

1、实验名称及目的

基础实验：建立位置控制通道的传递函数模型，使用 MATLAB “ControlSystemDesigner”设计校正控制器,使得加入校正环节后系统速度控制环阶跃响应稳态误差，相位裕度 $>75^{\circ}$ 截止频率 $>2.0\text{rad/s}$ 。位置控制环截止频率 $>1\text{rad/s}$,相位裕度 $>60^{\circ}$ ；使用自己设计的控制器进行软件在环仿真实验和硬件在环仿真实验；使用自己设计的控制器进行实飞实验。

2、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和实飞 实验验证了设计的效果。

3、文件目录

	文件夹/文件名称		说明
HIL	icon	FlightGear.png	FlightGear 硬件图片。
		pixhawk.png	Pixhawk 硬件图片。
		vehicle_local_position.mat	
		F450.png	F450 飞机模型图片。
	PosCtrl_HIL.slx		Simulink 仿真模型文件。
	Init_control.m		控制器初始化参数文件。
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。
	PosCtrl_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。
		FlightGear.png	FlightGear 硬件图片。
		pixhawk.png	Pixhawk 硬件图片。
		vehicle_local_position.mat	
		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。

4、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	卓翼 H7 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>

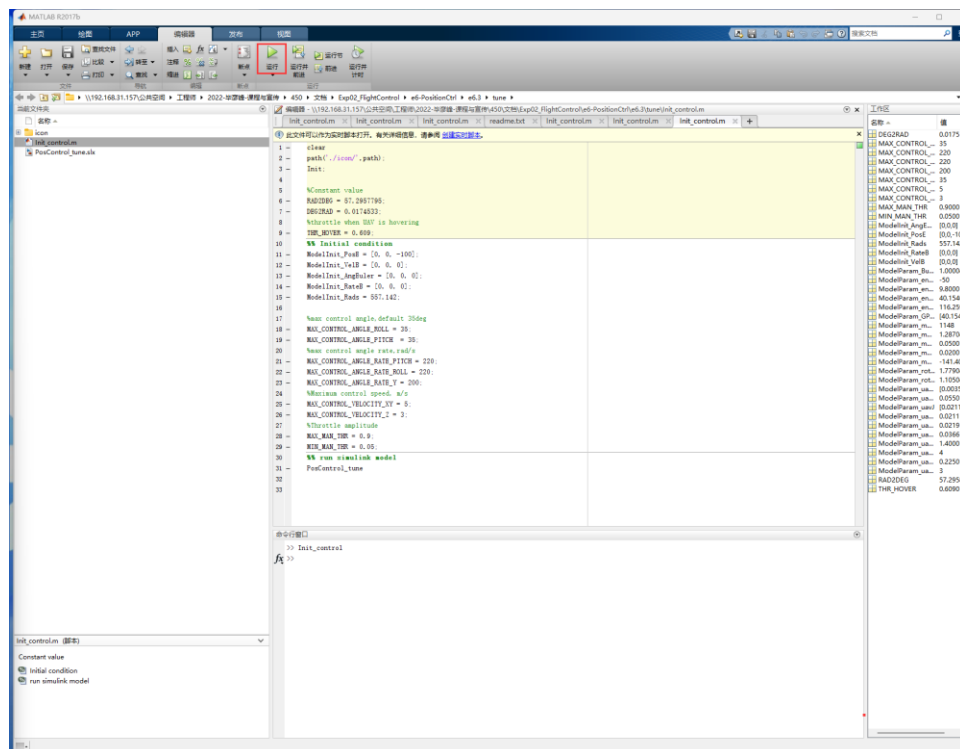
②：须保证平台安装时的编译命令为：droneyee_zyfc-h7_default，固件版本为：1.12.1。其他配套飞控请见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>

