

预习报告		实验记录		分析讨论		总成绩	
25		25		30		80	

年级、专业:	2022 级物理学	组号:	E2
姓名:	戴鹏辉、杨舒云	学号:	22344016、22344020
实验时间:	2024/4/24	教师签名:	

ET1-8 单级交流放大器

【实验报告注意事项】

1. 实验报告由三部分组成:

- (a) 预习报告: 课前认真研读实验讲义, 弄清实验原理; 实验所需的仪器设备、用具及其使用、完成课前预习思考题; 了解实验需要测量的物理量, 并根据要求提前准备实验记录表格 (可以参考实验报告模板, 可以打印)。 **(20 分)**
- (b) 实验记录: 认真、客观记录实验条件、实验过程中的现象以及数据。实验记录请用珠笔或者钢笔书写并签名 (**用铅笔记录的被认为无效**)。保持原始记录, 包括写错删除部分, 如因误记需要修改记录, 必须按规范修改。(不得输入电脑打印, 但可扫描手记后打印扫描件); 离开前请实验教师检查记录并签名。 **(30 分)**
- (c) 数据处理及分析讨论: 处理实验原始数据 (学习仪器使用类型的实验除外), 对数据的可靠性和合理性进行分析; 按规范呈现数据和结果 (图、表), 包括数据、图表按顺序编号及其引用; 分析物理现象 (含回答实验思考题, 写出问题思考过程, 必要时按规范引用数据); 最后得出结论。 **(30 分)**

实验报告就是将预习报告、实验记录、和数据处理与分析合起来, 加上本页封面。 **(80 分)**

2. 每次完成实验后的一周内交实验报告 (特殊情况不能超过两周)。

3. 其它注意事项:

- (a) 请认真查看并理解实验讲义第一章内容;
- (b) 注意实验器材的合理使用;
- (c) 使用结束使用各种仪器之后需要将其放回原位。

【特别鸣谢及模板说明】

感谢 2019 级学长石寰宇为本实验报告提供 LATEX 模板。由于原实验报告模板缺少实验编号, 为方便在电脑上整理, 故添加自命名编号 ET1-8

目录

1 ET1-8 单级交流放大器 预习报告	3
1.1 实验目的	3
1.2 仪器用具	3
1.3 原理概述	3
2 ET1-8 单级交流放大器 实验记录	5
2.1 实验内容、步骤与结果	5
2.1.1 操作步骤记录	5
2.1.2 实验结果展示	6
2.2 原始数据记录	8
3 ET1-8 单级交流放大器 分析与讨论	9
3.1 实验数据分析	9
3.1.1 静态工作点及计算分析相关量	9
3.1.2 计算分析小信号模型的电压增益与负载电阻对增益的影响	10
3.1.3 计算分析输入电阻和输出电阻	12
3.2 实验思考题	12
4 ET1-8 单级交流放大器 结语	14
4.1 参考文献	14
4.2 附件及实验相关的软硬件资料等	14

ET1-8 单级交流放大器 预习报告

1.1 实验目的

- 1、掌握放大电路静态工作点的测试方法，进一步理解电路元件参数对静态工作点的影响，以及调整静态工作点的方法。
- 2、掌握测量电压放大倍数、输入电阻、输出电阻及最大不失真输出电压幅值的方法。
- 3、观察电路参数对失真的影响。

1.2 仪器用具

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，测量范围，测量精度等）
1	电路原理箱或板	1	
2	函数信号发生器	1	
3	交流毫伏表	1	
4	数字万用表	1	
5	双踪示波器	1	

