



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 10 月 9 日

实验三 迭代学习控制实验

一、MATLAB 代码及数据分析

要求如下：

粘贴数据分析用的程序并适当添加注释

提取第一次实验的规划位置并保存的代码如下：

```
clear; clc; close all;
orig_parent_path = "E:\hitsz 课件资料\25 春 2025.9-10 运动控制\motion control\lab3\";
filename=orig_parent_path+'test2_wjk_xhw.fwtxt';
fileID=fopen(filename);
C=textscan(fileID,'%f %f %f %f %f %f %f %f');
fclose(fileID);
num=length(C{1});
P=zeros(num,2);
for i=1:num % 提取前两维
    P(i,1)=C{1}(i);
    P(i,2)=C{2}(i);
end
filename=orig_parent_path+'PTxt_2.Ptxt';
writematrix(P,filename,'Delimiter',' ','FileType','text');
```

计算误差并进行迭代学习的代码如下：

```
clear; clc; close all;
orig_parent_path = "E:\hitsz 课件资料\25 春 2025.9-10 运动控制\motion control\lab3\";
list_num='005';
filename=orig_parent_path+list_num+'.fwtxt';
fileID=fopen(filename);
C=textscan(fileID,'%f %f %f %f %f %f %f %f'); %按列读取并按列存储，C{1}为文件第一列，以此类推
fclose(fileID);
num=length(C{1});
if num == 0
    error('未读取到有效数据，请检查文件格式');
end

filename=orig_parent_path+'PTxt_2.Ltxt';
fileID=fopen(filename);
C1=textscan(fileID,'%f %f'); %按列读取并按列存储，C1{1}为文件第一列，以此类推
fclose(fileID);
num2=length(C1{1});
if num2 == 0
    error('未读取到有效数据，请检查文件格式');
```

```

end

filename=orig_parent_path+list_num+'_PT.Ptxt';
fileID=fopen(filename);
C0=textscan(fileID,'%f %f'); %按列读取并按列存储，C0{1}为文件第一列，以此类推
fclose(fileID);
num0=length(C0{1});
if num0 == 0
    error('未读取到有效数据，请检查文件格式');
end

Cx=0.8;
Cy=Cx;
E=zeros(num,2);
A=zeros(num,2);
for i=1:1:num %迭代
    E(i,1)=C1{1}(i)-C{3}(i);
    E(i,2)=C1{2}(i)-C{4}(i);
    A(i,1)=C0{1}(i)+Cx*E(i,1);
    A(i,2)=C0{2}(i)+Cy*E(i,2);
end
filename=orig_parent_path+list_num+'_Error.txt';
writematrix(E,filename,'Delimiter',' '); %存储误差数据
list_num='006';
filename=orig_parent_path+list_num+'_PT.Ptxt'; %输出迭代出的输入文件
writematrix(A,filename,'Delimiter',' ','FileType','text');

%% 检验数据有效性
v=zeros(1,num-1);
T=0.002;
for i=1:1:num-1
    v(i)=(A(i+1,1)-A(i,1))/T;
end
V_MAX=max(abs(v))
E1_MAX=max(abs(E(:,1)))
E2_MAX=max(abs(E(:,2)))

```

进行误差分析与误差图形绘制的代码如下：

```

%% 读取存储的误差文件
clear; clc; close all;
orig_parent_path = 'E:\hitsz 课件资料\25 春 2025.9-10 运动控制\motion control\lab3\';
list_num='000';
filename=orig_parent_path+list_num+'_Error.txt';
fileID=fopen(filename);
E0=textscan(fileID,'%f %f'); %按列读取并按列存储，E0{1}为文件第一列，以此类推

```

```

fclose(fileID);
num0=length(E0{1});
if num0 == 0
    error('未读取到有效数据，请检查文件格式');
end

list_num='001';
filename=orig_parent_path+list_num+'_Error.txt';
fileID=fopen(filename);
E1=textscan(fileID,'%f %f'); %按列读取并按列存储，E1{1}为文件第一列，以此类推
fclose(fileID);
num1=length(E1{1});
if num1 == 0
    error('未读取到有效数据，请检查文件格式');
end

list_num='002';
filename=orig_parent_path+list_num+'_Error.txt';
fileID=fopen(filename);
E2=textscan(fileID,'%f %f'); %按列读取并按列存储，E2{1}为文件第一列，以此类推
fclose(fileID);
num2=length(E2{1});
if num2 == 0
    error('未读取到有效数据，请检查文件格式');
end

list_num='003';
filename=orig_parent_path+list_num+'_Error.txt';
fileID=fopen(filename);
E3=textscan(fileID,'%f %f'); %按列读取并按列存储，E3{1}为文件第一列，以此类推
fclose(fileID);
num3=length(E3{1});
if num3 == 0
    error('未读取到有效数据，请检查文件格式');
end

list_num='004';
filename=orig_parent_path+list_num+'_Error.txt';
fileID=fopen(filename);
E4=textscan(fileID,'%f %f'); %按列读取并按列存储，E4{1}为文件第一列，以此类推
fclose(fileID);
num4=length(E4{1});
if num4 == 0
    error('未读取到有效数据，请检查文件格式');
end

