



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  
学号: 25S065010  
日期: 2025 年 9 月 28 日

# 实验一 基于 XY 平台的轨迹规划实验

## 一、MATLAB 代码及数据分析

规划路径与反馈位置分析代码:

```
clc;clear;close all;

% 读取整个文件到矩阵
data = load('1.1.txt'); % 或者使用 importdata('your_file.txt')
original_data = load('L1.txt');
% data = load('2.1.txt'); % 或者使用 importdata('your_file.txt')
% original_data = load('L2.txt');

% 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
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

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(col1, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '规划 x 值'); hold on;
plot(col3, 'r--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '编码器实际 x 值'); hold on;
plot(col5, 'g--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '光栅尺实际 x 值'); hold on;
legend();
ylabel("坐标值 (mm)")
xlabel("数据点数")
hold off;
subplot(2,1,2)
plot(col2, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '规划 y 值'); hold on;
plot(col4, 'r--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '编码器实际 y 值'); hold on;
plot(col6, 'g--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '光栅尺实际 y 值'); hold on;
legend();
ylabel("坐标值 (mm)")
xlabel("数据点数")
hold off;

% 分轴绘制半闭环、全闭环跟踪误差
figure(2);
subplot(2,1,1)
plot(half_close_error_x, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'x 半闭环跟踪误差'); hold on;
```

```

plot(close_error_x, 'r-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'x 全闭环跟踪误差'); hold on;
legend();
ylabel("坐标值 (mm)")
xlabel("数据点数")
hold off;
subplot(2,1,2)
plot(half_close_error_y, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'y 半闭环跟踪误差'); hold on;
plot(close_error_y, 'r-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'y 全闭环跟踪误差'); hold on;
legend();
ylabel("坐标值 (mm)")
xlabel("数据点数")
hold off;

% 分轴绘制速度与误差曲线
figure(3);
subplot(2,1,1)
yyaxis left
plot(col7, 'k-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'x 速度(左轴)'); hold on;
ylabel("速率 (mm/min)")
yyaxis right
plot(half_close_error_x, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', "x 半闭环跟踪误差(右轴)"); hold on;
ylabel("坐标值 (mm)")
ylim([-1.5,1.5])
legend();
xlabel("数据点数")
title("速度与半闭环误差图(x 轴)")
subplot(2,1,2)
yyaxis left
plot(col8, 'k-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'y 速度(左轴)'); hold on;
ylabel("速率 (mm/min)")
yyaxis right
plot(half_close_error_y, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', "y 半闭环跟踪误差(右轴)"); hold on;
ylabel("坐标值 (mm)")
ylim([-1,1])
legend();
xlabel("数据点数")
title("速度与半闭环误差图(y 轴)")
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();
hold off;

% 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('均方误差: %.6f\n', mse);
fprintf('均方根误差: %.6f\n', rmse);
end

```

---

振动测试仪数据时域频域分析:

---

```

clc;clear;close all;

% 读取整个文件到矩阵
orig_parent_path = "lab1/";
list_num = "1、1";
save_path = orig_parent_path + "png/";
parent_path = orig_parent_path + list_num + "/";
data_x = load(parent_path + 'CH1/00000001/CH1-00000001.txt');
disp(length(data_x))
data_y = load(parent_path + 'CH2/00000001/CH2-00000001.txt');
data_z = load(parent_path + 'CH3/00000001/CH3-00000001.txt');

t = 1:length(data_x);
t = t ./ 2000;

% data_x = data_x(5000:35001, :);
% data_y = data_y(5000:35001, :);
% data_z = data_z(5000:35001, :);

figure(1);
subplot(2,1,1)
plot(t, data_x);
title("x 方向振动分量 (时域)");
ylabel("振动大小 (g)")
xlabel("时间 (s)")
hold off;
subplot(2,1,2)
Fs = 2000; % 采样频率, 2k
T = 1/Fs; % 采样周期, 1/2k
L = length(data_x); % 信号长度
Y = fft(data_x);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;
plot(f, P1, 'r-')
xlabel('频率 (Hz)')

```

```

ylabel('|P(f)|');
title("x 方向振动幅频特性");
hold off;
% filename = save_path + list_num + "_x.png";
% saveas(gcf, filename);

figure(2);
subplot(2,1,1)
plot(t, data_y);
title("y 方向振动分量 (时域)");
ylabel("振动大小 (g)")
xlabel("时间 (s)")
hold off;
subplot(2,1,2)
Fs = 2000;           % 采样频率, 2k
T = 1/Fs;            % 采样周期, 1/2k
L = length(data_y);  % 信号长度
Y = fft(data_y);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;
plot(f, P1, 'r-')
xlabel('频率 (Hz)')
ylabel('|P(f)|')
title("y 方向振动幅频特性");
hold off;
% filename = save_path + list_num + "_y.png";
% saveas(gcf, filename);

figure(3);
subplot(2,1,1)
plot(t, data_z);
title("z 方向振动分量 (时域)");
ylabel("振动大小 (g)")
xlabel("时间 (s)")
hold off;
subplot(2,1,2)
Fs = 2000;           % 采样频率, 2k
T = 1/Fs;            % 采样周期, 1/2k
L = length(data_z);  % 信号长度
Y = fft(data_z);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;
plot(f, P1, 'r-')
xlabel('频率 (Hz)')
ylabel('|P(f)|')
title("z 方向振动幅频特性");
hold off;
% filename = save_path + list_num + "_z.png";
% saveas(gcf, filename);

