

- 1.实验名称及目的
 - 1.1 实验名称
 - 1.2 实验目的
 - 1.3 关键知识点
 - 关键知识点1: PID控制器设计原理
 - 关键知识点2: 控制系统参数整定方法
 - 关键知识点3: 系统稳定性分析
 - 关键知识点4: 飞行控制系统的性能指标
 - 关键知识点5: 控制系统优化方法
- 2.实验效果
- 3.文件目录
- 4.运行环境
 - 4.1 软件要求
 - 4.2 硬件要求
- 5.实验步骤
 - 5.1 步骤1: 角速率环参数调节
 - 5.2 步骤2: 角度环参数调节
 - 5.3 步骤3:扫频得到Bode图
 - 5.4 步骤4: 横侧向通道控制性能分析
 - 5.5 步骤5: 高度速度通道控制性能分析
 - 5.6 步骤6: 速度控制器实现
- 6.参考资料
- 7.常见问题
 - Q1: 执行InitDatactrl.m脚本时出现变量未定义错误
 - Q2: 模型线性化器无法生成Bode图
 - Q3: PID参数调整后系统响应不理想

1.实验名称及目的

1.1 实验名称

底层飞行控制之分析实验

1.2 实验目的

- (1) 调节俯仰通道 PID 控制器中的参数，改善控制性能，分析 PID 各参数作用。
- (2) 使用调试后的参数，对系统进行扫频，绘制 Bode 图，观察系统幅频响应和相频响应曲线，分析稳定裕度。

- (3) 对横侧向的协调转弯控制进行稳定分析。
- (4) 对高度速度通道控制进行稳定分析。

1.3 关键知识点

此处编写本实验的关键知识点，每个知识点单独分为小节来编写。可以写本实验的具体原理、代码解析、运行结果等等。

关键知识点1：PID控制器设计原理

PID控制器（比例-积分-微分控制器）是飞行控制系统中最常用的控制算法之一。它通过比例项快速响应误差，积分项消除稳态误差，微分项预测系统变化趋势来提高系统稳定性。在无人机飞行控制中，PID控制器广泛应用于姿态控制（滚转、俯仰、偏航）和位置控制（高度、速度）等方面。

关键知识点2：控制系统参数整定方法

Ziegler-Nichols方法是经典的PID参数整定技术，通过临界增益法确定控制器参数。该方法首先将控制器设为纯比例控制，逐步增大比例增益直到系统出现持续振荡，然后根据临界增益和临界周期计算PID参数。此外还有经验公式法、优化算法（如遗传算法、粒子群优化）等现代参数整定方法。

关键知识点3：系统稳定性分析

系统稳定性是飞行控制系统设计的核心要求。通过劳斯判据、奈奎斯特判据等方法分析闭环系统的稳定性，通过相位裕度、增益裕度等指标评估系统的稳定裕度。Bode图和根轨迹是分析系统频率响应特性和稳定性的常用工具。

关键知识点4：飞行控制系统的性能指标

飞行控制系统的性能通常通过时域指标评估，包括上升时间、峰值时间、超调量、调节时间等。这些指标反映了系统的响应速度、稳定性和准确性。频域指标如带宽、谐振峰值等也用于评估系统的动态性能。

