

---

## 1、实验名称及目的

**基础实验：**调节 PID 控制器的相关参数改善系统控制性能，并记录超调量和调节时间，得到一组满意的参数。在得到满意参数后，对系统进行扫频以绘制 Bode 图，观察系统幅频响应、相频响应曲线，分析其稳定裕度。

## 2、实验原理

多旋翼位置控制器的 PID 参数调节原理通常是通过实验和系统响应分析的方式进行调参。调参的目标是寻找最佳的 PID 参数组合，使得控制系统在快速、稳定和鲁棒的同时，能够准确地跟踪期望位置。

### 1、比例增益的调节：

增大比例增益( $K_p$ )可以加快系统的响应速度，但过大的比例增益可能引起系统的超调、振荡或不稳定。因此，需要逐渐增加比例增益，并观察系统响应的变化。如果响应过度振荡或不稳定，需要适当减小比例增益。一般来说，合适的比例增益应该能够提供足够的控制力度，同时保持系统的稳定性。

### 2、积分时间的调节：

积分时间( $T_i$ )用于补偿系统存在的持续性偏差。较大的积分时间可以更好地消除静态误差，但过大的积分时间可能导致系统的响应过度调整、超调或振荡。因此，需要逐渐增加积分时间，并观察系统响应的变化。如果响应过度调整或出现振荡，需要适当减小积分时间。适当的积分时间取决于系统的特性和控制需求。

### 3、微分时间的调节：

微分时间( $T_d$ )用于抑制系统响应中的快速变化部分。过大的微分时间可能引入额外的噪声或不稳定，而过小的微分时间可能无法有效地抑制系统的快速变化。因此，需要逐渐增加微分时间，并观察响应的变化。如果响应不稳定或出现振荡，需要适当减小微分时间。合适的微分时间应该能够平滑系统的响应并抑制快速变化。

调参是一个迭代过程，需要不断尝试不同的参数组合，并通过实验观察系统响应的表现。可以结合手动试错和自动调参算法来进行参数调节。当完成 PID 参数调节后，可以通过扫频实验来绘制系统的 Bode 图。Bode 图显示系统对不同频率输入信号的增益和相位响应。绘制 Bode 图的原理如下：

#### 1、输入频率扫描：

在扫频实验中，输入信号的频率会在一定范围内进行扫描。通常采用等间隔或对数间隔的频率值。

#### 2、测量输出信号：

对于每个输入频率，测量系统输出的响应信号。可以使用传感器测量位置或姿态的反馈信号。

#### 3、计算增益和相位：

根据输入和输出信号，计算系统的增益和相位。增益可以表示为输出幅度与输入幅度的比值，通常以分贝(dB)为单位。相位表示系统输出与输入信号之间的相对延迟。

#### 4、绘制 Bode 图：

将增益和相位作为频率的函数，绘制 Bode 图。通常使用对数坐标来表示频率，并将增益和相位用线性或极坐标图形表示。绘制 Bode 图：将增益和相位作为频率的函数，绘制 Bode 图。通常使用对数坐标来表示频率，并将增益和相位用线性或极坐标图形表示。

详细内容请参考上层路径文献[3]第 10 讲\_实验六\_定点位置控制器设计实验.pptx，文献[4]第 12 讲\_基于半自主自驾仪的位置控制 V2.pptx。

### 3、实验效果

调节 PID 控制器的参数，尝试得到一组满意的参数，并使用 MATLAB 系统分析工具得到整个开环系统的 Bode 图，查看相应闭环系统的相位裕度和幅值裕度。

### 4、文件目录

| 文件夹/文件名称         |                           | 说明               |
|------------------|---------------------------|------------------|
| icon             | Init.m                    | 模型初始化参数文件。       |
|                  | FlightGear.png            | FlightGear 硬件图片。 |
|                  | pixhawk.png               | Pixhawk 硬件图片。    |
|                  | SupportedVehicleTypes.pdf | 机架类型修改说明文件。      |
|                  | F450.png                  | F450 飞机模型图片。     |
| PosCtrl_tune.slx |                           | Simulink 仿真模型文件。 |
| Init_control.m   |                           | 控制器初始化参数文件。      |

