

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

1. 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。
2. 掌握负反馈放大器各项性能指标的测量。
3. 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

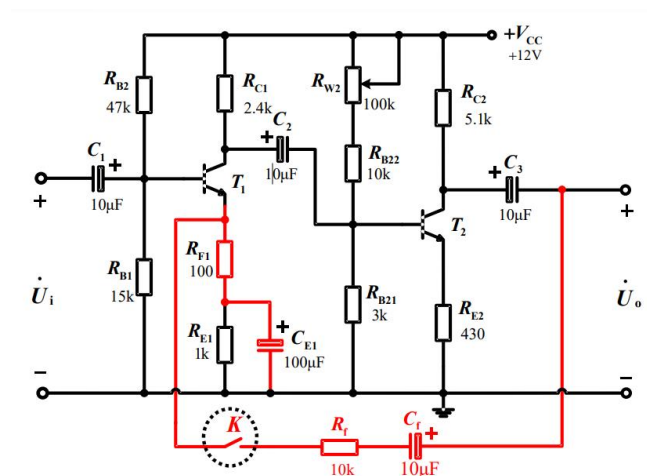


图 1 电压串联负反馈

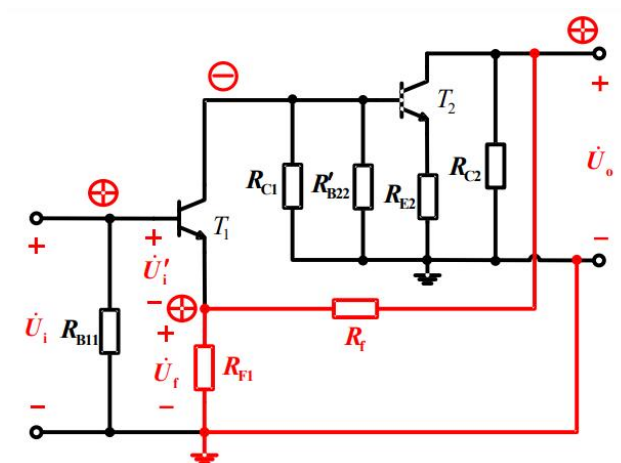


图 2 R_f 、 R_{F1} 组成负反馈网络

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

2.2 负反馈放大器对电路影响

2.2.1 放大倍数下降

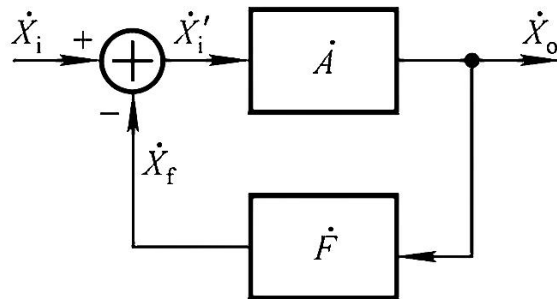


图3 反馈放大器示意图

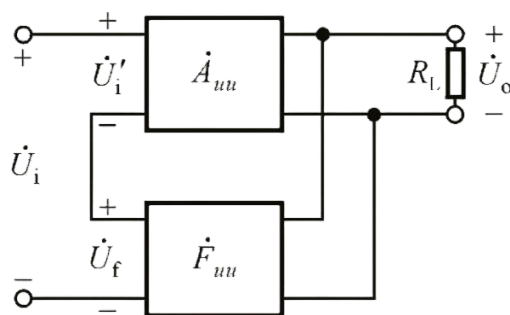


图4 电压串联负反馈示意图

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

$$U_i' = U_i - U_f$$

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

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

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。

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

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

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

引入负反馈后，增益稳定度提升了 $(1+A_u F)$ 倍。

2.2.3 对输入电阻影响

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

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

$$R_{if} = (1+A_u F) R_i$$

引入负反馈后，输入电阻增大为原来的 $(1+A_u F)$ 倍。

2.2.4 对输出电阻影响

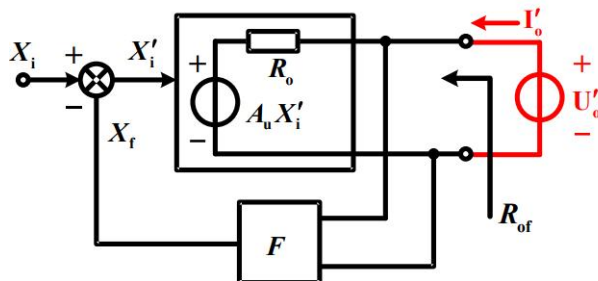


图 5 电压负反馈示意图

令 $X_i = 0$ 加压求流

$$I_o' = \frac{U_o' - A_u X_i'}{R_o} = \frac{U_o' + U_o' A_u F}{R_o} = \frac{U_o' (1+A_u F)}{R_o}$$

