



哈爾濱工業大學(深圳)
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, SHENZHEN

运动控制 实验报告

专业： 控制科学与工程
班级： 25 级控制 1 班
姓名： 吴俊达（同组：许浩威）
学号： 25S065010
日期： 2025 年 9 月 30 日

实验二 速度规划参数对运行性能影响实验

一、MATLAB 代码及数据分析

```
clc;clear;close all;

% 读取整个文件到矩阵
data = load('lab2/001.fwtxt'); % 或者使用 importdata('your_file.txt')
original_data = load('L2.txt');
prefix = "1.";
t_x=(0:length(data(:,1))-1).*0.002;

% 将每一列分配给不同的数组
col1 = data(:, 1); % 第一列, 规划 x
col2 = data(:, 2); % 第二列, 规划 y
% 路径长度计算
col1_temp = [ col1(2:end, 1);0 ];
col1_diff = col1_temp - col1;
col2_temp = [ col2(2:end, 1);0 ];
col2_diff = col2_temp - col2;
dis = zeros(1,length(data(:,1)));
accumulate_dis = 0;
for i=1:length(data(:,1))
    dis(i) = accumulate_dis;
    accumulate_dis = accumulate_dis + sqrt(col1_diff(i)^2 + col2_diff(i)^2);
end
col3 = data(:, 3); % 第三列, 编码器 x
col4 = data(:, 4); % 第四列, 编码器 y
col5 = data(:, 5); % 第五列, 光栅 x
col6 = data(:, 6); % 第六列, 光栅 y
col7 = data(:, 7); % 第七列, 速度 x
col8 = data(:, 8); % 第八列, 速度 y
% 加速度计算
col7_temp = [ col7(2:end, 1);0 ];
col7_diff = col7_temp - col7;
col8_temp = [ col8(2:end, 1);0 ];
col8_diff = col8_temp - col8;
acc_x = col7_diff ./ 0.002 .* 60;
acc_x(end) = 0.0;
acc_y = col8_diff ./ 0.002 .* 60;
acc_y(end) = 0.0;

original_1 = original_data(:, 1); % 原始第 1 列
original_2 = original_data(:, 2); % 原始第 2 列
```

```

half_close_error_x = col1 - col3;
half_close_error_y = col2 - col4;
close_error_x = col1 - col5;
close_error_y = col2 - col6;
feedback_error_x = col3 - col5;
feedback_error_y = col4 - col6;

```

% 分轴绘制规划、编码器、光栅位置

```

figure(1);
subplot(2,1,1)
plot(t_x, col1, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '规划 x 值'); hold on;
plot(t_x, col3, 'r--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '编码器实际 x 值'); hold on;
plot(t_x, col5, 'g--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '光栅尺实际 x 值'); hold on;
legend('Location', 'Best');
ylabel("坐标值 (mm)")
xlabel("T(s)")
hold off;
subplot(2,1,2)
plot(t_x, col2, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '规划 y 值'); hold on;
plot(t_x, col4, 'r--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '编码器实际 y 值'); hold on;
plot(t_x, col6, 'g--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '光栅尺实际 y 值'); hold on;
legend('Location', 'Best');
ylabel("坐标值 (mm)")
xlabel("T(s)")
saveas(1,prefix+"1.png",'png');
hold off;

```

% 分轴绘制半闭环、全闭环跟踪误差

```

figure(2);
subplot(2,1,1)
plot(t_x, half_close_error_x, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'x 半闭环跟踪误差');
hold on;
plot(t_x, close_error_x, 'r-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'x 全闭环跟踪误差'); hold
on;
legend('Location', 'Best');
ylabel("误差 (mm)")
% xlabel("数据点数")
xlabel("T(s)")
hold off;
subplot(2,1,2)
plot(t_x, half_close_error_y, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'y 半闭环跟踪误差');
hold on;
plot(t_x, close_error_y, 'r-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'y 全闭环跟踪误差'); hold
on;
legend('Location', 'Best');
ylabel("误差 (mm)")

```

```

xlabel("T(s)")
saveas(2,prefix+"2.png",'png');
hold off;

% 分轴绘制速度与误差曲线
figure(3);
subplot(2,1,1)
yyaxis left
plot(t_x, col7, 'k-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'x 速度(左轴)'); hold on;
ylabel("速率 (mm/min)")
yyaxis right
plot(t_x, half_close_error_x, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', "x 半闭环跟踪误差(右轴)"); hold on;
ylabel("误差 (mm)")
ylim([-1.5,1.5])
legend('Location', 'Best');
% xlabel("数据点数")
xlabel("T(s)")
title("速度与半闭环误差图(x 轴)")
subplot(2,1,2)
yyaxis left
plot(t_x, col8, 'k-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'y 速度(左轴)'); hold on;
ylabel("速率 (mm/min)")
yyaxis right
plot(t_x, half_close_error_y, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', "y 半闭环跟踪误差(右轴)"); hold on;
ylabel("误差 (mm)")
ylim([-1,1])
legend('Location', 'Best');
% xlabel("数据点数")
xlabel("T(s)")
title("速度与半闭环误差图(y 轴)")
saveas(3,prefix+"3.png",'png');
hold off;

% 绘制位置 xy 曲线
figure(4);
plot(original_1, original_2, 'k-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '指令位置'); hold on;
plot(col1, col2, 'b--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '规划位置'); hold on;
plot(col3, col4, 'r--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '编码器位置'); hold on;
plot(col5, col6, 'g--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '光栅位置'); hold on;
title("xy 原始位置、规划位置、编码器位置、光栅位置图")
ylabel("y 坐标值 (mm)")
xlabel("x 坐标值 (mm)")
legend('Location', 'Best');
saveas(4,prefix+"4.png",'png');