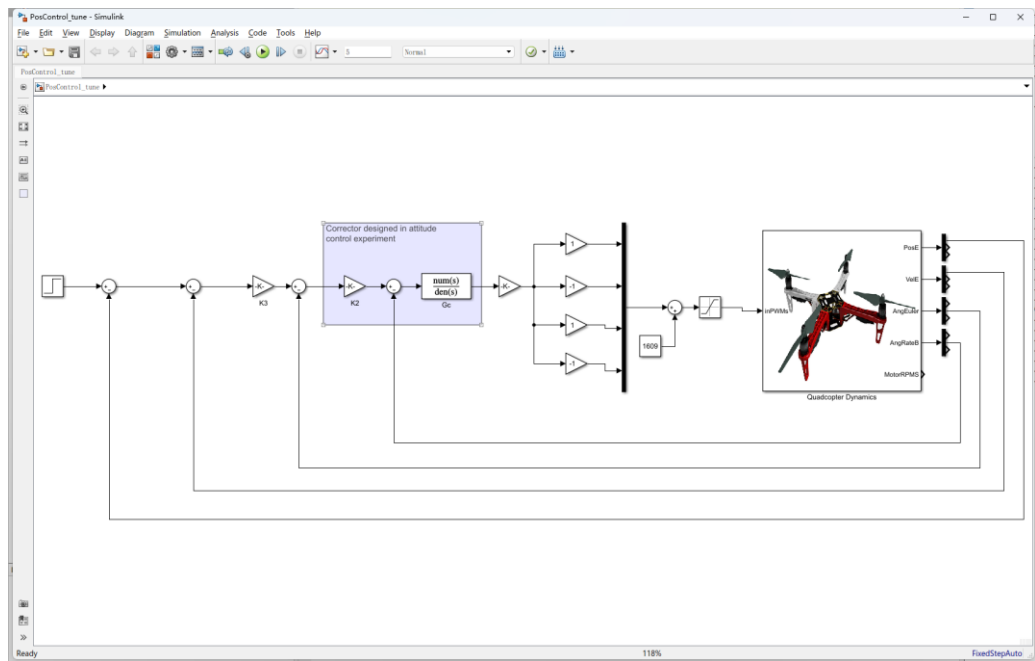
③：本实验演示所使用的遥控器为：福斯 FS-i6S、配套接收器为：FS-iA6B。遥控器相关配置见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>

5、实验步骤

Step 1:

打开 e6-PositionCtrl\PID-Config\6.3\tune\Init_control.m 文件，点击运行初始化参数，PosControl_tune.slx 文件将会自动打开，如下图所示。

