**   **

计算机与大数据学院《电子线路综合实验》实验报告

实验时间：2025年6月8日

实验六 负反馈两级放大电路

实验目的：

1. 了解两级放大电路的工作原理和理论分析方法。
2. 进一步熟练放大电路静态工作点的调试方法和各项性能指标的测量方法。
3. 了解引入负反馈后，放大电路动态性能指标的各项变化。
4. 了解反馈深度的概念，以及深度负反馈下电压放大倍数的近似计算。

实验原理：

|  |  |
| --- | --- |
| 第1题：两级共射放大电路分析题  请对右图电路进行理论分析：已知*U*BE1= *U*BE2= 0.8V，*β*1=*β*2=100，  以下计算请保留到小数点后2位。  1）求解两级的静态工作点Q1和Q2。（Q2请采用估算法求解）  2）画出微变等效电路，求、、（已知40Ω） | 图示, 示意图  AI 生成的内容可能不正确。 |

求解过程请手写在作业纸上，先写公式后带入数据计算。请拍照截图放在下方：

**白板上写着字

AI 生成的内容可能不正确。**

|  |  |
| --- | --- |
| 第2题：负反馈理论问答题  1）图中全局反馈的电阻有哪些？  2）图中全局反馈的类型是什么？请说明判断依据。  3）该反馈对各项动态性能指标（包括、、和）的影响是什么？  4）若*Rf*=2kΩ时，达到深度负反馈，请估算此时的电压放大倍数*Auf*=？ | 图示, 示意图  AI 生成的内容可能不正确。 |

上述解答请手写在作业纸上，需写清瞬时极性法的判断过程。请拍照截图放在下方：

文本, 信件

AI 生成的内容可能不正确。

实验内容

重要说明：本次实验为了保证实验效果，仍然采用虚拟三极管。但是由于仿真软件中的虚拟三极管过于理想（不存在极间电容，无法观测通频带的高频区），需要对其参数做出一些调整。

调整方法：

1、在“Transistors”组的“TRANSISTORS\_VIRTUAL”中选择“BJT\_NPN”放置在设计窗口。

2、双击该器件→值→编辑模型→双击“CJE(B-E零偏压耗尽层电容)”和“CJC(B-C零偏压耗尽层电容)”的值，将其设置为10pF→更改元器件→确认。（建议检查是否修改成功，若成功，值会变为“1e-011”；建议修改一个三极管，然后复制黏贴得到第二个三极管）

1. 测量静态参数

步骤1：用Multisim仿真软件画出图1的仿真电路，仔细检查无误后，截图放入图2的位置。

黑色的钟表

AI 生成的内容可能不正确。

图1 负反馈两级放大电路的理论图

说明1：所有元件的符号标准为DIN标准；（点击“选项”-“全局偏好”-“元器件”更改）。

说明2：直流电源在“Sources”组的“POWER\_SOURCES”中选择“VCC”，将其放置在设计窗口，双击该仪器，将电压值设置为12V。

说明3：三极管在“Transistors”组的“TRANSISTORS\_VIRTUAL”中选择“BJT\_NPN”。（注意一定要按实验操作说明文档第一页的说明，编辑模型参数并确定更改）。

说明4：交流电源在“Sources”组的“POWER\_SOURCES”中选择“AC\_POWER”，将其放置在设计窗口，双击该仪器，将电压有效值（RMS）设置为0.006V，频率设置为10kHz。

说明5：电解电容可在“Basic”组中的“CAP\_ELECTROLIT”中任选一个将其放置在设计窗口，双击该电容，将值设置为100μF。注意电容的极性不要接反。