```

```

hold off;

% 绘制合速度/合加速度对路径长度的变化曲线
figure(5);
plot(dis, sqrt(col7.^2 + col8.^2), 'b-', 'LineWidth', 2); hold on;
title("合速度随路径长度变化")
ylabel("合速度 (mm/min)")
xlabel("路径长度 (mm)")
saveas(5,prefix+"5.png",'png');

figure(6);
plot(dis, sqrt(acc_x.^2 + acc_y.^2), 'b-'); hold on;
title("合加速度随路径长度变化")
ylabel("合加速度 (mm/min^2)")
xlabel("路径长度 (mm)")
saveas(6,prefix+"6.png",'png');

% 误差分析
error_analysis(half_close_error_x, "x 半闭环跟踪误差");
error_analysis(half_close_error_y, "y 半闭环跟踪误差");
error_analysis(close_error_x, "x 全闭环跟踪误差");
error_analysis(close_error_y, "y 全闭环跟踪误差");
error_analysis(half_close_error_x-close_error_x, "x 半闭环与全闭环反馈差");
error_analysis(half_close_error_y-close_error_y, "y 半闭环与全闭环反馈差");

function error_analysis(errors, name)
    % 计算各种误差指标
    abs_errors = abs(errors);

    % 最大误差
    max_abs_error = max(abs_errors);

    % 均方误差
    mse = mean(errors.^2);
    rmse = sqrt(mse);

    % 显示结果
    fprintf('=== ' + name + '误差分析结果 ===\n');
    fprintf('最大误差: %.6f\n', max_abs_error);
    fprintf('均方根误差: %.6f\n', rmse);
end

```

振动分析脚本与第一次实验完全相同，此处略去。

二、误差计算结果与分析

要求如下：

1、对于步骤2、3、4、5运行得到的四组数据进行分析，分别计算x、y轴的半闭环跟踪误差、全闭环跟踪误差、半闭环和全闭环反馈误差，求解以上误差的最大值与均方根值，将最大值和均方根值记录在此处。

	步骤 2	步骤 3	步骤 4	步骤 5
x 半闭环跟踪误差最大值	0.151389	0.155792	0.217386	0.655102
x 半闭环跟踪误差方均根值	0.061809	0.059864	0.111417	0.144716
y 半闭环跟踪误差最大值	0.010424	0.009997	0.013532	0.034543
y 半闭环跟踪误差方均根值	0.003549	0.003509	0.006907	0.008390
x 全闭环跟踪误差最大值	0.670809	0.674432	0.716874	0.969829
x 全闭环跟踪误差方均根值	0.548161	0.547732	0.533969	0.579806
y 全闭环跟踪误差最大值	0.157517	0.158119	0.162858	0.174270
y 全闭环跟踪误差方均根值	0.141972	0.142579	0.141903	0.141669
x 半闭环与全闭环之差最大值	0.530000	0.534000	0.510500	0.531500
x 半闭环与全闭环之差方均根值	0.519001	0.523571	0.500072	0.520494
y 半闭环与全闭环之差最大值	0.153000	0.154500	0.153500	0.153000
y 半闭环与全闭环之差方均根值	0.141394	0.142503	0.141675	0.141360

2、不同的速度规划参数下的误差有何差异？请结合速度规划参数的定义解释差异原因。

答：差异：① 在加速度参数较小时，增大速度参数，误差没有明显改变；② 在加速度参数较大时，增大速度参数，误差的最大值和均方根都增大了；③ 在速度参数相同时，增大加速度参数，误差的最大值和均方根都增大了，且加速度参数增加越多，误差的最大值、均方根的增大也越多。

原因：① 当加速度参数较小时，系统加速和减速的速率很低。即使增大了速度参数（允许更高的最大速度），系统也无法快速达到这个速度，因为加速度有限。因此，实际运动速度始终低于速度参数，且速度变化缓慢。由于实际速度没有显著增加，系统的动态响应（如惯性效应）没有明显变化。控制器有足够的时间来调整和跟踪轨迹，因此跟踪误差没有明显改变。误差主要受加速度参数限制，而不是速度参数。

② 当加速度参数较大时，系统可以快速加速到更高的速度。增大速度参数后，系统实际达到的速度更高，运动更快。高速运动意味着轨迹的频率成分更高，而控制系统的带宽是有限的。如果系统带宽不足，跟踪高频轨迹时会产生更大的跟踪误差。此外，高速下惯性、摩擦或其他非线性效应（如执行器饱和）更显著，导致控制器无法完美跟踪计划轨迹。因此，误差的最大值和均方根都增大。均方根误差增大表明误差的整体水平升高，而最大值增大表明可能出现更大的瞬时误差。

③ 当速度参数固定时，增大加速度参数意味着系统会以更快的速率加速和减速。这导致运动轨迹更陡峭，加速度变化率（jerk）增加。高加速度会要求执行器提供更大的力或扭矩，可能超出执行器的