```

---

## 二、误差计算结果与分析

我使用的机器，两组数据之间没有显著的差别（详见报告附录）。为分析规律，采用了许浩威同学采集的数据，数据分析脚本是本人独立完成的。

下表中单位均为 mm。

	LTxt_1	LTxt_2
x 半闭环跟踪误差最大值	0.508318	0.481848
x 半闭环跟踪误差方均根值	0.204066	0.153544
y 半闭环跟踪误差最大值	0.028788	0.027638
y 半闭环跟踪误差方均根值	0.012349	0.008259
x 全闭环跟踪误差最大值	0.976818	0.938471
x 全闭环跟踪误差方均根值	0.559006	0.546175
y 全闭环跟踪误差最大值	0.174392	0.169056
y 全闭环跟踪误差方均根值	0.141702	0.141824
x 半闭环与全闭环之差最大值	0.482000	0.467000
x 半闭环与全闭环之差方均根值	0.470170	0.456308
y 半闭环与全闭环之差最大值	0.153000	0.153500
y 半闭环与全闭环之差方均根值	0.141101	0.141554

对半闭环跟踪误差、全闭环跟踪误差、以及半闭环和全闭环反馈误差的理解：

“闭环控制”的基本思想是通过测量“实际输出”并与“期望指令”进行比较，用产生的“误差”来修正系统行为，最终使实际输出逼近期望指令。在半闭环和全闭环系统中，这个“实际输出”的测量点不同，这就导致了二者区别。

### 半闭环跟踪误差：

- **定义：** 指令位置（希望电机转到的位置）与电机编码器反馈的实际位置之间的差值。
- **测量点：** 在传动链的中间环节，通常是在伺服电机本体的尾部，通过**编码器**测量电机的**转角**（或转速）。
- **本质：** 这是伺服驱动器“看到”的误差。驱动器尽全力消除的就是这个误差。它反映了**电机轴**跟随指令的良好程度。
- **产生原因：** 伺服系统本身的动态响应，如惯性、刚度、带宽限制等。只要指令在变化，这个误差就存在；当指令停止且系统稳定后，理论上这个误差应为零。
- **局限：** 半闭环系统对电机轴之后发生的所有问题都视而不见，如联轴器的间隙或弹性变形，丝杠的螺距误差、热伸长；丝杠螺母的背隙；导轨的平行度误差等。系统以为电机转到了正确的位置，但最终的执行末端（如本次实验中的平台）可能并没有到达正确的位置。

### 全闭环跟踪误差

- **测量点：** 在传动链的最终环节，直接在最终的运动执行部件上安装**直线光栅尺**等检测装置，测量**最终的实际位移**。

- 定义:** 指令位置与最终执行末端（光栅尺反馈）的实际位置之间的差值。
- 本质:** 这是从系统最终性能角度定义的“真实”误差。它反映了工作台/刀尖最终跟随指令的良好程度。
- 产生原因:** 包含了整个传动链的所有误差源：伺服电机的跟踪误差 + 传动环节（丝杠、联轴器等）引入的所有误差。