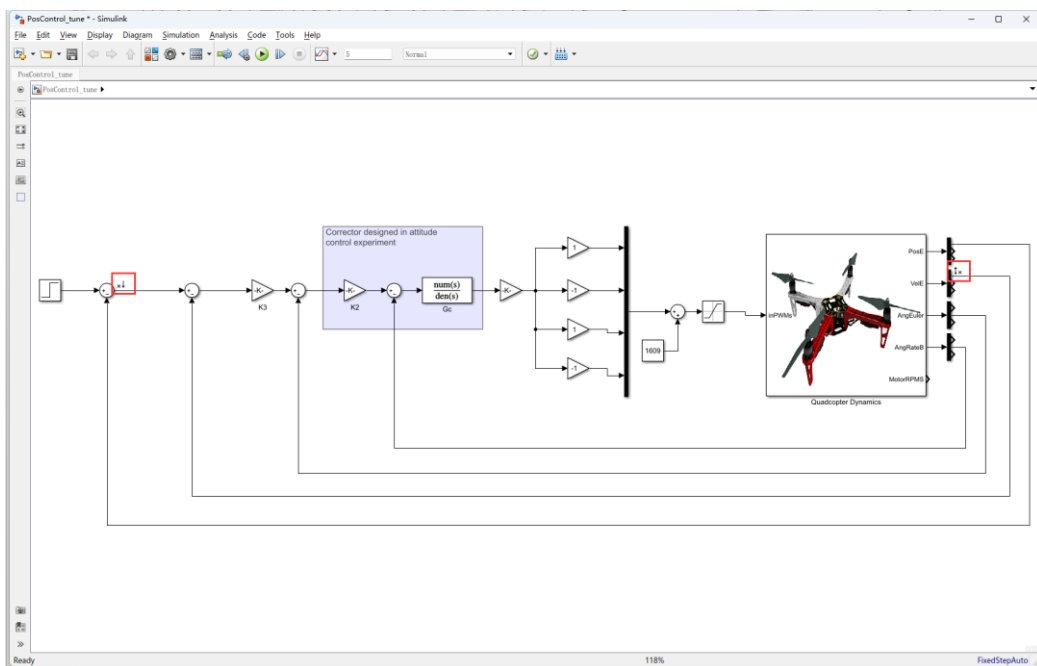




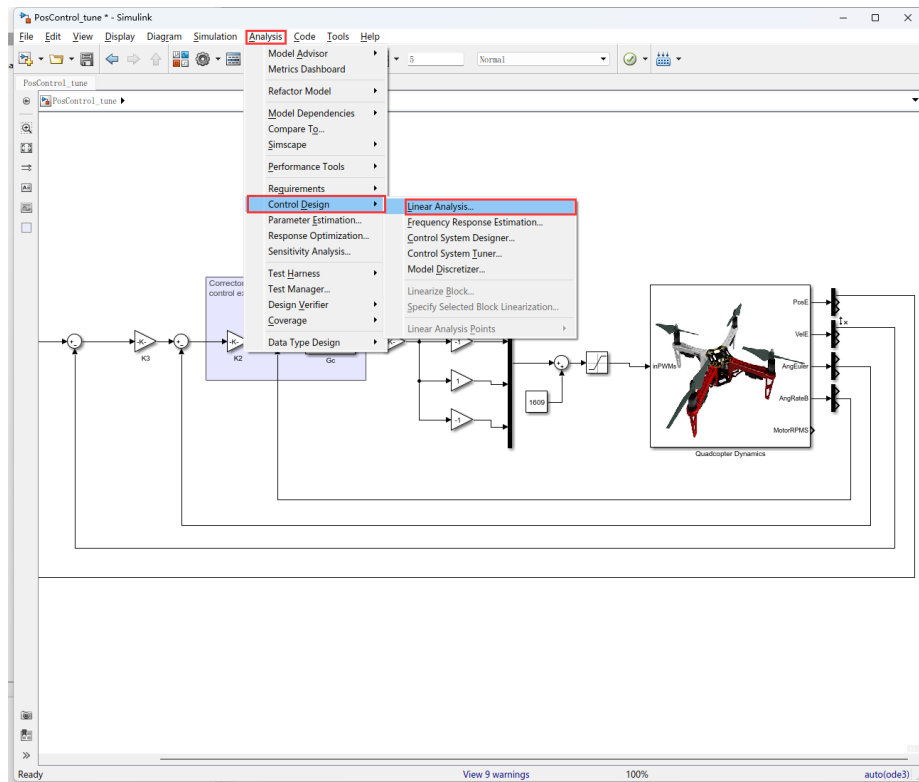
Step 2:

速度环分析:

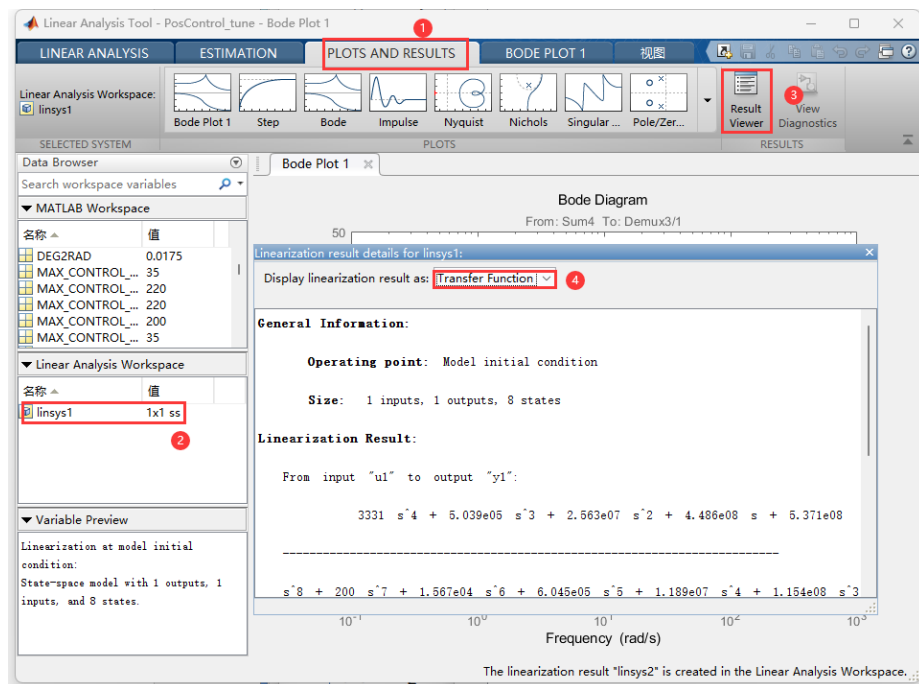
输入为期望速度，输出为实际速度。设置输入输出点如下图所示。



点击运行后，进行如下图所示操作生成 Bode 图



生成 Bode 图后，在左侧“Linear Analysis Workspace”中会出现“linsys1”变量。如下图所示操作，即可得到传递函数模型。



由下图所示得到的传递函数为

$$\frac{3331s^4 + 5.039e05s^3 + 2.563e07s^2 + 4.486e08s + 5.371e08}{s^8 + 200s^7 + 1.567e04s^6 + 6.045e05s^5 + 1.189e07s^4 + 1.154e08s^3 + 5.557e08s^2 + 5.371e08s + 280.1}$$

进一步简化得

$$\frac{3330.9(s + 1.29)}{s(s + 1.253)(s + 33.92)(s^2 + 14.87s + 101.1)}$$

由上述传递函数建立如下图的.m 文件

```
1 num=[3331 5.039e05 2.563e07 4.486e08 5.371e08];
2 den=[1 200 1.567e04 6.045e05 1.189e07 1.154e08 5.557e08 5.371e08 280.1];
3 G=tf(num,den); Z=[-1.29];
4 P=[-5.214e-7 -1.253 -33.92 ];
5 zpk1=zpk(G)
6 GG=tf(zpk1)
7 controlSystemDesigner('',G);
```

