

1、实验名称及目的

设计实验：(1)建立姿态控制通道的传递函数模型，设计校正控制器,使得姿态角速度环稳态误差，相位裕度>65°，截至频率>10rad/s。姿态角度环截至频率>5rad/s,相位裕度>60°；
(2)使用自己设计的控制器进行硬件在环仿真实验；

2、实验原理

为了尝试得到最优的参数，超前环节（Lead）和滞后环节（Lag）是两种常用的校正技术，用于改善系统的稳定性和频率响应。它们可以被应用于控制系统中的信号处理、滤波、增益修正等方面。

1、超前环节（Lead）校正：

超前环节校正主要用于提高系统的相位裕度和频率响应。当系统出现相位滞后时，可以使用超前环节来增加相位裕度，使系统能够更好地跟踪期望值。超前环节通过引入一个正向的相位补偿来提前系统响应。其传输函数通常具有以下形式： $G_{lead}(s) = K * (\tau s + 1) / (\alpha \tau s + 1)$ 其中，K是增益参数， τ 是时间常数， α 是控制超前的参数。超前环节的校正原理是在系统的低频范围内引入更多的增益和相位，从而提高系统的相位裕度。这可以有效地补偿系统的相位滞后问题，并提高系统的稳定性和响应速度。

2、滞后环节（Lag）校正：

滞后环节校正主要用于抑制系统的高频振荡和噪声。当系统存在频率过高或振荡较强的干扰时，可以使用滞后环节来减小系统的增益和相位，使系统更加稳定。滞后环节通过引入一个反向的相位补偿来减小系统的响应。其传输函数通常具有以下形式： $G_{lag}(s) = K * (\tau s + 1) / (\alpha \tau s + 1)$ 其中，K是增益参数， τ 是时间常数， α 是控制滞后的参数。滞后环节的校正原理是在系统的高频范围内引入更多的相位滞后，从而减小系统的增益和相位，抑制系统的振荡和噪声。这可以提高系统的稳定性和抗干扰能力。

超前环节和滞后环节的选择和参数调整需要根据具体系统的特性进行，以满足系统稳定性、响应速度和抗干扰能力等要求。

详细内容请参考上层路径文献[3]第 09 讲_实验五_姿态控制器设计实验.pptx，文献[4]第 11 讲_底层飞行控制 V2.pptx。

3、实验效果

使用自动控制原理中的系统校正方法对多旋翼系统进行校正,设计了超前和滞后超前环节 分别对位置环和速度环实施控制，并达到设计指标。完成设计后，连接硬件进行在环仿真验证了设计的效果。

4、文件目录

	文件夹/文件名称	说明
	icon FlightGear.png	FlightGear 硬件图片。

HIL		pixhawk.png	Pixhawk 硬件图片。
		F450.png	F450 飞机模型图片。
		AttitudeControl_HIL.slx	Simulink 仿真模型文件。
		Init_control.m	控制器初始化参数文件。
		importPX4log.m	
Sim	icon	UE_Logo.jpg	UE 软件的 Logo
		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。
		AttitudeControl_Sim.slx	Simulink 仿真模型文件。
		Init_control.m	控制器初始化参数文件。
tune	icon	SupportedVehicleTypes.pdf	Pixhawk 硬件图片。
		Init.m	模型初始化参数文件。
		F450.png	F450 飞机模型图片。
		AttitudeControl_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 ^①	1
2	RflySim 平台免费版	Pixhawk 6C 飞控 ^②	1
3	MATLAB 2017B 及以上	遥控器 ^③	1
		遥控器接收器	1
		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>