说明6：开关请选用元器件库Basic组中的SWITCH中的DIPSW1，不用SPST。

图示, 示意图

AI 生成的内容可能不正确。

图2 负反馈两级放大电路的仿真图

步骤2：在每个三极管的基极B，发射极E和集电极C上放置测量探针。双击探针，选择只显示“参数”中“V(直流)”和“I(直流)”。闭合S1(有载)，打开S2，点击仿真运行，分别调整*R*B1和*R*B3，使得*I*B1=20μA和*I*B2=20μA（须等待几秒让数值稳定，并重复开启仿真验证）。将所有测量值填入表1，将带探针结果的电路图截图放入图3的位置。（为了精确调节，可双击可变电阻，将*R*B1和*R*B3增量设置为1%）

图示, 示意图

AI 生成的内容可能不正确。

图3 有载时两级放大电路的静态参数测量图（要求含有探针的测量结果）

步骤3：将表1的结果与理论分析结果进行验证，并验证三极管的工作状态。

表1 两级共射放大电路的静态参数

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *I*B1 | *I*C1 | *I*E1 | *V*E1 | *V*B1 | *V*C1 |
| 20.0μA | 2.00mA | 2.02mA | 0.404V | 1.20V | 6.00V |
| *I*B2 | *I*C2 | *I*E2 | *V*E2 | *V*B2 | *V*C2 |
| 20.0μA | 2.00mA | 2.02mA | 2.02V | 2.81V | 5.99V |

二、测量无负反馈作用时电路的动态参数（开关S2打开）

步骤1：将开关S2打开（断开反馈），S1闭合（有载）。在放大电路的净输入端（C1的前面）放置万用表（设置为交流电压档），调整*RS*使得万用表的读数为3mV（由于两级放大电路的Au非常大，为了精确调节，可双击*RS*，将增量设置为0.1%）。请将电源内阻*RS*的阻值和输入电压有效值填入表2，并计算输入电阻*ri*的大小。

步骤2：用示波器分别测量*ui*（C1的前面）和*uoL*（C3的后面）的波形。观察放大电路对*ui*的同相放大。将同时显示*ui*和*uoL*波形的示波器显示窗口截图（含示波器的设置区）放入图4的位置。

说明1：先将示波器触发方式设置为“正常”观测波形动态变化，截图时才改为“单次”。

说明2：观测波形时，要注意设置合适的时基标度(50μs/Div)和通道刻度(V/Div)。注意：通道A和通道B的刻度值差别很大，说明此时的电压放大倍数Au非常大。

图表, 折线图

AI 生成的内容可能不正确。

图4 有载且无负反馈时电路的输入输出波形图（通道A设为5mV/Div；B设为1V/Div）

步骤3：在放大电路的输出端（C3的后面）放置万用表（设置为交流电压档），读出有载时的输出电压有效值*U*oL，并计算出电压放大倍数Au，将上述值填入表2。

步骤4：将开关S1打开，用万用表读出空载时的输出电压有效值*U*oo，并计算出输出电阻*ro*，将上述值填入表2。

表2 无负反馈时电路的动态参数（S2打开，*Us*=6mV，*RL*=3kΩ）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 电源内阻  *RS* | 输入电压  *Ui* |  | 输出电压（有载）*U*oL |  | 输出电压（空载）*U*oo |  |
| 20.67kΩ | 3mV | 20.67kΩ | 1.269V | 423 | 2.529V | 2.9787kΩ |

步骤5：将表2的结果与理论分析结果进行验证，会存在小误差（Au大但不稳定）。

步骤6：将开关S1闭合（有载），在右侧仪器栏中选择第6个仪器“波特测试仪”，并将其IN通道正端放在输入（C1的前面），OUT通道正端放在输出（C3的后面），两个通道的负端均接地。点击仿真运行，双击该仪器可观测无反馈时电路的幅频特性曲线。

说明：波特仪相关设置如下：模式选幅值；水平和垂直均选对数；I 表示对应参数的起始值，F表示对应参数的终止值，请按图5下方的要求设置，使曲线显示恰当。

步骤7：在波特仪曲线上验证*f*=10kHz时的分贝值为（52.755）dB，请将此时的显示界面（含波特仪的设置区）截图放入图5的位置。计算表2第5列转换的分贝值*Au* (dB)= 20lg≈（52.527）dB。两者存在一定误差，说明无负反馈的两级放大电路会因电路不稳定产生一定的误差。