运行即可使用 MATLAB 基于 Bode 图的控制系统设计，如下图所示。

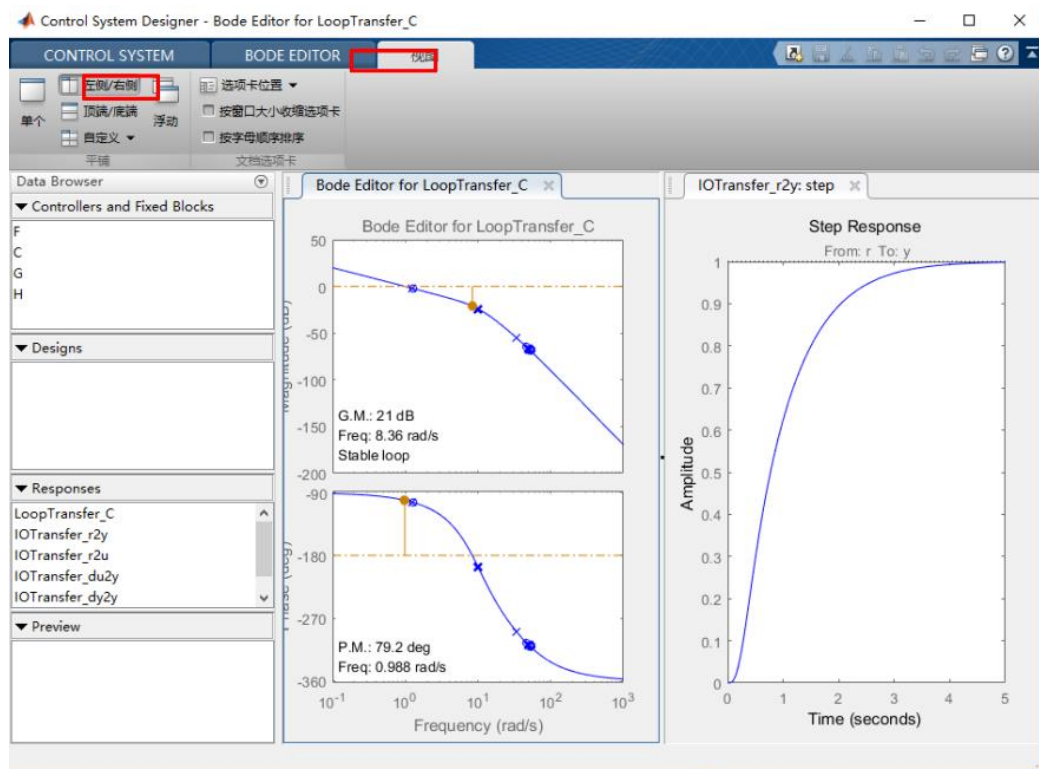


图.基于 Bode 图的控制系统设计

Step 3:

使用工具箱校正：

由上图可知，系统的响应较慢，向上拖动 Bode 图曲线增大开环增益。增益增大，从阶跃响应曲线上看，响应时间变短，但是带来了超调。从 Bode 图上看，相位裕度为 50.1° ，相比设计目标偏小。

