}{I_i} = \frac{U_i' + AFU_i'}{I_i}$$

$$R_{if}' = (1+AF)R_i$$

引入负反馈后，输入电阻增大为原来的 $(1+A_uF)$ 倍。

2.2.4 对输出电阻影响

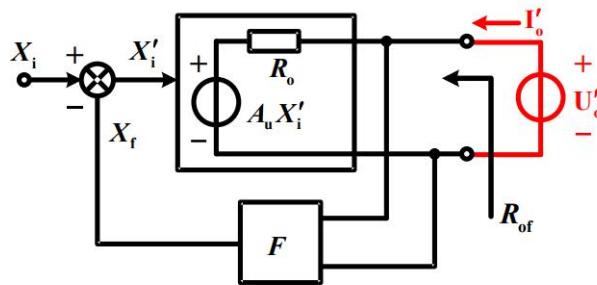


图 5 电压负反馈示意图

$\sum X_i = 0$ 加压求流

$$I'_o = \frac{U'_o - A_u X'_i}{R_o} = \frac{U'_o + U'_o A_u F}{R_o} = \frac{U'_o (1+AF)}{R_o}$$

$$R_{of} = \frac{U'_o}{I'_o} = \frac{R_o}{1+A_u F}$$

引入负反馈后，输出电阻减小为原来的 $\frac{1}{1+A_u F}$ 倍。

2.2.5 对通频带影响

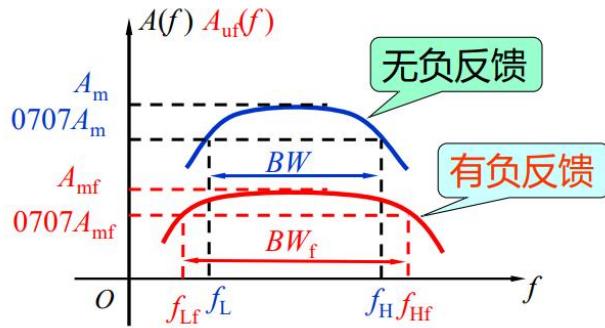


图 6 放大器的幅频特性曲线图

$$\text{无反馈时: } BW_i = f_H - f_L$$

$$\text{引入负反馈后: } f_{Hf} = (1 + A_{uf}) f_H \quad f_{Lf} = \frac{1}{1 + A_{uf}} f_L$$

$$BW_2 = f_{Hf} - f_{Lf} = (1 + A_{uf}) BW_i$$

3 实验内容

1. 搭建考虑负载效应的基本放大器，调整并测量 T_1 、 T_2 管静态工作点。
2. 测试基本放大器动态指标，含放大倍数、输入/输出电阻、通频带。
3. 搭建电压串联负反馈放大器，测其动态指标。

4 实验数据及分析

4.1 考虑负载效应的基本放大器

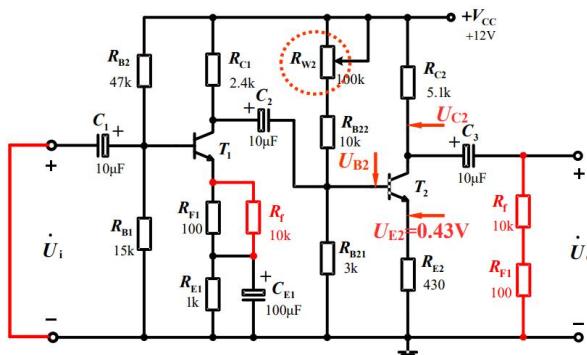


图 7 考虑负载效应的基本放大器

4.1.1 测量静态工作点

对地电位	V_B	V_E	V_C	R_{W2}
T_1 管	2.7712V	2.13997V	7.1560V	20.2970kΩ
T_2 管	1.0503V	0.43023V	6.7762V	

T₁管:

$$I_{BQ_1} = \frac{V_{ce} - U_{B1}}{R_{B2}} - \frac{U_{B1}}{R_{B1}} = \frac{12 - 2.7712}{4.7 \times 10^3} - \frac{2.7712}{1.5 \times 10^3} = 1.16 \times 10^{-5} A$$

$$I_{CQ_1} = \frac{V_{ce} - U_{C1}}{R_{C1}} = \frac{12 - 7.1560}{2.4 \times 10^3} = 2.02 \times 10^{-3} A$$

$$\begin{aligned} U_{CE_1} &= V_{cc} - I_{CQ_1} R_{C1} - I_{EQ_1} (R_F / (R_F + R_E)) \\ &= 12 - 2.02 \times 10^{-3} \times 2.4 \times 10^3 - (2.02 \times 10^{-3} + 1.16 \times 10^{-5}) \times \left(\frac{100 \times 10^3 / 10^3}{100 + 10^3} + 1 \times 10^3 \right) \\ &= 4.91925 V \end{aligned}$$

$$U_{CE_1, \text{测}} = U_{C1} - U_{E1} = 7.1560 - 2.13997 = 5.01603 V$$

$$\text{相对误差} = \frac{|U_{CE_1, \text{测}} - U_{CE_1}|}{U_{CE_1}} \times 100\% = 2.0\%$$

