

位置控制设计

1. 实验目的

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. 实验要求

- 软件要求：Windows 10及以上版本；RflySim工具链^[1]；MATLAB 2022b及以上。
- 硬件要求：笔记本/台式电脑① 1台；Pixhawk 6x 飞控② 1台；遥控器③ 1台；遥控器接收器 1台；数据线、杜邦线等 若干台^[2]。

3. 实验地址

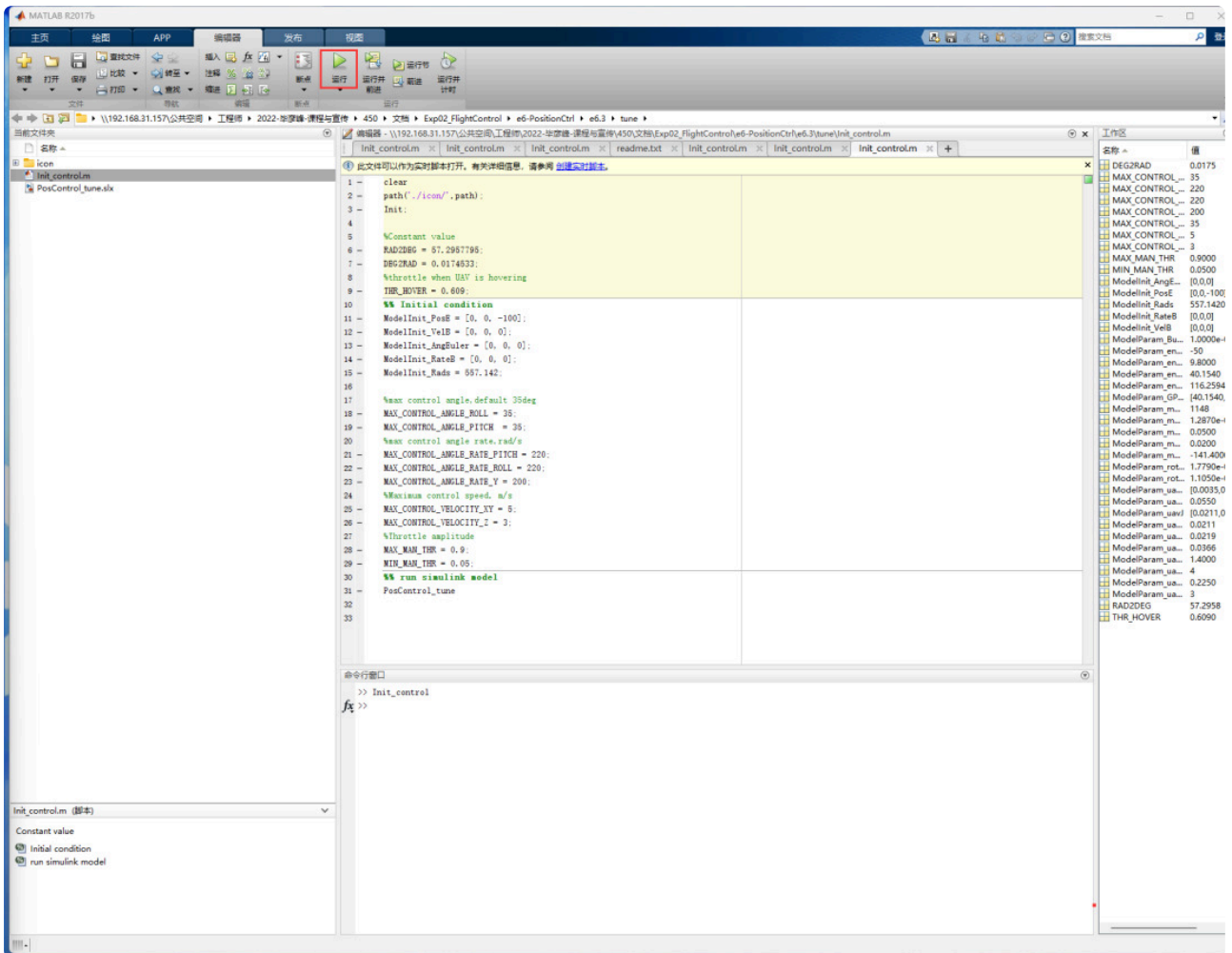
例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\5.RflySimFlyCtrl\1.BasicExps\e6-PositionCtrl\e6.3](#)

