

负反馈放大器

微电子学院

2023.3.6

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

一、实验题目

· 负反馈放大器

二、实验目的

1. 通过实验了解电压串联负反馈对放大器性能的改善；
2. 了解负反馈放大器各项技术指标的测试方法；
3. 掌握负反馈放大电路频率特性的测量方法；
4. 进一步熟悉各种测量仪器的使用方法。

三、实验原理

1. 反馈的概念：

反馈是电子电路中常用的一种方法或手段，它通过一定的方式将放大器输出回路中的电压或电流的一部分或全部回送到放大器的输入回路中，从而影响输入的电压或电流，这种电压或电流的回送过程称作反馈。

根据回送到输入回路的反馈量对输入量的影响效果，可以分为正反馈和负反馈。如果反馈量起到了增强原输入电压或电流的作用，称为正反馈，反之，若反馈量起到了削弱原输入电压或电流的作用，则为负反馈。判断电路中引入的是正反馈或负反馈，一般采用瞬时极性法。

2. 负反馈放大器四种基本类型：

根据负反馈放大器输出端的取样对象是电压或电流，将反馈分为电压反馈型和电流反馈型；另外，根据反馈信号与输入信号在输入回路是串联连接或并联连接，又将反馈分为串联反馈型和并联反馈型。

所以按照输出端的两种取样方式和输入端的两种连接方式可得交流负反馈放大器四种基本类型：

- (1) 电压串联负反馈
- (2) 电压并联负反馈
- (3) 电流串联负反馈
- (4) 电流并联负反馈

3. 负反馈使放大器的放大倍数降低：

A_{uf} 的表达式为：
$$A_{uf} = \frac{A_u}{1 + A_u F_u}$$

4. 负反馈改变放大器的输入和输出电阻：

负反馈对放大器输入阻抗和输出阻抗的影响比较复杂。不同的反馈形式，对阻抗的影响不一样。并联负反馈能降低输入阻抗；而串联负反馈则提高输入阻抗，电压负反馈使输出阻抗降低；电流负反馈使输出阻抗升高。

输入电阻： $R_{if} = (1 + A_u F_u) R_i$

输出电阻： $A_{of} = \frac{R_o}{1 + A_u F_u}$

5. 负反馈扩展了放大器的通频带：（如图1）

负反馈放大器

微电子学院

2023.3.6

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

上限频率表达式: $f_{Hf} = (1 + A_u F_u) f_H$

下限频率表达式: $f_{Lf} = \frac{1}{1 + A_u F_u} f_L$

带宽: $BW = f_{Hf} - f_{Lf} \approx f_{Hf}$

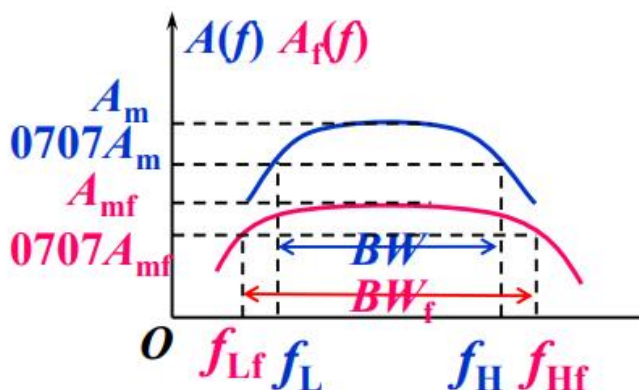


图1 负反馈扩展了放大器的通频带

6. 负反馈提高了放大倍数的稳定性:

当反馈深度一定时, 有: $\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + AF} \frac{dA}{A}$

可见引入负反馈后, 放大器闭环放大倍数 A_f 的相对变化量比开环放大倍数的相对变化量减少了 $(1 + AF)$ 倍, 即闭环增益的稳定性提高了 $(1 + AF)$ 倍。

7. 带有电压串联负反馈的两级阻容耦合放大器: (如图2)