```

```

list_num='005';
filename=orig_parent_path+list_num+'_Error.txt';
fileID=fopen(filename);
E5=textscan(fileID,'%f %f'); %按列读取并按列存储，E5{1}为文件第一列，以此类推
fclose(fileID);
num5=length(E5{1});
if num5 == 0
    error('未读取到有效数据，请检查文件格式');
end

%% 计算各误差数据的最大值与均方根
T=0.002;
plot_t0=0:T:(num0-1)*T;
plot_t1=0:T:(num1-1)*T;
plot_t2=0:T:(num2-1)*T;
plot_t3=0:T:(num3-1)*T;
plot_t4=0:T:(num4-1)*T;
plot_t5=0:T:(num5-1)*T;

error_analysis(E0{1}, "第 0 次 x 方向");
error_analysis(E1{1}, "第 1 次 x 方向");
error_analysis(E2{1}, "第 2 次 x 方向");
error_analysis(E3{1}, "第 3 次 x 方向");
error_analysis(E4{1}, "第 4 次 x 方向");
error_analysis(E5{1}, "第 5 次 x 方向");

error_analysis(E0{2}, "第 0 次 y 方向");
error_analysis(E1{2}, "第 1 次 y 方向");
error_analysis(E2{2}, "第 2 次 y 方向");
error_analysis(E3{2}, "第 3 次 y 方向");
error_analysis(E4{2}, "第 4 次 y 方向");
error_analysis(E5{2}, "第 5 次 y 方向");

%% 绘制历次运行误差
figure;
plot(plot_t0,E0{1});
hold on;
plot(plot_t1,E1{1});
hold on;
plot(plot_t2,E2{1});
hold on;
plot(plot_t3,E3{1});
hold on;
plot(plot_t4,E4{1});
hold on;

```

```

plot(plot_t5,E5{1});
hold on;
title('历次运行 X 轴误差','FontSize',10);
xlabel('T Time(s)','FontSize',10);
ylabel('E Error(mm)','FontSize',10);
legend('k=0','k=1','k=2','k=3','k=4','k=5');
filename = orig_parent_path + "Error_x.png";
saveas(gcf, filename);

```

```

figure;
plot(plot_t0,E0{2});
hold on;
plot(plot_t1,E1{2});
hold on;
plot(plot_t2,E2{2});
hold on;
plot(plot_t3,E3{2});
hold on;
plot(plot_t4,E4{2});
hold on;
plot(plot_t5,E5{2});
hold on;
title('历次运行 Y 轴误差','FontSize',10);
xlabel('T Time(s)','FontSize',10);
ylabel('E Error(mm)','FontSize',10);
legend('k=0','k=1','k=2','k=3','k=4','k=5');
filename = orig_parent_path + "Error_y.png";
saveas(gcf, filename);

```

```

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

```

进行轨迹绘制的代码如下：

```
%% 读取轨迹数据
orig_parent_path = 'E:\hitsz 课件资料\25 春 2025.9-10 运动控制\motion control\lab3\';
list_num='000';
filename=orig_parent_path+'PTxt_2.Ltxt';
fileID=fopen(filename);
C=textscan(fileID,'%f %f'); %按列读取并按列存储，C{1}为文件第一列，以此类推
fclose(fileID);
num=length(C{1});
if num == 0
    error('未读取到有效数据，请检查文件格式');
end

filename=orig_parent_path+list_num+'.fwtxt';
fileID=fopen(filename);
C0=textscan(fileID,'%f %f %f %f %f %f %f %f'); %按列读取并按列存储，C0{1}为文件第一列，
以此类推
fclose(fileID);
num=length(C0{1});
if num == 0
    error('未读取到有效数据，请检查文件格式');
end

list_num='001';
filename=orig_parent_path+list_num+'.fwtxt';
fileID=fopen(filename);
C1=textscan(fileID,'%f %f %f %f %f %f %f %f'); %按列读取并按列存储，C1{1}为文件第一列，
以此类推
fclose(fileID);
num=length(C1{1});
if num == 0
    error('未读取到有效数据，请检查文件格式');
end

%% 绘制轨迹
figure;
plot(C{1},C{2});
hold on;
plot(C0{3},C0{4});
hold on;
plot(C0{5},C0{6});
hold on;
plot(C1{3},C1{4});
hold on;
plot(C1{5},C1{6});
```

```

hold on;
title('规划轨迹与 k=0、k=1 时的编码器、光栅轨迹','FontSize',10);
xlabel('X Pos(mm)','FontSize',10);
ylabel('Y Pos(mm)','FontSize',10);
legend('规划轨迹','k=0 编码器','k=0 光栅','k=1 编码器','k=1 光栅');
filename = orig_parent_path + "trajectory.png";
saveas(gcf, filename);