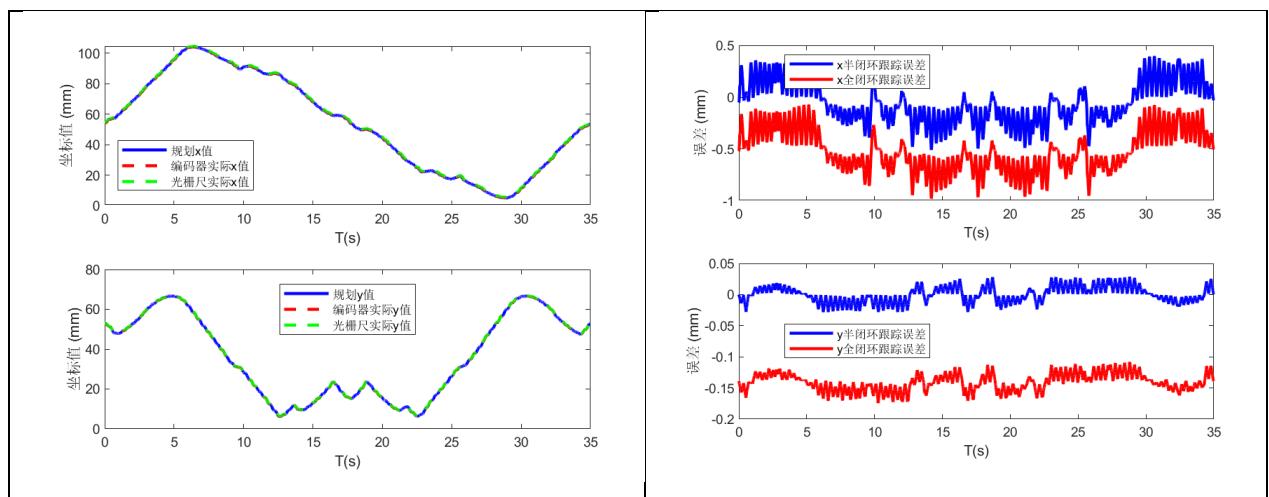
为求清晰，列出如下对比表格：

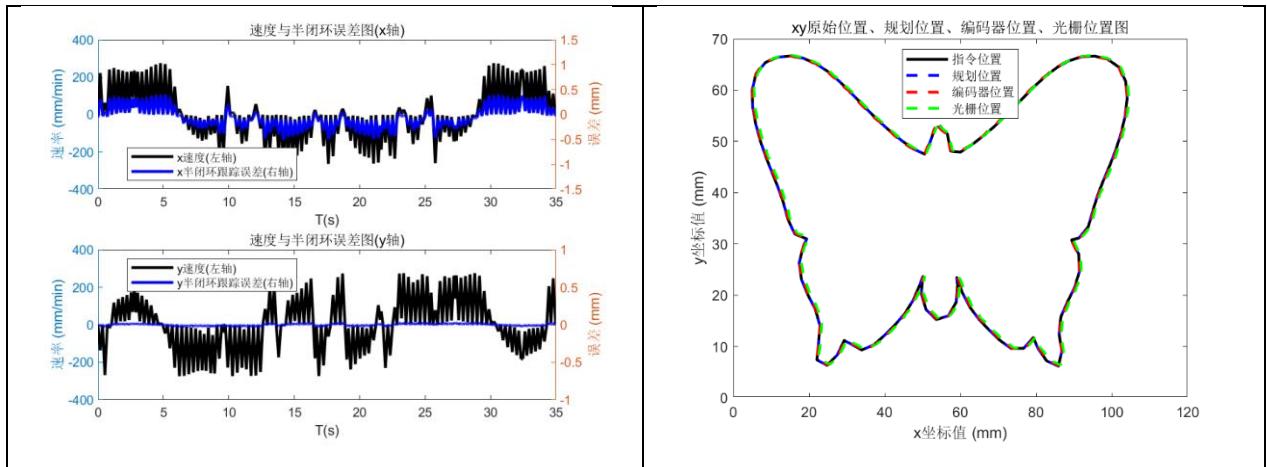
特性	半闭环系统	全闭环系统
反馈装置	电机编码器	直线光栅尺
测量点	电机轴	最终工作台
跟踪误差	指令 vs. 电机位置	指令 vs. 工作台位置
控制目标	让电机轴精确跟随指令	让工作台精确跟随指令
能否补偿传动误差	否	是
系统稳定性	较高（机械谐振环节被排除在环外）	较低（机械传动链的间隙、柔性被包含在环内，易引发振荡）
成本	较低	较高

