

实验三 电压串联负反馈放大器

范玥瑶 PB18000341

2020 年 6 月 24 日

1 实验目的

1. 理解反馈放大器的分类和判别方法。
2. 研究电压串联负反馈对放大电路性能的影响。
3. 掌握负反馈放大电路各项性能指标的测试方法。

2 实验原理

2.1 反馈

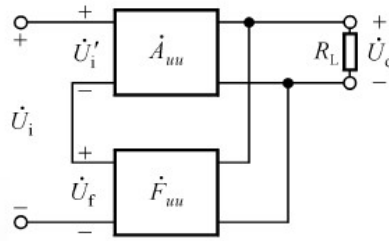
反馈即将放大电路输出端的电压或电流，通过一定的方式，返回到放大器的输入端，对输入端产生作用。

2.2 反馈的性质

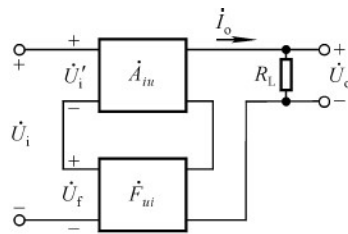
若反馈信号削弱原来的输入信号，使净输入信号减小，则为负反馈；反之为正反馈。实际应用中多使用负反馈。

2.3 反馈的组态

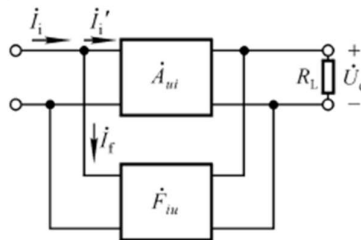
如图 2.3.1，据输入量和反馈量可以将负反馈电路的组态分为四种：电压串联负反馈，电流串联负反馈，电压并联负反馈，电流并联负反馈。



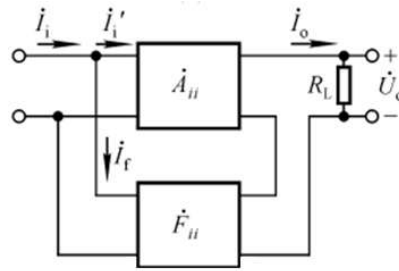
(a)



(b)



(c)



(d)

图 2.3.1 负反馈电路的组态 (a) 电压串联负反馈 (b) 电流串联负反馈 (c) 电压并联负反馈 (d) 电流并联负反馈

2.4 反馈闭环系统

反馈闭环系统包括基本放大器和反馈网络两部分。

如图 2.4.1, \dot{X}_i , \dot{X}'_i , \dot{X}_o , \dot{X}_f 分别表示放大器的输入、净输入、输出及反馈信号。

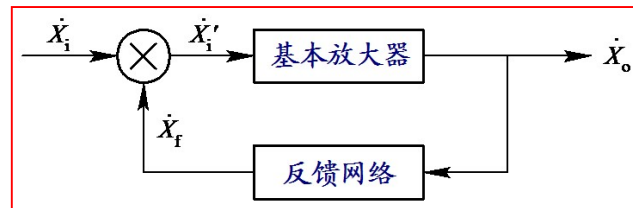


图 2.4.1 反馈闭环结构示意图

2.5 负反馈的一般关系式

如图 2.5.1, 开环增益

$$\dot{A} = \dot{X}_o / \dot{X}'_i$$

反馈系数

$$\dot{F} = \dot{X}_f / \dot{X}_o$$

闭环增益

$$\dot{A}_f = \dot{X}_o / \dot{X}_i$$

它们满足关系:

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A} \dot{X}'_i}{\dot{X}'_i + \dot{X}_f} = \frac{\dot{A} \dot{X}'_i}{\dot{X}'_i + \dot{F} \dot{X}_o} = \frac{\dot{A} \dot{X}'_i}{\dot{X}'_i + \dot{A} \dot{F} \dot{X}'_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A} \dot{F}} \quad (1)$$