1.3 原理概述

放大电路用于放大信号，使其具有更大的幅度，但不失真。静态工作情况下，不同的直流工作点会影响影响放大倍数、波形失真和工作稳定性。

1. 放大电路静态工作点的选择

当放大电路只提供直流电源而没有输入信号时，称为静态工作情况。三极管的各电极的直流电压和电流的数值将和三极管特性曲线上的一点对应，这点常称为 Q 点。

静态工作点的选取影响放大器的放大倍数、波形失真及工作稳定性等。不当选择静态工作点会导致饱和失真或截止失真。

调整静态工作点通常涉及调整电路中相关电阻，使得晶体管的集电极电流 I_{CQ} 和集电极-发射极电压 U_{CEQ} 达到合适的值。

2. 放大电路的基本性能

当放大电路静态工作点调好后，输入交流小信号 u_i ，这时电路处于动态工作情况。基本性能测量的原理电路为Figure 1。

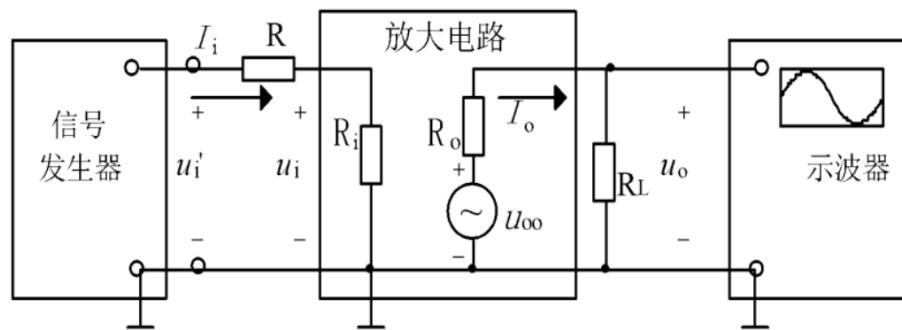


Figure 1: 交流放大电路实验原理图

(a) 电压放大倍数 A_u 的测量

$$A_u = U_o / U_i$$

(b) 输入电阻 R_i 的测量

放大器的输入电阻 R_i 就是从放大器输入端看进去的等效电阻，即 $R_i = U_i / I_i$ 。

通常测量 R_i 的方法是：在放大器的输入回路串一个已知电阻 R ，在放大器输入端加正弦信号电压，用示波器观察放大器输出电压 u_o ，在 u_o 不失真的情况下，测量电阻 R 两端对地的电压 U'_i 和 U_i ，则有： $R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{U'_i - U_i} R$

(c) 输出电阻 R_o 的测量

放大电路的输出电阻是从输出端向放大电路方向看进去的等效电阻，用 R_o 表示。测量 R_o 的方法是在放大器的输入端加信号电压，在输出电压 u_o 不失真的情况下，测量空载时放大器的输出电压 U_∞ 和带负载时放大器的输出电压 U_{OL} 值，则输出电阻有： $R_o = \frac{U_\infty - U_{OL}}{I_o} = \frac{U_\infty - U_{OL}}{U_{OL}} R_L$

专业:	物理学	年级:	2022 级
姓名:	戴鹏辉、杨舒云	学号:	22344016、22344020
室温:	26°	实验地点:	A522
学生签名:	见附件部分	评分:	
实验时间:	2024/4/24	教师签名:	

ET1-8 单级交流放大器 实验记录

2.1 实验内容、步骤与结果

2.1.1 操作步骤记录

1. 调节静态工作点

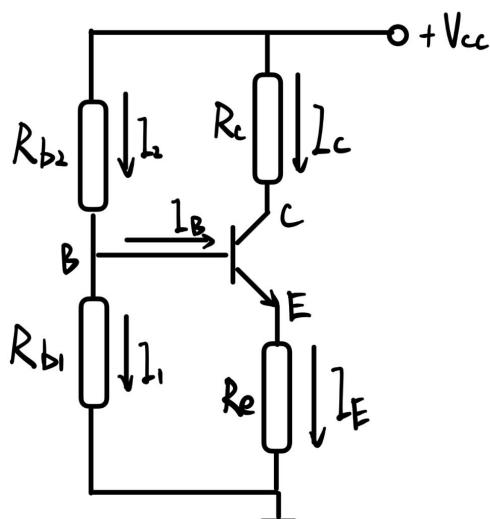


Figure 2: 放大电路直流通路

如图Figure 2所示连好电路，将输入端 (U_{i+}) 对地短路，调节电位器 W_1 ，使大致上 $U_C = V_{CC}/2$ ，测量并记录静态工作点 U_C 、 U_E 、 U_B 的数值，由此计算 I_E 、 I_C 与 I_B ，再计算 α 与 β 。

2. 测量小信号模型的电压增益与负载电阻对增益的影响

在实验步骤 1 的基础上，把输入对地断开，接入 $f=1K\Omega$ 、 $U_i=5mV$ 的正弦波信号，负载电阻分别为 $RL=1K\Omega$ 、 $RL=2K\Omega$ 、 $RL=5K\Omega$ 和 $RL=\infty$ ，用毫伏表测量输出电压的值，用示波器观察输入电压和输出电压波形，记录并计算放大倍数。