### 5、运行环境

| 序号 | 软件要求             | 硬件要求                       |    |
|----|------------------|----------------------------|----|
|    |                  | 名称                         | 数量 |
| 1  | Windows 10 及以上版本 | 笔记本/台式电脑 <sup>①</sup>      | 1  |
| 2  | RflySim 平台免费版    | Pixhawk 6C 飞控 <sup>②</sup> | 1  |
| 3  | MATLAB 2017B 及以上 | 数据线、杜邦线等                   | 若干 |

①：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com/1.1InstallMethod.html>

②：须保证平台安装时的编译命令为：px4\_fmu-v6c\_default，固件版本为：1.13.3。其他配套飞控请见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>

③：本实验演示所使用的遥控器为：天地飞 WFLY-ET10、配套接收器为：WFLY-RF209S。遥控器相关配置见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>

## 6、实验步骤

### Step 1:

#### 模型初始设置

PID 参数步骤与姿态控制的参数调试步骤相同。先调试内环速度环，再调试外环的位置环，先调高度再调水平位置。调试文件在” e6-PositionCtrl\PID-Config\6.2\PosCtrl\_tune.slx” 文件夹中。 调节参数的初始状态应是飞行器处于高空悬停状态，将初始高度设置为 100m, 电机的初始转速设置为 557.1420rad/s, 这个初始条件对应于飞行器在空中 100m 处悬停。修改 “Init\_control.m” 文件中的对应参数如下。

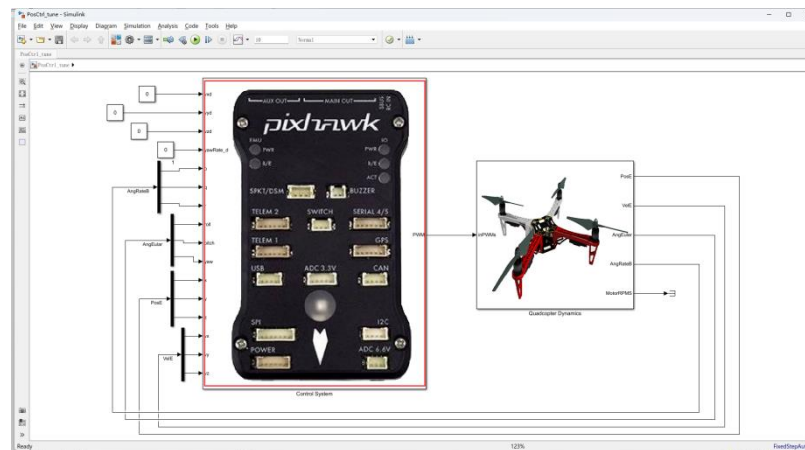
```
ModelInit_PosE = [0, 0, -100];  
ModelInit_VelB = [0, 0, 0];  
ModelInit_AngEuler = [0, 0, 0];  
ModelInit_RateB = [0, 0, 0];  
ModelInit_Rads = 557.142;
```

