

---

## 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错误!未找到引用源。第 10 讲\_实验六\_定点位置控制器设计实验.pptx，文献错误!未找到引用源。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

例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\5.RflySimFlyCtrl\1.BasicExps\6-PositionCtrl\6.2\](#)

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://rflysim.com/doc/zh/HowToInstall.pdf>

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-RF209 S。遥控器相关配置见：<https://rflysim.com/doc/zh/B/3.1ET10.html>

## 6、实验步骤

### Step 1:

## 模型初始设置

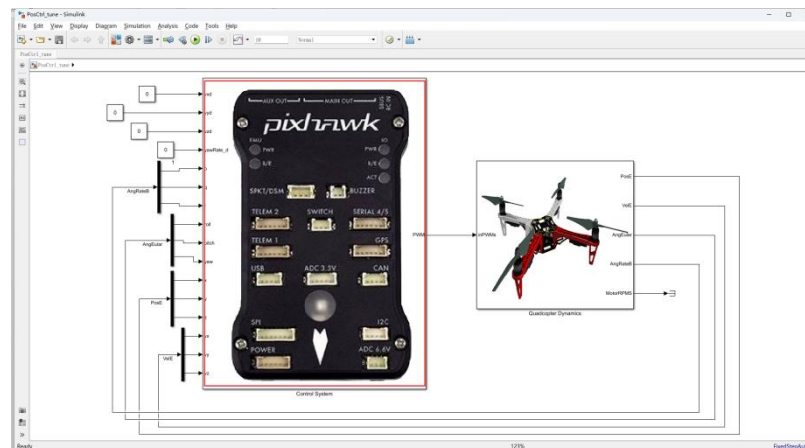
PID 参数步骤与姿态控制的参数调试步骤相同。先调试内环速度环，再调试外环的位置环，先调高度再调水平位置。调试文件在“e6-PositionCtrl\PID-Config\6.2\PosCtrl\_tune.slx”文件夹中。调节参数的初始状态应是飞行器处于高空悬停状态，将初始高度设置为 100m，电机的初始转速设置为 557.1420rad/s，这个初始条件对应于飞行器在空中 100m 处悬停。修改“Init\_control.m”文件中的对应参数如下。

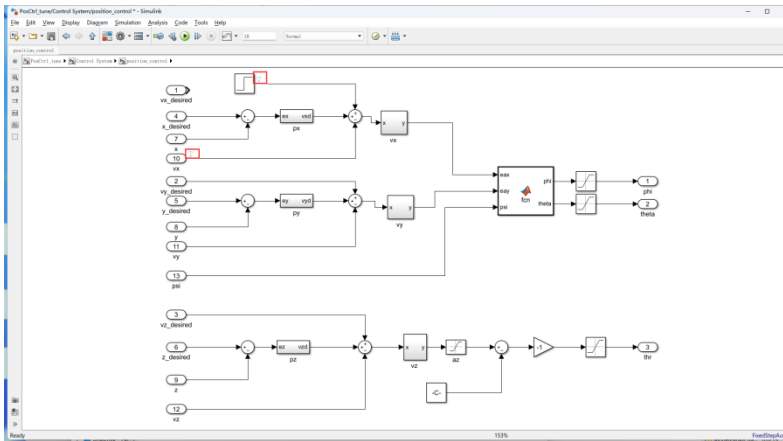
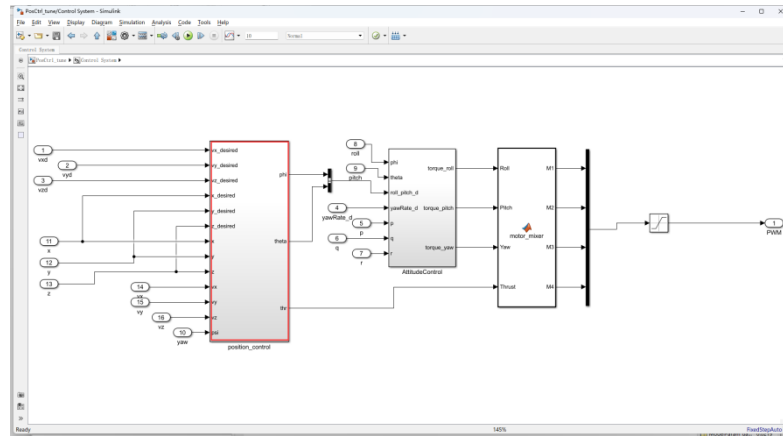
```
ModelInit_PosE = [0, 0, -100];
ModelInit_VelB = [0, 0, 0];
ModelInit_AngEuler = [0, 0, 0];
ModelInit_RateB = [0, 0, 0];
ModelInit_Rads = 557.142;
```