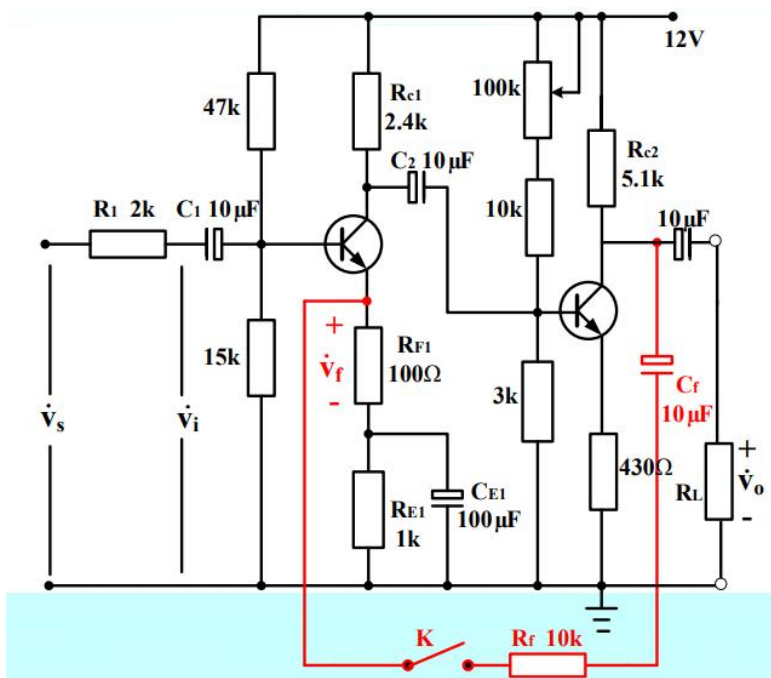


图2 带有电压串联负反馈的两级阻容耦合放大器

8. 电压串联负反馈放大器原理框图: (如图3)

负反馈放大器

微电子学院

2023.3.6

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

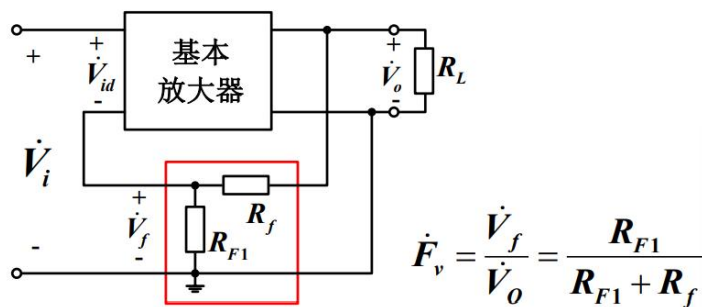


图3 电压串联负反馈放大器原理框图

9. 本实验需要测量基本放大器的动态参数，怎样实现无反馈而得到基本放大器呢？

不能简单地断开反馈支路，而是既要去掉反馈作用，又要把反馈网络的影响（负载效应）考虑到基本放大器中去。为此：

在画基本放大器的输入回路时，因为是电压负反馈，所以可以将负反馈放大器的输出端交流短路，即令 $V_O=0$ ，此时 R_f 相当于并联在 R_{F1} 上；

在画基本放大器的输出回路时，由于输入端是串联负反馈，因此需将反馈放大器的输入端（ T_1 管的射极）开路，此时 $(R_f + R_{F1})$ 相当于并接在输出端。可近似认为 R_f 并接在输出端。（如图4，5所示）

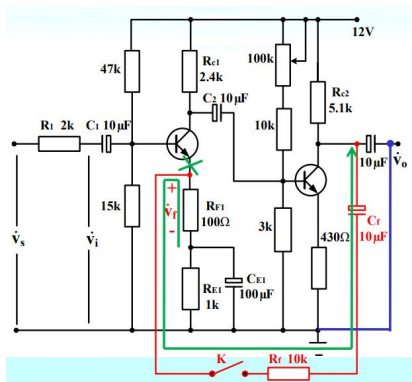


图4

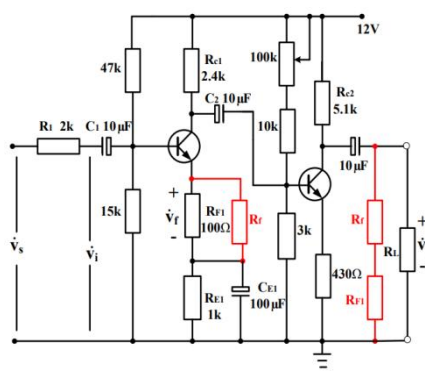
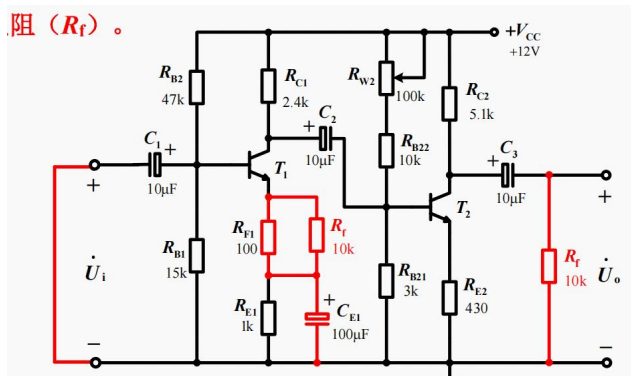