T₂管:

$$I_{BQ_2} = \frac{V_{ce} - U_{B2}}{R_{B2} + R_{B21}} - \frac{U_{B2}}{R_{B21}} = \frac{12 - 1.05303}{20.297 \times 10^3 + 10^3} - \frac{1.05303}{3 \times 10^3} = 1.03 \times 10^{-5} A$$

$$I_{CQ_2} = \frac{V_{ce} - U_{C2}}{R_{C2}} = \frac{12 - 6.7762}{5.1 \times 10^3} = 1.02 \times 10^{-3} A$$

$$\begin{aligned} U_{CE_2} &= V_{cc} - I_{CQ_2} R_{C2} - I_{EQ_2} R_{E2} = 12 - 1.02 \times 10^{-3} \times 5.1 \times 10^3 - (1.02 \times 10^{-3} + 1.03 \times 10^{-5}) \times 430 \\ &= 6.35497 V \end{aligned}$$

$$U_{CE_2, \text{测}} = U_{C2} - U_{E2} = 6.7762 - 0.43023 = 6.34597 V$$

$$\text{相对误差} = \frac{|U_{CE_2, \text{测}} - U_{CE_2}|}{U_{CE_2}} \times 100\% = \frac{|6.34597 - 6.35497|}{6.35497} \times 100\% = 0.14\%$$

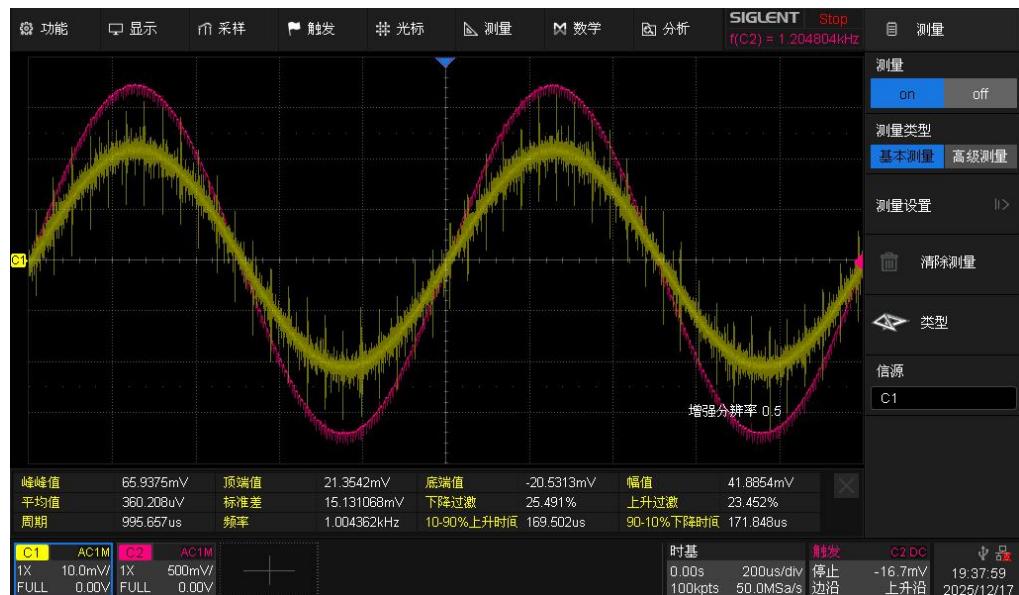
4. 1. 2 放大倍数和输出电阻测试

$$U_i = 15.001 mV$$

R _L (k Ω)	输出电压	Au	Ro
∞	1.2130V	80.86	3.36k Ω
10	0.9077V	60.51	

$$R_o = \left(\frac{U_o}{U_L} - 1 \right) R_L = \left(\frac{1.2130}{0.9077} - 1 \right) \times 10 = 3.36 k\Omega$$