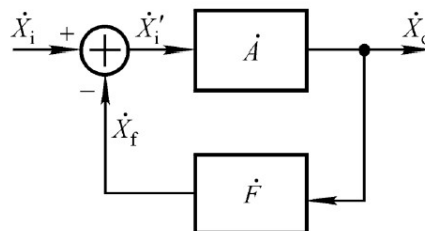


图 2.5.1 负反馈闭环系统示意图

2.6 负反馈对放大器性能的影响

1) 提高了放大倍数的稳定性: 引入负反馈以后, 放大器的放大倍数由 A 变为 $A_f = \frac{A}{1+AF}$ 。将

A_f 对 A 求得

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

即

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

2) 改变输入电阻和输出电阻

串联负反馈 $R_{if} = (1 + AF)R_i$, 并联负反馈 $R_{if} = R_i / (1 + AF)$; 电压负反馈 $R_{of} = R_o / (1 + AF)$, 电流负反馈 $R_{of} = (1 + AF)R_o$.

3) 展宽频带

如图 2.6.1, 闭环上限频率比开环时增加了, 闭环下限频率比开环时减小了。

$$f_{LF} = f_L / (1 + AF)$$

$$f_{HF} = (1 + AF) f_H$$

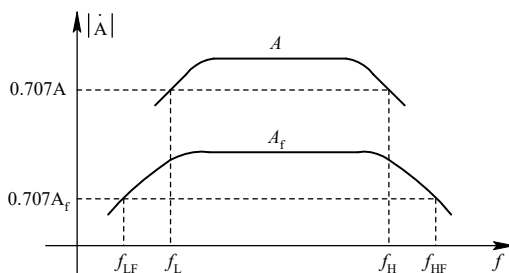


图 2.6.1 开闭环放大电路的频率响应特性曲线

4) 减小非线性失真

多级放大电路中输出级的输入信号幅度较大, 在动态过程中, 放大器件可能工作在它的传输特性的非线性部分, 因而使输出波形产生非线性失真。引入负反馈后, 可使这种非线性失真减小。引入深度负反馈 $1 + AF \gg 1$ 后闭环增益近似于 $\frac{1}{F}$, 而仅有 A 与 f 相关, 所以输出量正比于输入量亦即减小了非线性失真。应当注意的是, 负反馈减小非线性失真所指的是反馈环内的失真。如果输入波形本身就是失真的, 这时即使引入负反馈, 也是无济于事的。

2.7 电压串联负反馈放大器实验电路

实验电路如图 2.7.1 所示, 仿真电路图如图 2.7.2。电路是一个两级放大器, 第一级是含 T_1 的共射极放大电路, 第二级是含 T_2 的共射极放大电路。输入端为 \dot{U}_i , A 为第一级输出, B 为第二级输入, 输入端为 \dot{U}_o 。第二级的集电极接着电压串联负反馈网络, 当 K_1 (S_1) 开关接在“断”时开环放大, 当 K_1 开关接在“通”时闭环放大。在测量输出阻抗时通过 S_2 控制电路有无输出负载。

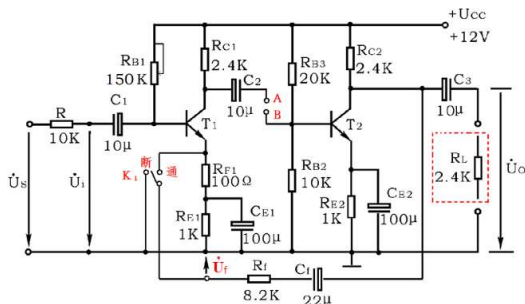


图 2.7.1 电压串联负反馈放大器实验电路图

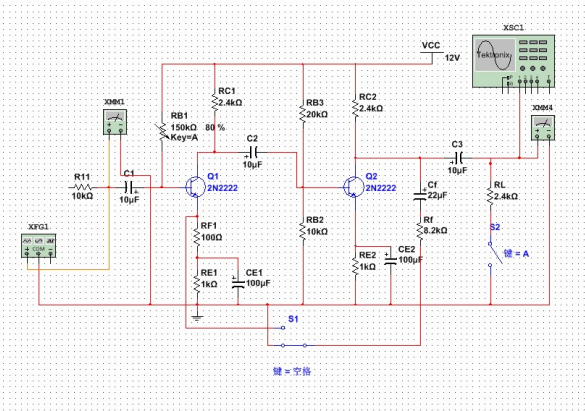


图 2.7.2 电压串联负反馈放大器仿真电路图

3 实验内容

本实验中用到的仪器有：直流稳压电源、函数信号发生器、数字示波器。

3.1 放大器最大开环增益的测量

连接实验电路，仿真电路图如图 3.1.1.