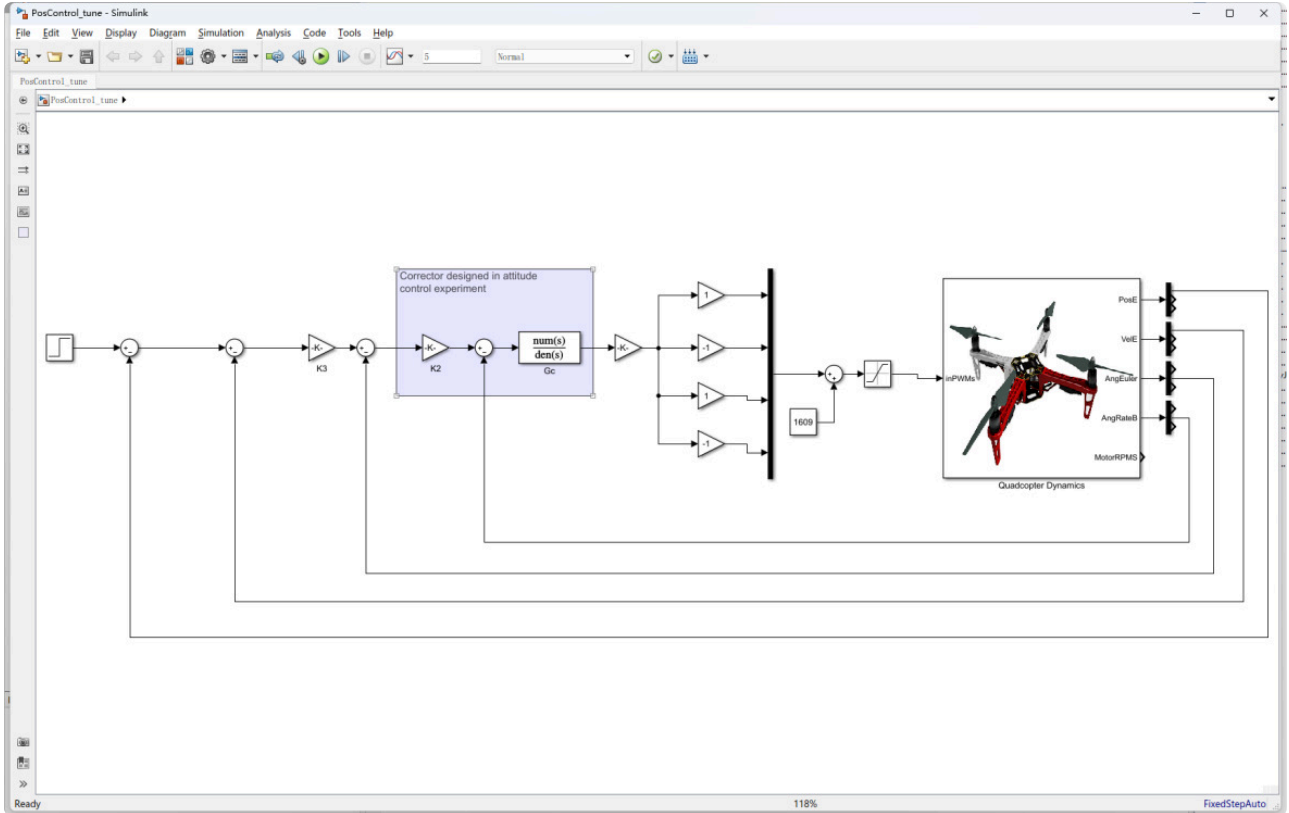
- HIL：包含硬件在环仿真的相关文件，如Simulink模型PosCtrl_HIL.slx和控制器初始化参数Init_control.m等。
- Sim：包含软件仿真相关文件，如Simulink模型PosCtrl_Sim.slx和初始化参数Init_control.m等。
- Tune：包含参数调节相关文件，如Simulink模型PosCtrl_tune.slx和控制器初始化参数Init_control.m等。

4. 实验内容或步骤

4.1 步骤1：位置控制设计

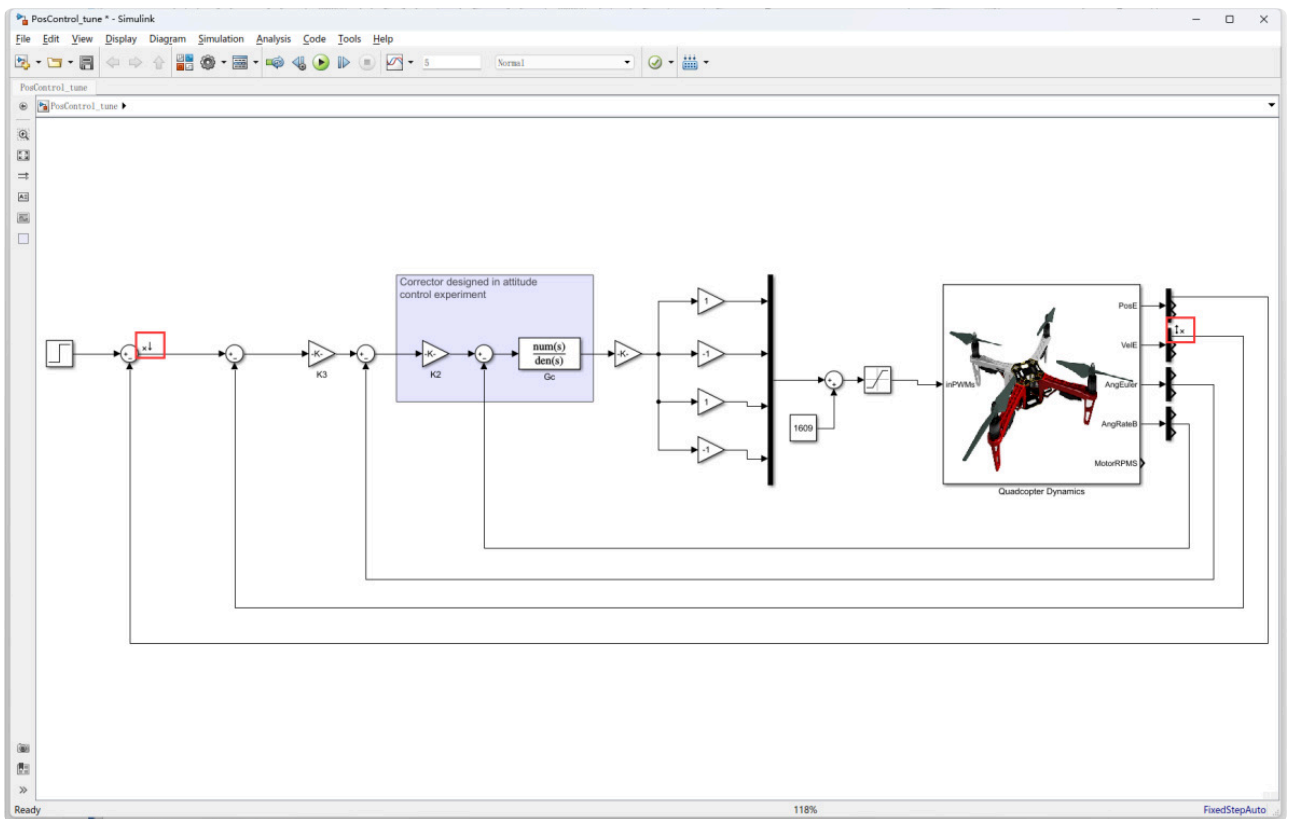
打开e6-PositionCtrl\PID-Config\e6.3\tune\Init_control.m文件，点击运行初始化参数，PosControl_tune.slx文件将会自动打开。