$R_L = \infty$ 时，输入输出电压波形如下图所示：



4.1.3 通频带测试

$U_i = 15.001 \text{mV}$

频率值	$f_L = 18 \text{Hz}$	f_H	$= 363 \text{kHz}$
输入电压	14.987mV	15.001mV	14.9993mV
输出电压	0.6406V	0.9077V	0.6418V

4.1.4 输入电阻测试

$U_s = 15.035 \text{mV}$

U_s	U_i	R_i
15.035mV	12.240mV	$8.76 \text{k}\Omega$

$$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R = \frac{12.240}{15.035 - 12.240} \times 2 = 8.76 k\Omega$$

4.2 负反馈放大器

4.2.1 放大倍数和输出电阻测试

$U_i = 20.003 \text{mV}$

$R_L (\text{k}\Omega)$	输出电压	A_u	R_o
∞	0.9022V	45.10	$1.90 \text{k}\Omega$
10	0.7581V	37.90	

$$R_o = \left(\frac{U_{of}}{U_{Lf}} - 1 \right) R_L = \left(\frac{0.9022}{0.7581} - 1 \right) \times 10 = 1.90 k\Omega$$

对放大倍数影响：

$$R_L = \infty \text{ 时}, \quad A_{uf} = \frac{A_u}{1+A_u F} = \frac{80.86}{1+80.86 \times 9.9 \times 10^{-3}} = 44.91$$

$$A_{uf}|_{RL} = 45.10$$

$$\text{相对误差} = \frac{|A_{uf}|_{RL} - A_{uf}|}{A_{uf}} \times 100\% = \frac{|45.10 - 44.91|}{44.91} \times 100\% = 0.42\%$$

$$R_L = 10 k\Omega \text{ 时}, \quad A_{uf} = \frac{A_u}{1+A_u F} = \frac{60.51}{1+60.51 \times 9.9 \times 10^{-3}} = 37.84$$

$$A_{uf}|_{RL} = 37.90$$

$$\text{相对误差} = \frac{|A_{uf}|_{RL} - A_{uf}|}{A_{uf}} \times 100\% = \frac{|37.90 - 37.84|}{37.84} \times 100\% = 0.16\%$$

对增益稳定性影响：

开环(无负反馈时)：

$$\frac{dA_u}{A_u} = \frac{60.51 - 80.86}{80.86} = -0.25$$

闭环(有负反馈时)：

$$\frac{dA_{uf}|_{RL}}{A_{uf}|_{RL}} = \frac{37.90 - 45.10}{45.10} = -0.16$$

$$\frac{dA_{uf}}{A_{uf}} = \frac{1}{1+A_u F} \frac{dA_u}{A_u} = \frac{1}{1+80.86 \times 9.9 \times 10^{-3}} \times (-0.25) = -0.14$$

$$\text{相对误差} = \frac{\left| \frac{dA_{uf}|_{RL}}{A_{uf}|_{RL}} - \frac{dA_{uf}}{A_{uf}} \right|}{\left| \frac{dA_{uf}}{A_{uf}} \right|} \times 100\% = \frac{| -0.16 - (-0.14) |}{|-0.14|} \times 100\% = 14.29\%$$

对输出电阻影响：

$$R_{of} = \frac{R_o}{1+A_u F} = \frac{3.36}{1+60.51 \times 9.9 \times 10^{-3}} = 2.10 k\Omega$$

$$R_{of}|_{RL} = 1.90 k\Omega$$

$$\text{相对误差} = \frac{|R_{of}|_{RL} - R_{of}|}{R_{of}} \times 100\% = \frac{|1.90 - 2.10|}{2.10} \times 100\% = 9.52\%$$

4.2.2 通频带测试

$U_i = 20.003 \text{ mV}$

频率值	$f_L = 17.8 \text{ Hz}$	f_0	$f_H = 598 \text{ kHz}$
输入电压	19.984 mV	20.003 mV	20.020 mV
输出电压	0.5363 V	0.7586 V	0.5363 V

对通频带影响：

$$BW_1 \approx f_H = 363 \text{ kHz}$$

$$f_{Hf} = (1 + A_{uf}) f_H = (1 + 60.5 \times 9.9 \times 10^{-3}) \times 363 \times 10^3 = 580 \text{ kHz}$$

$$f_{L_f} = 598 \text{ kHz}$$

$$\text{相对误差} = \frac{|f_{Hf, \text{实}} - f_{Hf}|}{f_{Hf}} \times 100\% = \frac{|598 - 580|}{580} \times 100\% = 3.10\%$$

$$f_{L_f} = \frac{1}{1 + A_{uf}} f_L = \frac{1}{1 + 60.5 \times 9.9 \times 10^{-3}} \times 18 = 11.3 \text{ Hz}$$