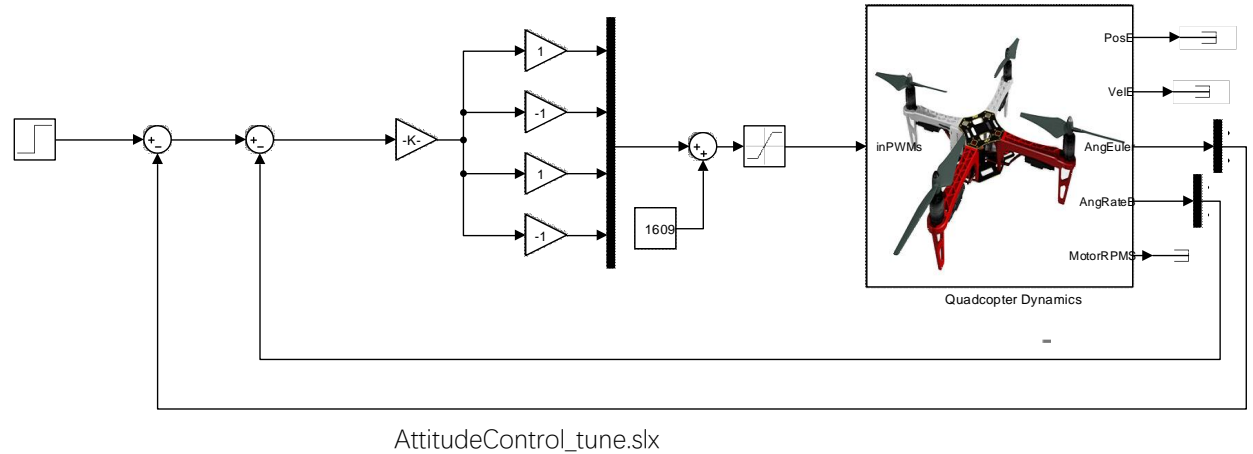
③：本实验演示所使用的遥控器为：天地飞 WFLY-ET10、配套接收器为：WFLY-RF209S。遥控器相关配置见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>

6、实验步骤

Step 1:

对整体结构进行简化:

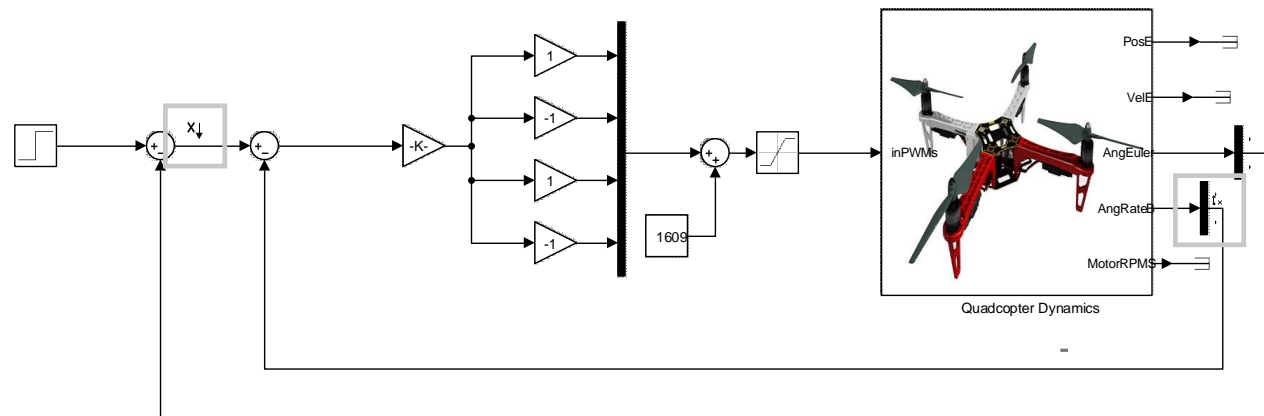
首先只对一个通道进行分析, 这里选择俯仰角通道, 简化后的模型如下图所示 (运行 "e5-AttitudeCtrl\PID-Config\c5.3\tune\Init_control.m" 打开)。



Step 2:

角速度环分析:

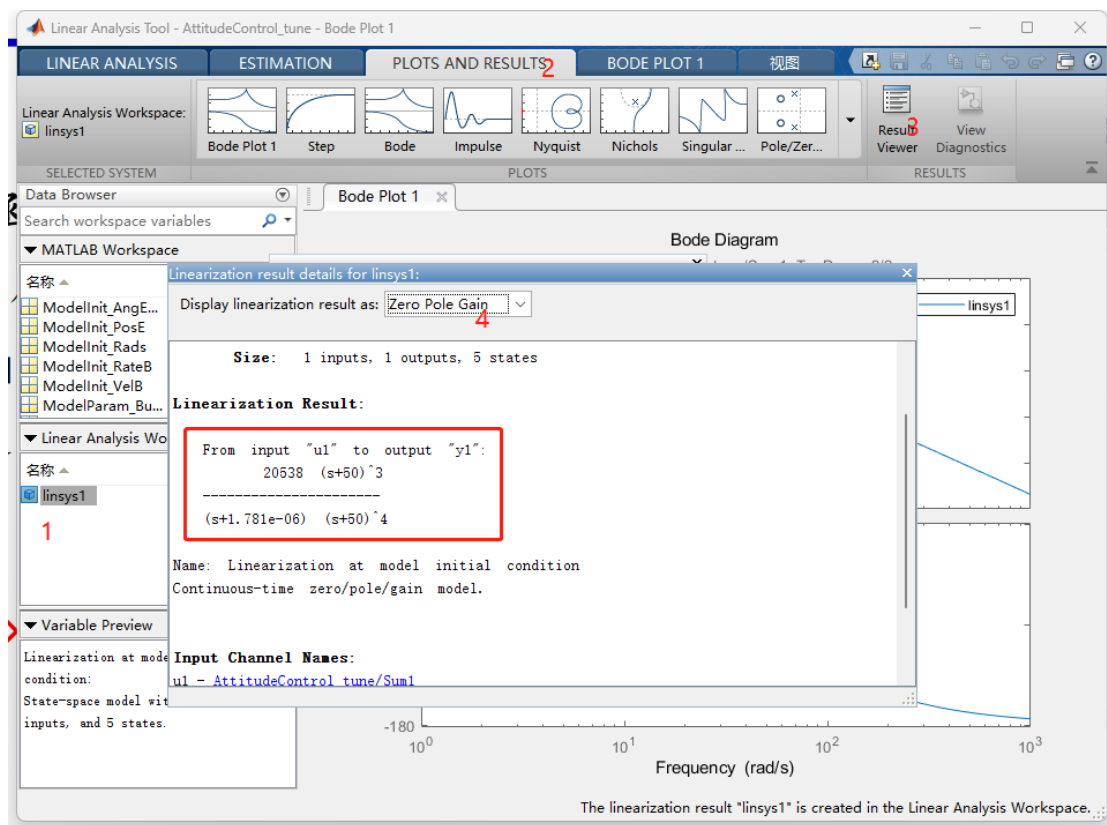
输入为期望角速度, 输出为实际角速度。设置输入输出点如图所示。



Step 3:

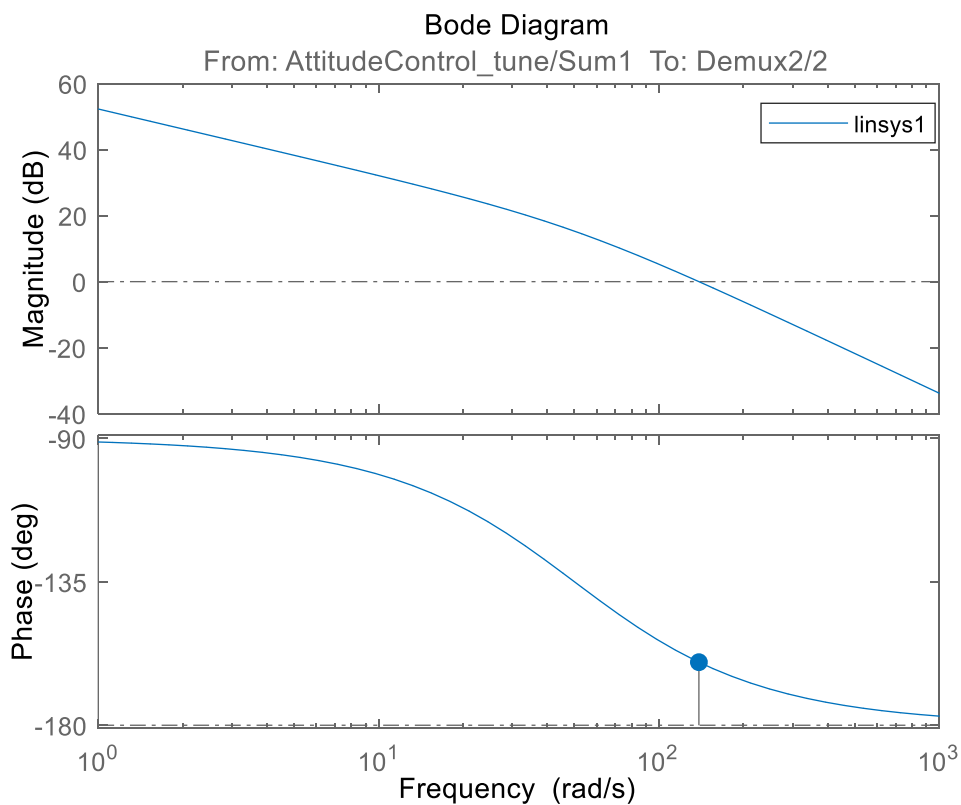
得到传递函数模型:

生成 Bode 图后, 在左侧 Linear Analysis Workspace 中会出现 linsys1 变量, 按图示操作即可得到传递函数模型。

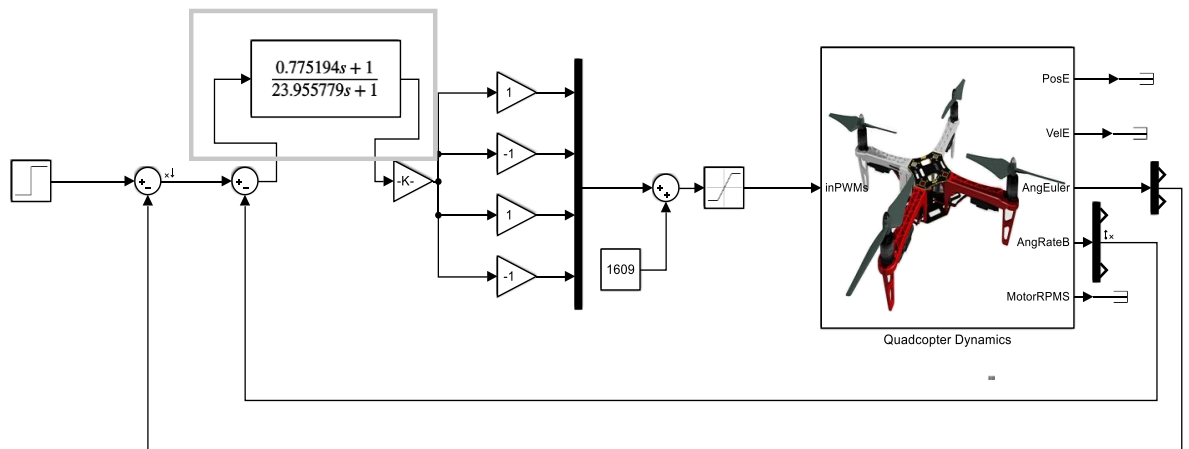


Step 4:

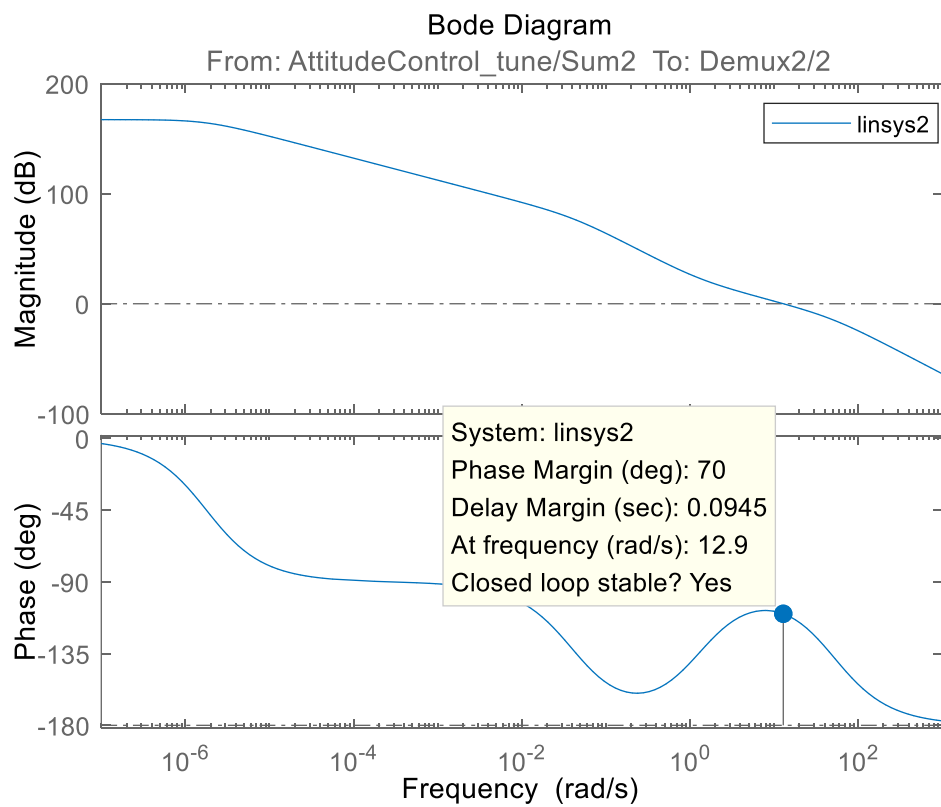
校正前 Bode 图



将校正器加入到角速度控制环。

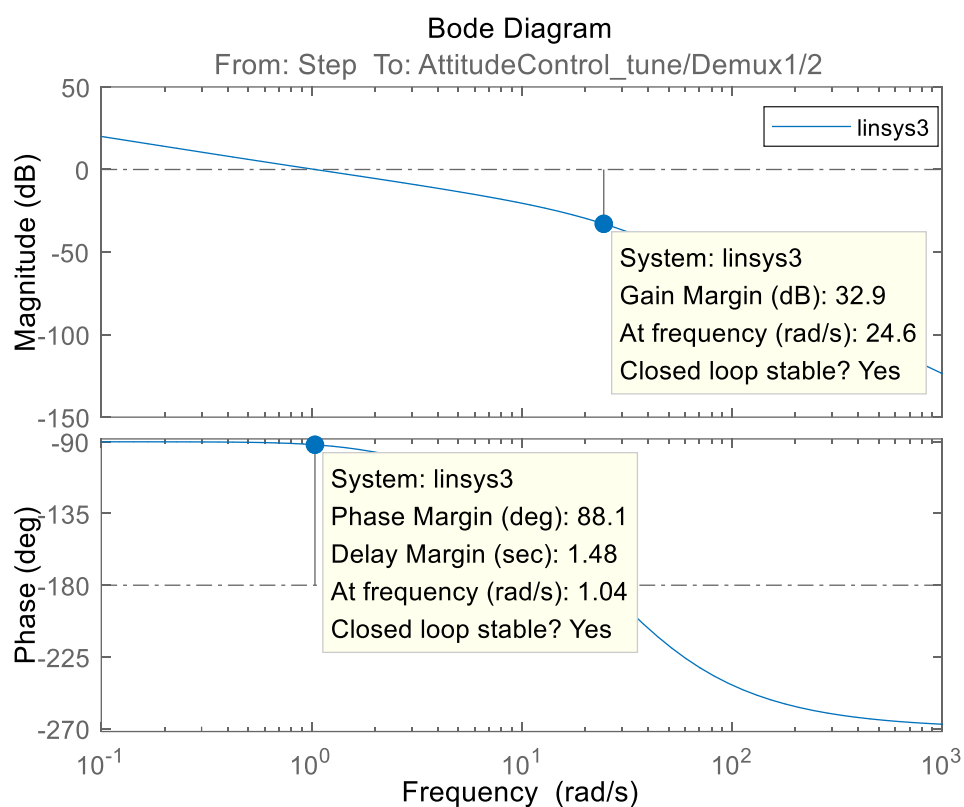