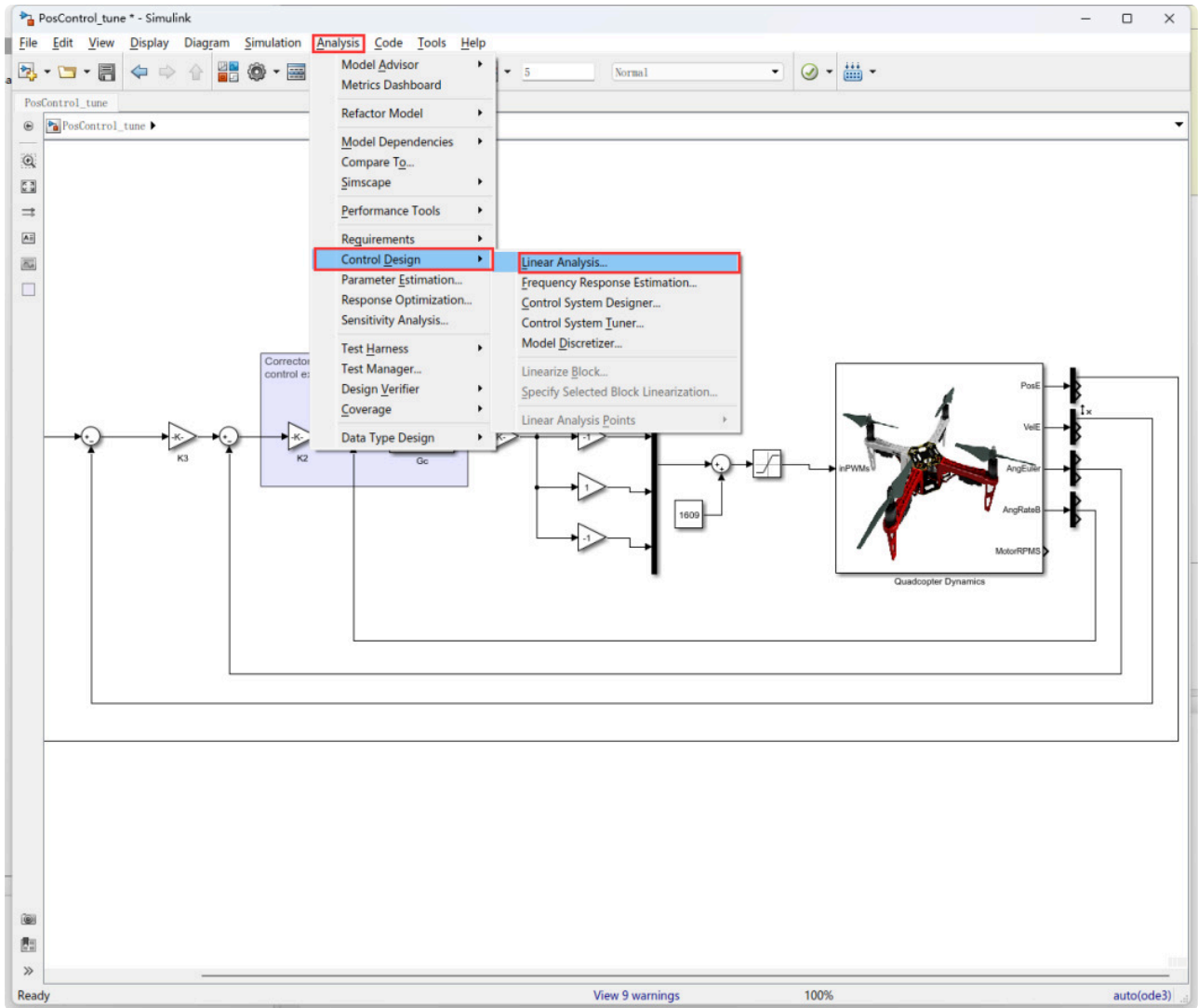


4.2 步骤2：速度环分析

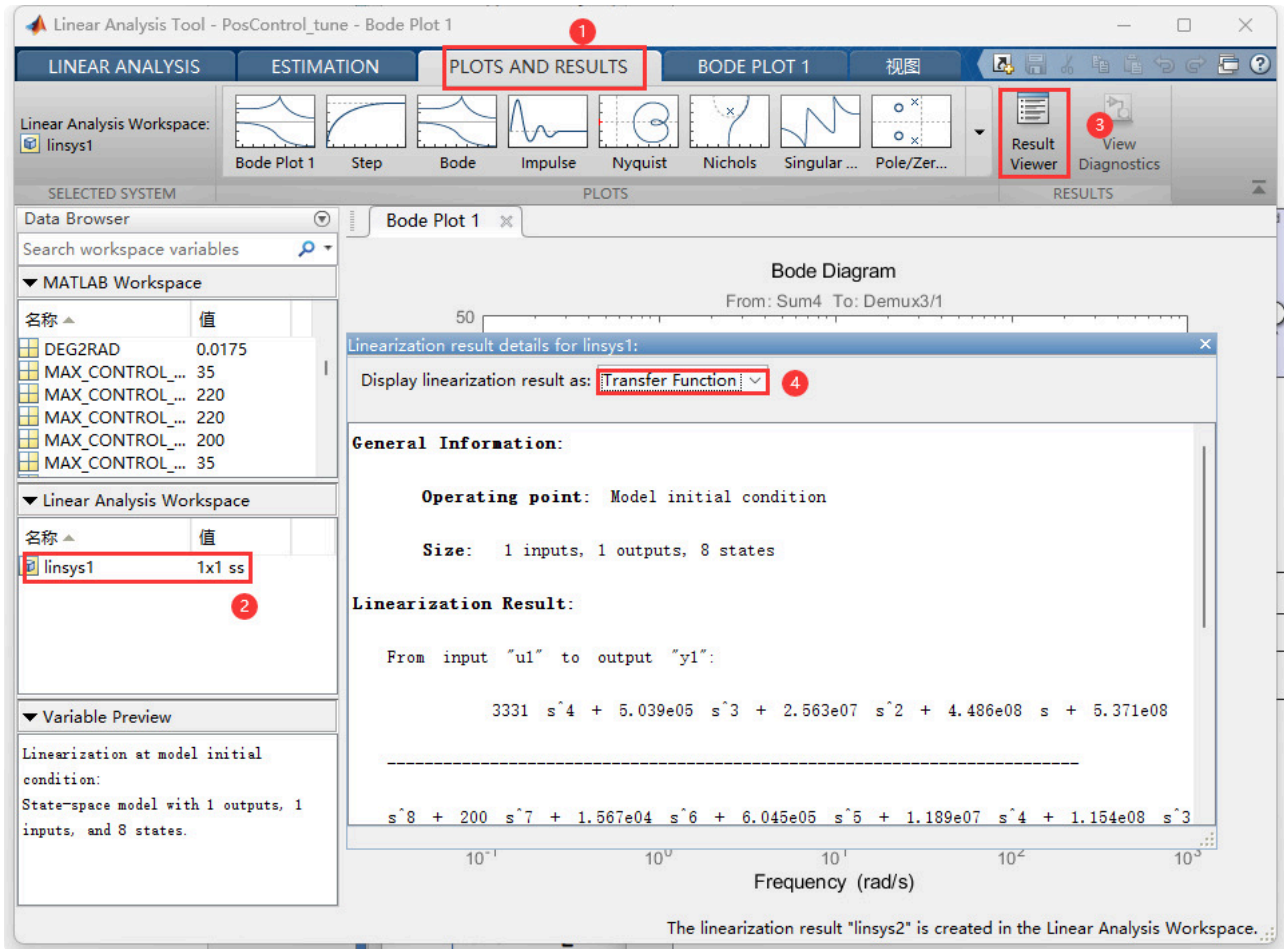
输入为期望速度，输出为实际速度。设置输入输出点如下图所示。



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

```
num=[3331 5.039e05 2.563e07 4.486e08 5.371e08];
```

```
den=[1 200 1.567e04 6.045e05 1.189e07 1.154e08 5.557e08 5.371e08 280.1];
```

```
G=tf(num,den);Z=[-1.29];
```

