

负反馈放大电路仿真实验

唐延宇 PB22030853

2024 年 8 月 17 日

摘要

本仿真实验意在验证电路引入反馈对放大倍数的稳定作用以及对电路通频带的展宽作用。实验利用 Multism 14.3 软件搭建了两个仿真电路,测量两电路的若干关键性能指标,由此验证了结论。

关键词: 负反馈 通频带 理想运放

1 负反馈电路放大倍数的稳定

1.1 基本原理

由于在放大电路中引入深度负反馈后,有:

$$\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}} \quad (1)$$

从而放大系数只与反馈系数有关,而反馈网络一般为电阻网络,具有较好的稳定性,能够抵抗一定范围内环境条件改变带来的影响,下具体计算之。

在中频段,假设 $\dot{A}, \dot{A}_f, \dot{F}$ 均为实数,那么有:

$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \quad (2)$$

两端求微分,有:

$$dA_f = \frac{(1 + AF)dA - AFdA}{(1 + AF)^2} \quad (3)$$

$$= \frac{dA}{(1 + AF)^2} \quad (4)$$

故而:[1]

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + AF} \cdot \frac{dA}{A} \quad (5)$$

由此可见,在放大电路中引入负反馈,可使得放大倍数的稳定 $(1 + AF)$ 倍,但同时放大倍数自身也将变为原先的 $\frac{1}{1 + AF}$ 。

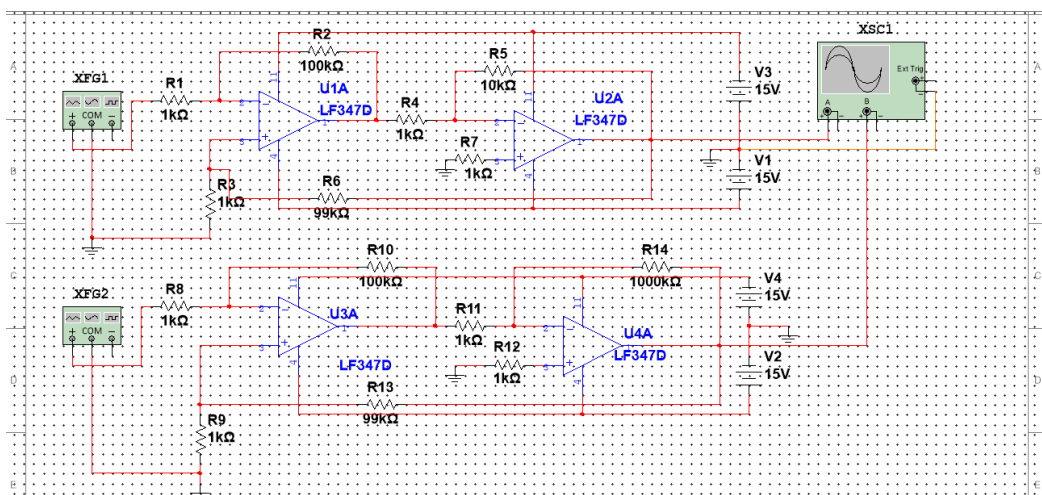


图 1: 仿真电路图一

1.2 仿真电路

仿真所用电路图如图1所示.