半闭环和全闭环反馈误差可理解为传动链的累积误差。全闭环系统通过其反馈回路，能够主动地补偿掉这一部分。

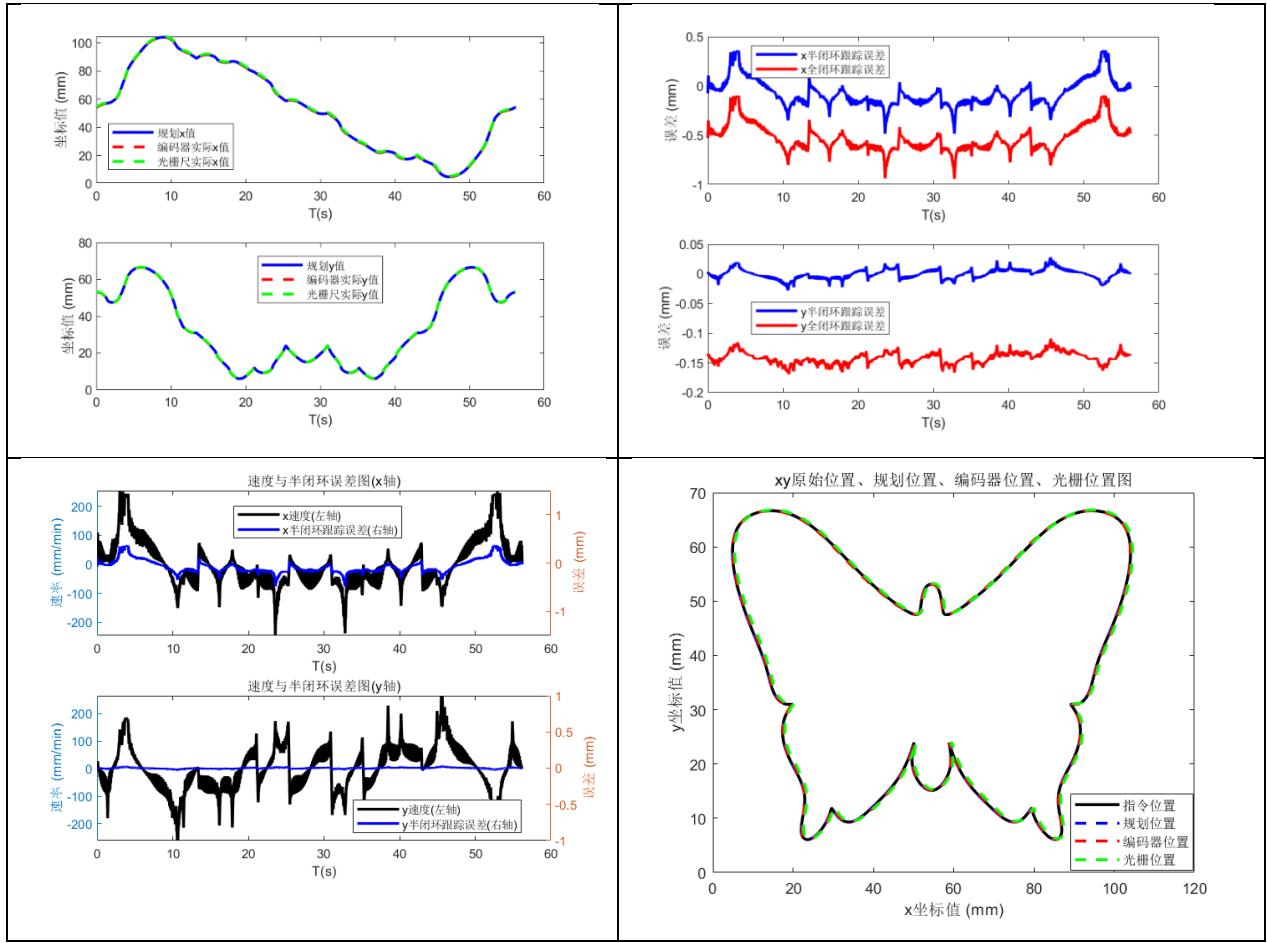
### 三、波形绘制与分析

LTxt\_1:





LTxt\_2:



对比两组数据曲线，回答下列问题：

a. 跟踪误差的影响因素有哪些

**答：1. 机械系统因素：**这是误差的根本来源，机械部分的缺陷会直接传递给控制系统，难以完全补偿。

比如，电机与丝杠的联轴器、丝杠螺母与平台之间的连接如果存在松动或柔性，会产生反向间隙和弹性变形；当运动方向改变时，电机会先克服反向间隙，平台才会移动，导致指令与实际位置不同步；导轨滑块上的静摩擦、动摩擦和粘滞摩擦会影响运动的平滑性。特别是在低速时，静摩擦可能导致“爬行”现象；丝杠本身的螺距误差、制造缺陷（如跳动、弯曲）会直接导致位置误差；XY轴导轨的垂直

度误差、平面度误差会导致两个轴的运动相互干涉，产生“阿贝误差”等几何误差。

**2. 控制系统因素：**如比例、积分、微分参数不合适，则无法有效抑制静态误差和动态误差；为了抑制噪声和机械共振，会设置低通滤波器。但滤波器会引入相位延迟，从而增加跟踪误差；没有前馈或前馈参数不准，在加减速阶段会有很大的误差峰值。

**3. 伺服驱动与电机因素：**驱动器的电流（扭矩）控制带宽决定了电机响应控制信号的速度。带宽不足，则无法精确执行控制器的扭矩指令；电机本身存在的扭矩脉动（尤其是在低速时）会使运动不平稳，产生速度波动。

**4. 反馈系统因素：**编码器本身的制造精度、编码器轴与电机/丝杠轴不同心、反馈延迟等，都会导致误差。

**5. 外部与环境因素：**指令速度与加速度、轨迹曲率对系统的动态性能有要求；来自外部的振动、环境温度变化、外力干扰，都会导致位置偏差。

b. 半闭环与全闭环跟踪误差与速度之间的关系是什么。

答：与速度大致呈现正相关关系，即速度较大时，误差（半闭环或全闭环）也较大。

c. 对比 *LTxt\_1*（低密度路径）与 *LTxt\_2*（高密度路径）的跟踪误差曲线，分析路径段数增加（即路径更光滑）时，离散化误差幅值和波动频率如何变化？