$$R_{of} = \frac{U_o'}{I_o'} = \frac{R_o}{1+A_u F}$$

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

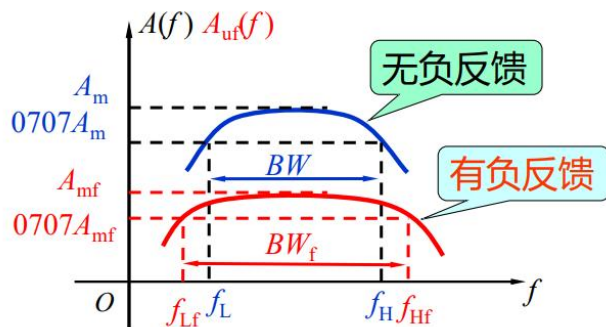


图 6 放大器的幅频特性曲线图

无反馈时: $BW_1 = f_H - f_L$

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

$BW_2 = f_{Hf} - f_{Lf} = (1 + A_{uf}) BW_1$

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

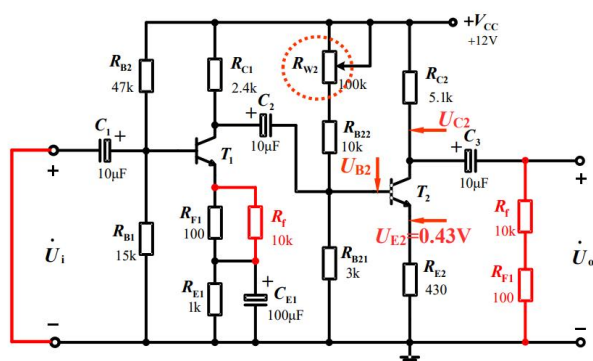


图 7 考虑负载效应的基本放大器

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	20.2970k Ω
T_2 管	1.0503V	0.43023V	6.7762V	

T₁ 管:

$$I_{BQ1} = \frac{V_{CC} - U_{B1}}{R_{B2}} - \frac{U_{B1}}{R_{B1}} = \frac{12 - 2.7712}{47 \times 10^3} - \frac{2.7712}{15 \times 10^3} = 1.16 \times 10^{-5} A$$

$$I_{CQ1} = \frac{V_{CC} - U_{C1}}{R_{C1}} = \frac{12 - 7.1560}{2.4 \times 10^3} = 2.02 \times 10^{-3} A$$

$$\begin{aligned} U_{CE1} &= V_{CC} - I_{CQ1} R_{C1} - I_{EQ1} (R_{F1} // R_f + R_{E1}) \\ &= 12 - 2.02 \times 10^{-3} \times 2.4 \times 10^3 - (2.02 \times 10^{-3} + 1.16 \times 10^{-5}) \times \left(\frac{100 \times 10 \times 10^3}{100 + 10 \times 10^3} + 1 \times 10^3 \right) \\ &= 4.91925 V \end{aligned}$$

$$U_{CE1,测} = U_{C1} - U_{E1} = 7.1560 - 2.13997 = 5.01603 V$$

$$\text{相对误差} = \frac{|U_{CE1,测} - U_{CE1}|}{U_{CE1}} \times 100\% = 2.0\%$$

T₂ 管:

$$I_{BQ2} = \frac{V_{CC} - U_{B2}}{R_{B2} + R_{B12}} - \frac{U_{B2}}{R_{B21}} = \frac{12 - 1.05303}{20.27 \times 10^3 + 10 \times 10^3} - \frac{1.05303}{3 \times 10^3} = 1.03 \times 10^{-5} A$$

$$I_{CQ2} = \frac{V_{CC} - U_{C2}}{R_{C2}} = \frac{12 - 6.7762}{5.1 \times 10^3} = 1.02 \times 10^{-3} A$$

$$\begin{aligned} U_{CE2} &= V_{CC} - I_{CQ2} R_{C2} - I_{EQ2} R_{E2} = 12 - 1.02 \times 10^{-3} \times 5.1 \times 10^3 - (1.02 \times 10^{-3} + 1.03 \times 10^{-5}) \times 430 \\ &= 6.35497 V \end{aligned}$$

$$U_{CE2,测} = U_{C2} - U_{E2} = 6.7762 - 0.43023 = 6.34597 V$$

$$\text{相对误差} = \frac{|U_{CE2,测} - U_{CE2}|}{U_{CE2}} \times 100\% = \frac{|6.34597 - 6.35497|}{6.35497} \times 100\% = 0.14\%$$

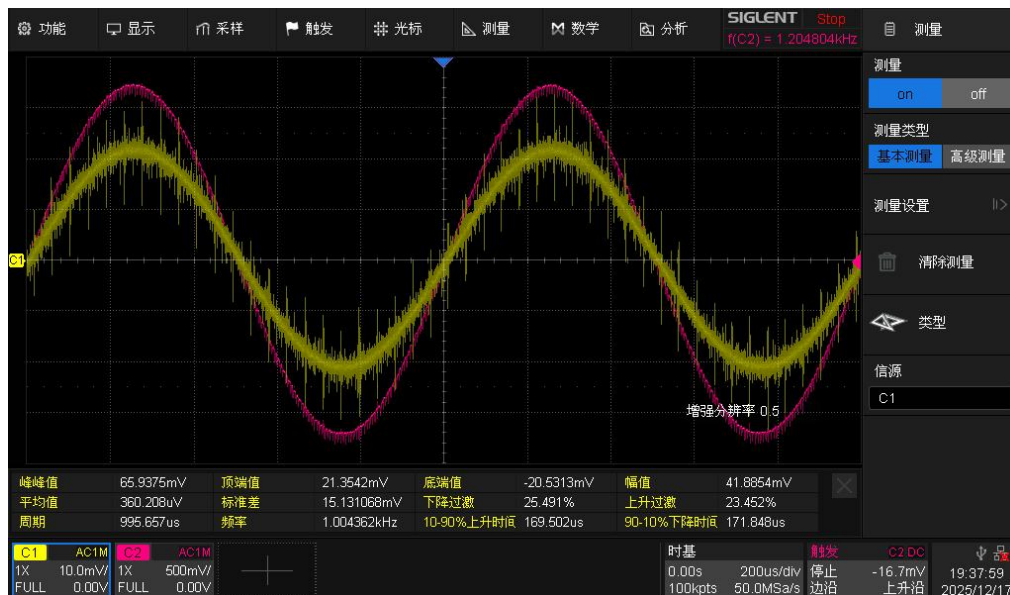
4.1.2 放大倍数和输出电阻测试

U_i = 15.001 mV

R _L (kΩ)	输出电压	A _u	R _o
∞	1.2130V	80.86	3.36kΩ
10	0.9077V	60.51	

$$R_o = \left(\frac{U_o}{U_L} - 1 \right) R_L = \left(\frac{1.213V}{0.907V} - 1 \right) \times 10 = 3.36k\Omega$$

$R_L = \infty$ 时，输入输出电压波形如下图所示：



4.1.3 通频带测试

$U_i = 15.001mV$

频率值	$f_L = 18Hz$	f_o	$f_H = 363kHz$
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

$U_s = 15.035mV$

U_s	U_i	R_i
15.035mV	12.240mV	8.76kΩ

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

4.2 负反馈放大器

4.2.1 放大倍数和输出电阻测试

$U_i = 20.003mV$

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

$$R_o = \left(\frac{U_o}{U_{L4}} - 1 \right) R_L = \left(\frac{0.9022}{0.7581} - 1 \right) \times 10 = 1.90k\Omega$$