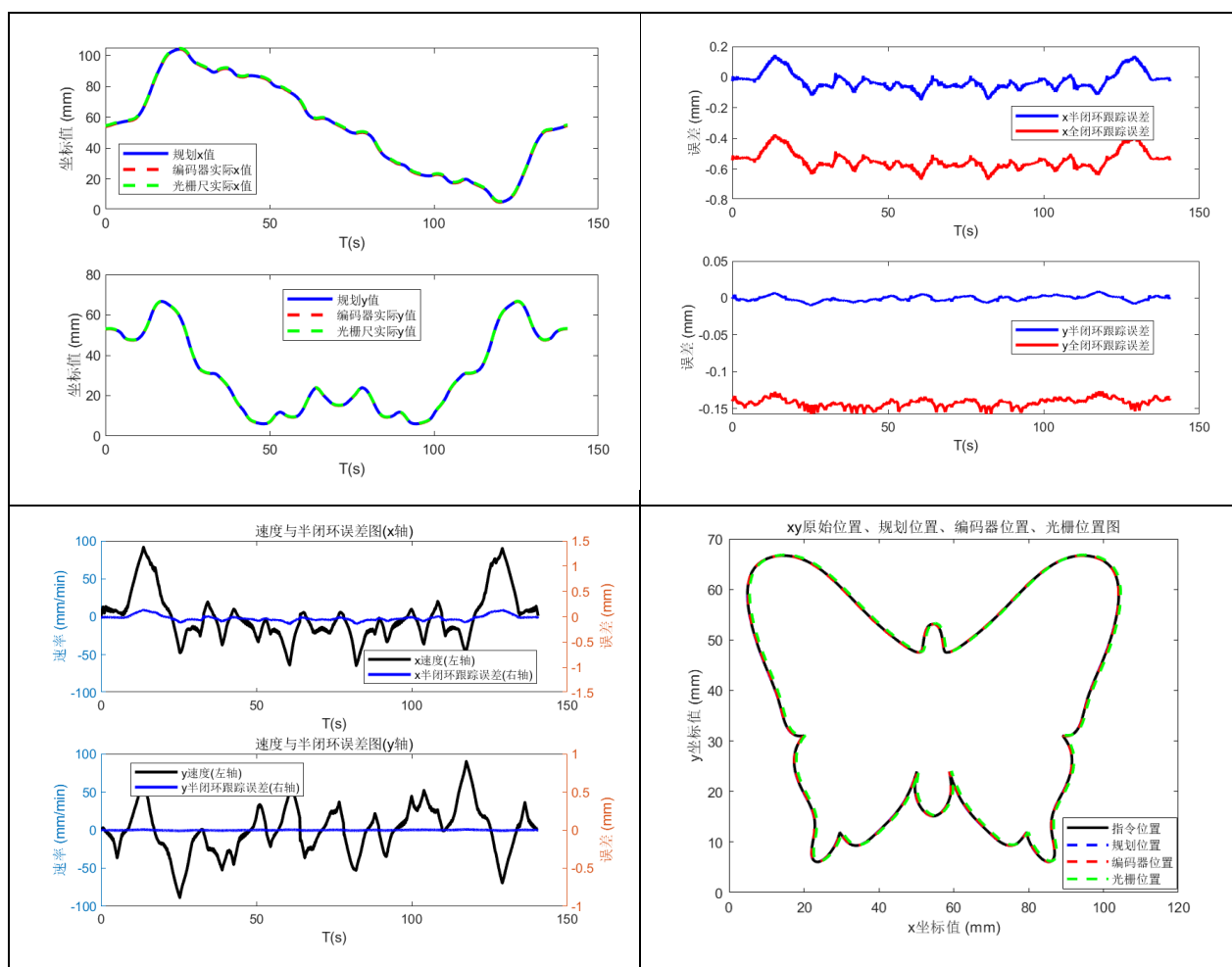
能力范围，引起饱和、振荡或延迟。同时，高 jerk 会激励系统的高频动力学模式（如共振），从而增加跟踪误差。加速度参数增加越多，这些效应越明显，因此误差的最大值和均方根增大得也越多。例如，在梯形速度规划中，高加速度会导致加速段和减速段更短，但轨迹更尖锐，控制器可能无法及时响应，导致超调或抖动。