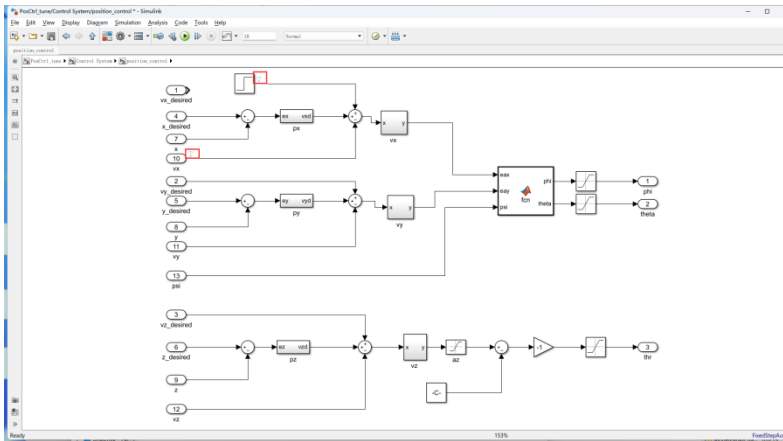
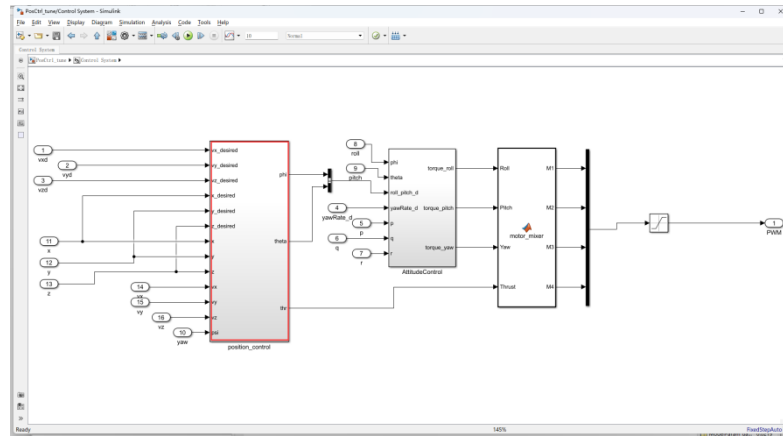
### Step 2:

#### 速度控制环参数调节:

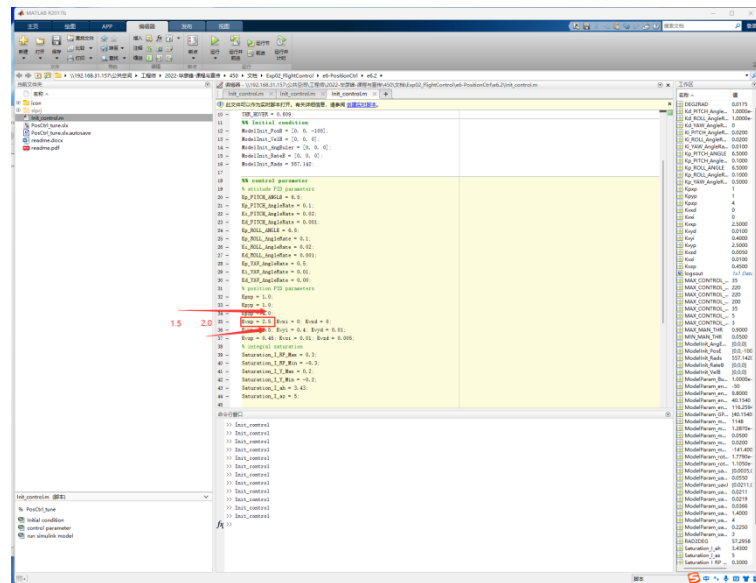
首先调节内环 PID 参数。 打开 “e6-PositionCtrl\PID-Config\6.2\PosControl\_tune.slx” 文件中的 “Control System” 子模块中的 “position\_control” 模块，即为位置控制系统模型。将其中 x 通道的速度期望部分换成阶跃输入，并将输入输出设置为 “Enable Data logging”