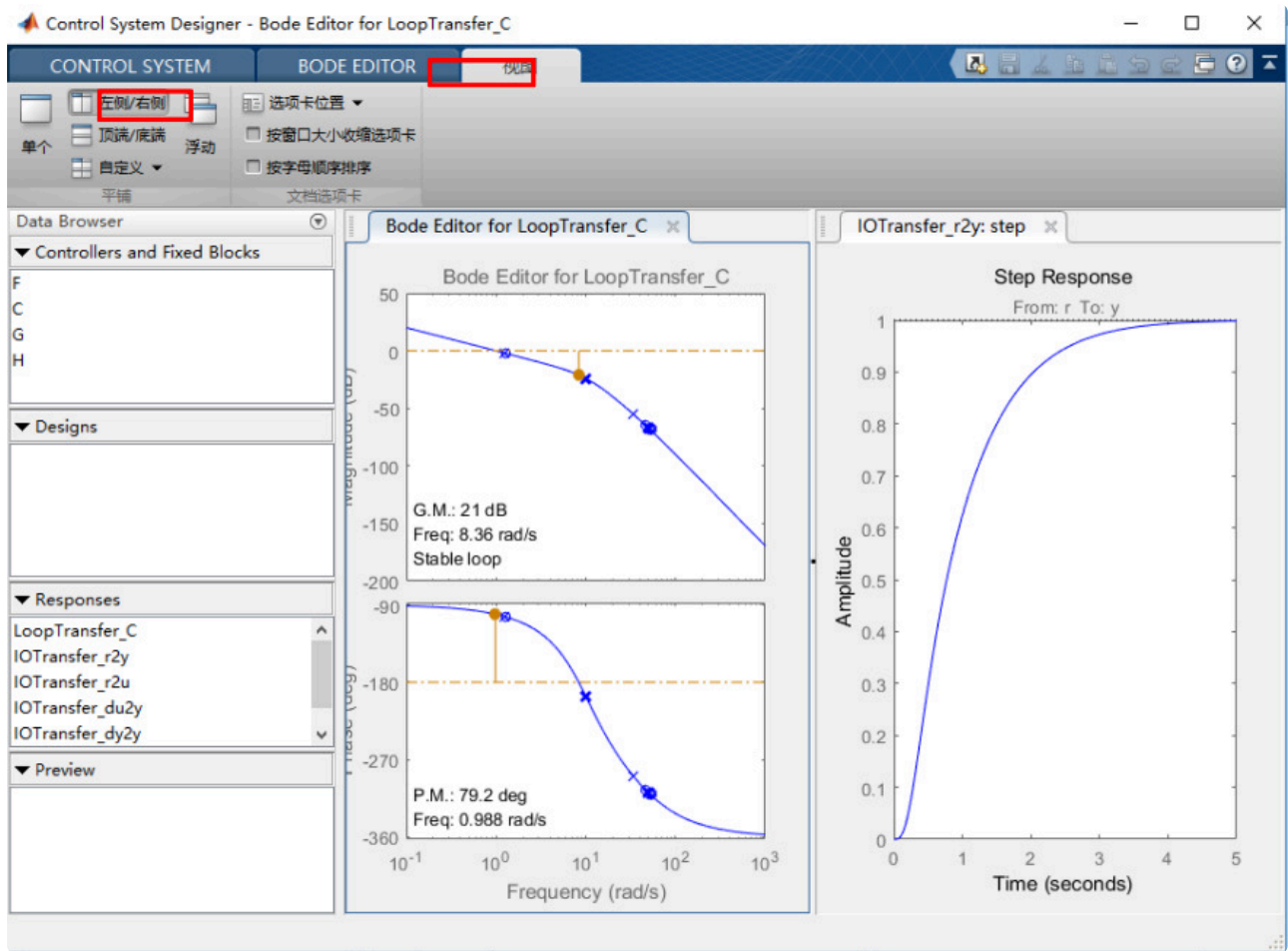
```
P=[-5.214e-7 -1.253 -33.92];
```

```
zpk1=zpk(G)
```

```
GG=tf(zpk1)
```

```
controlSystemDesigner('bode',G);
```