### Step 2:

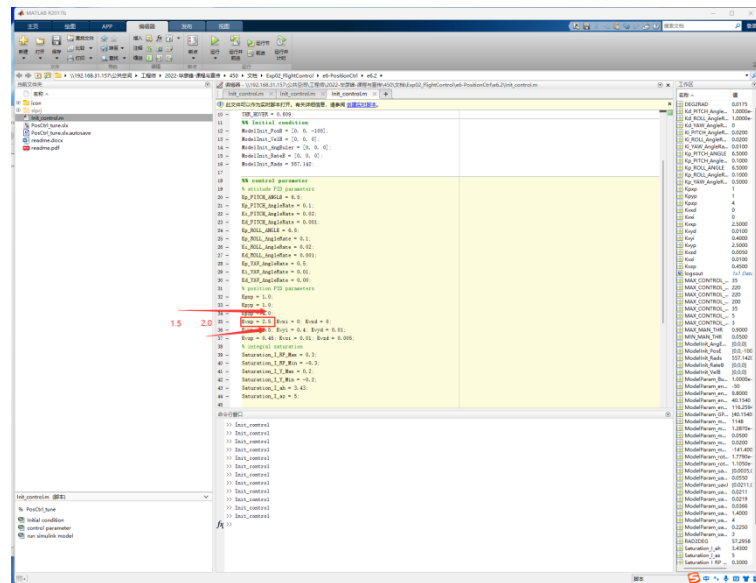
### 速度控制环参数调节:

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。

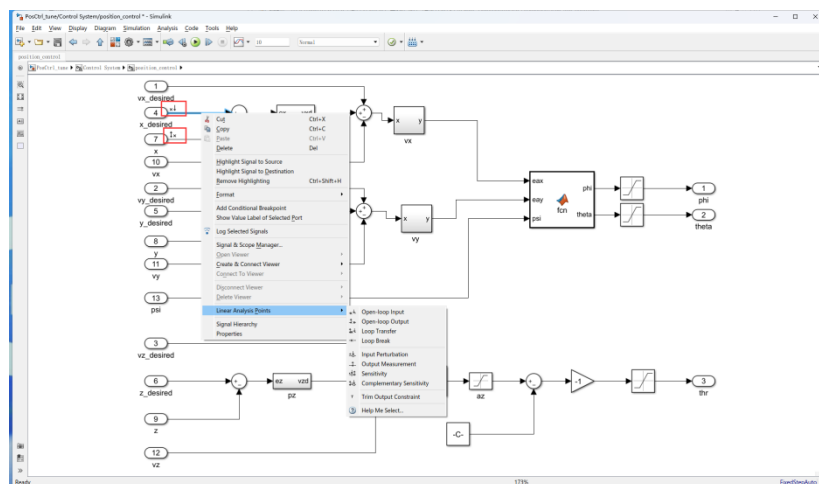




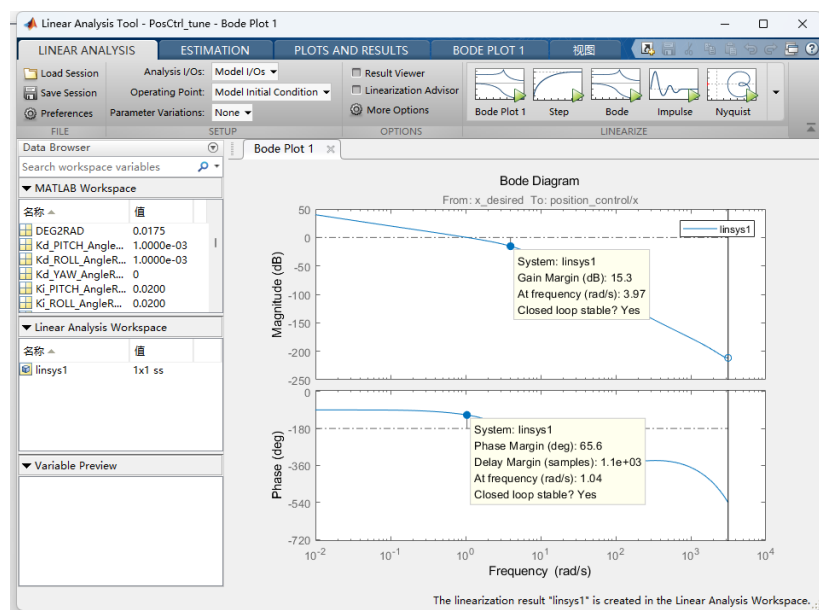
## Step 4:

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.

---

## 8、常见问题

Q1: 无

A1: 无