图5 考虑了负载效应的基本放大器

四、实验内容

- 1.实验一：测量静态工作点：

按下图连接电路，接成考虑负载效应的基本放大器。



负反馈放大器

微电子学院

2023.3.6

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

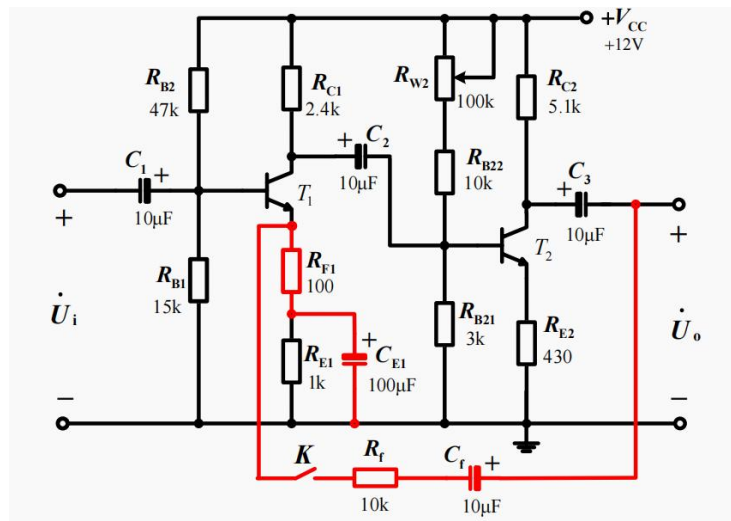
输入端短接，调节RW2，使T2管对地电压 $U_{E2} = 0.43V$ ；用万用表DCV档分别测量T1和T2管的对地电位 U_B 、 U_E 和 U_C ；用万用表欧姆档测出电位器RW2的阻值，记录数据。

2.实验二：基本放大器动态指标的测量

信号源输出为频率 $f=1kHz$ ，有效值为 $U_i = 20mV$ 的正弦信号，同时要求输出波形不失真，即用示波器监视输出，用毫伏表记录各电压的有效值；逐步改变信号源的频率，找到 f_H 和 f_L ；在基本放大器与信号源之间串接电阻 $R=2k\Omega$ ，负载 $R_L=10k\Omega$ 接上，毫伏表测试电阻R两端的电压 U_s 、 U_i ，记录数据。

3.实验三：反馈放大器动态指标的测量

测试电路如下图所示，电压串联负反馈放大器。函数发生器输出频率为 $f=1kHz$ ，幅度为 $U_i = 20mV$ （有效值）的正弦信号，负载电阻 $R_L=10k\Omega$ 。测量 A_{uf} 、 A_{uLf} 、 R_{if} 、 R_{of} 及 f_{Lf} 和 f_{Hf} ，记录数据。



五、原始数据

1. 实验一：测量静态工作点

T₁管对地电位 $U_B = 2.7932V$ $U_E = 2.1592V$ $U_C = 7.1689V$

T₂管对地电位 $U_B = 1.0535V$ $U_E = 0.4307V$ $U_C = 6.7400V$

100k Ω 电位器阻值=20.414k Ω

2. 实验二：基本放大器动态指标的测量

1) 基本放大器放大倍数和输出电阻的测量

测试条件： $f=1kHz$ ， $U_i = 20mV$ ， R_L 空载

$U_O=1.642V$ ， $U_i=20mV$ ，则 $A_{uf}=-81.1$

测试条件： $f=1kHz$ ， $U_i = 20mV$ ， $R_L=10k\Omega$

$U_L=1.227V$ ， $U_i=20mV$ ，则 $A_{uLf}=-61.35$

输出电阻 $R_o=3.382k\Omega$

2) 基本放大器通频带的测量

$f_{Hf}=370kHz$ ， $f_{Lf}=18Hz$

3) 基本放大器输入电阻的测量

负反馈放大器

微电子学院

2023.3.6

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

$U_S=20.33\text{mV}$, $U_i=16.44\text{mV}$, $R=2\text{k}\Omega$ 则 $R_i=8.452\text{k}\Omega$