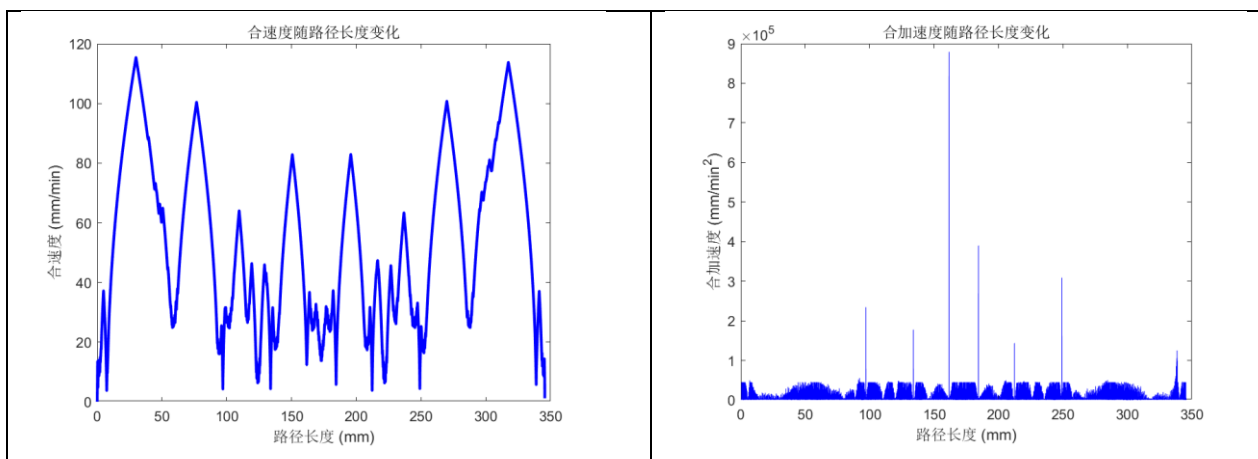
三、波形绘制与分析

要求如下：

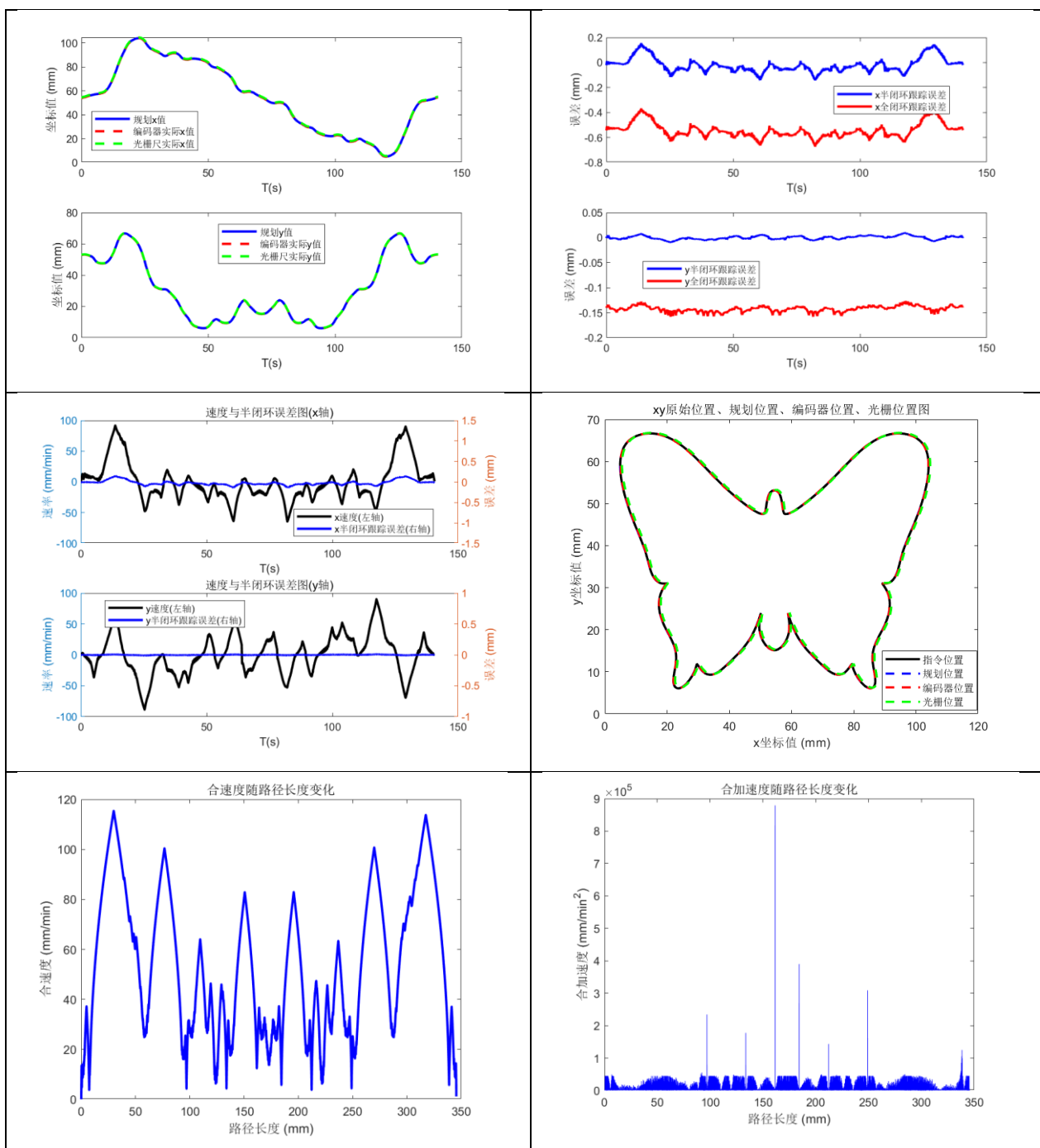
1、根据实验指导书要求绘制图形，将所绘制的图形记录在此处，注意标注好图形的名称、横纵坐标、单位。为了避免图形数量太多，建议使用“subplot”，将需要比较的x、y轴数据绘制在一个figure中。

步骤 2:

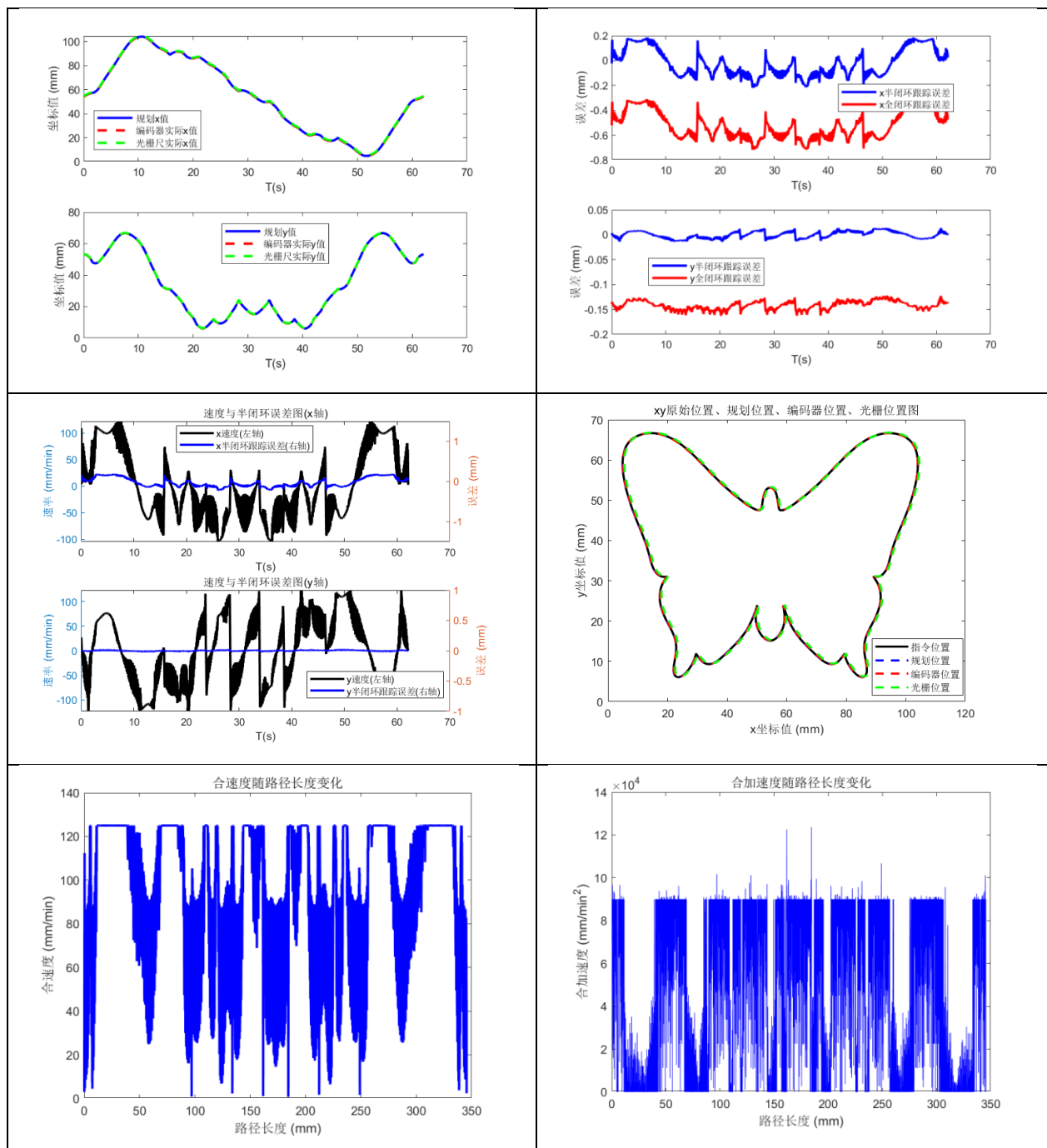




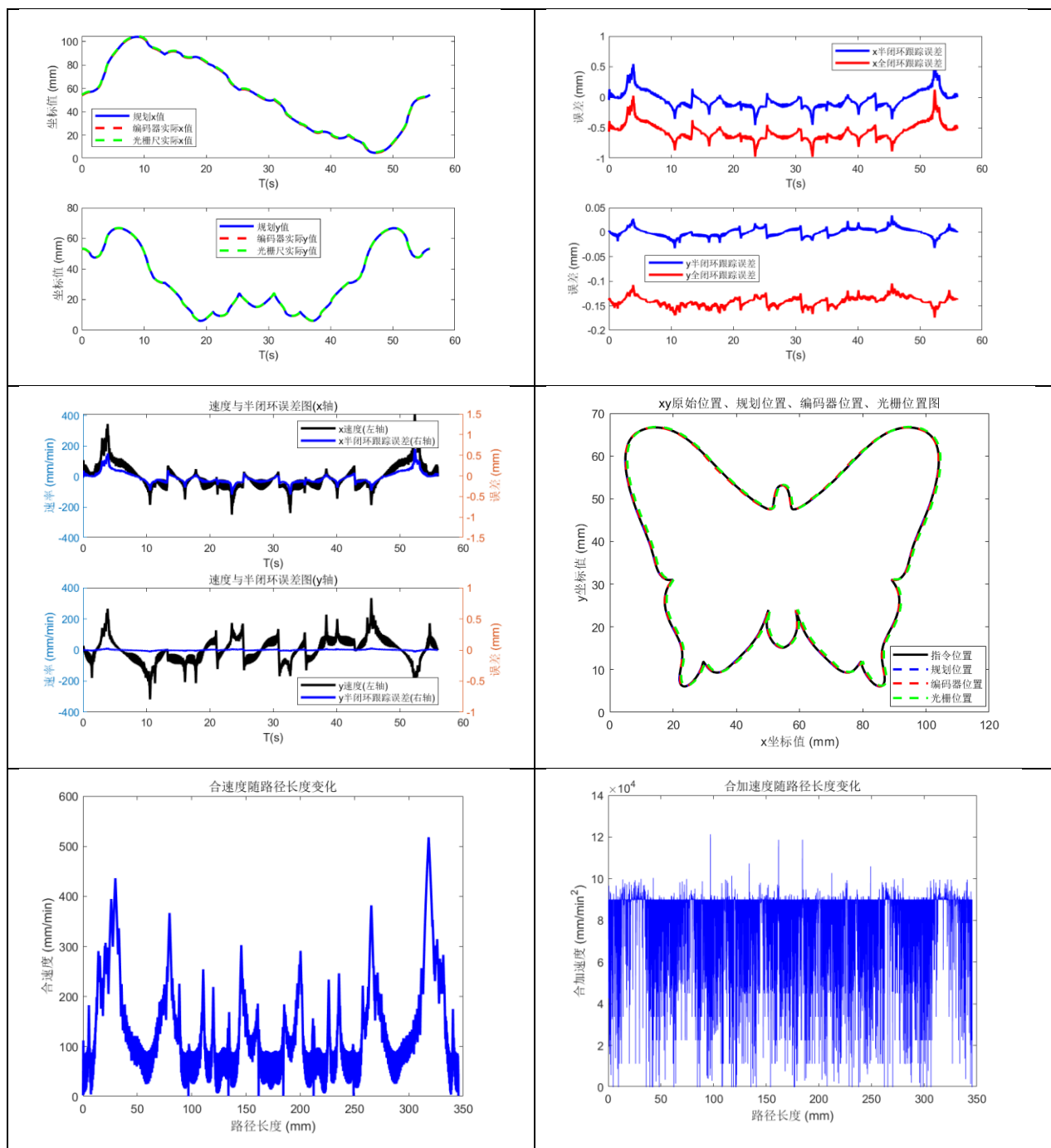
步骤 3:



步骤 4:



步骤 5:



2、对比“步骤2”、“步骤3”运行结果，发现什么现象，解释其产生的原因。

答：运行结果几乎完全相同。原因是，在给定的运动轨迹（位移）和加速度下，系统根本没有达到新设置的、更高的最大速度。换句话说，由于距离太短或者加速度有限，系统在达到更高的速度上限之前就必须开始减速了。因此，整个运动过程仍然由加速度和位移主导，实际的运动曲线和误差完全没有变化。

3、对比“步骤2”、“步骤4”运行结果，说说加速度改变对运行性能的影响。

答：当速度参数固定时，增大加速度参数意味着系统会以更快的速率加速和减速。这导致运动轨迹更陡峭，加速度变化率（jerk）增加。高加速度会要求执行器提供更大的力或扭矩，可能超出执行器的能力范围，引起饱和、振荡或延迟。同时，高jerk会激励系统的高频动力学模式（如共振），从而增

加跟踪误差。加速度参数增加越多，这些效应越明显。

4、对比“步骤4”、“步骤5”运行结果，说说速度改变对运行性能的影响。

答：增大速度参数前，由于加速度参数较大，所以系统很容易就达到速度上限。增大速度参数后，由于加速度参数较大，系统可以快速加速到更高的速度。高速运动意味着轨迹的频率成分更高，而控制系统的带宽是有限的。如果系统带宽不足，跟踪高频轨迹时会产生更大的跟踪误差。此外，高速下惯性、摩擦或其他非线性效应（如执行器饱和）更显著，导致控制器无法完美跟踪计划轨迹。

5、结合上述分析结果，总结一下应当如何调整速度规划参数以使运动控制系统达到更好的性能。

答：调整速度规划参数是优化系统性能的关键步骤，目的是在速度、精度、稳定性和平滑性之间取得最佳平衡，应遵循从基础到高级，从开环到闭环的顺序。首先，确保机械基础牢固，然后了解系统限制，即获取或估算系统的转动惯量、摩擦系数、最大连续/峰值扭矩、机械共振频率。这是设置合理参数上限的基础。然后，调整速度规划参数，从底层到上层逐步调试。从保守值开始，先将 V_{max} 和 A_{max} 设置为一个较低的值（如电机最大能力的 30%）。然后在固定 V_{max} 下，逐步增加 A_{max} ，观察电机电流（扭矩）和实际位置波形。当观察到扭矩饱和或出现超调/振荡时，适当回调 A_{max} ，留出 10%-20% 的安全余量。然后在设定好 A_{max} 后，逐步增加 V_{max} ，直到达到系统允许的最高速度或电机能力上限。

6、结合《GXN 系列运动控制器编程手册》，对比步骤5 与实验三中低密度小线段运行结果（速度规划参数配置一致），说明前瞻功能如何改善路径跟踪性能。

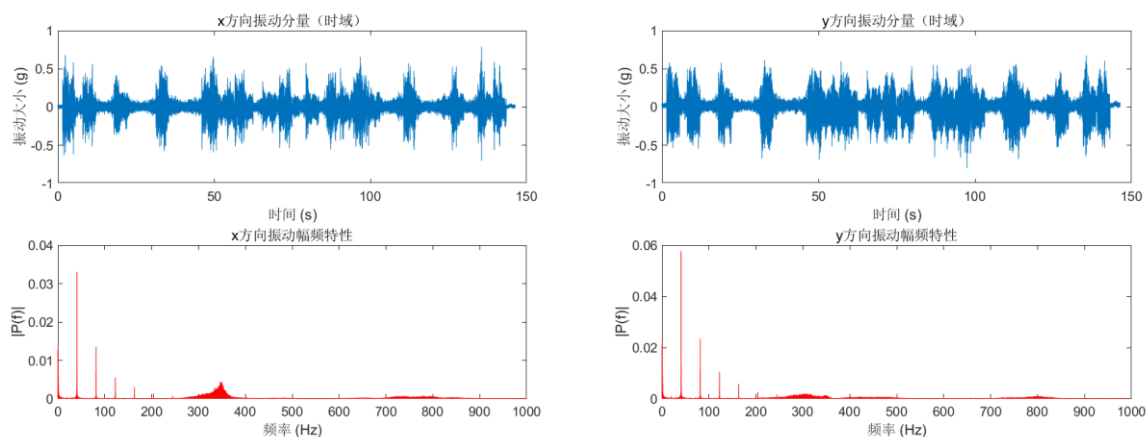
答：前瞻功能的核心在于，控制器不再仅仅根据车辆当前的位置误差来做出反应，而是通过预瞄前方路径上的一个或多个点，提前预知未来的路径曲率和方向变化，从而“未雨绸缪”地计算出更平滑、更合理的控制指令。没有前瞻的控制器总是在误差发生之后才去纠正，这是一种“滞后”的控制。前瞻功能通过预测未来的路径，让控制器在误差即将发生但尚未发生时就开始动作，有效补偿了系统延迟，使车辆响应更加及时。