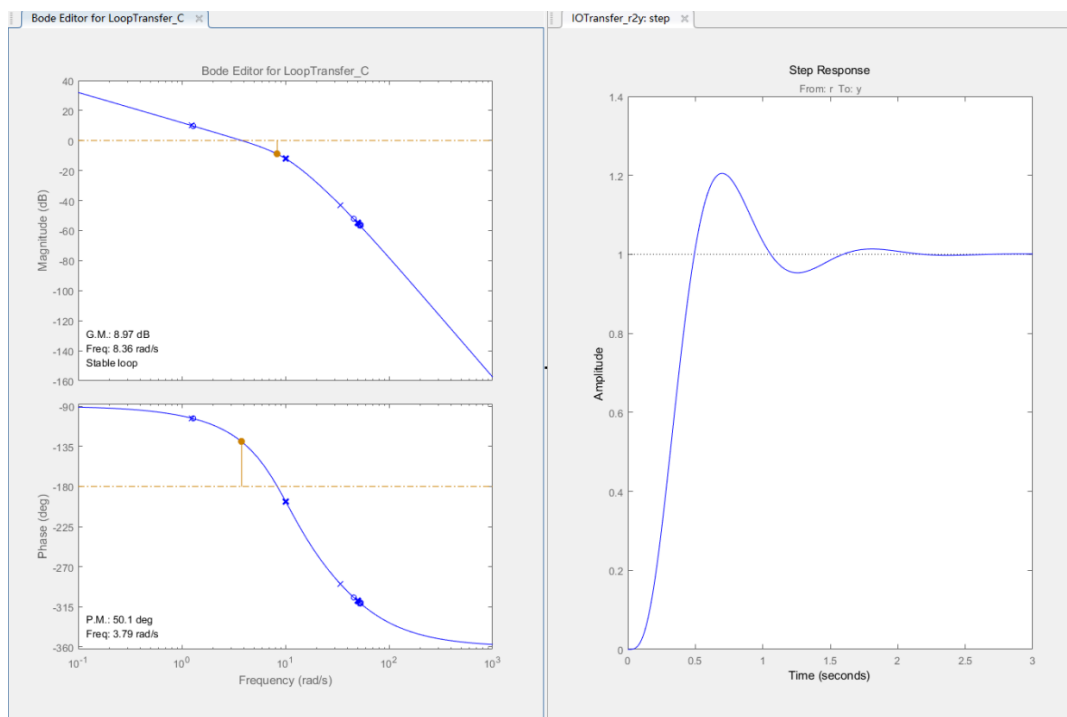


图. 加大增益对 Bode 图和阶跃响应的影响

增加一个超前校正环节，提高相位裕度，还能进一步提高截止频率，增加响应速度。在 Bode 图中右键“add Pole/Zero”-“Lead”，直接拖动零极点观测响应曲线，得到合适的矫正环节，如下图所示。

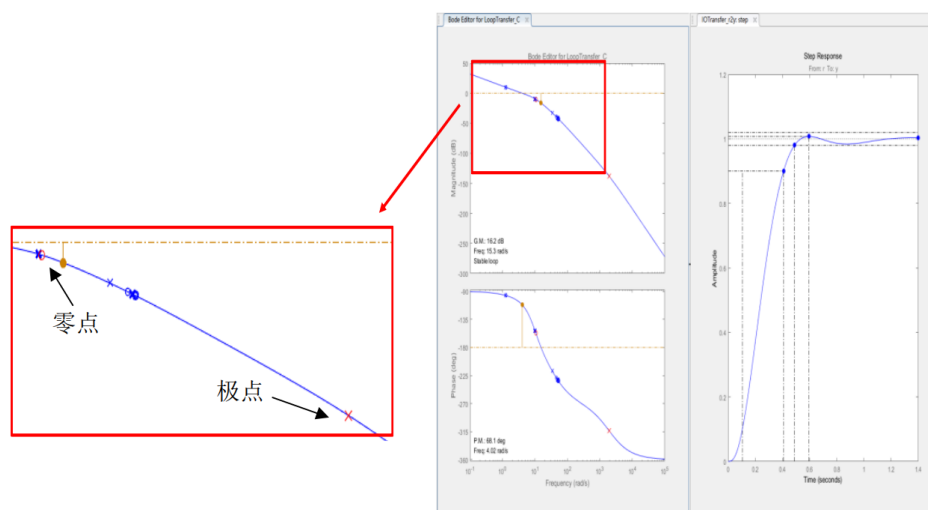
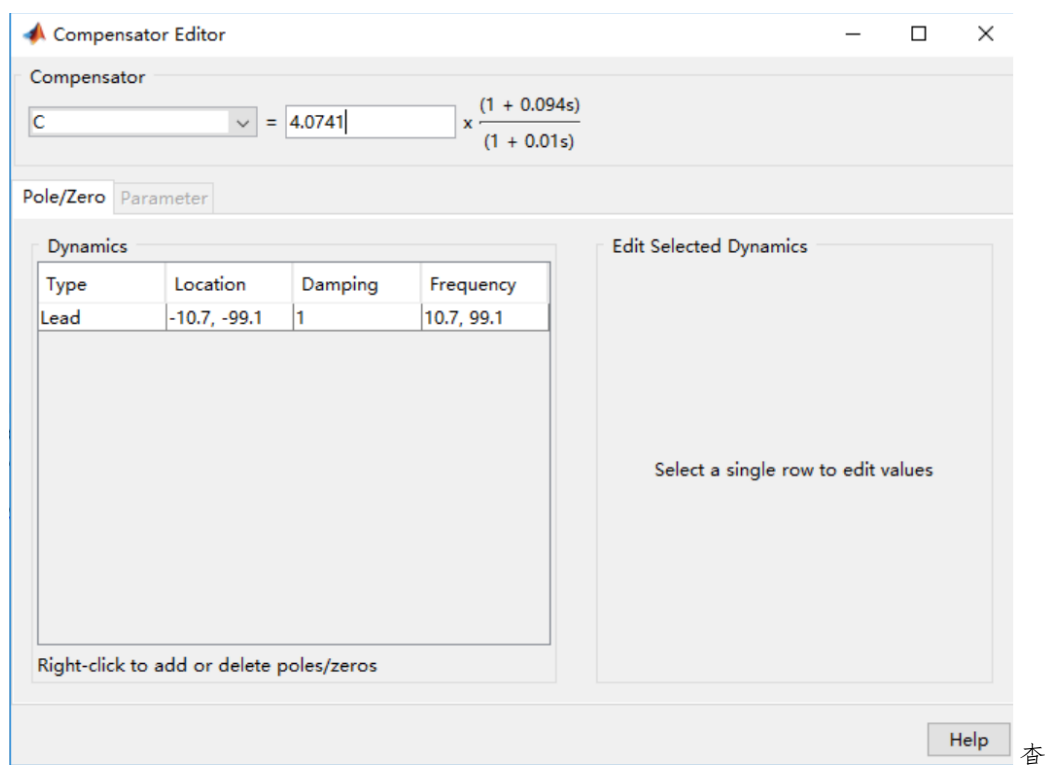