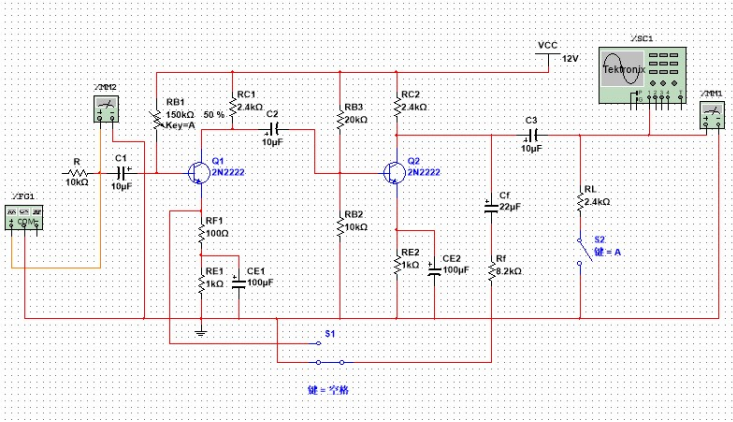


图 3.1.1 电压串联负反馈放大器仿真电路图

接通直流电源 $U_{cc}=+12V$, S1 置“开环”， U_i 输入 1kHz 的正弦波，自选合适的幅度值，调节 R_{B1} ，使两级放大电路增益最大不失真即输出最大且输出波形不失真，用万用表 ACV 档测量输入电压、输出电压，计算放大器的开环总增益 A_v 。

实验中最大不失真状态下信号发生器 $V_p=3mV, U_i=2.121mV, U_o=919.860mV$. 输出波形图如图 3.1.2.

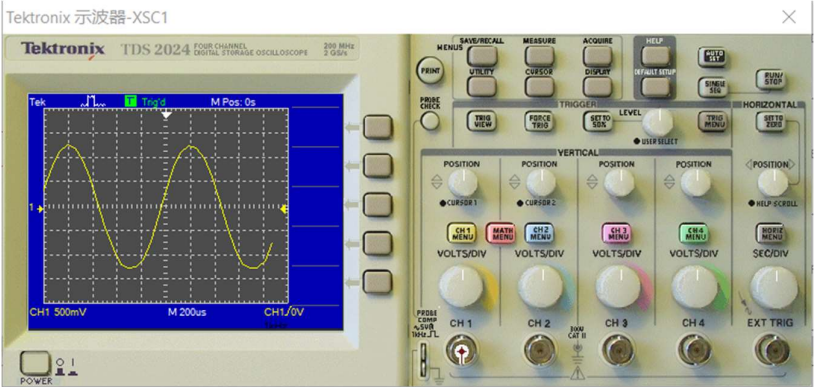


图 3.1.2 开环电路输出波形图

3.2 电压串联负反馈放大电路反馈系数和闭环增益的测量

R_{B1} 保持不变, S_1 置“闭环”, 调节 U_i 幅度至合适值, 使输出信号最大不失真, 测量输入电压、输出电压、反馈电压, 计算反馈系数 F 及闭环总增益 A_{vf} , 计算反馈深度 $D=1+A_{vf}F$ 值。

实验中最大不失真状态下信号发生器 $V_p=20mV, U_i=14.145mV, U_o=927.374mV, U_f=3.77V$, 输出波形图如图 3.2.1。