3. 测量输入电阻和输出电阻

按图连好电路，输入端接入 $f=1\text{KHz}$ 、 $U_i=20\text{mV}$ 的正弦信号，分别测出 R_1 两端对地信号电压 U_i 及 U'_i ；测出负载电阻 R_L 开路时的输出电压 U_∞ ，和接入 R_L 时的输出电压 U_o ，计算放大电路的输入输出电阻。

4. 观察静态工作点对放大器输出波形的影响

观察记录 R_B 不同阻值下的波形情况，判断是何种失真。

2.1.2 实验结果展示

1. 调节静态工作点及测量相关量

测量得到 $U_C = 5.985V$, $U_E = 2.772V$, $RC = 2.4k\Omega$ 以及 $RE = 1.1k\Omega$ ；接下来进一步分析电路计算得到其它量，详见数据分析部分。

2. 测量小信号模型的电压增益与负载电阻对增益的影响

不同负载电阻下测量得到的输入输出电压数据如Table 1所示。

Table 1: 实验数据：不同电阻 R_L 对电压增益的影响

$R_L/k\Omega$	U_{in}/mV	U_{out}/mV
1	0.406	3.211
2	0.400	3.215
5	0.405	4.660
∞	0.390	6.660

进一步的计算与分析见数据分析部分。

3. 测量输入电阻和输出电阻

接入不同的外接电阻，测得的关于输入输出电阻的数据如Table 2和Table 3所示。

Table 2: 实验数据：测量输入电阻

$r_s/k\Omega$	u_{i1}/mV	$u_{i1'}/\text{mV}$	u_{i2}/mV	$u_{i2'}/\text{mV}$
10	0.401	1.762	1.29	7.04

Table 3: 实验数据：测量输出电阻

U_{out}/mV	R_L/Ω
25.9	∞
18.19	5.1
13.67	2.4
8.285	1

进一步的计算与分析见数据分析部分。

4. 观察静态工作点对放大器输出波形的影响

当信号不失真时，波形如Figure 3:



Figure 3: 放大电路输入信号与输出信号对比（不失真）

当发生截止失真时，波形如Figure 4:

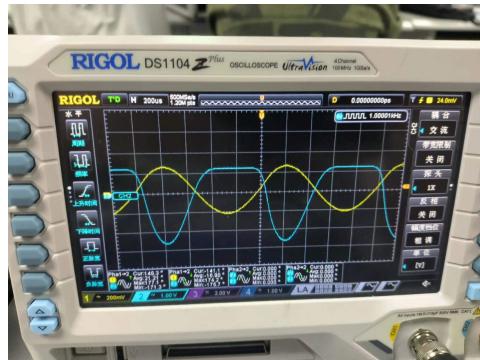


Figure 4: 放大电路输入信号与输出信号对比（截止失真）

当发生饱和失真时，波形如Figure 5:

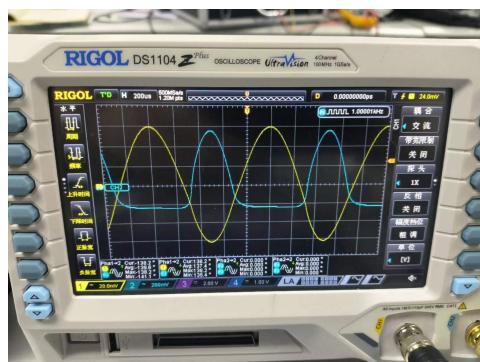
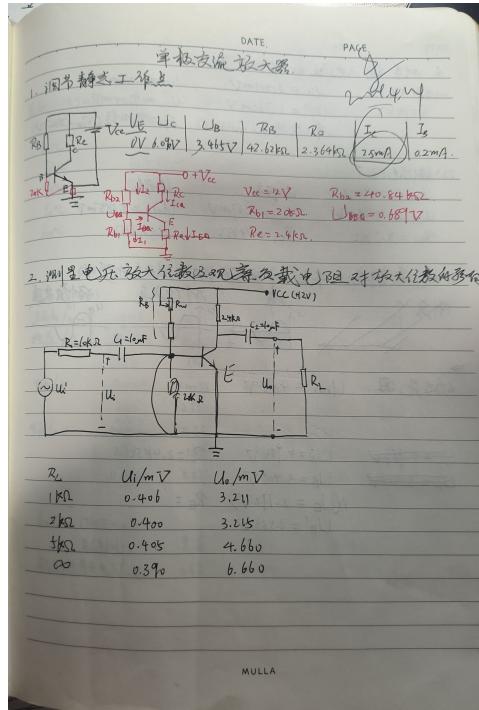