```

振动分析脚本与第一次实验完全相同（除了读取的文件名不同），此处略去。

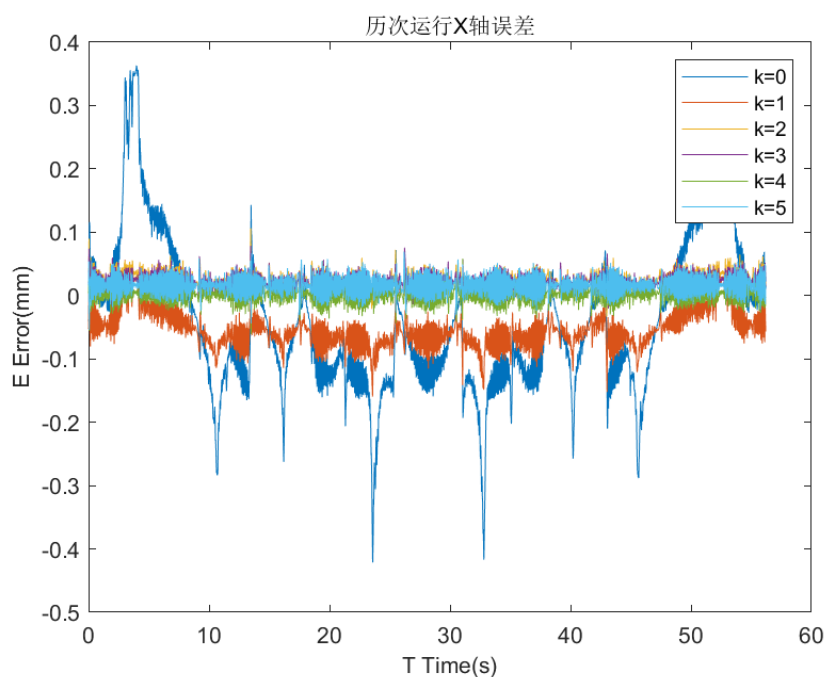
二、波形绘制与分析

要求如下：

1、将几次运行的 $E_{i,k,x}$ 绘制在一张图中，计算其最大值变化，均方根值变化；

（表格中单位均为 mm）

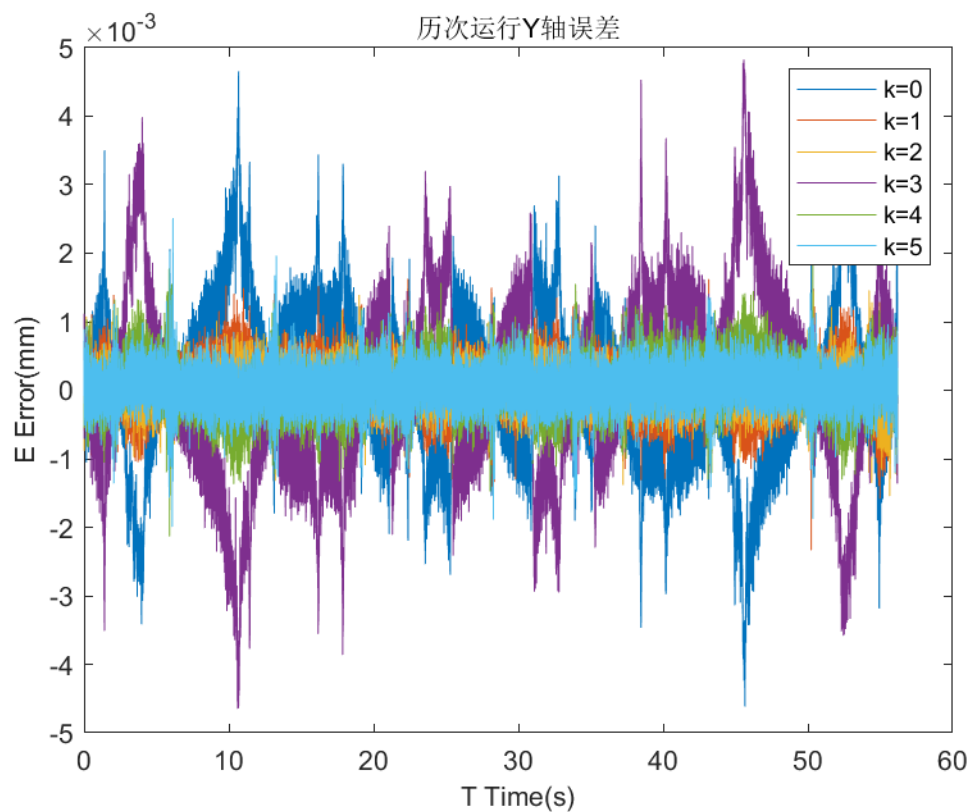
	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$
最大值	0.421341	0.159529	0.106163	0.078434	0.061034	0.069146
均方根值	0.130832	0.060463	0.024938	0.023014	0.013515	0.021148