运行即可使用 MATLAB 基于 Bode 图的控制系统设计，如下图所示。



4.3 步骤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。

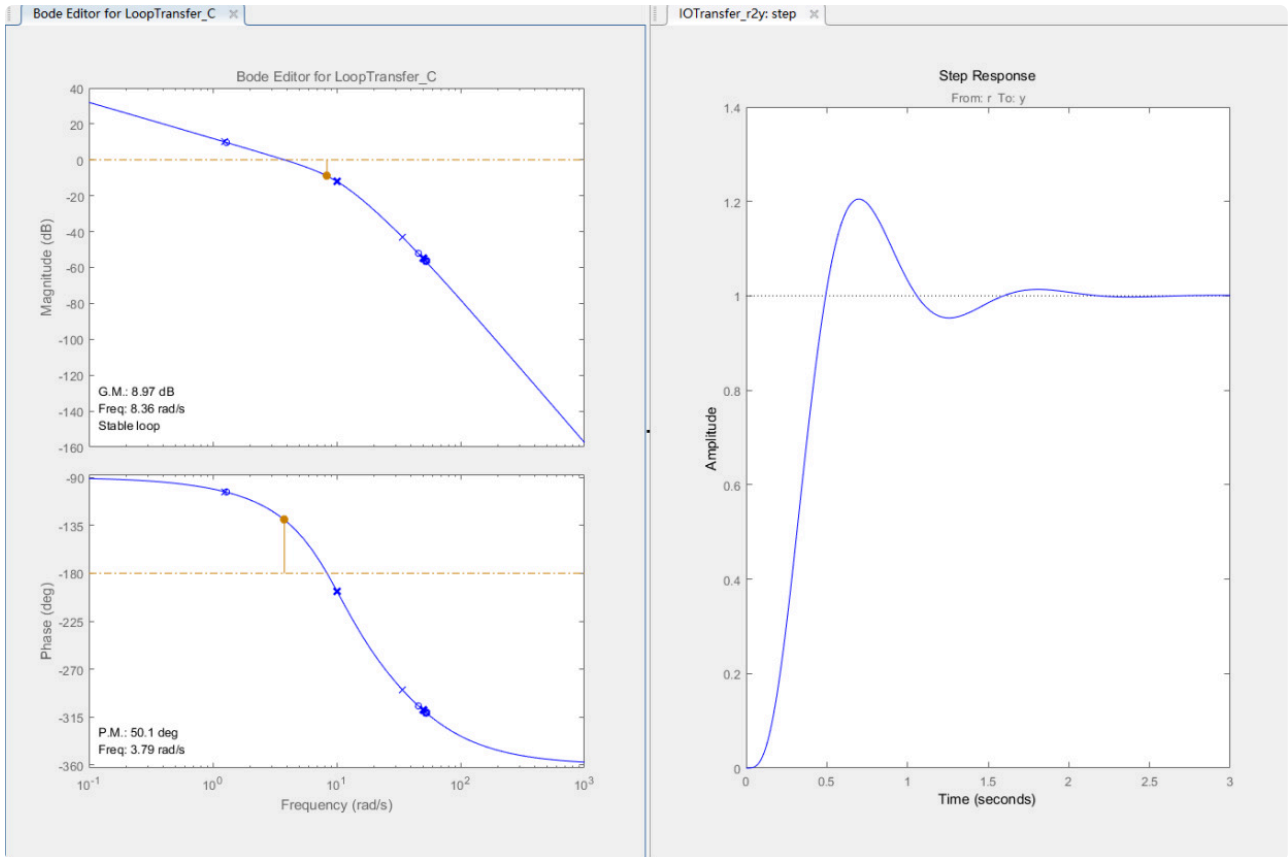
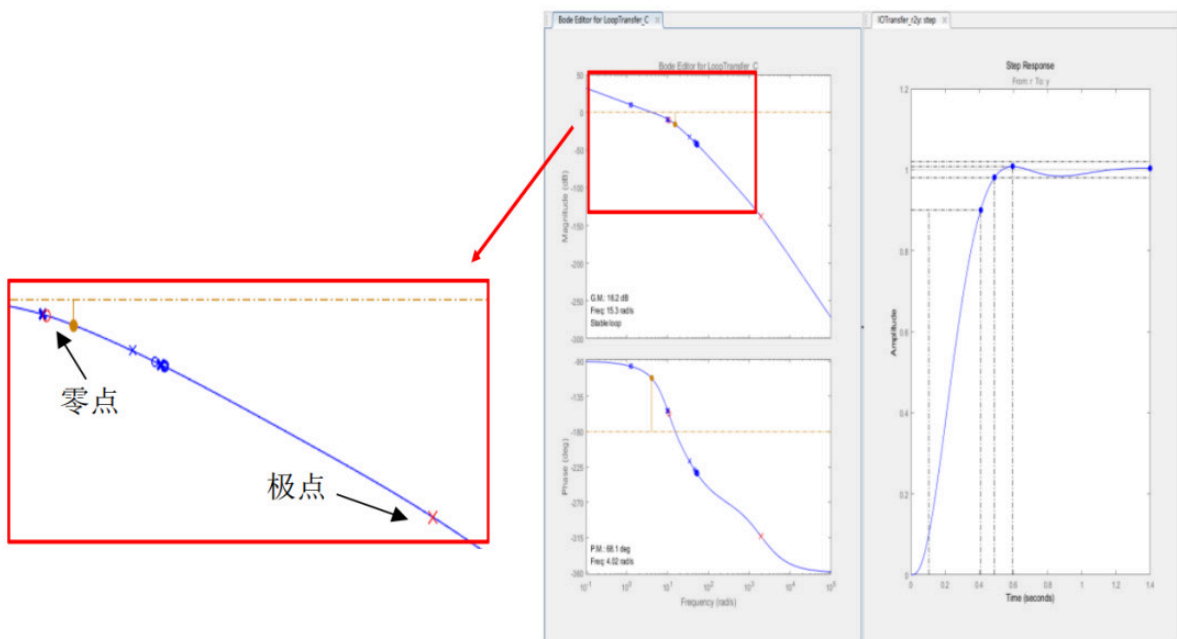
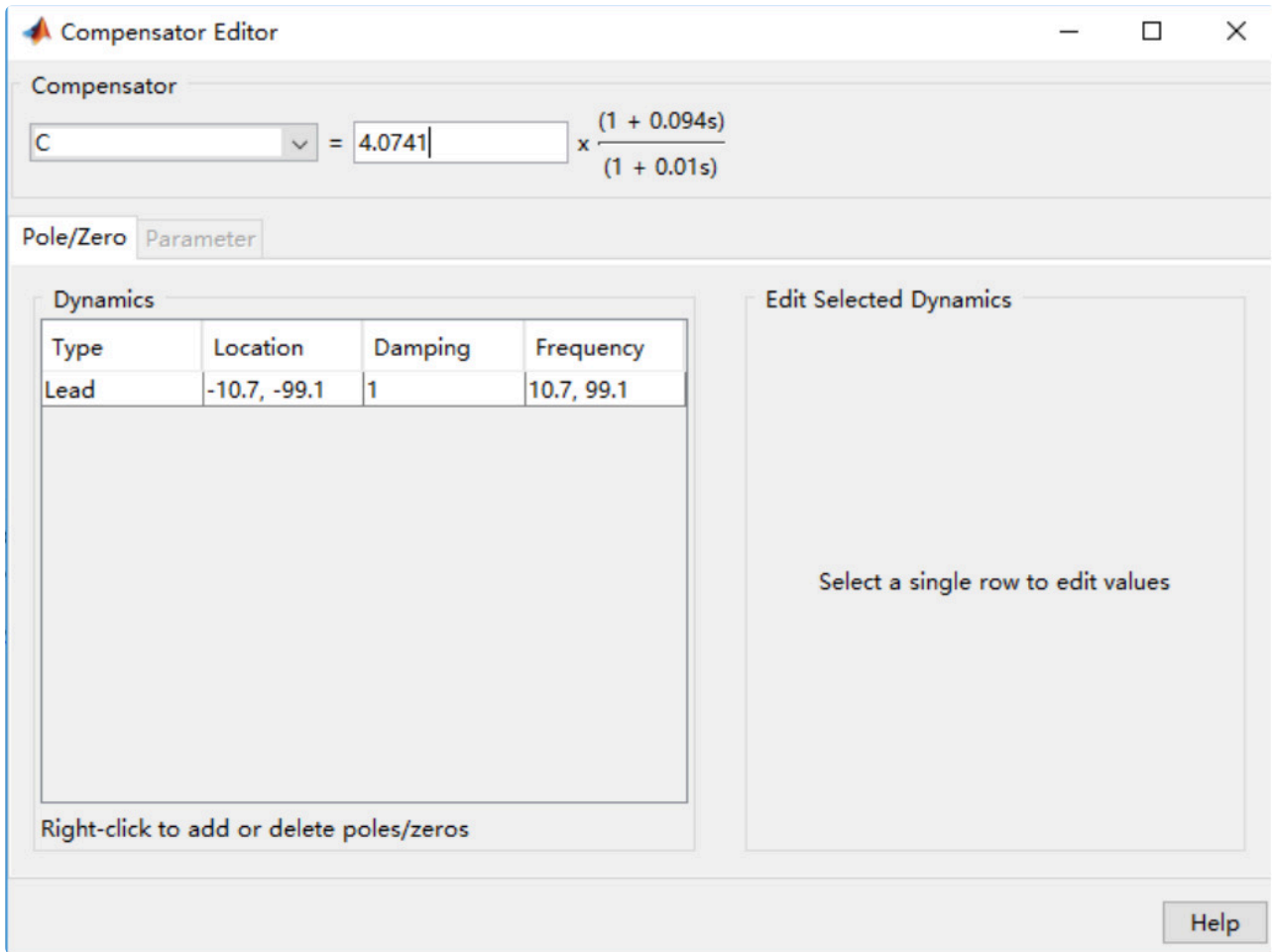