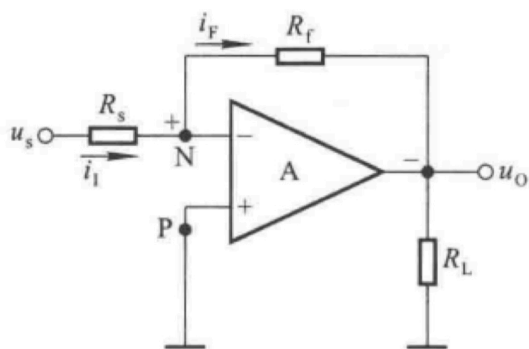


图 2: 电压并联负反馈部分

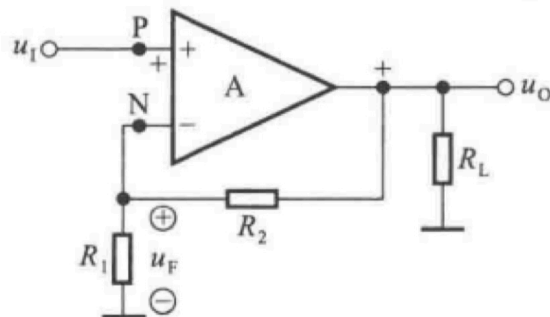


图 3: 电压串联负反馈部分

该电路是由两个理想运放构成的两级放大电路, 电路结构较为简单, 上下两电路的区别仅为 R_s 位置处的反馈电阻阻值不同, 因此以下为免冗赘, 仅根据上图分析电路. 根据瞬时极性法可知, 电路的主体是由两个集成运放组成的两级直接耦合放大电路, 在两级内部均分别引入了电压并联负反馈, 且在级间引入了电压串联负反馈, 拆分简化电路图分别如图2,3所示. 由此, 电压并联负反馈部分的放大倍数可如下计算:

由于反馈电流 $\dot{I}_f = \dot{I}_i$, 故可认为理想运放两端子均接地, 即“虚地” ($u_P = u_N = 0$), 从而 $\dot{U}_o = -\dot{I}_f R_f = -\dot{I}_i R_f$, 则有:

$$\dot{A}_{uif} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} = -R_f \quad (6)$$

又 $\dot{U}_s = \dot{I}_i R_s$,

$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = -\frac{R_f}{R_s} \quad (7)$$

电压串联负反馈部分的放大倍数可如下计算:

$$\dot{U}_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \dot{U}_i \quad (8)$$

从而放大倍数:

$$\dot{A}_{uuf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (9)$$

具体到仿真电路中, 根据式 (7), 有 $\dot{A}_{uuf1} = -R_2/R_1$, $\dot{A}_{uuf2} = -R_5/R_4$, 从而 $\dot{A}_{uuf} \approx \dot{A}_{uuf1} \cdot \dot{A}_{uuf2}$.

理想深度负反馈条件下, 根据式 (9), 级间电压串联闭环放大倍数为:

$$\dot{A}_f = 1 + \frac{R_6}{R_3} = 100 \quad (10)$$

1.3 仿真结果分析

实测信号源输入峰值为 9.984 mV, 上下两电路输出电压峰值分别为 895.554 mV 和 983.311 mV, 仿真实验使用如图 4 所示的双踪示波器读取数据. 采用峰值代替相量计算, 则实测闭环放大系数可如下计算:

$$A_{f1} = \frac{U_{o1}}{U_{i1}} = \frac{895.554}{9.984} = 89.70 \quad (11)$$

$$A_{f2} = \frac{U_{o2}}{U_{i2}} = \frac{983.311}{9.984} = 98.49 \quad (12)$$

由此可见, R_5 从 10 k Ω 增加到 1 M Ω , 增大了开环增益, 使得闭环放大倍数更加接近理论值. 同时, 电路开环放大倍数变化为:

$$\frac{\Delta \dot{A}_u}{\dot{A}_u} = \frac{10^3 - 10^5}{10^5} = -0.99 \quad (13)$$

闭环放大倍数变化为:

$$\frac{\Delta \dot{A}_{uf}}{\dot{A}_{uf}} = \frac{89.7 - 98.49}{98.49} = -0.09 \quad (14)$$

由此可知, 引入反馈后, 放大倍数的稳定性大大提高, 从而验证了结论. 总结反馈电阻 R_5 变换前后电路各参量数值如表所示:

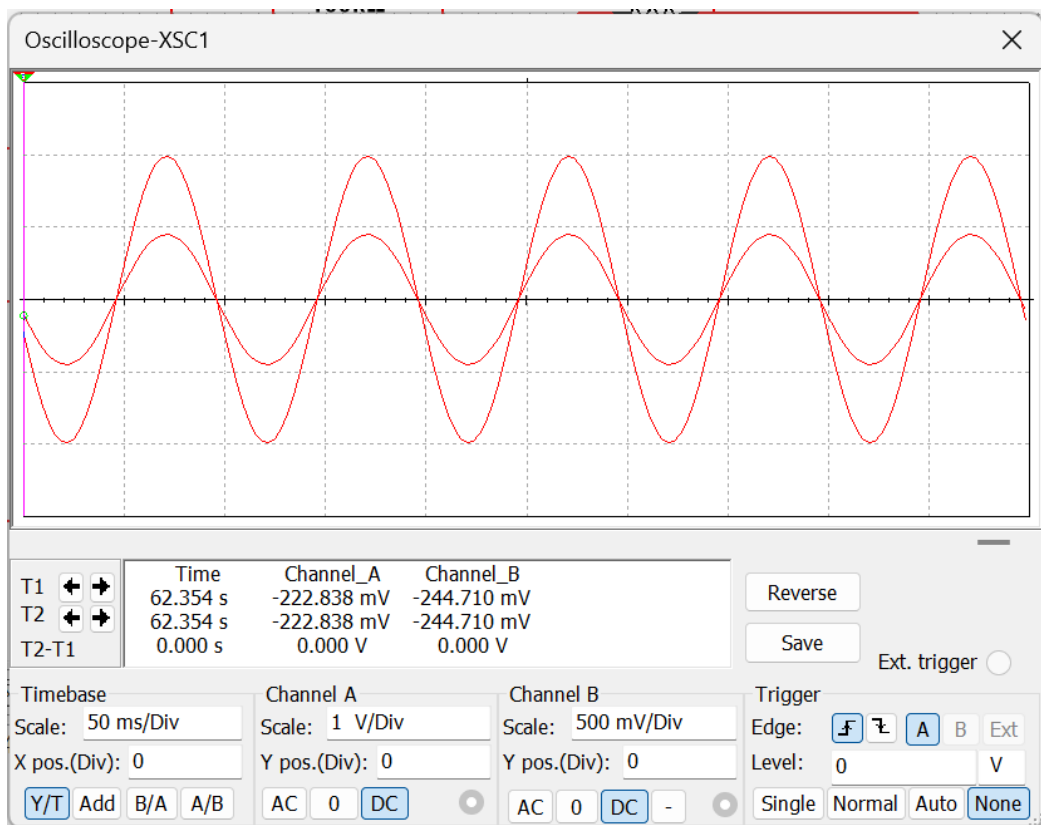


图 4: 示波器显示波形图

表 1: 仿真结果对比表

反馈电阻 $R_f/k\Omega$	信号源峰值/mV	输出峰值/mV	开环放大倍数 A_u	闭环放大倍数 A_{uf}
10	9.984	895.554	10^3	89.70
1000	9.984	983.311	10^5	98.49

2 负反馈对电路频率响应的影响

2.1 基本原理

在电路中引入负反馈,可以展宽电路的通频带.下详细推导之.方便起见,假设反馈网络为纯电阻网络,波特图中仅在高频段有一个拐点,则:

$$\dot{A}_b = \frac{\dot{A}_m}{1 + j\frac{f}{f_H}} \quad (15)$$

式中, \dot{A}_m, \dot{A}_b 分别为基本放大电路的中频和高频放大倍数, f_H 为电路的上限截止频率.那么,引入负反馈后电路的高频段放大倍数为:

$$\dot{A}_{bf} = \frac{\dot{A}_b}{1 + \dot{A}_b \dot{F}_b} \quad (16)$$

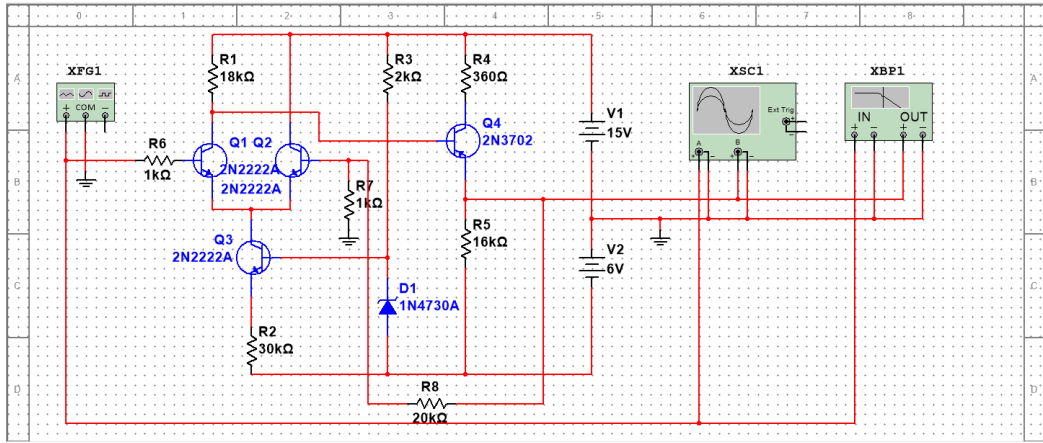


图 5: 仿真电路图二

将式 (15) 代入式 (16), 分子分母同除以 $(1 + \dot{A}_m \dot{F})$ 可得:

$$\dot{A}_{bf} = \frac{\frac{\dot{A}_m}{1 + \dot{A}_m \dot{F}}}{1 + j \frac{f}{(1 + \dot{A}_m \dot{F}) f_H}} \quad (17)$$

$$= \frac{\dot{A}_{mf}}{1 + j \frac{f}{f_H}} \quad (18)$$

上式中使用 \dot{A}_{mf} 标志中频段负反馈电路放大倍数, 上限截止频率为:

$$f_{Hf} = f_H (1 + A_m F) \quad (19)$$

由此可见, 负反馈可将基本放大电路的频带展宽 $(1 + AF)$ 倍.

2.2 仿真电路

仿真所使用的电路图如图5所示.

在电路中, 三极管 Q1, Q2 构成了单端输入、单端输出的差动放大电路, 具有抑制温漂的作用. 且两发射结接入了一个恒流源, 使得第一级放大电路更加稳定. 第二级放大采用了基本共射放大电路. 同时, 在两级放大电路之间引入了电压并联负反馈, 反馈网络仅包含 R_8 一个电阻. 电路接入了双踪示波器 XSC1 观察输入输出特性是否正常, 并使用 XBP1 绘制波特图对比有无反馈的情况下电路频率响应的差异.

2.3 仿真结果分析

仿真测得的有无反馈时的波特图输出分别如图6,7所示. 从图中总结引入反馈前后电路特性变化如表2所示.

由此可见, 引入反馈可在减小增益的代价下极大程度展宽频带, 这与理论分析的结果是吻合的.

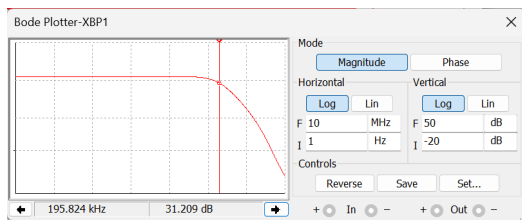


图 6: 无反馈时电路的截止频率

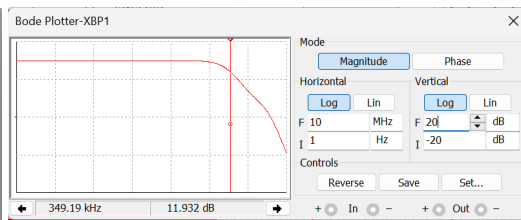


图 7: 有反馈时电路的截止频率

表 2: 引入反馈前后电路参数变化表

电路情况	中频增益/dB	3 dB 下上限截止频率/kHz
无反馈	34.283	195.924
有反馈	14.943	349.19

2.4 误差分析

本次仿真的误差可能主要来自以下两方面：

- 由于此电路引入的反馈是交直流共存的负反馈，因此在引入反馈之后，应当调节电路的静态工作点，而本次仿真忽略了这一点，因此结果可能存在误差。
- 由于 Multism 软件中的波特图绘制时，频率不可连续读取，因此无法准确定位增益下降 3dB 对应的频率，这必然为结果带来误差。

3 总结

本仿真实验目的为验证电路引入负反馈对于稳定放大倍数以及展宽频带的作用，为此，实验者分别搭建了一个由两级理想运放组成的基本放大电路，以及一个由差动放大和基本共射构成的两级就基本放大电路。实验通过测试电路的关键性能指标，较好地验证了理论分析的结果。但与此同时，实验设计仍然具有一定的改善空间。

参考文献

- [1] 童诗白、华成英主编. 模拟电子技术基础. 北京: 高等教育出版社. 2015.7
- [2] 刘同怀、顾理编著. 模拟电子电路. 中国科学技术大学出版社. 2015.2