$$f_{L_f, \text{标}} = 17.8 \text{ Hz}$$

$$\text{相对误差} = \frac{|f_{L_f, \text{实}} - f_{L_f}|}{f_{L_f}} \times 100\% = \frac{|17.8 - 11.3|}{11.3} \times 100\% = 57.52\%$$

$$BW_2 = (1 + A_{uf}) BW_1 = 580 \text{ kHz}$$

$$BW_{2, \text{实}} = 598 \text{ kHz}$$

$$\text{相对误差} = \frac{|BW_{2, \text{实}} - BW_2|}{BW_2} \times 100\% = 3.10\%$$

下截止频率误差较大的原因可能为操作不精确产生误差。

4.2.3 输入电阻测试

$U_s = 20.006 \text{ mV}$

U_s	U_i	R_i
20.006 mV	16.650 mV	$9.92 \text{ k}\Omega$

$$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R = \frac{16.650}{20.006 - 16.650} \times 2 = 9.92 \text{ k}\Omega$$

对输入电阻影响：

$$R_{if} = (1 + AF) R_i = (1 + 60.5 \times 9.9 \times 10^{-3}) \times 8.76 = 14.01 \text{ k}\Omega$$

$$R_{if, \text{标}} = 9.92 \text{ k}\Omega$$

$$\text{相对误差} = \frac{|R_{if, \text{实}} - R_{if}|}{R_{if}} \times 100\% = \frac{|9.92 - 14.01|}{14.01} \times 100\% = 29.19\%$$

输入电阻误差较大可能原因是串联电阻实际阻值与标称值不符，采用标称值计算产生误差。

5 实验思考题

一、分析本次实验结果，总结电压串联负反馈对放大器放大性能的影响？

使放大倍数下降、提高增益稳定度、增大输入电阻、减小输出电阻、增大带宽。

二、测量通频带时，影响下截止频率 f_L 和上截止频率 f_H 大小的因素有哪些？

(1)、影响下截止频率 f_L 的因素

f_L 由电路中耦合电容、旁路电容与电阻组成的 RC 高通网络决定：

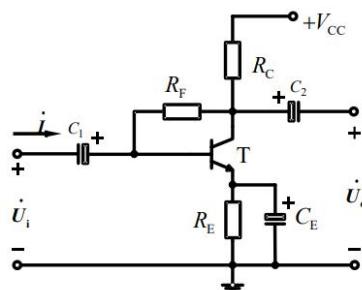
1. 电容参数：耦合电容、发射极旁路电容的容量越小，RC 时间常数越小， f_L 越高；若电容容量衰减，也会使 f_L 升高。
2. 电阻参数：与电容配合的电阻阻值越大，RC 时间常数越大， f_L 越低。
3. 电路级数：多级放大电路的 f_L 由各 RC 回路的截止频率共同决定，级数越多， f_L 通常越高。

(2)、影响上截止频率 f_H 的因素

f_H 由三极管极间电容、电路分布电容与电阻组成的 RC 低通网络决定：

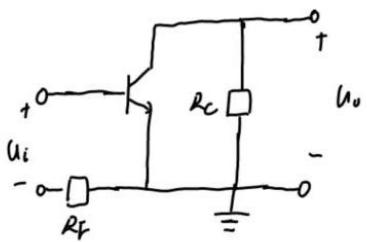
1. 三极管参数：三极管的极间电容越大，RC 时间常数越大， f_H 越低；三极管的电流放大系数 β 越大，也会间接增大等效电容，降低 f_H 。
2. 电路负载：放大器的等效负载电阻 R_L' 越小，RC 时间常数越小， f_H 越高。
3. 分布参数：电路的导线长度、焊点间距等引入的寄生电容越大，等效电容越大， f_H 越低。
4. 电路级数：多级放大电路的 f_H 是各级截止频率的综合结果，级数越多， f_H 通常越低。

三、电路如下图所示，判断此电路有无交流负反馈，若有其反馈组态是？请画出考虑负载效应的基本放大器交流通路。



有交流负反馈，反馈组态为电压并联负反馈。

考虑负载效应的基本放大器交流通路如下图所示：



6 实验总结

本实验以电压串联负反馈为核心，搭建两级共射放大电路，对比测试开环与闭环状态下的增益、输入 / 输出阻抗、通频带及失真情况。

结果验证：负反馈虽降低电压增益，但能显著提升增益稳定性、拓宽通频带、减小非线性失真，同时增大输入电阻、减小输出电阻，符合“以增益换性能”的理论，实验达到预期目的。

7 附录（原始数据）