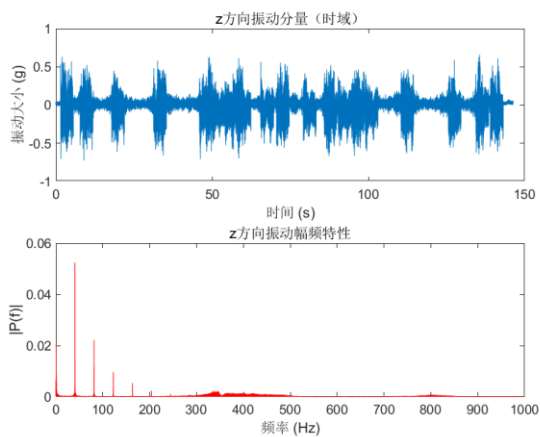
四、测振仪测试结果

要求如下：

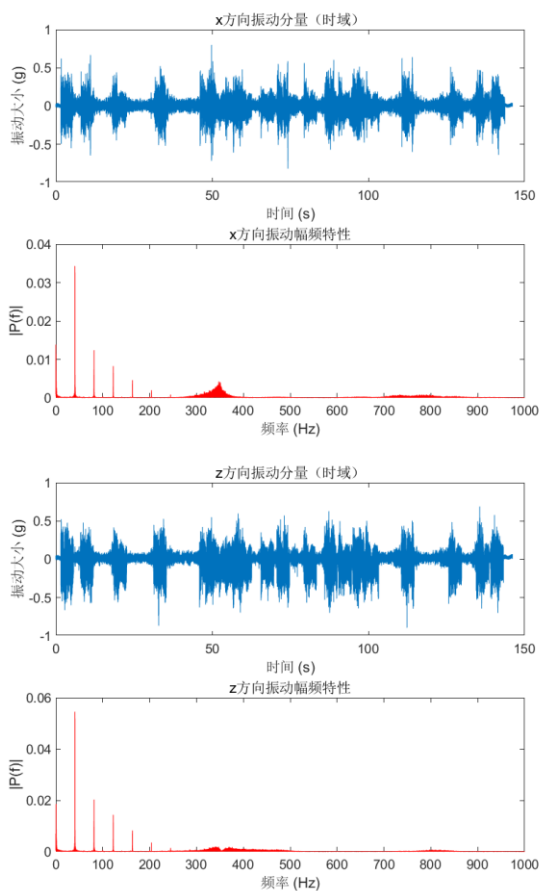
1、将测振仪所测得的xyz 三轴信号的时域波形和频域波形记录在此处。

步骤 2:

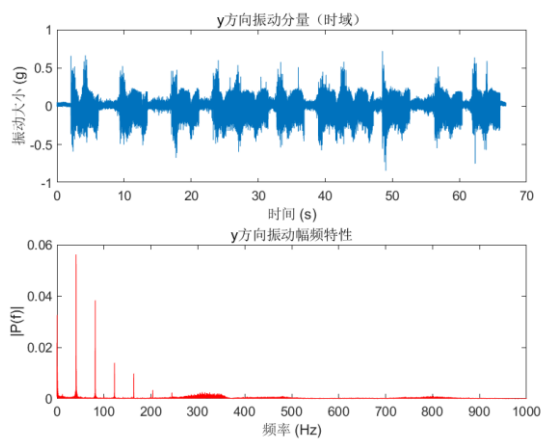
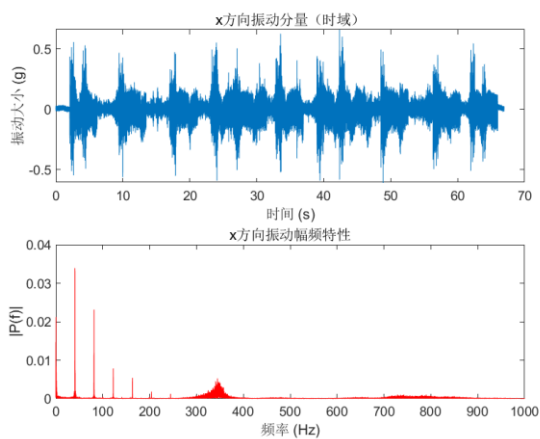