图. 加大增益对Bode图和阶跃响应的影响

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，得到合适的校正环节，如下图所示。



在 Bode 图中右键"Edit Compensator"，如下图所示

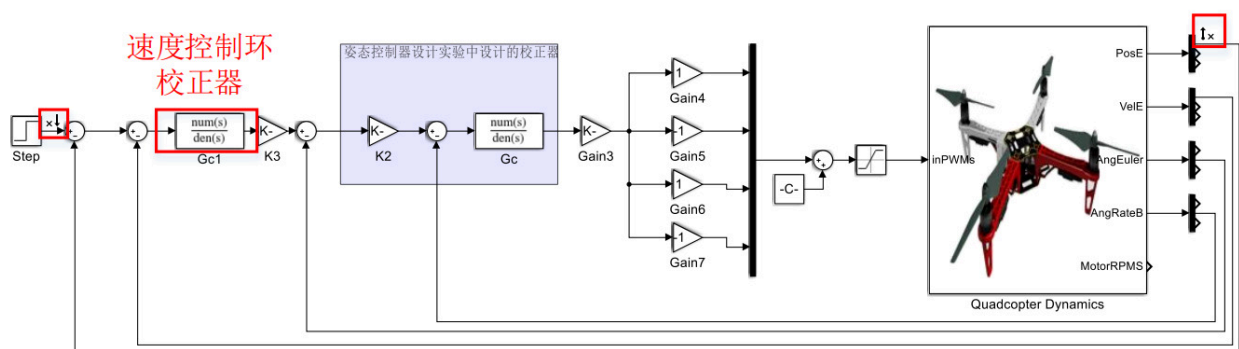


查看最终的得到的校正器为

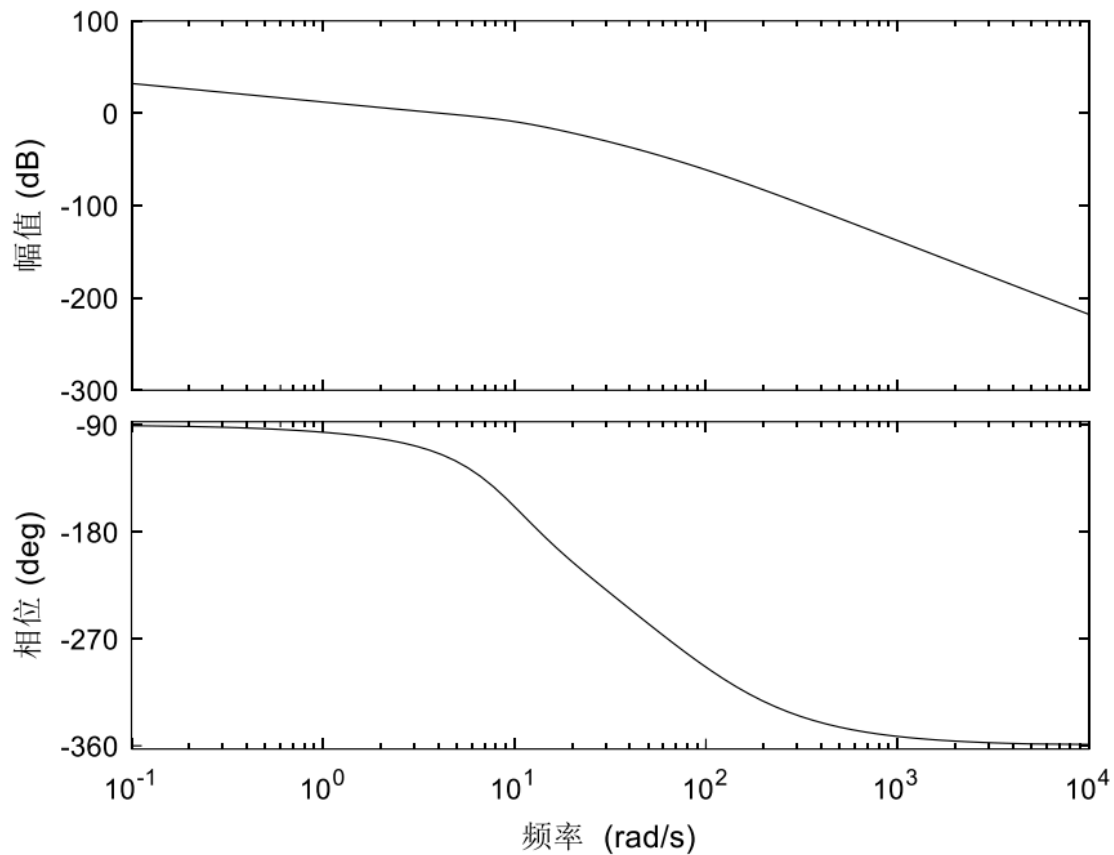
$$G_c = \frac{4.0741(1 + 0.094s)}{1 + 0.01s}$$