答：路径段数增加时，从图中可直观看出离散化误差幅值降低；“正弦式”振荡的现象几乎消失，于是可看出波动频率降低。

d. 在路径急转弯处，低密度路径的误差是否显著高于高密度路径？结合路径插值算法（如直线段逼近圆弧）解释原因。

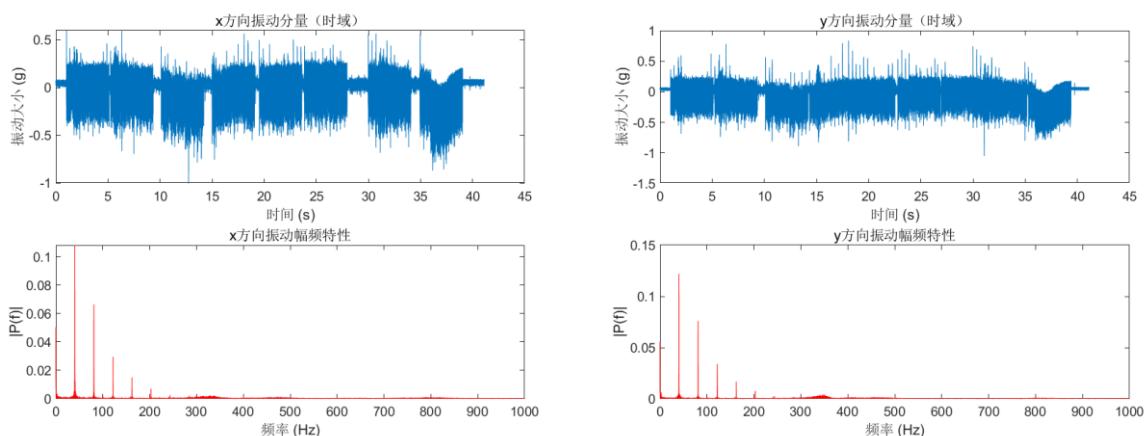
答：在路径急转弯处，低密度路径的误差显著高于高密度路径。这是因为高密度路径直线段数更多，直线段之间的转角处的过渡更加光滑，更贴近真实路径。