3. 实验三：反馈放大器动态指标的测量

测试条件： $f=1\text{kHz}$, $U_i=20\text{mV}$, $R_L=10\text{k}\Omega$ 。

实验数据如表所示：

1) 反馈放大系数

$U_O=832\text{mV}$, $U_i=20.24\text{mV}$, 则 $A_{uf}=-41.107$

$U_L=700\text{mV}$, $U_i=20.24\text{mV}$, 则 $A_{uLf}=-34.585$

2) 输入电阻

$U_S=20.31\text{mV}$, $U_i=16.80\text{mV}$, 则 $R_{if}=9.572\text{k}\Omega$

3) 输出电阻

$R_{of}=1.885\text{k}\Omega$

4) 频率特性

$f_{Hf}=650\text{kHz}$, $f_{Lf}=18\text{Hz}$

六、数据处理与分析

1. 实验一：测量静态工作点

理论计算：

$$\frac{V_{CC} - U_{B1}}{47\text{k}\Omega} = I_{B1} + \frac{U_{B1}}{15\text{k}\Omega}, U_{B1} - U_{E1} = 0.7V$$

$$I_{E1} = \frac{U_{E1}}{1.1\text{k}\Omega} = (\beta + 1)I_{B1}$$

$$I_{C1} = \frac{V_{CC} - U_{C1}}{2.4\text{k}\Omega} = \beta I_{B1}$$

$$\beta = 160$$

由以上各式解得：

$$U_{B1\text{理论}} = 2.7703V$$

$$U_{E1\text{理论}} = 2.0703V$$

$$U_{C1\text{理论}} = 7.5110V$$

$$U_{E2\text{理论}} = 0.43V$$

$$I_{C2} = 1\text{mA}$$

又有：

$$\frac{V_{CC} - U_{B2}}{10\text{k}\Omega + 20.735\text{k}\Omega} = I_{B2} + \frac{U_{B2}}{3\text{k}\Omega}$$

$$I_{C2} = \frac{V_{CC} - U_{C2}}{5.1\text{k}\Omega} = \beta I_{B2}$$

$$\beta = 160$$

由以上各式解得：

$$U_{B2\text{理论}} = 1.0501V$$

负反馈放大器

微电子学院

2023.3.6

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

$$U_{E2理论} = 0.43V$$

$$U_{C2理论} = 6.9V$$

误差计算：

$$\left| \frac{U_{B1理论} - U_{B1}}{U_{B1理论}} \right| \times 100\% = \left| \frac{2.7703 - 2.7932}{2.7703} \right| \times 100\% = 0.8\%$$

$$\left| \frac{U_{E1理论} - U_{E1}}{U_{E1理论}} \right| \times 100\% = \left| \frac{2.0703 - 2.1592}{2.0703} \right| \times 100\% = 4.2\%$$

$$\left| \frac{U_{C1理论} - U_{C1}}{U_{C1理论}} \right| \times 100\% = \left| \frac{7.5110 - 7.1689}{7.5110} \right| \times 100\% = 4.5\%$$

$$\left| \frac{U_{B2理论} - U_{B2}}{U_{B2理论}} \right| \times 100\% = \left| \frac{1.0501 - 1.0535}{1.0501} \right| \times 100\% = 0.3\%$$

$$\left| \frac{U_{E2理论} - U_{E2}}{U_{E2理论}} \right| \times 100\% = \left| \frac{0.43 - 0.4307}{0.43} \right| \times 100\% = 0.016\%$$

$$\left| \frac{U_{C2理论} - U_{C2}}{U_{C2理论}} \right| \times 100\% = \left| \frac{6.9 - 6.7400}{6.9} \right| \times 100\% = 2.3\%$$

误差分析：

- 1) 电阻实际阻值与标称值有误差。
- 2) 三极管 β 与经验值160之间有误差。
- 3) 电源电压与标称值12V之间有误差。
- 4) 万用表测量误差。