加入校正环节后的 **Bode** 图如图所示，相位裕度为 70° 。

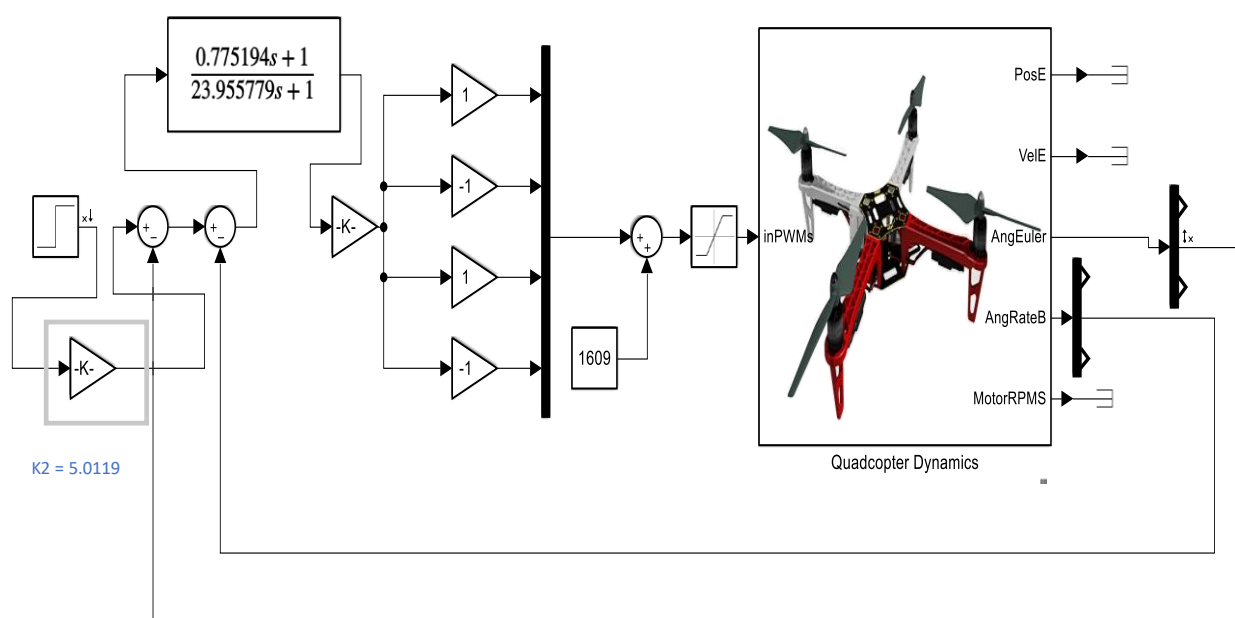


Step 5:

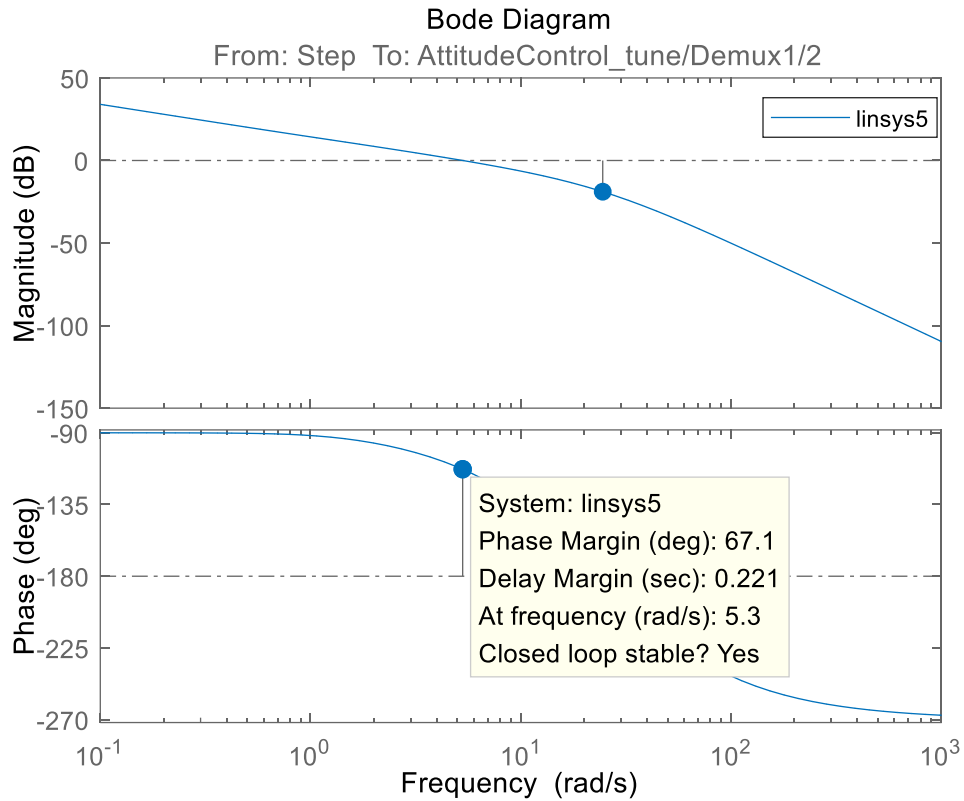
先得到角度环的开环校正前 **Bode** 图



设计校正器对其进行校正。输入输出点设置如图所示。



加入校正环节后的 Bode 图如图，截止频率为 5.3rad/s，相位裕度为 67.1。



Step 6:

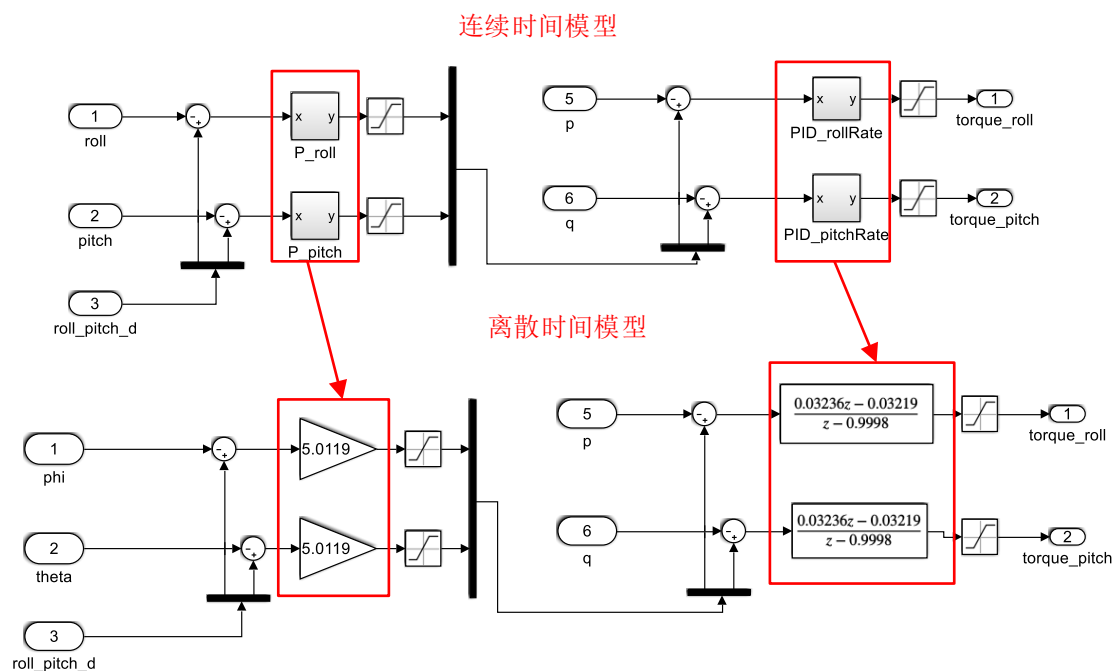
使用 `c2d` 函数将 s 域的传递函数（按下述提示输入，这里输入的是 **step4** 设计的校正器）变为 z 域

```
H = tf([num], [den])  
Hd = c2d(H, Ts, 'foh')
```

其中“num”为传递函数分子系数向量，“den”为传递函数分母系数向量，“Ts”为仿真步长，本例 中为 **0.004s**。

Step 7:

将设计的时域连续的校正器换为时域离散的校正器（在“e5-AttitudeCtrl\PID-Config\5.3 \HIL\AttitudeControl_HIL.slx”中找到 AttitudeControl_HIL/Control System/AttitudeControl 子模块）



Step 8:

将"e5-AttitudeCtrl\PID-Config\5.3\HIL\AttitudeControl_HIL.slx"模型编译完成后烧入飞控，进行硬件在环仿真：观察发现，随着被拨动摇杆的放开，多旋翼能很快的返回到之前平稳的状态，并无明显振荡。

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 09 讲_实验五_姿态控制器设计实验.pptx.
- [4]. 第 11 讲_底层飞行控制 V2.pptx.

8、常见问题

Q1: 无

A1: 无