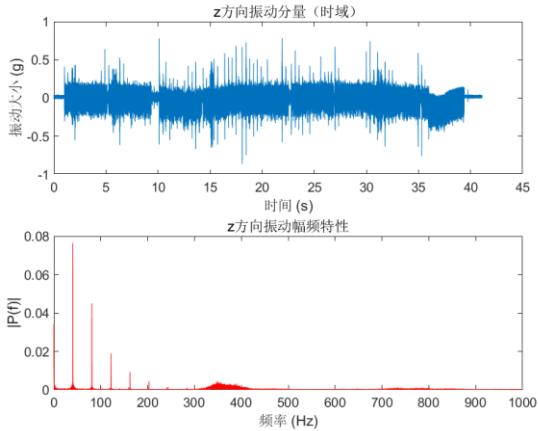
#### 四、测振仪测试结果

要求如下：

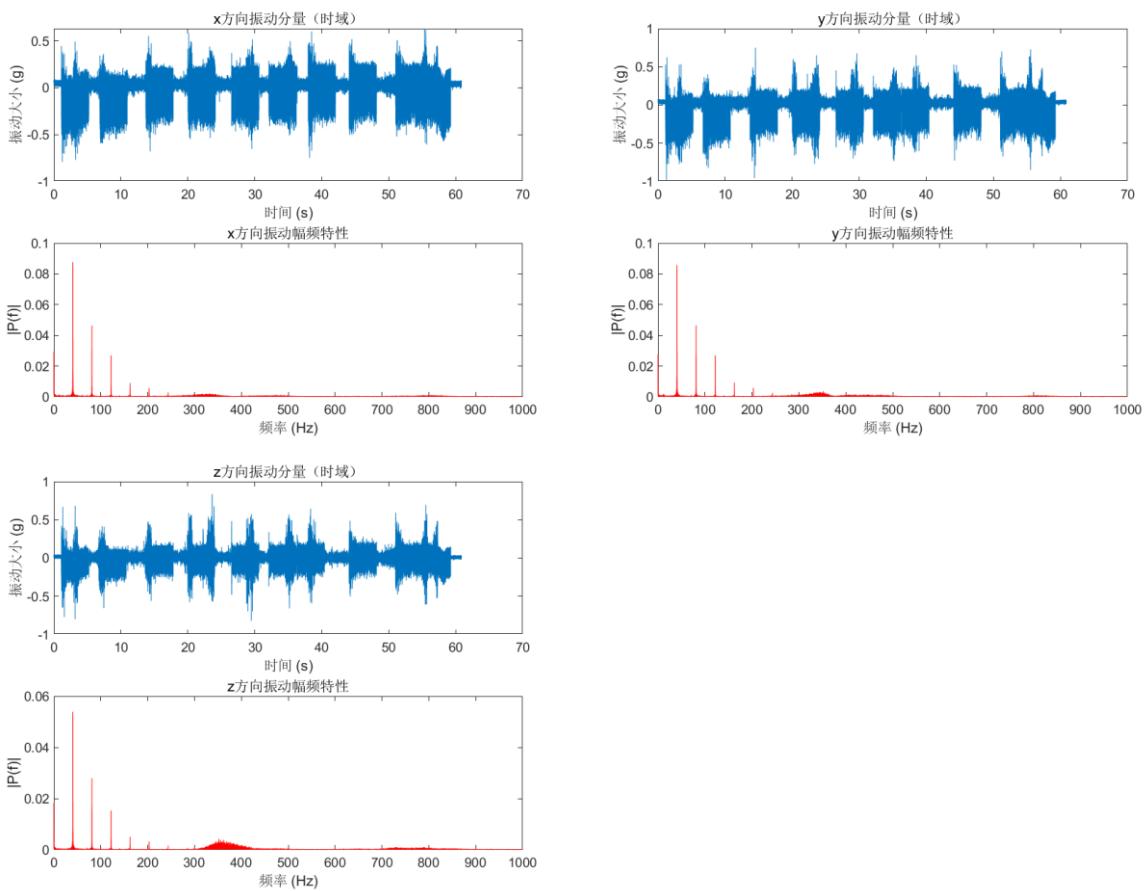
1、对于“*LTxt\_1*”与“*LTxt\_2*”，将测振仪所测得的xyz三轴信号的时域波形和频域波形记录在此处。

*LTxt\_1*：（如下面三张图所示）





LTxt\_2: (如下面三张图所示)



2、分析波形，分别从时域与频域角度分析振动测试波形与xy 平台运动的关系，回答下列问题

- a. 对比 LTxt\_1 与 LTxt\_2 的振动时域波形（时域幅值、持续时间），分析路径光滑度对振动强度的影响。

答：很明显，低密度路径执行结果的振动时域波形充满了尖刺，整体幅值也较大；而高密度路径执行结果的振动时域波形则基本没有尖刺，更多时间中幅值处于较低水平。这说明路径越光滑，振动强度越低。

- b. 在振动信号中是否观察到周期性冲击？若存在，其与路径离散化频率（小线段密度）是否相关？

答：在振动信号中的确观察到周期性冲击，尤其是低密度路径执行结果更为显著。路径离散化频率越低，周期性冲击也越分散（即频率越低）。

c. 若高密度路径的振动能量集中在更低频段，试从机械谐振角度解释其与路径离散化的关系。

答：高密度路径由于其离散指令点间距更小，对运动控制系统构成的激励信号的频率更高。然而，一个物理系统的机械谐振频率是固定的。当激励频率远高于系统能响应的最高频率（即谐振频率）时，高频能量会被系统自然滤除，反而使得最终表现出来的振动能量集中在系统的低频谐振模态上。

d. 针对实验观测到的振动问题，提出至少两种抑制振动的工程措施。

答：① 对于较宽的振动频谱，或是存在多个共振峰的情况，或者振动是随机的、瞬态的，那么优先考虑增加阻尼的措施；② 如果频谱分析显示振动能量高度集中在某一个特定频率（例如与转速对应的频率），并且该频率非常稳定，那么动力吸振器是一个好的选择。