说明：波特仪设好参数后需要重新仿真。右击光迹线，可设置“设定X轴值”、“set Y value→”和“set Y value←”的具体值。光迹线会自动移动到所设值的位置，从曲线的下方即可读出对应的频率值或分贝值。

步骤8：移动光迹线，测量曲线的上/下限截止频率（将y轴值设置为*f*=10kHz时的dB值-3dB），将上述值记录在表3中，并计算出通频带*f*BW=*f*H-*f*L=（278.823）kHz。（不能约等于*f*H）

表3 无负反馈时电路的通频带（S2打开，S1闭合）

|  |  |
| --- | --- |
| 图表  AI 生成的内容可能不正确。  图5 有载且无负反馈时电路的幅频特性曲线（*f*=10kHz）（水平：20mHz~1GHz；垂直：0~80dB） | |
| 下限截止频率*f*L=（48.367）Hz | 上限截止频率*f*H=（278.871）kHz |
| 光迹线测量结果截图如下  图表, 折线图  AI 生成的内容可能不正确。 | 光迹线测量结果截图如下  图表, 折线图  AI 生成的内容可能不正确。 |

说明：图5要求把波特仪界面完整截图，而上/下限截止频率的截图只需要截曲线及其下面的读数，不需要截波特仪的设置区。

结论：无负反馈时的两级放大电路的通频带比较窄，说明其对不同频率信号的适应能力较弱。

三、测量有负反馈作用时电路的动态参数（开关S2闭合）

步骤1：将开关S2闭合（引入反馈），S1闭合（有载）。仿真运行发现静态参数没有任何变化。

步骤2：保持*us*和*Rs*与反馈前完全相同，在仿真运行状态下，仅滑动反馈电阻*Rf*的阻值，观测在不同反馈深度下，采集到的输入电压*Uif*，并计算输入电阻*rif*的大小，将上述值填入表4。

步骤3：在仿真运行状态下，仅滑动反馈电阻*Rf*的阻值，观测在不同反馈深度下，有载时的输出电压*UoLf*和空载时的输出电压*Uoof*，计算出电压放大倍数*Auf*和输出电阻*rof*，将上述值填入表4。

表4 有负反馈时电路的动态参数（S2闭合，*Us*=6mV，*RL*=3kΩ，*Rs*见表2第一列）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *Rf*的阻值 | 有载时的输入电压*Uif*  （mV） | （kΩ） | 有载时的输出电压*UoLf*  （mV） |  | 空载时的输出电压*Uoof*  （mV） | （kΩ） |
| 100% | 5.206 | 135.330 | 234.544 | 45.053 | 257.472 | 0.293 |
| 80% | 5.287 | 153.049 | 195.465 | 36.971 | 211.082 | 0.240 |
| 60% | 5.373 | 176.872 | 153.420 | 28.554 | 162.837 | 0.184 |
| 40% | 5.467 | 211.705 | 108.053 | 19.765 | 112.600 | 0.126 |
| 20% | 5.568 | 266.027 | 58.961 | 10.589 | 60.259 | 0.066 |
| 0% | 5.678 | 363.956 | 5.674 | 0.999 | 5.680 | 0.003 |

说明1：建议按列测量，表4中所有数据请保留到小数点后三位。

说明2：将测量数据（不要加单位）填入EXCEL文件，可进行快速计算。

说明3：输出端电压会有所波动，读数时可取某个中间值进行记录。

说明4：虽然有误差，但是随着*Rf*阻值的下降，*Uif*和*rif*是递增的；*UoLf*、*Auf*、*Uoof*和*rof*是递减的。

步骤4：将开关S1闭合（有载），将反馈电阻*Rf*的滑动条置于20%，连接好波特测试仪后，点击仿真运行，双击该仪器可观测有负反馈时电路的幅频特性曲线。

步骤5：在波特仪曲线上验证*f*=10kHz时的分贝值为（20.497）dB，请将此时的显示界面（含波特仪的设置区）截图放入图6的位置。计算表4中（*Rf*的阻值为20%）的*Auf*转换的分贝值*Au* (dB)= 20lg≈（20.497）dB。两者非常吻合，说明有负反馈的两级放大电路可以使电路趋于稳定，减小测量误差。