。

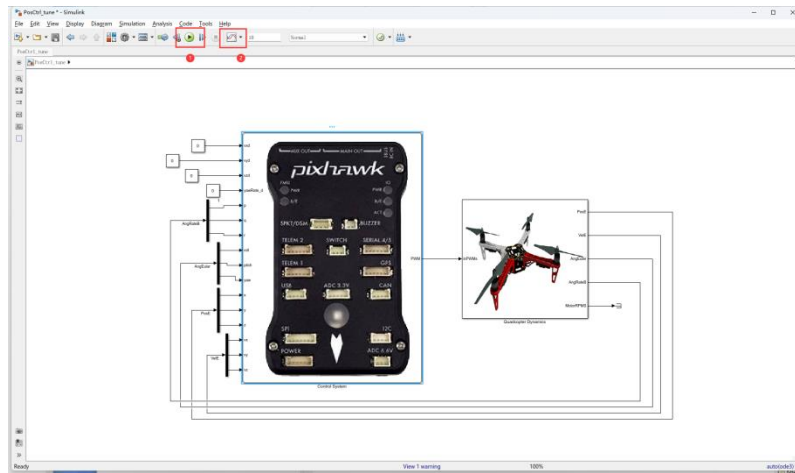




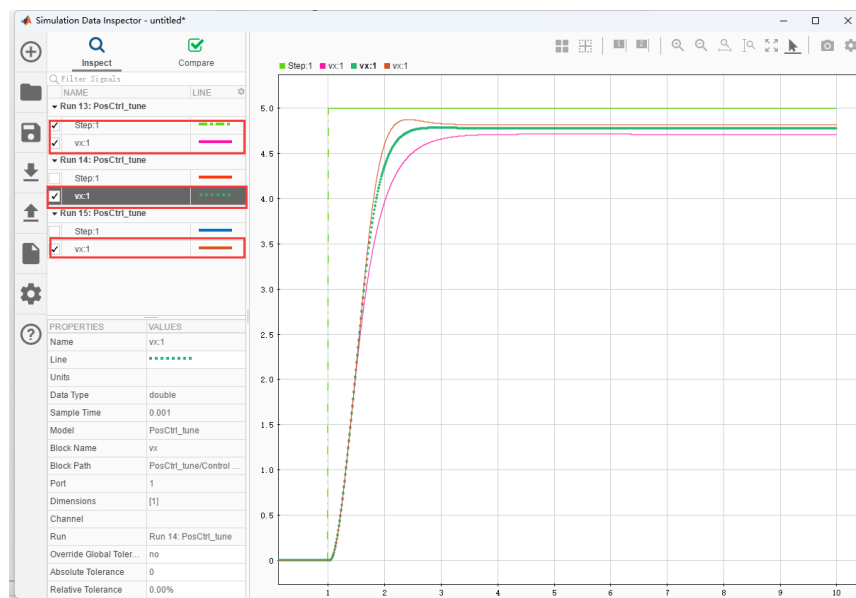
在“Init\_control.m”文件中修改内环 PID 参数的值。先设定比例项参数，积分和微分参数设为 0，Kvxp 参数设置分别为 1.5、2.0 和 2.5，下图所示。



依次运行“Init\_control.m”文件。点击 Simulink 的“Run”按钮开始仿真，在“Simulation Data Inspector”中查看输入输出波形，如下图所示。



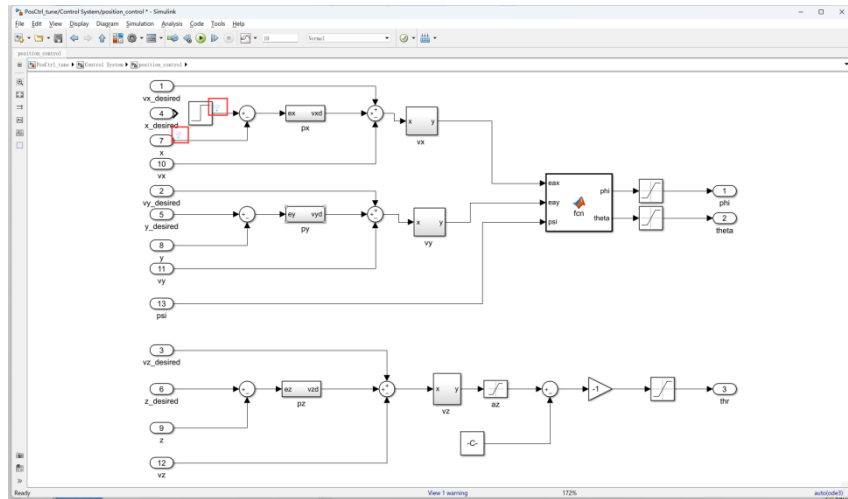
由小到大逐渐增大比例项系数值，得到阶跃响应曲线如图。



### Step 3:

### 位置环参数调节:

使用步骤二中得到的速度环参数，在“PosControl\_tune.slx”文件中，将“x\_desired”换为阶跃输入，并将阶跃输入和“x”信号线设置为“Enable Data Logging”，如下图所示。