对放大倍数影响:

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

$$A_{uf \text{ 测}} = 45.10$$

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

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

$$A_{uf \text{ 测}} = 37.90$$

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

对增益稳定度影响:

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):

$$\frac{dA_{uf \text{ 测}}}{A_{uf \text{ 测}}} = \frac{37.90 - 45.10}{45.10} = -0.16$$

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

$$\begin{aligned} \text{相对误差} &= \frac{\left| \frac{dA_{uf \text{ 测}}}{A_{uf \text{ 测}}} - \frac{dA_{uf}}{A_{uf}} \right|}{\left| \frac{dA_{uf}}{A_{uf}} \right|} \times 100\% = \frac{|-0.16 - (-0.14)|}{|-0.14|} \times 100\% \\ &= 14.29\% \end{aligned}$$

对输出电阻影响:

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

$$R_{of \text{ 测}} = 1.90 \text{ k}\Omega$$

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

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	19.984mV	20.003mV	20.020mV
输出电压	0.5363V	0.7586V	0.5363V

对通频带影响:

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

$$f_{Hf} = (1 + A_{uf}) f_H = (1 + 60.51 \times 9.9 \times 10^{-3}) \times 363 \times 10^3 = 580\text{kHz}$$

$$f_{Hf\text{测}} = 598\text{kHz}$$

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

$$f_{Lf} = \frac{1}{1 + A_{uf}} f_L = \frac{1}{1 + 60.51 \times 9.9 \times 10^{-3}} \times 18 = 11.3\text{Hz}$$

$$f_{Lf\text{测}} = 17.8\text{Hz}$$

$$\text{相对误差} = \frac{|f_{Lf\text{测}} - f_{Lf}|}{f_{Lf}} \times 100\% = \frac{|17.8 - 11.3|}{11.3} \times 100\% = 57.52\%$$

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

$$BW_{2\text{测}} = 598\text{kHz}$$

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

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
20.006mV	16.650mV	9.92kΩ

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

对输入电阻影响:

$$R_{if} = (1 + A_f) R_i = (1 + 60.51 \times 9.9 \times 10^{-3}) \times 8.76 = 14.01\text{k}\Omega$$

$$R_{if\text{测}} = 9.92\text{k}\Omega$$

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

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 大小的因数有哪些？

(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：

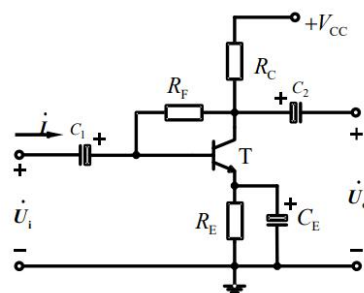
1. 电容参数：耦合电容、发射极旁路电容的容量越小，RC 时间常数越小， f_L 越高；若电容量衰减，也会使 f_L 升高。
2. 电阻参数：与电容配合的电阻阻值越大，RC 时间常数越大， f_L 越低。
3. 电路级数：多级放大电路的 f_L 由各 RC 回路的截止频率共同决定，级数越多， f_L 通常越高。

(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：

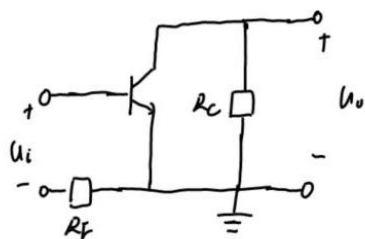
1. 三极管参数：三极管的极间电容越大，RC 时间常数越大， f_H 越低；三极管的电流放大系数 β 越大，也会间接增大等效电容，降低 f_H 。
2. 电路负载：放大器的等效负载电阻 R_L' 越小，RC 时间常数越小， f_H 越高。
3. 分布参数：电路的导线长度、焊点间距等引入的寄生电容越大，等效电容越大， f_H 越低。
4. 电路级数：多级放大电路的 f_H 是各级截止频率的综合结果，级数越多， f_H 通常越低。

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）