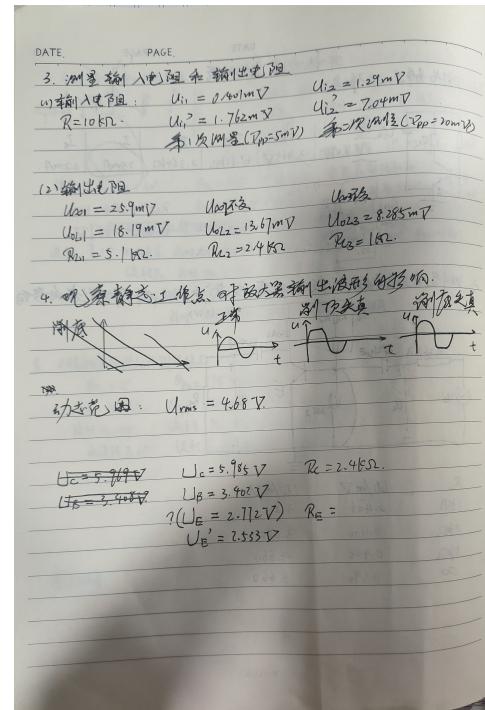
Figure 5: 放大电路输入信号与输出信号对比（饱和失真）

2.2 原始数据记录

实验记录本上的原始数据见Figure 6a (签字) Figure 6b。



(a) 原始数据 1



(b) 原始数据 2

Figure 6: 原始数据

专业:	物理学	年级:	2022 级
姓名:	戴鹏辉、杨舒云	学号:	22344016、22344020
日期:	2023/4/26	评分:	

ET1-8 单级交流放大器 分析与讨论

3.1 实验数据分析

3.1.1 静态工作点及计算分析相关量

- 测量得到 $U_C = 5.985V$, $U_E = 2.772V$, $R_C = 2.4k\Omega$ 以及 $R_E = 1.1k\Omega$; 又知道 $V_{CC} = 12V$;
- 进一步计算得到 $I_C = \frac{V_{CC} - U_C}{R_C} = 2.505mA$ 和 $I_E = \frac{U_E}{R_E} = 2.520mA$;
- 接下来计算得到 $\alpha = \frac{I_C}{I_E} = 0.994$, 则 $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = 165.7$;
- 利用上述结果, 可计算要求的其它量 $I_B = \frac{I_C}{\beta} = 0.015mA$ (可以发现的确有 $I_B + I_C = I_E$)。
- 讨论静态工作点对放大器输出波形的影响

静态工作点对输出回路的影响主要体现在放大倍数、波形失真、直流偏置和功耗几个方面。合适的静态工作点选择可以确保放大器在稳定的放大倍数下工作, 避免波形失真; 同时, 能够控制输出信号的直流偏置, 减少功耗。因此, 在放大器设计中, 需要仔细选择静态工作点, 以保证输出回路的正常工作。使用图解法可以帮助我们更好的分析其影响, 如Figure 7、Figure 8

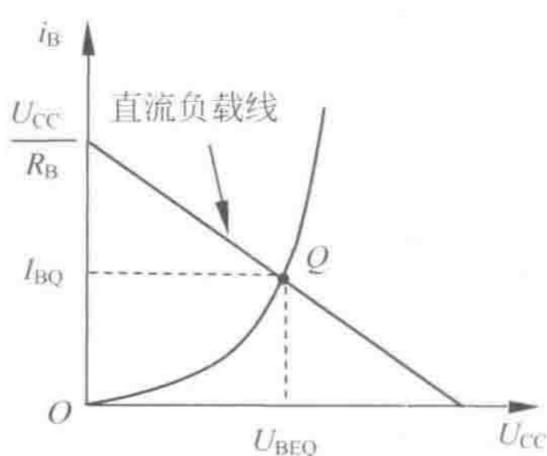


Figure 7: 输入回路图解分析

当我的静态工作点设置的太高, 即过大的集电极电流 I_{CQ} 或过小的集电极-发射极电压 U_{CEQ} 时 (具体在实验中, 是减小了 R_B 电阻值, 使得 I_{BQ} 增大, 进一步使得 I_{CQ} 增大), 会发生饱和失真。饱和