图. 加入超前环节

在 Bode 图中右键“Edit Compensator”，如下图所示



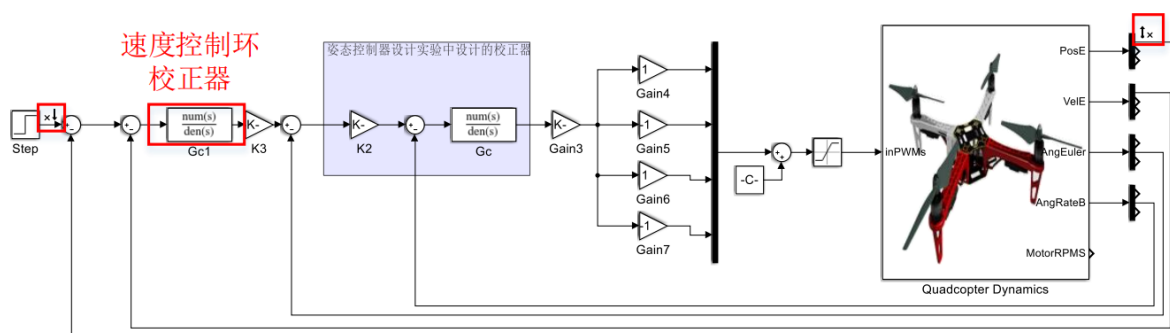
看最终的得到的校正器为

$$G_c = \frac{4.0741(1 + 0.094s)}{1 + 0.01s}$$

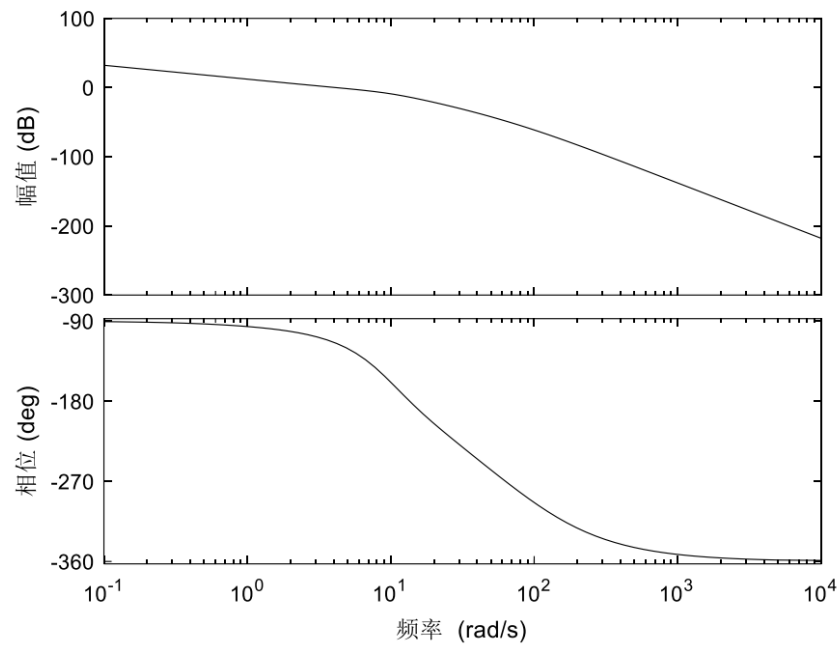
Step 4:

对 x 通道位置环进行校正:

加入 Step 3 中得到的速度环校正器, 如下图所示。



得到位置环的 Bode 图如下图所示, 相位裕度为 75.8°, 截止频率 0.99, 基本满足要求。可略微增加增益, 提高截止频率。(例如取位置环增益为 1.2, 重新绘制 Bode 图, 相位裕度为 65.3°, 截止频率为 1.12, 满足实验指标。)



Step 5:

仿真实验:

前述设计的校正环节是时域连续的环节，加入该模型应将其变为时域离散的环节。使用 `c2d` 函数将 s 域的传递函数（按下述提示自行输入）变为 z 域传递函数。

```
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 $0.004s$ 。

这里替换后的传递函数为

$$G_c = \frac{2.0452(1 + 0.15s)}{1 + 0.013s} \rightarrow G_c(z) = \frac{22.6z - 22.5}{z - 0.4634}.$$

Step 6:

将 Simulink 模型中的 PID 控制器替换成离散模块，（在“e6-PositionCtrl\PID-Config\6.3\HIL\PosControl_HIL.slx”中找到 PosControl_HIL/Control System/Subsystem1/position_control 子模块）如下图所示

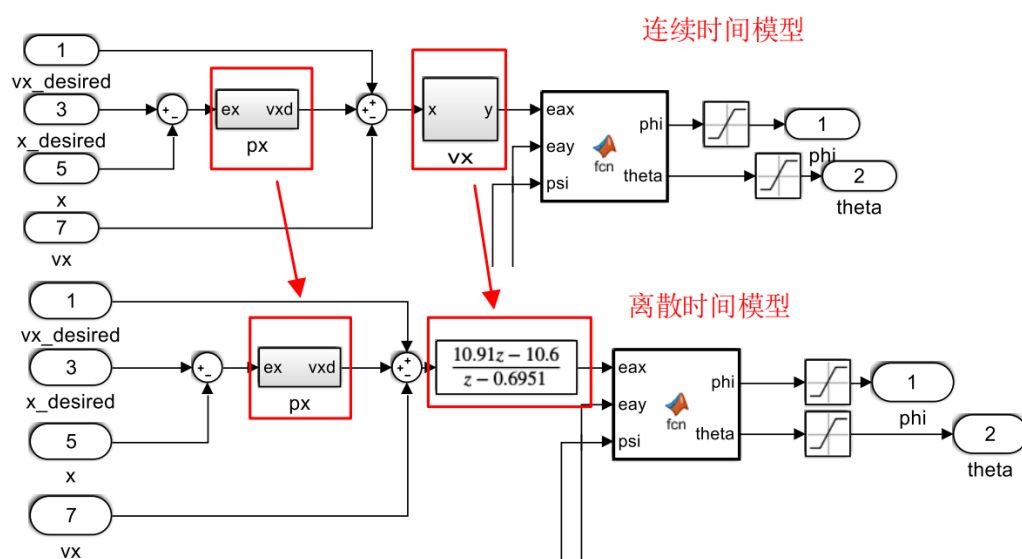


图 替换原来的 PID 校正器

Step 7:

将"e6-PositionCtrl\PID-Config\6.3\HIL\PosControl_HIL.slx"模型编译完成后烧入飞控，进行硬件在环仿真，多旋翼可以实现基本的直线飞行和悬停。

6、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.