2. 实验二：基本放大器动态指标的测量

理论计算：

该放大器的交流信号模型如图1所示：

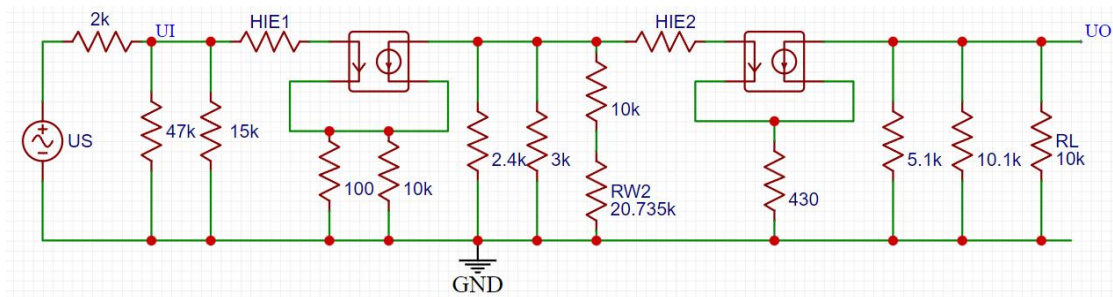


图1 交流信号模型

对图1的电路图进行化简，得到图2所示电路：

负反馈放大器

微电子学院

2023.3.6

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

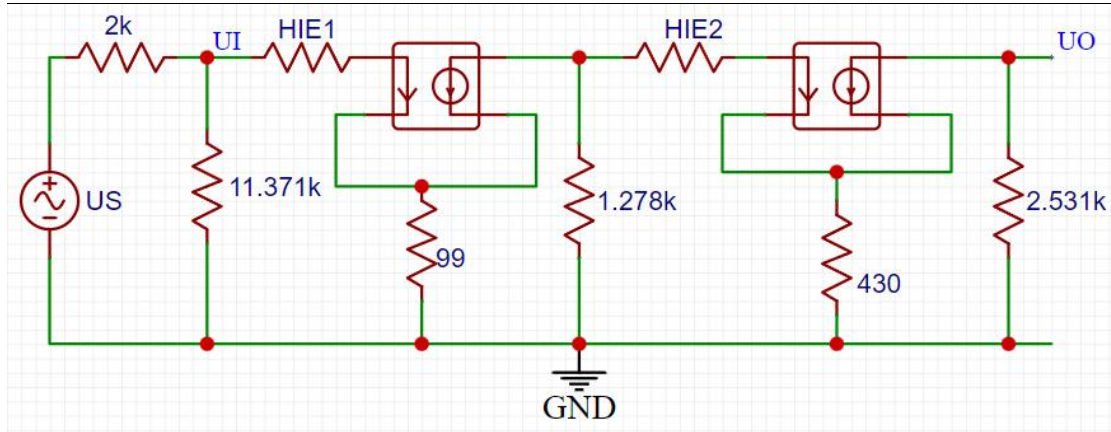


图2 化简后的电路

$$I_{EQ1} = \frac{U_{E1}}{1.1k\Omega} = 1.974mA$$

$$I_{EQ2} = \frac{U_{E2}}{430\Omega} = 1mA$$

$$h_{ie1} = 200\Omega + (\beta + 1) \frac{26mV}{I_{EQ1}} = 2.32k\Omega$$

$$h_{ie2} = 200\Omega + (\beta + 1) \frac{26mV}{I_{EQ2}} = 4.386k\Omega$$

$$A_{UL} = \frac{U_O}{U_I} = \frac{-\beta i_{b2} \times 2.531k\Omega}{i_{b1} [h_{ie1} + (1 + \beta) \times 99\Omega]} = -22.179 \frac{i_{b2}}{i_{b1}}$$

$$\frac{i_{b2}}{i_{b1}} = \frac{-\beta \times 1.278k\Omega}{1.278k\Omega + (1 + \beta) \times 430\Omega + h_{ie2}} = -2.730$$

$$A_{UL理论} = -60.55$$

$$R'_i = h_{ie1} + (1 + \beta) \times 99\Omega = 18.259k\Omega$$

$$R_i = R'_i // 13k\Omega = 7.594k\Omega$$

令 $U_s = 0$, 可得 $i_{b1} = i_{b2} = 0$, 可得 $R'_o = \infty$

所以有 $R_o = R'_o // 5.1k\Omega // 10.1k\Omega = 3.389k\Omega$

误差计算:

由测量数据可得:

$$R_i = \frac{U_i}{\frac{U_s - U_i}{2k\Omega}} = 8.452k\Omega$$

$$A_{UL} = \frac{U_L}{20mV} = -61.35$$

负反馈放大器

微电子学院

2023.3.6

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

$$R_o = \left(\frac{U_o}{U_L} - 1 \right) R_L = 3.382k\Omega$$

$$\left| \frac{R_{i理论} - R_i}{R_{i理论}} \right| \times 100\% = \left| \frac{7.594k - 8.452k}{7.594k} \right| \times 100\% = 8.2\%$$

$$\left| \frac{R_{o理论} - R_o}{R_{o理论}} \right| \times 100\% = \left| \frac{3.389k\Omega - 3.382k\Omega}{3.389k\Omega} \right| \times 100\% = 0.2\%$$

$$\left| \frac{A_{UL理论} - A_{UL}}{A_{UL理论}} \right| \times 100\% = \left| \frac{60.55 - 61.35}{60.55} \right| \times 100\% = 1.3\%$$