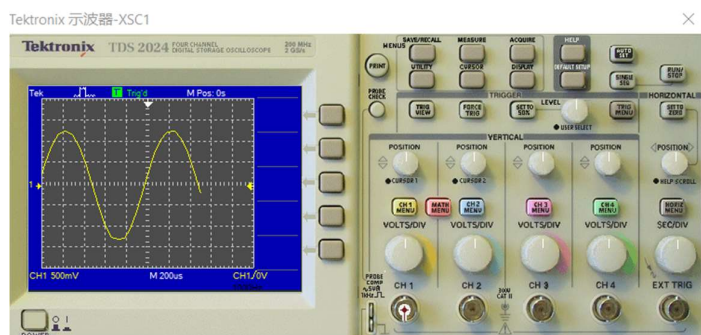
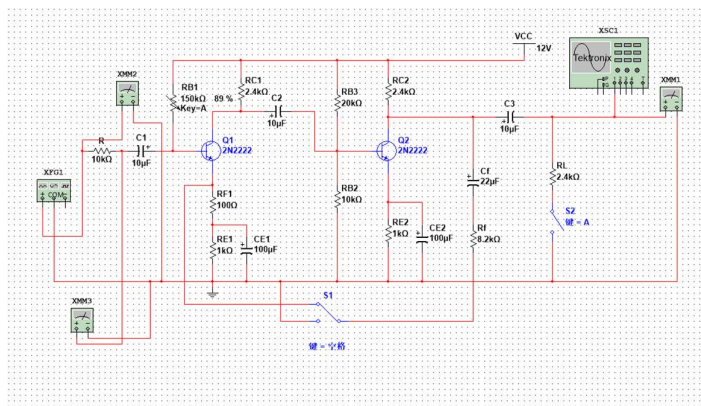


图 3.2.1 闭环电路输出波形图

3.3 输入阻抗的测量

连接电路, 仿真电路图如图 3.3.1。



将测试信号加在 U_s , 在开环和闭环电路测量 u_s 、 u_i 。实验测得开环 $u_s=14.142mV, u_i=454.472 \mu V$, 闭环 $u_s=14.142mV, u_{if}=1.261mV$ 。

3.4 输出阻抗的测量

在开环和闭环电路中分别测量 S_2 断开时的输出电压 $u_{o\infty}$ 和 S_2 闭合时的输出电压 u_{oL} 。实

验测得开环 $u_{o\infty}=3.181V, u_{oL}=2.402V$, 闭环 $u_{o\infty f}=927.365mV, u_{oLf}=879.870mV$ 。

3.5 通频带宽的测量

逐点法测量电压串联负反馈放大器的开环通频带 BW 及闭环通频带 BW_f 。测量方法为：
在开环电路中

1. 在中频区 1kHz 测出 U_{om} 。
 2. 保持 U_i 幅值不变, 增加或减小 U_i 频率, 找到对应 $0.707U_{om}$ 的 f_L 和 f_H 。
- 改变 U_i 频率时维持幅值不变且要求输出波形不失真。在闭环电路中重复上述操作测得 f_{Lf} 和 f_{Hf} 。

信号源峰值 $V_p=3mV$ 。开环 $U_{om}=919.864mV, 0.707U_{om}=650.344mV, f_H=292.5kHz, f_L=87.7Hz$ 。开环 $U_{omf}=138.319mV, 0.707U_{om}=97.792mV, f_{Hf}=2.42MHz, f_{Lf}=28.9Hz$ 。

4 实验分析

4.1 增益和反馈系数

开环总增益

$$A_v = \frac{U_o}{U_i} = \frac{919.860mV}{2.121mV} = 433.692$$

分贝制下为

$$A_v = 20\lg 433.692 = 52.7dB$$

反馈系数

$$F = \frac{U_f}{U_o} = \frac{3.77V}{927.374mV} = 4.065$$

闭环总增益

$$A_{vf} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{927.374mV}{14.145mV} = 65.562$$