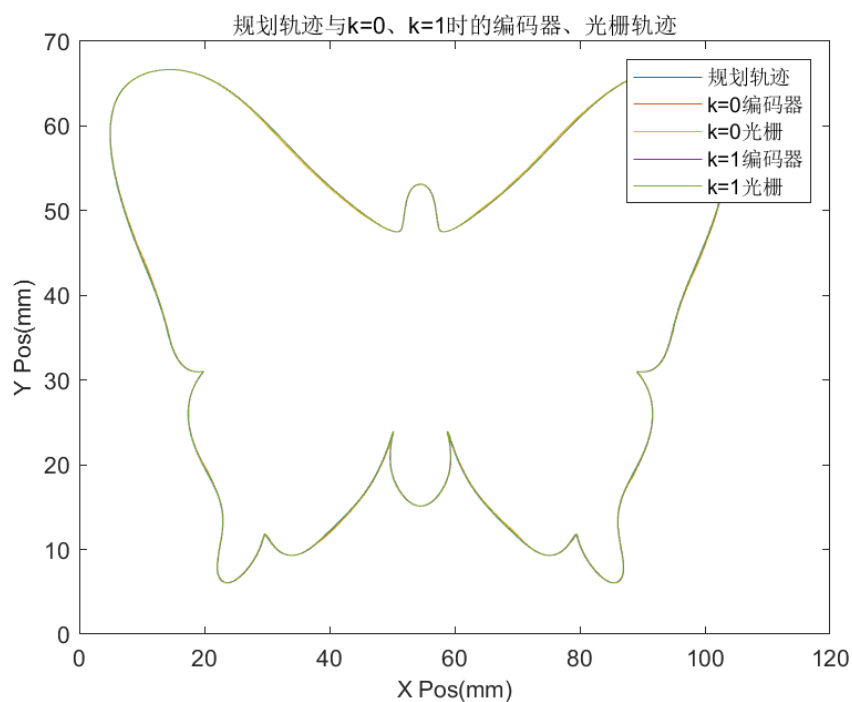
2、将几次运行的 $E_{i,k,y}$ 绘制在一张图中，计算其最大值变化，均方根值变化；

（表格中单位均为 mm）

	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$
最大值	0.004656	0.002334	0.001544	0.004828	0.002134	0.002512
均方根值	0.001115	0.000357	0.000285	0.001339	0.000382	0.000291



3、在Matlab 中，将xy 规划位置， $k=0$ ， $k=1$ 编码器位置，光栅位置绘制在一张图中。



4、观察上述曲线，回答下列问题，

- 请分析几次迭代过程中 $E_{i,k,y}$ 的最大值和均方根值变化趋势，说明迭代学习控制对位置误差的改善效果。
- 若将学习率 C_x/C_y 调整为 0.5 或 1.0，预测误差收敛特性会发生什么变化？请说明理论依据。

答：a. 迭代过程中 $E_{i,k,y}$ 的最大值和均方根值变化趋势及 ILC 对位置误差的改善效果：

在迭代学习控制（ILC）过程中，位置误差 $E_{i,k,y}$ （其中 i 表示迭代次数， k 表示时间点， y 表示位置方向）的最大值和均方根值随着迭代次数的增加而呈现下降趋势。具体分析如下：

- **最大值变化趋势：**在初始迭代中，由于系统尚未学习，位置误差的最大值通常较大。随着迭代进行，ILC 利用前一次迭代的误差信息调整控制输入，使系统逐渐逼近期望轨迹，因此误差最大值会逐渐减小。
- **均方根值变化趋势：**RMS 误差反映了整个时间序列上的误差整体大小。在 ILC 过程中，RMS 误差同样会随着迭代而减小。