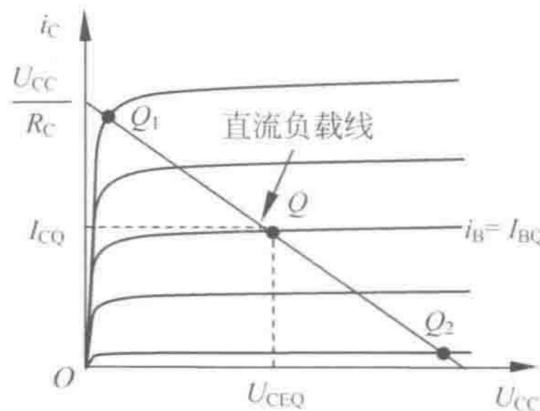


Figure 8: 输出回路图解分析

失真是指输出信号无法再进一步增大，因为放大器无法提供更高的输出电压或电流，导致输出信号被截断，无法完整地跟随输入信号的变化。于是得到输出电压底部失真的图像，即Figure 5

当我的静态工作点设置的太低，即过小的集电极电流 I_{CQ} 或过大的集电极-发射极电压 U_{CEQ} 时（具体在实验中，是增大了 R_B 电阻值，使得 I_{BQ} 减小，进一步使得 I_{CQ} 减小），会发生截止失真。截止失真会导致输出信号完全消失，无法提供有效的信号放大，造成信号丢失或无法传输的问题。于是得到输出电压顶部失真的图像，即Figure 4

3.1.2 计算分析小信号模型的电压增益与负载电阻对增益的影响

1. 测量结果如Table 1所示，分别计算得到各 R_L 下的电压增益 Av ，结果如Table 4所示。

Table 4: 数据分析：不同电阻 R_L 对电压增益的影响

$R_L/k\Omega$	U_{in}/mV	U_{out}/mV	Av
1	0.406	3.211	7.909
2	0.400	3.215	8.038
5	0.405	4.660	11.51
∞	0.390	6.660	17.08

2. 理论分析

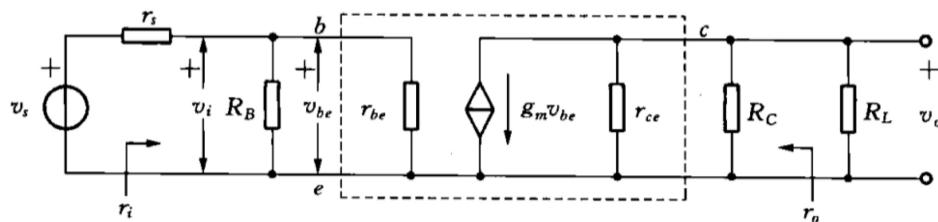


Figure 9: 小信号模型

小信号模型如Figure 9所示，因此，电压增益的理论值应当为 $Av = \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m}{r'_o + \frac{1}{R_L}}$ ，注意到有 $Av_\infty = \frac{g_m}{r'_o}$

$g_m r'_o$, 因此考虑用函数 $y = \frac{Av_\infty}{1+pr_L}$, p 是拟合参数, 对应着我们能够测得的输出电阻。拟合结果如Figure 10所示。