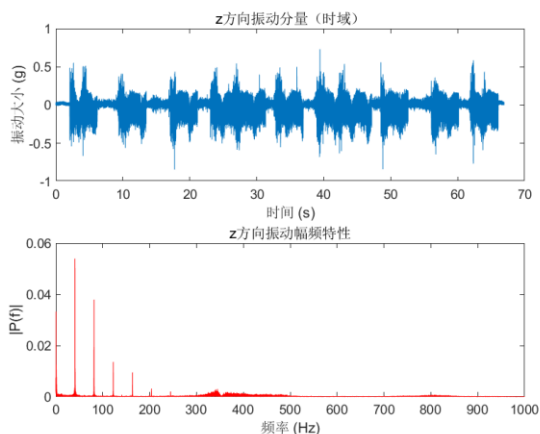


步骤 3:

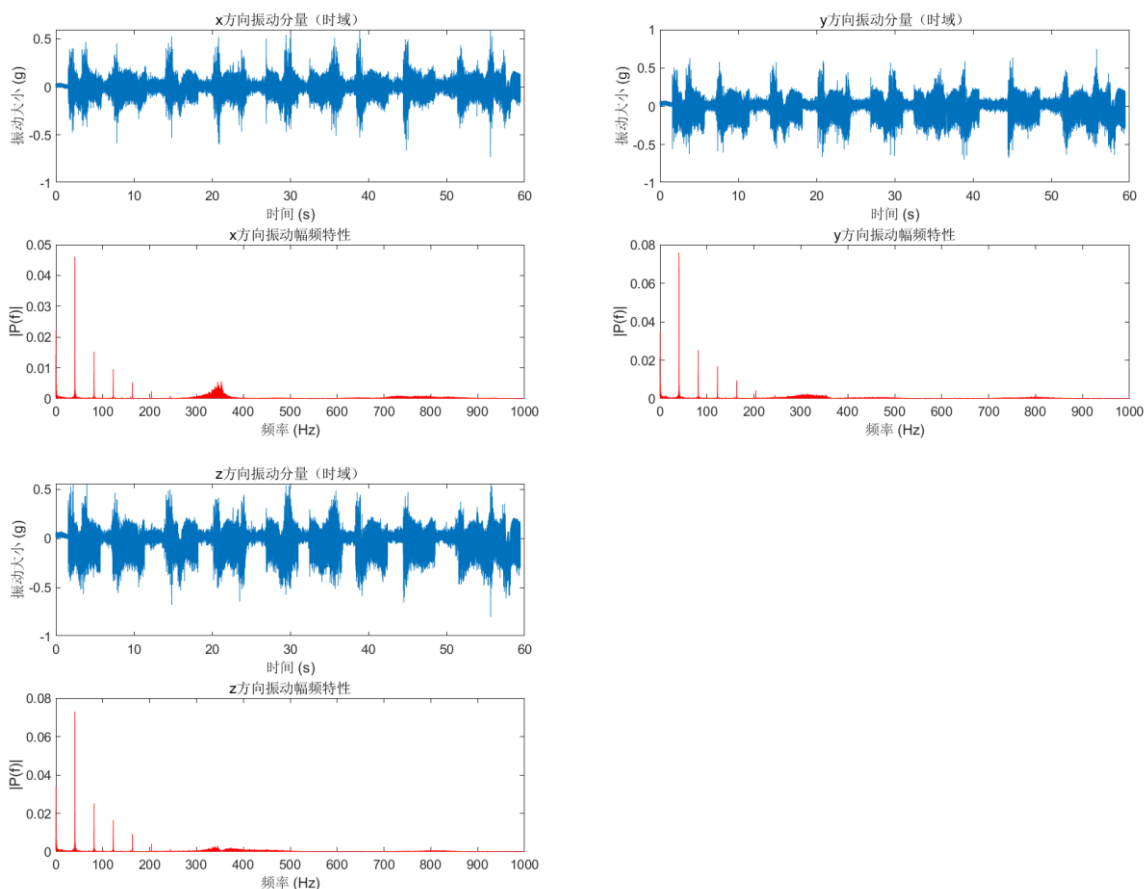


步骤 4:





步骤 5:



2、分析波形，回答下列问题

a. 对比步骤2~5 运行结果，在不同的速度规划参数下，xyz 三轴的振动幅值和频率分布有何显著差异？分析高速运动对机械系统振动的影响。

答：差异：① 在加速度参数较小时，增大速度参数，振动没有明显改变；② 在加速度参数较大时，增大速度参数，或是在速度参数相同时，增大加速度参数，振动的幅值都增大了；③ 频率响应没有明显的规律，仅仅观察到步骤 4 的频率响应中 80Hz 的模态明显增大了（激发共振模态）。

影响：高速运动引入了一系列在低速时可以忽略的物理效应，比如，惯性效应显著增强；轴承间隙、连接处的摩擦、材料的应力-应变关系等非线性因素不能再被忽略；即使没有外部周期性激励，当转速达到系统固有频率的特定倍数时，系统也会发生共振；等等。这些都会影响振动。

b. 对比步骤5 与实验三中低密度小线段振动测试结果，说说开启 LookAhead 功能对振动抑制的具体表现。

振动类型	无前瞻表现	开启前瞻后的表现
直线跟踪振荡	明显的“之”字形轨迹，方向高频微调	轨迹近乎笔直，方向保持稳定或极低频微调
弯道切入冲击	在弯道处突然转向	平滑渐入弯道
路径噪声响应	轨迹复现路径噪声，高频抖动	忽略高频噪声，轨迹平滑

五、实验心得

要求如下：
说说你在本次实验中遇到的问题与收获

无