步骤6：移动光迹线，测量曲线的上/下限截止频率（将y轴值设置为*f*=10kHz时的dB值-3dB），将上述值记录在表5中，并计算出通频带*f*BW=*f*H-*f*L≈*f*H=（12.756）MHz。

表5 有负反馈时电路的通频带（*Rf*的滑动条置于20%）

|  |  |
| --- | --- |
| 图形用户界面, 图表  AI 生成的内容可能不正确。  图6 有载且有负反馈时电路的幅频特性曲线（*f*=10kHz）（水平：20mHz~1GHz；垂直：0~50dB） | |
| 下限截止频率*f*L=（231.238）mHz | 上限截止频率*f*H=（12.756）MHz |
| 光迹线测量结果截图如下  图表, 折线图  AI 生成的内容可能不正确。 | 光迹线测量结果截图如下  图形用户界面, 图表, 折线图  AI 生成的内容可能不正确。 |

说明：图6要求把波特仪界面完整截图，而最后一行截图只需要截曲线及其下面的读数，不需要截波特仪的设置区。

注意：测量低频截止频率时，光迹线若无法到达设置的dB值，可以点击波特仪的“设置”按钮，将分解点个数设置为200个，然后重新仿真，刷新幅频特性曲线后再进行测量。

实验讨论：

请将有/无负反馈作用的动态参数实验结果汇总填写到表6中，并回答以下问题：

表6 有/无负反馈作用的动态参数比较

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 电压放大倍数*Au* | 输入电阻 | 输出电阻 | 通频带 |
| 无负反馈时（断开*Rf*） | 423 | 20.67kΩ | 2.9787kΩ | ≈278.823kHz |
| 有负反馈时（*Rf*处于20%） | 10.589 | 266.027kΩ | 0.066kΩ | ≈ 12.756 MHz |

问题1：该电路为什么可以实现对输入电压的同相放大？

该电路为两级共射放大结构，每一级会对信号进行反相，经过两级后输出信号与输入信号同相，因此实现了对输入电压的同相放大

问题2：在相同*Us*和*RS*的情况下，随着*Rf*阻值的减小，逐渐增大，该现象说明了什么？造成该现象的原因是什么？

该现象说明输入电阻随着负反馈增强而增大。因为深度负反馈能提高电路的输入电阻，所以Rf减小时反馈增强，导致U\_if增大

问题3：随着*Rf*阻值的减小，输出端电压和均逐渐减小，但两者的差距也越来越小。该现象说明了什么？造成该现象的原因是什么？

这说明输出电阻随着负反馈增强而减小。Rf减小时，负反馈加深，能有效降低输出电阻，因此负载变化对输出电压的影响减小，U\_oLf和U\_oof差距缩小。

实验小结：（可总结收获、所犯错误，解决方案、心得体会等）

通过本次负反馈两级放大电路实验，我对放大电路的基本原理、负反馈的作用及其对性能指标的影响有了更加直观的理解。实验中观察到，引入负反馈后，电路的电压放大倍数虽然下降了，但输入电阻增大、输出电阻减小、通频带明显拓宽，验证了理论所说的“负反馈提升电路稳定性和频率响应能力”。

在操作过程中，我一开始忘记调整三极管的结电容参数，导致幅频响应异常偏高。后来通过检查实验指导书并重新设定CJE和CJC参数为10pF，问题得以解决。这让我意识到实验细节的重要性。整体来说，这次实验让我理论和实践更加结合，对模拟电路的设计和调试能力也有了进一步提升。