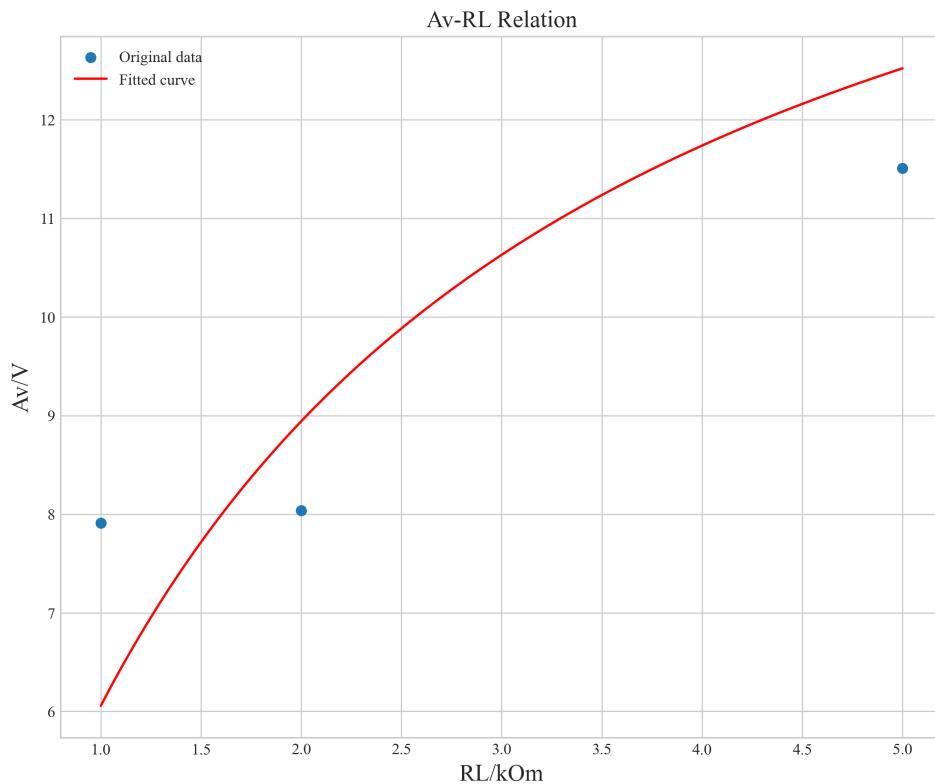


Figure 10: 数据分析：负载电阻对增益的影响

而参数值为 $r'_o = 1.8k\Omega$ 。

3. 总结电路参数变化对静态工作点和电压放大倍数的影响

经过上述分析, 我们可以发现静态工作点的选择与电路的参数密切相关, 主要影响因素包括集电极电阻 R_C 、电源电压 V_{CC} 、基极电阻 R_B 、负载电阻 R_L 等。这些参数变化会直接影响静态工作点和电压放大倍数, 具体影响总结如下:

(a) 集电极电阻 R_C :

- i. 增大 R_C 会导致静态工作点 (Q 点) 向上移动, 使得集电极电压 U_{CEQ} 增大, 但电压放大倍数减小。
- ii. 减小 R_C 会导致 Q 点向下移动, U_{CEQ} 减小, 但电压放大倍数增大。

(b) 电源电压 V_{CC} :

- i. 增大 V_{CC} 会使得 Q 点向上移动, U_{CEQ} 增大, 但电压放大倍数不会明显改变。
- ii. 减小 V_{CC} 会使得 Q 点向下移动, U_{CEQ} 减小, 但电压放大倍数不会明显改变。

(c) 基极电阻 R_B :

- i. 增大 R_B 会使得 Q 点向上移动, U_{CEQ} 增大, 但电压放大倍数减小。

ii. 减小 R_B 会使得 Q 点向下移动, U_{CEQ} 减小, 但电压放大倍数增大。

(d) 负载电阻 R_L :

i. 增大 R_L 会导致静态工作点 (Q 点) 向下移动, 使得集电极电压 U_{CEQ} 减小, 电压放大倍数减小。

ii. 减小 R_L 会导致 Q 点向上移动, U_{CEQ} 增大, 但电压放大倍数增大。

综上所述, 电路参数的变化会直接影响静态工作点的位置和电压放大倍数的大小, 合理调整这些参数可以实现对电路性能的有效控制和优化。

3.1.3 计算分析输入电阻和输出电阻

1. 分析输入电阻和输出电阻的测试方法

小信号模型如Figure 9所示, 因此我们可以利用对 RL 与 r_s 的测量来测量输入输出电阻; 又由于前面测得了 R_B 与 RC , 因此可以由此计算得到真实的输入输出电阻。结果如Table 5和Table 6所示。