ILC 对位置误差的改善效果：ILC 通过重复学习机制，不断修正控制输入，从而有效降低位置误差。最大值和 RMS 值的下降趋势表明 ILC 能够系统性地减少跟踪误差，提高位置控制精度。这种改善源于 ILC 的“记忆”特性，即每次迭代都积累经验，逐步消除重复性误差。如果迭代次数足够，误差可以收敛到一个较小值，甚至为零（理想情况下）。

b. 学习率 C_x/C_y 调整为 0.5 或 1.0 对误差收敛特性的影响及理论依据

在 ILC 中，学习率 C_x/C_y 是控制误差收敛速度和解稳定性的关键参数。调整学习率会影响收敛特性如下：

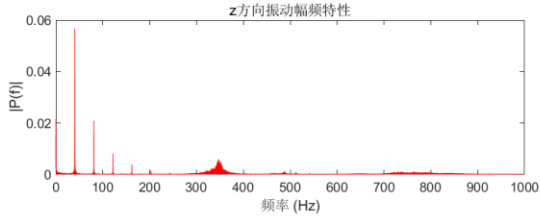
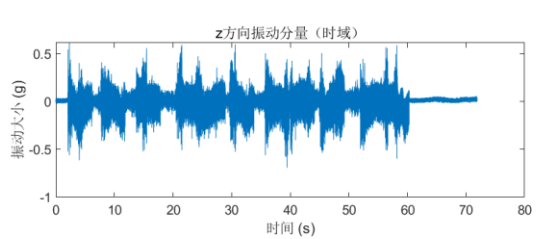
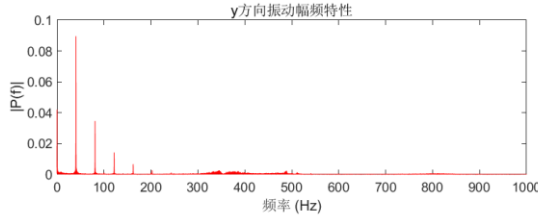
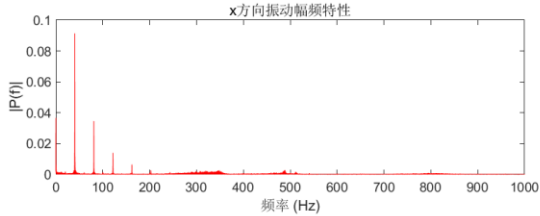
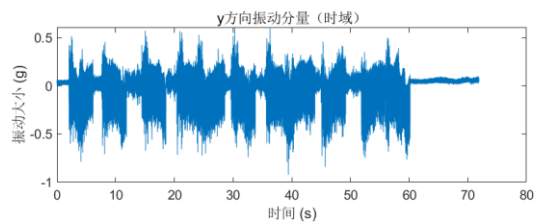
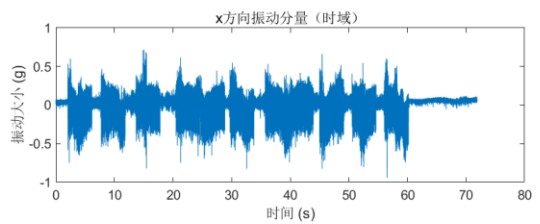
- **学习率调整为 0.5：**
 - **预测变化：**误差收敛速度会变慢，但系统稳定性增强。具体来说，误差的最大值和 RMS 值会以较慢的速率下降，可能需要更多迭代次数才能达到相同精度，但收敛过程更平稳，不易出现振荡。
 - **理论依据：**ILC 的收敛条件通常要求学习率与系统增益的乘积满足一定范数条件。对于线性系统，误差更新方程可表示为 $e_{k+1} = (I - CL)e_k$ ，其中 L 是系统增益矩阵。如果学习率 C 较小，则 $\|I - CL\|$ 可能接近 1 但小于 1，保证误差指数收敛，但收敛速率较慢。
- **学习率调整为 1.0：**
 - **预测变化：**误差收敛速度可能加快，但系统稳定性风险增加。误差可能快速下降，但在某些情况下可能出现振荡或发散，尤其当系统存在非线性或建模误差时。
 - **理论依据：**当学习率 $C=1.0$ 时，收敛条件取决于系统增益 L 。如果 L 是单位矩阵或接近单位矩阵，则 $\|I - CL\|$ 可能接近 0，误差快速收敛。但如果 L 的范数较大或系统有不稳定性， $\|I - CL\|$ 可能大于 1，导致误差发散。因此，学习率为 1.0 时需谨慎，通常需要系统满足严格的正实条件或增益条件。