如下图在“Init\_control.m”由小增大位置环比例项系数，即“Kp<sub>px</sub>”的值，分别为 0.6、0.8、1.0 和 1.2。

```

% Init_control.m
% 初始化控制参数

% 系统参数
T = 0.01; % 采样周期 (s)
N = 1000; % 总采样点数

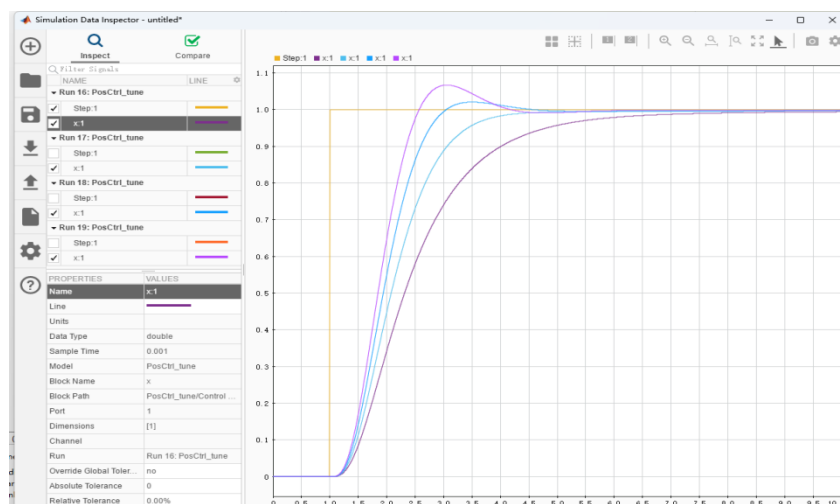
% 初始条件
x0 = 0; y0 = 0; z0 = 0; % 初始位置 (m)
vx0 = 0; vy0 = 0; vz0 = 0; % 初始速度 (m/s)
phi0 = 0; theta0 = 0; % 初始姿态 (rad)
psi0 = 0; % 初始偏航角 (rad)

% 控制参数
Kp_px = 0.6; % 位置环比例增益 (1/s^2)
Kd_px = 0.001; % 位置环微分增益 (1/s)
Ki_px = 0.001; % 位置环积分增益 (1/s^3)
Kp_py = 0.8; % 位置环比例增益 (1/s^2)
Kd_py = 0.002; % 位置环微分增益 (1/s)
Ki_py = 0.002; % 位置环积分增益 (1/s^3)
Kp_pz = 1.0; % 位置环比例增益 (1/s^2)
Kd_pz = 0.003; % 位置环微分增益 (1/s)
Ki_pz = 0.003; % 位置环积分增益 (1/s^3)
Kp_phi = 1.2; % 姿态环比例增益 (1/s^2)
Kd_phi = 0.004; % 姿态环微分增益 (1/s)
Ki_phi = 0.004; % 姿态环积分增益 (1/s^3)
Kp_theta = 1.2; % 姿态环比例增益 (1/s^2)
Kd_theta = 0.004; % 姿态环微分增益 (1/s)
Ki_theta = 0.004; % 姿态环积分增益 (1/s^3)
Kp_psi = 1.2; % 姿态环比例增益 (1/s^2)
Kd_psi = 0.004; % 姿态环微分增益 (1/s)
Ki_psi = 0.004; % 姿态环积分增益 (1/s^3)

% 饱和限幅
sat_x_max = 10; sat_x_min = -10; % x轴位置饱和限幅 (m)
sat_y_max = 10; sat_y_min = -10; % y轴位置饱和限幅 (m)
sat_z_max = 10; sat_z_min = -10; % z轴位置饱和限幅 (m)
sat_phi_max = 1.57; sat_phi_min = -1.57; % phi轴姿态饱和限幅 (rad)
sat_theta_max = 1.57; sat_theta_min = -1.57; % theta轴姿态饱和限幅 (rad)
sat_psi_max = 1.57; sat_psi_min = -1.57; % psi轴姿态饱和限幅 (rad)