分贝制下为

$$A_{vf} = 20\lg 65.562 = 36.3dB$$

反馈深度

$$D = 1 + A_v F = 1 + 433.692 * 4.065 = 1763.958$$

由上述计算结果，开环增益比闭环增益大； $D \sim 10^3$ ，本实验中的电压串联负反馈放大电路是深度负反馈。

4.2 输入阻抗

已知 $R=10k\Omega$ ，开环输入电阻

$$R_i = \frac{u_i}{u_s - u_i} \cdot R = \frac{454.472\mu V}{14.142mV - 454.472\mu V} \cdot 10k\Omega = 332.034\Omega$$

闭环输入电阻

$$R_{if} = \frac{u_{if}}{u_s - u_{if}} \cdot R = \frac{1.261mV}{14.142mV - 1.261mV} \cdot 10k\Omega = 978.961k\Omega$$

分析电路，输入电阻的变化取决于负反馈是串联反馈还是并联反馈。对比 R_i 和 R_{if} 可得，串联负反馈网络会增大放大电路的输入阻抗，从而使得：（1）对相同的电源内阻，对电源的驱动力要求更小，更节能；（2）对于不同内阻的电源，输入电压更稳定。

4.3 输出阻抗

已知 $R_L=2.4k\Omega$ ，开环输出阻抗

$$R_o = \left(\frac{u_{o\infty}}{u_{oL}} - 1 \right) R_L = \left(\frac{3.181V}{2.402V} - 1 \right) \cdot 2.4k\Omega = 778.351\Omega$$

闭环输出阻抗

$$R_{of} = \left(\frac{u_{o\infty f}}{u_{oLf}} - 1 \right) R_L = \left(\frac{927.365mV}{879.870mV} - 1 \right) \cdot 2.4k\Omega = 129.551\Omega$$

分析电路，输出电阻的变化取决于负反馈是电压反馈还是电流反馈。对比 R_o 和 R_{of} 可得，电压负反馈网络会减小放大电路的输出阻抗，更适合小电阻的负载，以及让输出电压更稳定。

4.4 通频带宽

开环通频带宽

$$BW = f_H - f_L = 292.5kHz - 87.7Hz = 292.4123kHz \approx 292.4kHz$$

闭环通频带宽

$$BW_f = f_{Hf} - f_{Lf} = 2.42MHz - 28.9Hz = 2.4199711MHz \approx 2.420MHz$$

$BW_f \gg BW$, 电压串联负反馈网络可以增大带宽。

5 实验思考题

1. 为稳定静态工作点应引入何种反馈？为改善电路动态性能应引入何种反馈？欲增大带负载能力应引入何种反馈？

答：为稳定静态工作点应引入直流负反馈。为改善电路动态性能应引入交流反馈。为增大带负载能力应引入电压负反馈。

2. 反馈网络的负载效应是如何体现在开环放大器中的？

答：负载效应指仅当由于负载的变化而引起输出稳定量的变化的效应。一方面开环放大器的输出电阻会使得输出量随负载变化明显，而在闭环电路中电压反馈电路输出阻抗远小于负载令输出近似于理想电压源，电流反馈电路输出阻抗远大于负载使得输出近似于理想电流源。另一方面闭环电路对负载效应有负反馈抑制，所以开环放大器的负载效应更为明显。

6 实验总结

本实验中，实验者通过进行开闭环放大电路的增益，闭环电路反馈系数、反馈深度，开闭环电路输入输出阻抗和上下限频率、带宽的测量实验加深了对模拟电路知识的理解。了解了反馈电路的性质、组态，复习了反馈、闭环系统、开环增益、闭环增益、反馈系数、反馈深度、深度负反馈等一系列概念，了解了负反馈电路在工作电路中的应用，认知了电压对放大器性能的影响。

实验者从实验结果中得出结论：1. 电压串联负反馈有利于静态工作点的稳定；2. 电压串联负反馈会减小电压增益，但是同时可以稳定电压增益；3. 串联反馈可以减小输入电阻，稳定输入电压；4. 电压负反馈可以增大输出电阻；5. 电压串联负放大电路会增大通频带宽，减小失真的风险。