三、测振仪测试结果

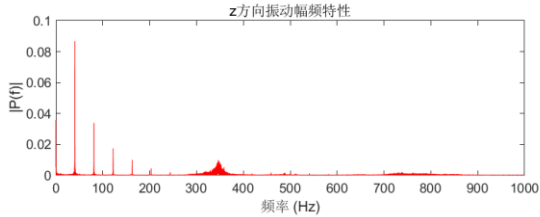
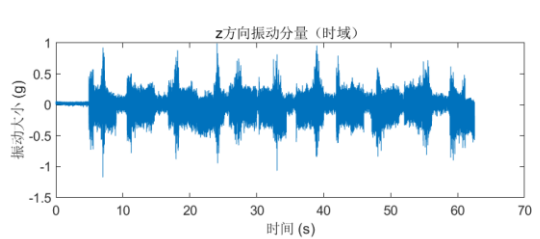
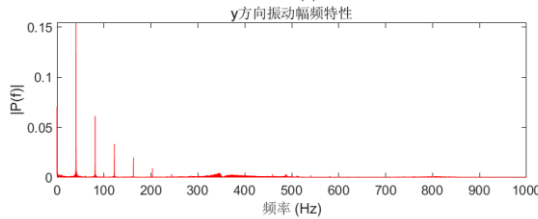
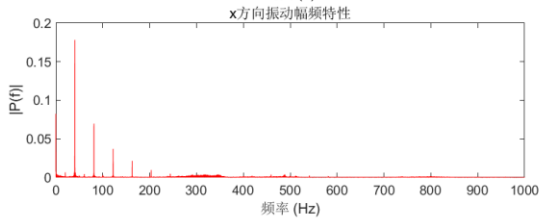
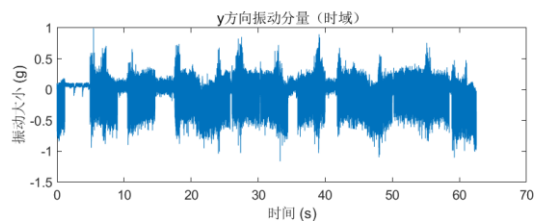
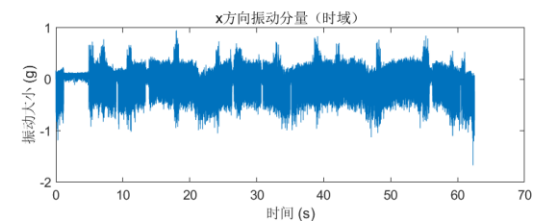
要求如下：

1、对于 $k=0\sim5$ ，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。

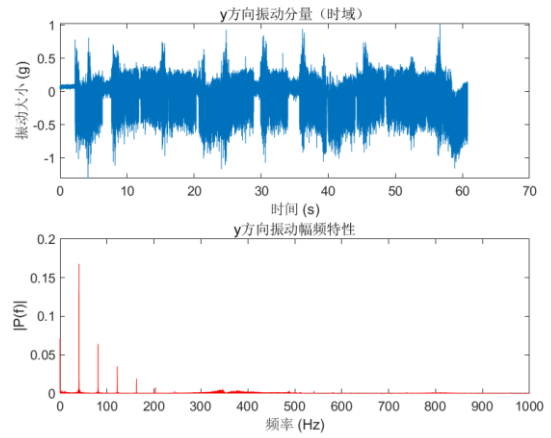
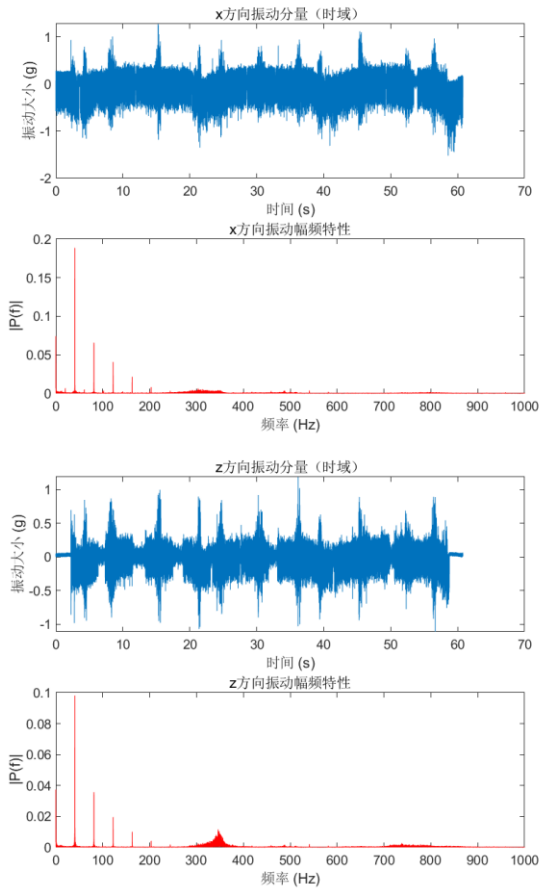
$k=0$ ：