```

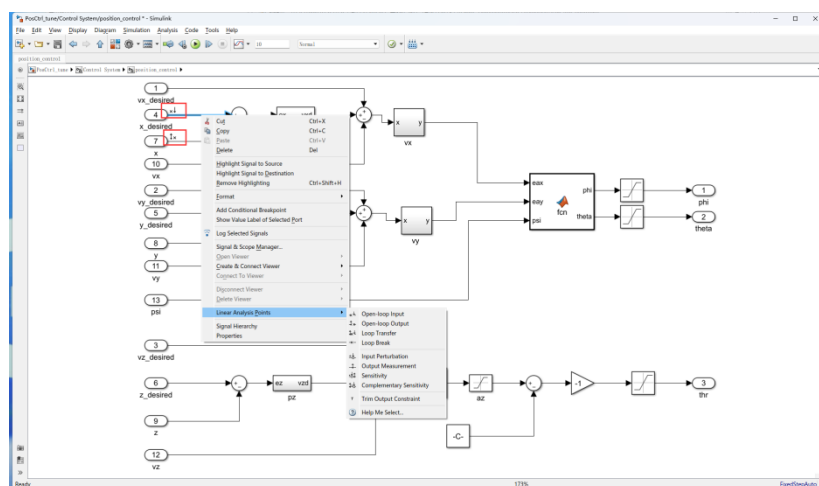
在“Simulation Data Inspector”观察阶跃响应。如下图



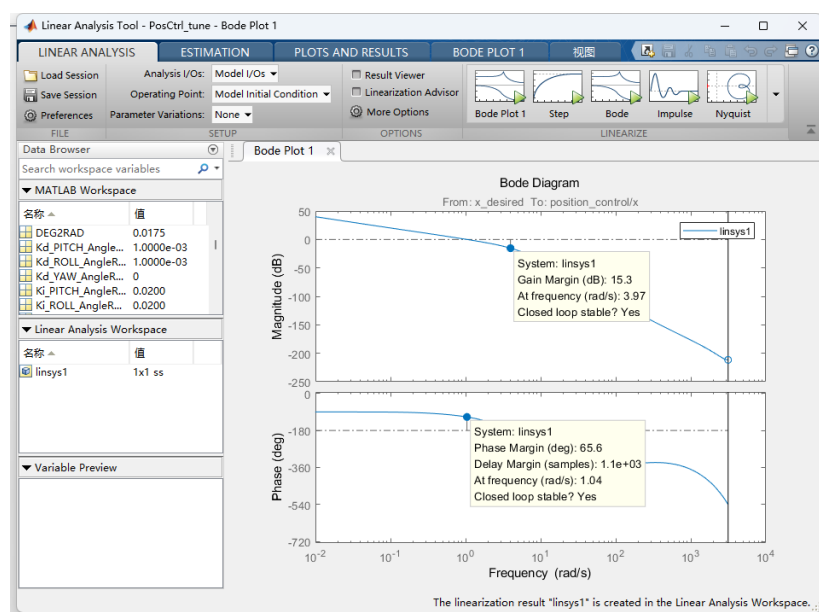
## Step 4:

扫频得到 Bode 图：

设定信号输入输出点。将“x\_desired”输入线设为“Open-loop Input”，“x”设置为“Open-loop Output”如下图所示。



得到 Bode 图如下图。



## 7、参考文献

- [1]. 全权,杜光勋,赵峙尧,戴训华,任锦瑞,邓恒译.多旋翼飞行器设计与控制[M],电子工业出版社, 2018.
- [2]. 全权,戴训华,王帅.多旋翼飞行器设计与控制实践[M],电子工业出版社, 2020.
- [3]. 第 10 讲\_实验六\_定点位置控制器设计实验.pptx.
- [4]. 第 12 讲\_基于半自主自驾仪的位置控制 V2.pptx.

---

## 8、常见问题

Q1: 无

A1: 无