## 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

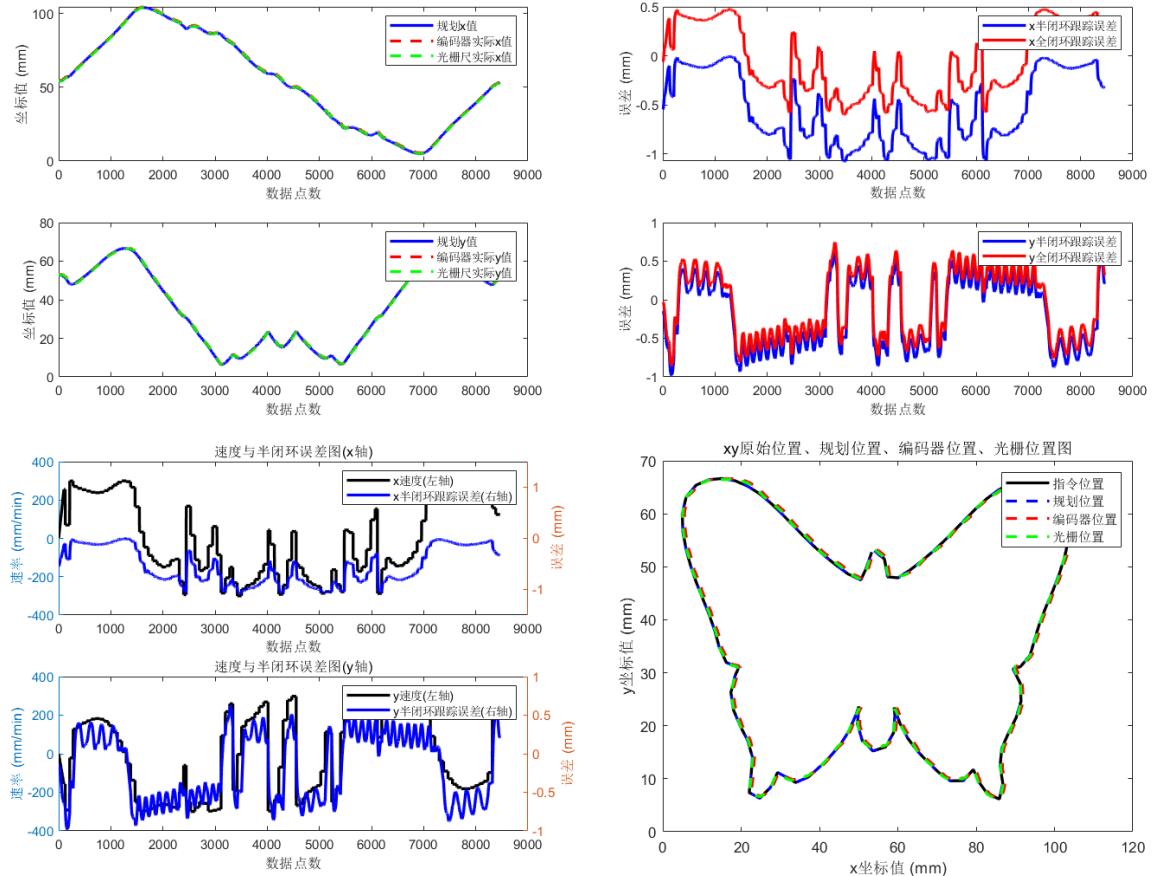
无。

附：

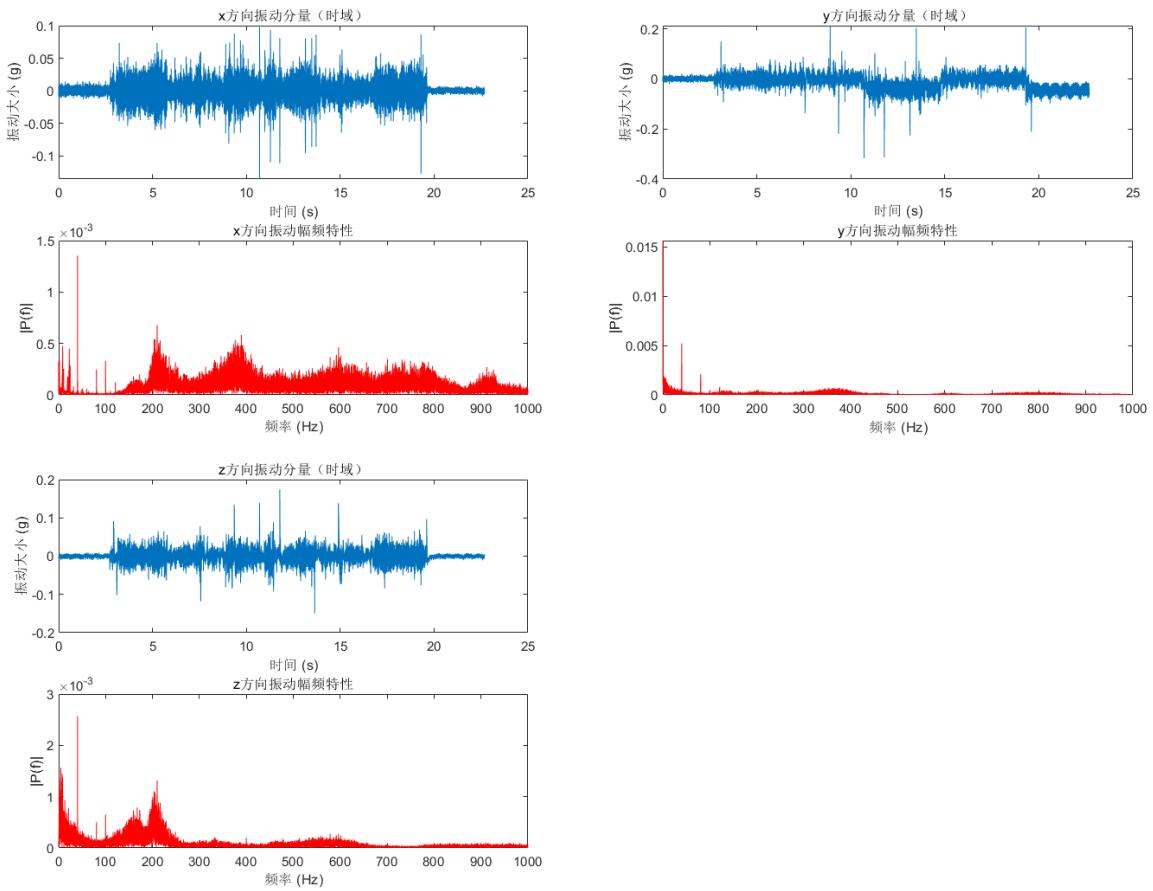
本人采集到的数据及相应分析（最后一排最右侧机器）。按照实验指导书要求，未开启 lookahead。