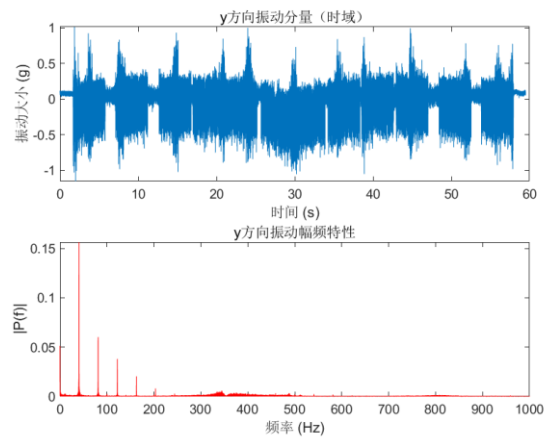
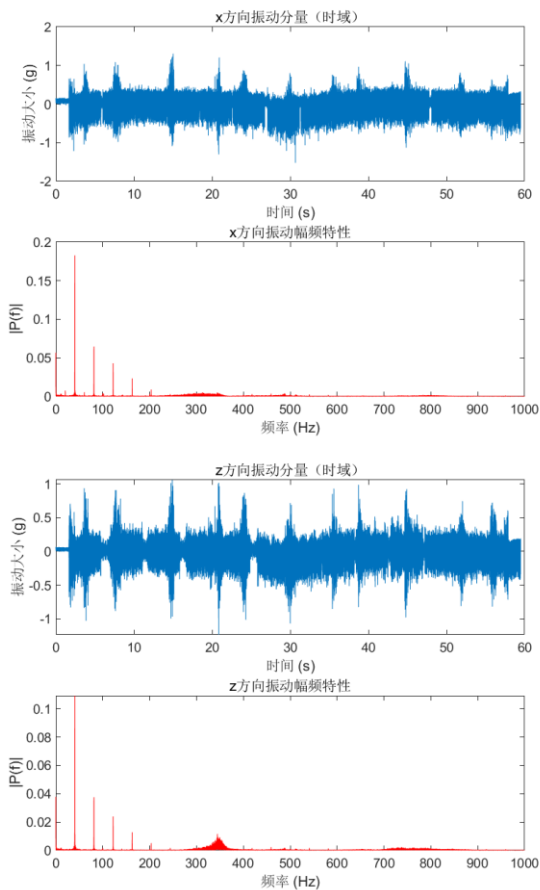
k=1:



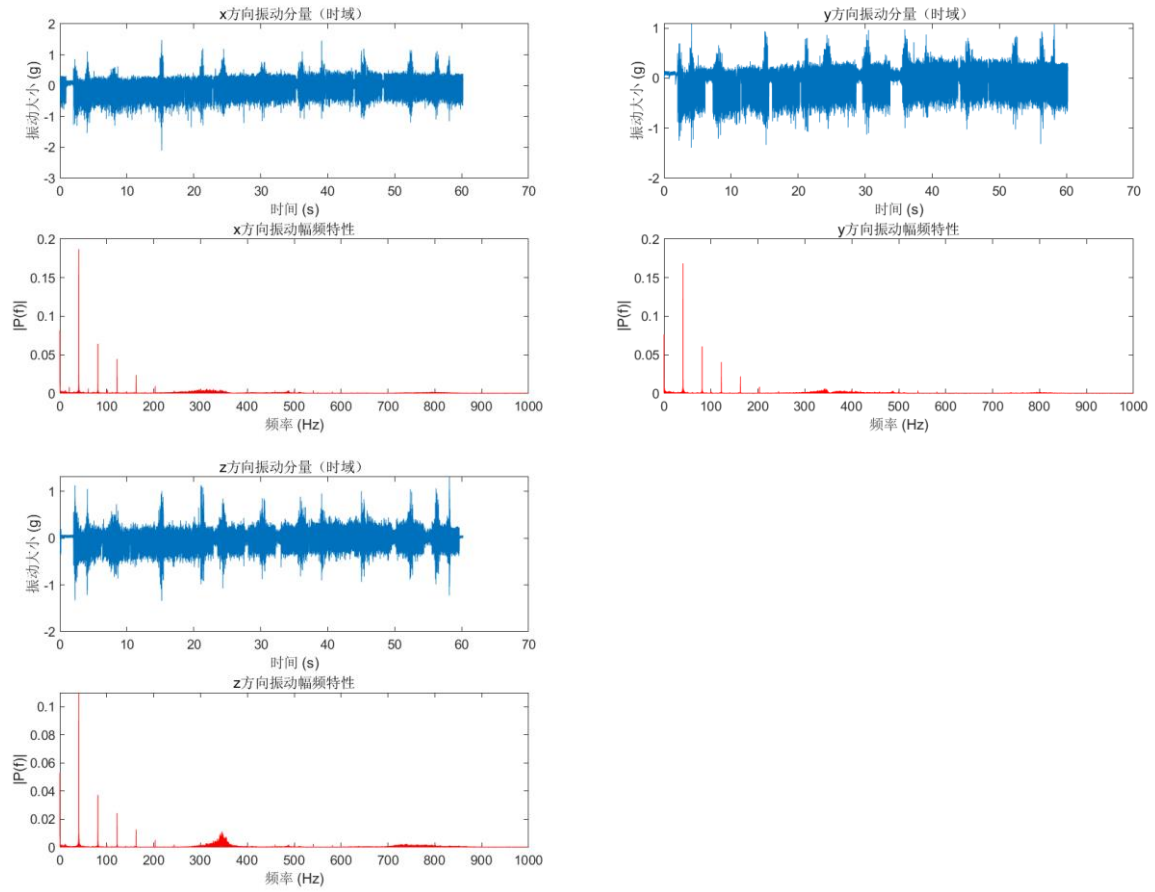
k=2:



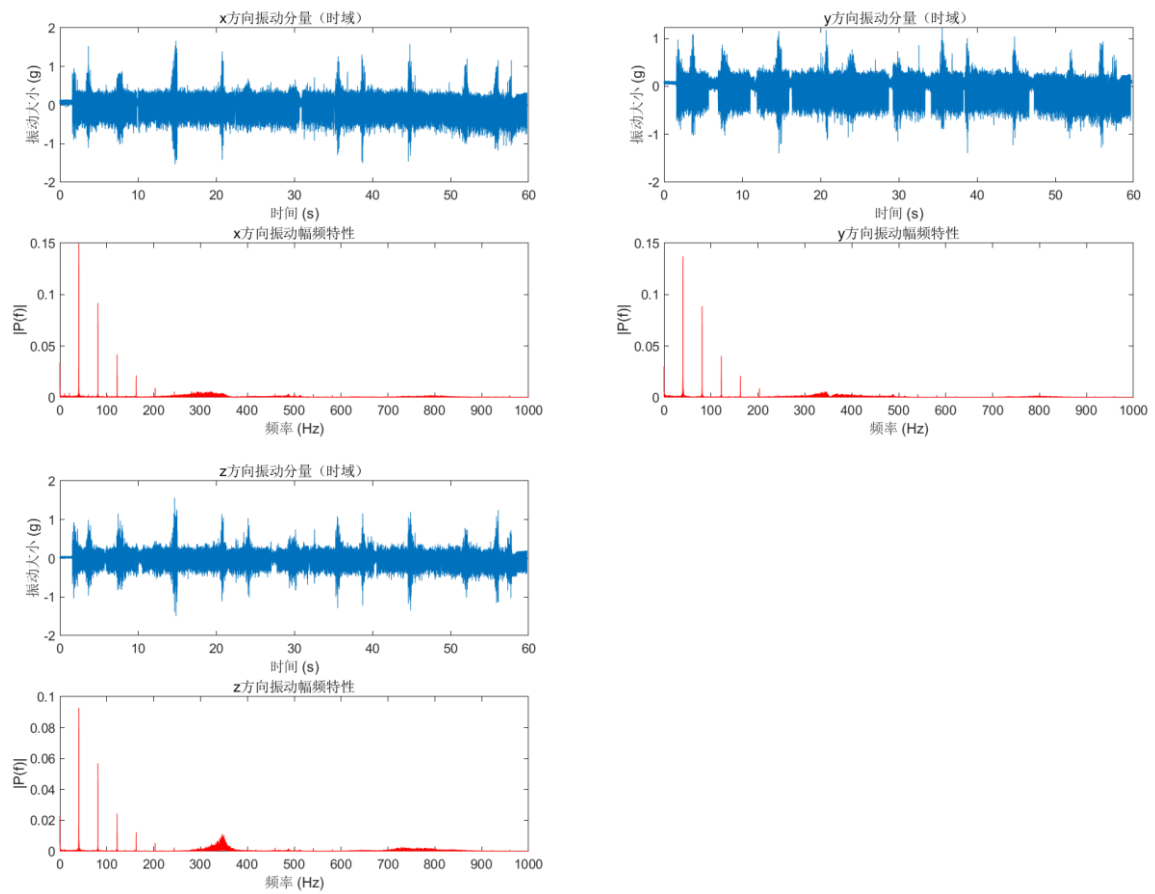
k=3:



k=4:



k=5:



2、分析波形，结合振动数据与位置误差曲线，分析迭代学习对机械振动及轨迹跟踪精度的影响。

答：① 对机械振动的影响：从图中可以看出，随着迭代学习的进行，振动能量更集中于低频段，高频分量下降。但是，振动的幅值反而有所增大，可能是学习率较大导致的。设计良好的迭代学习，能学习到一个“反振动”的前馈信号。例如，为了在到达目标点前抑制过冲和振动，ILC 会生成一个微小的、提前的“反向加速度”脉冲，主动抵消系统的振荡趋势。

② 对跟踪精度的影响：在初始迭代中，由于系统尚未学习，位置误差通常较大。随着迭代进行，ILC 利用前一次迭代的误差信息调整控制输入，使系统逐渐逼近期望轨迹，因此误差会逐渐减小，跟踪精度不断提高。

四、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

遇到的问题：workbench 数据保存不全，导致无法与规划位置对应，跟踪误差计算不正确。

可考虑计算轮廓误差，不过这超出了本次实验的要求，之后可以试试。

收获：感受到了迭代学习控制（ILC）对误差的抑制作用。