Table 5: 数据分析: 输入电阻测量

$rs/k\Omega$	$ui1/mV$	$ui1'/mV$	$ui2/mV$	$ui2'/mV$	$ro(real)/k\Omega$
10.000	0.401	1.762	1.290	7.040	3.667
$ro(exp)/k\Omega$	$ro1(Vpp=5mV)$	2.946	$ro2(Vpp=20mV)$	2.243	2.638

Table 6: 数据分析: 输出电阻测量

$Uout/mV$	RL/Ω	$ro(exp)/k\Omega$	$ro(real)/k\Omega$
25.90	∞	nan	nan
18.19	5.1	2.162	21.77
13.67	2.4	2.147	20.38
8.285	1.0	2.126	18.63
均值	nan	2.145	20.26

2. 从测量结果可以看出, 输入电阻的两次测量结果差异较大, 推测受到了 Vpp 的值的影响; 而输出电阻测量结果较均匀, 但与前面拟合结果有较大差异, 推测是由于电路因为接入了 r_s 导致 g_m 有变化。

3.2 实验思考题

思考题 3.1: 实验电路的参数 R_L 及 V_{CC} 变化, 对输出信号的动态范围有何影响? 如果输入信号加大, 输出信号的波形将产生什么失真?

改变 R_L 可能引起的变化:

1. 增大 R_L 会导致放大电路的输出阻抗增加, 从而使得输出信号受负载影响减小, 动态范围可能增加。

- 减小 R_L 则会导致输出阻抗减小，负载影响增大，动态范围可能减小。

改变 V_{CC} 可能引起的变化：

- 增大 V_{CC} 可以提供更大的动态范围，因为输出信号可以在更大的电压范围内变化。
- 减小 V_{CC} 则会限制输出信号的动态范围，可能导致输出信号无法完全跟随输入信号的变化。

输入信号加大时，输出信号的波形可能会产生以下失真：

- 过载失真：当输入信号幅值过大，超过放大电路能够处理的范围时，输出信号将被截断或扭曲，导致失真。
- 削波失真：当输入信号的幅值超过放大电路工作范围的一部分时，输出信号将被削波，波形被截断，失真严重。
- 非线性失真：放大电路的非线性特性会导致输出信号的波形失真，特别是在信号幅值较大时更为明显。

思考题 3.2：本实验在测量放大器放大倍数时，使用交流毫伏表，而不用万用表，为什么？

原因是因为放大器输出的是交流信号，而万用表通常用于测量直流电压、低频（家用）交流电和电阻。

放大器的放大倍数是指输出信号与输入信号的电压或功率比。由于放大器输出的是交流信号，使用直流测量工具（如万用表）可能无法准确测量交流信号的幅值。交流毫伏表具有更高的频率响应和更低的内阻，适合测量交流信号的幅值，因此更适合用于测量放大器的放大倍数。

思考题 3.3：测一个放大器的输入电阻时，若选取的串入电阻过大或过小，则会出现测试误差，请分析测试误差。

在测量放大器的输入电阻时，选择的串入电阻过大或过小都会引起测试误差，具体表现如下：

串入电阻过大时：

- 如果串入电阻过大，会导致实际测量电路的输入电阻与理论值相差较大。
- 过大的串入电阻会使得放大器输入端的等效电阻增大，从而影响到整个电路的输入特性。
- 结果可能导致测量值偏低，因为串入电阻的影响使得实际测量电路的输入电阻比真实值更大。

串入电阻过小时：

- 如果串入电阻过小，可能会造成测量电路的输入电阻变得很小，与放大器的输入电阻相比，会导致较大的失真。
- 过小的串入电阻会导致放大器输入端的等效电阻减小，从而改变了整个电路的输入特性。
- 结果可能导致测量值偏高，因为串入电阻的影响使得实际测量电路的输入电阻比真实值更小。

因此，在测量放大器输入电阻时，需要选择合适的串入电阻，以确保测量的准确性。通常选择一个与待测电路输入电阻相当的串入电阻，这样可以最大限度地减小测试误差。

ET1-8 单级交流放大器 结语

4.1 参考文献

- [1] 维基百科 <https://zh.wikipedia.org>
- [2] 沈韩. 基础物理实验.——北京: 科学出版社, 2015.2 ISBN: 978-7-03-043311-4

4.2 附件及实验相关的软硬件资料等

实验报告个人签名如Figure 11。



Figure 11: 个人签名

相关代码已上传至 Github。