	LTxt_1	LTxt_2
x 半闭环跟踪误差最大值	1.074663	1.057388
x 半闭环跟踪误差方均根值	0.655961	0.633861
y 半闭环跟踪误差最大值	0.981997	1.006949
y 半闭环跟踪误差方均根值	0.480874	0.496638
x 全闭环跟踪误差最大值	0.596163	0.574240
x 全闭环跟踪误差方均根值	0.366916	0.362845
y 全闭环跟踪误差最大值	0.856086	0.890949
y 全闭环跟踪误差方均根值	0.446538	0.452631

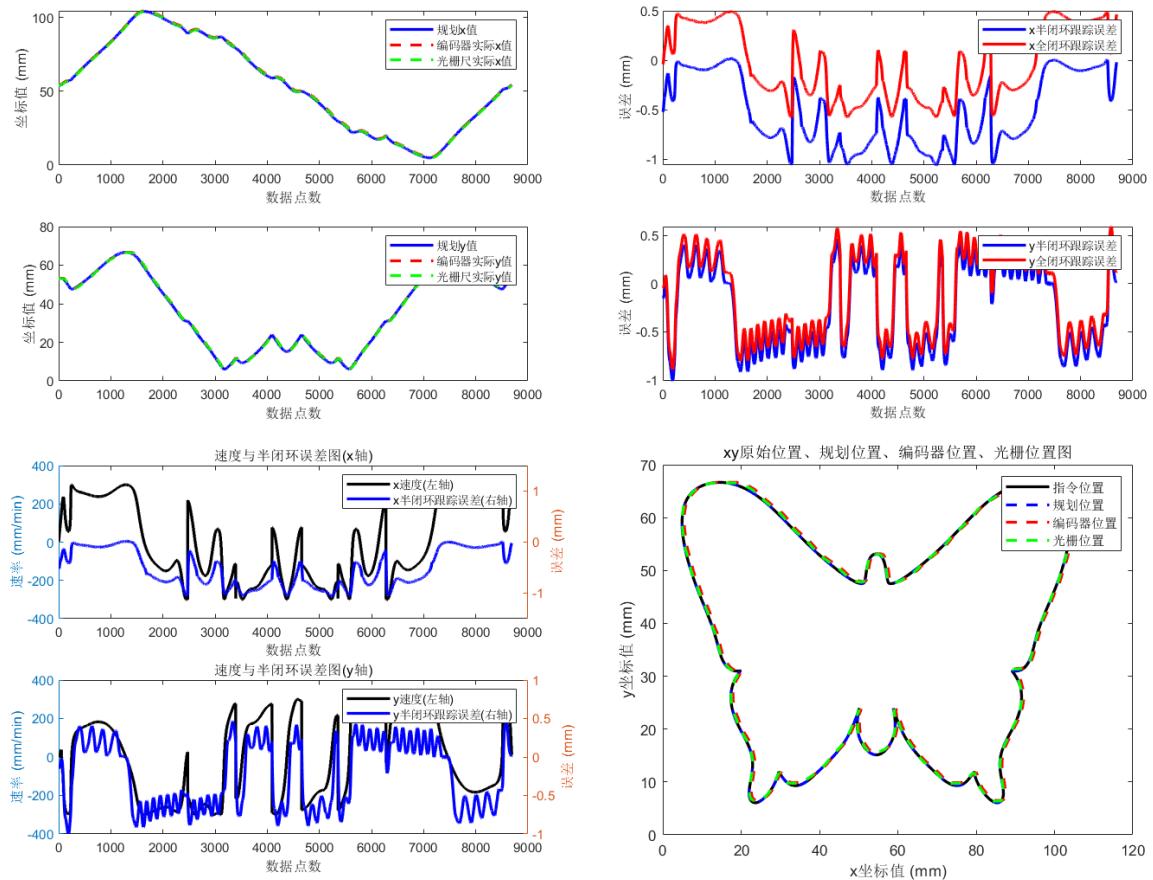
LTxt\_1：



振动：



LTxt\_2:



振动：