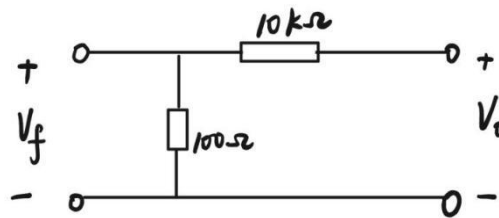
误差分析：

- 1) 电阻实际阻值与标称值有误差。
- 2) 三极管 β 与经验值160之间有误差。
- 3) 电源电压与标称值12V之间有误差。
- 4) 万用表测量误差。
- 5) 理论计算时有近似的成分，如忽略 r_{ce} ，近似计算 h_{ie} 等。

3. 实验三：反馈放大器动态指标的测量

理论计算：

下图为反馈网络电路：



$$F = \frac{100\Omega}{100\Omega + 10k\Omega} \approx 0.0099$$

$$A_{uf} = \frac{A_{UL理论}}{1 + A_{UL理论} F} = \frac{60.55}{1 + 60.55 \times 0.0099} = 37.86$$

$$R_{if} = (1 + A_{UL理论} F) R_{i理论} = (1 + 60.55 \times 0.0099) \times 7.007k\Omega = 11.21k\Omega$$

$$R_{of} = \frac{R_{o理论}}{1 + A_{UL理论} F} = \frac{3.389k\Omega}{1 + 60.55 \times 0.0099} = 2.12k\Omega$$

误差计算：

由测量数据可得：

$$R_{if} = \frac{U_i}{\frac{U_s - U_i}{2k\Omega}} = 9.572k\Omega$$

$$A_{UFL} = \frac{U_L}{20mV} = -34.585$$

负反馈放大器

微电子学院

2023.3.6

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

$$R_{of} = \left(\frac{U_o}{U_L} - 1 \right) R_L = 1.885k\Omega$$

$$\left| \frac{R_{if理论} - R_{if}}{R_{if理论}} \right| \times 100\% = \left| \frac{11.21k\Omega - 9.572k\Omega}{11.21k\Omega} \right| \times 100\% = 14.6\%$$

$$\left| \frac{R_{of理论} - R_{of}}{R_{of理论}} \right| \times 100\% = \left| \frac{2.12k\Omega - 1.885k\Omega}{2.12k\Omega} \right| \times 100\% = 11.1\%$$

$$\left| \frac{A_{UfL理论} - A_{UfL}}{A_{UfL理论}} \right| \times 100\% = \left| \frac{37.86 - 34.585}{37.86} \right| \times 100\% = 8.7\%$$

$$\frac{f_{Hf}}{f_H} = 1.75, \frac{f_L}{f_{Lf}} = 1, 1 + A_{UL理论} F = 1.6$$

对于高频截止频率，测量值与理论值较为相符，低频截止频率误差相对较大。

误差分析：

- 1) 电阻实际阻值与标称值有误差；
- 2) 三极管 β 与经验值160之间有误差；
- 3) 电源电压与标称值12V之间有误差；
- 4) 万用表测量误差。

七、思考题

1. 总结负反馈对放大器放大性能的影响？

答：以我们做的电压串联负反馈实验为例，能够减小放大器产生的非线性失真；能够减小电压放大倍数；提高电路的稳定性；拓宽电路的通频带；抑制电路内部产生的干扰和噪声；影响电路输入和输出电阻。

2. 测量通频带时，影响 f_L 和 f_H 的因数有哪些？

答：由 f_L 和 f_H 的计算公式， $f = \frac{1}{2\pi RC}$ ，其中 R 为耦合电容 C 所在回路的等效电阻，因此对 R 和 C 有影响的量均会影响 f_L 和 f_H 。

八、实验总结

1. 本次实验结果直观的显示了负反馈回路对电路性能例如输入输出电阻、稳定性的影响，实验结果与理论较为符合，完成了实验目的，达到了实验要求。

2. 在本次实验完成了基本放大电路静态工作点的测量、动态参数的测量以及非深度负反馈条件下动态参数的测量，并进行了误差分析，加深了对理论知识的理解。