4.4 步骤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。）



4.5 步骤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])
```

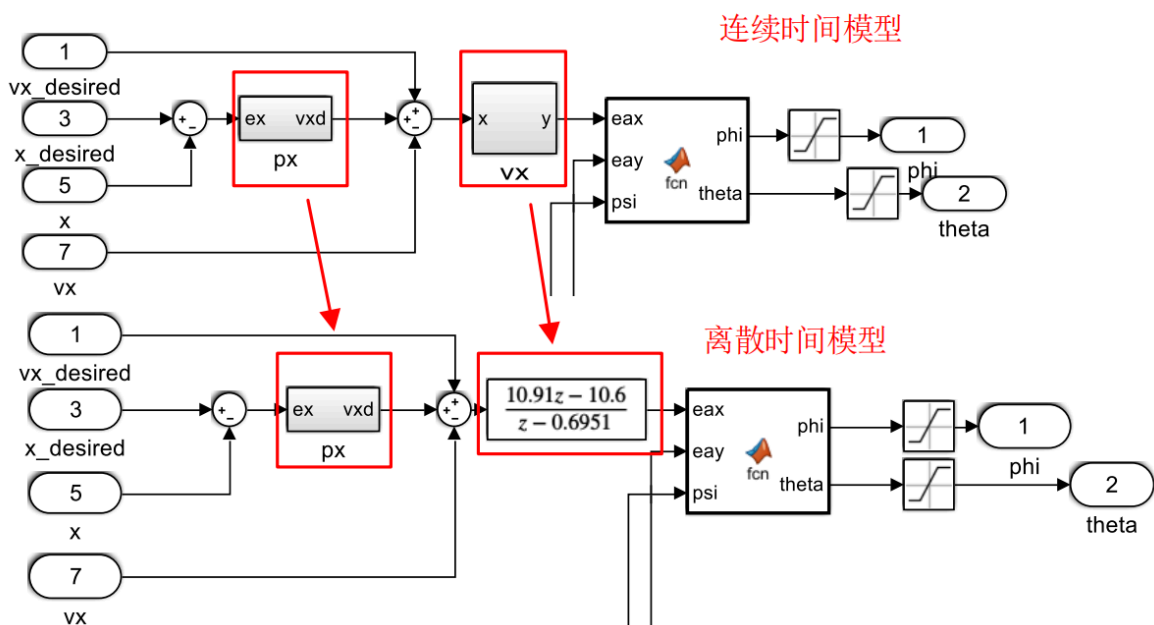
```
Hd = c2d(H, Ts, 'foh')
```

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

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

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



5. 关键知识点

- 使用系统校正方法对多旋翼进行校正。
- PID控制器。
- RflySim平台软硬件在环仿真。

6. 参考资料

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]. 北京: 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]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
3. [RflySim官方文档](#)

7. 常见问题

Q1: 若使用Pixhawk 6X飞控，平台安装时的编译命令是什么？推荐的PX4固件版本是多少？

A1: 应使用编译命令 `px4_fmu-v6x_default`，推荐的PX4固件版本为 1.12.3。其他配套飞控及编译命令请见：[RflySim硬件支持列表](#)。

Q2: 在使用ControlSystemDesigner设计控制器时，如何确定校正环节的参数？

A2: 可以通过Bode图的特性来确定校正环节参数。首先增大开环增益以缩短响应时间，然后添加超前校正环节（Lead Compensator）以提高相位裕度。在Bode图中右键选择"Add Pole/Zero"-">"Lead"，通过拖动零极点来观测响应曲线，直到满足相位裕度和截止频率的设计指标。

Q3: 如何将连续域的控制器的转换为离散域控制器？

A3: 使用MATLAB的 `c2d` 函数将s域的传递函数转换为z域传递函数。具体方法为：`Hd = c2d(H, Ts, 'foh')`，其中 `H` 为连续域传递函数，`Ts` 为仿真步长（本例中为 0.004s），`'foh'` 表示采用一阶保持器方法进行转换。

1. <https://rflysim.com/> ↩

2. 推荐配置请见：<https://rflysim.com/doc/zh/HowToInstall.pdf> ↩