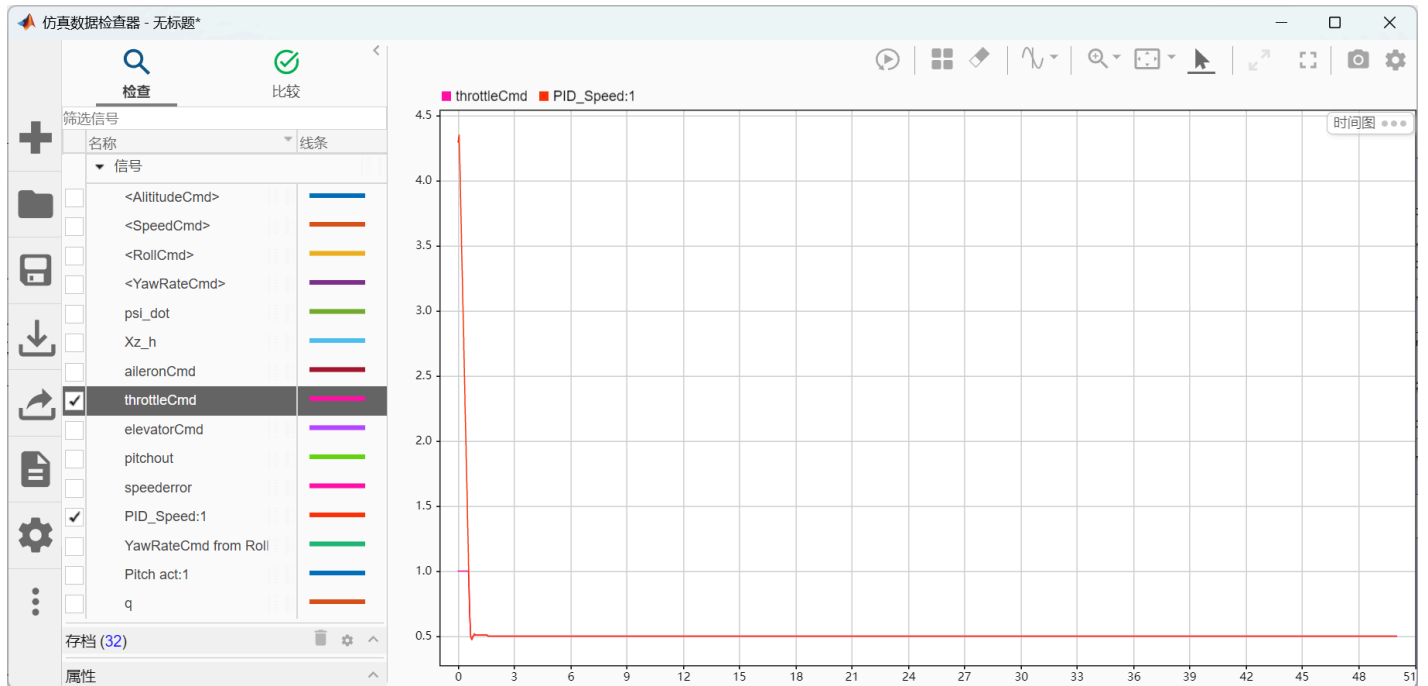
关键知识点5：控制系统优化方法

现代飞行控制系统常采用优化算法提高控制性能，如遗传算法、粒子群优化、模糊逻辑控制等。这些方法能够自动调整控制器参数，适应系统参数变化和外界干扰，提高系统的鲁棒性和自适应能力。

更多详细实验原理可见：全权,高文瀚,刘润潇,陈鑫泉,戴训华,吕书礼,徐琳,李悦.微小型固定翼无人机飞行控制设计与实践. 北京, 2025

2. 实验效果

通过调节高度和速度控制器参数，实现了对无人机高度和空速的精确控制，高度控制器能够使无人机快速准确地跟踪高度指令，速度控制器则保证了飞行过程中空速的稳定性。



3. 文件目录

例程目录: [\[安装目录\]\RflySimAPIs\5.RflySimFlyCtrl\1.BasicExps\e10-FixedWingCtrl\code_6\e4-2](#)

4. 运行环境

4.1 软件要求

Windows 10及以上版本; RflySim工具链; MATLAB2022B以上版本。

4.2 硬件要求

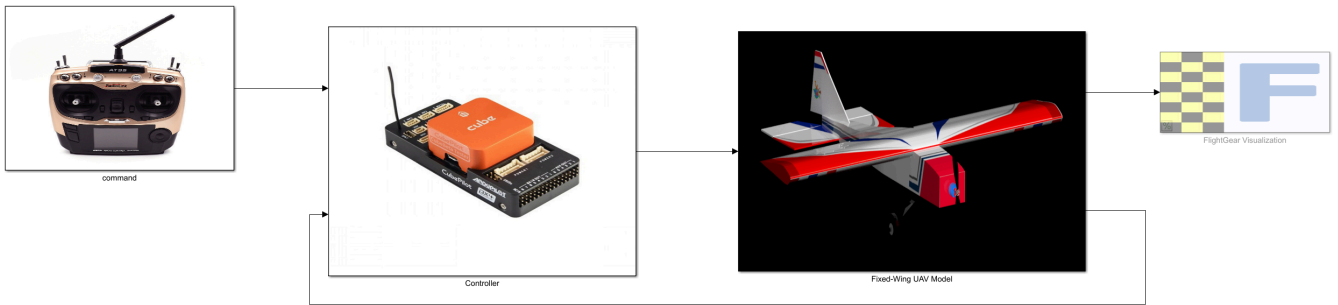
笔记本/台式电脑1台

①: 推荐配置请见: <https://rflysim.com/>

5. 实验步骤

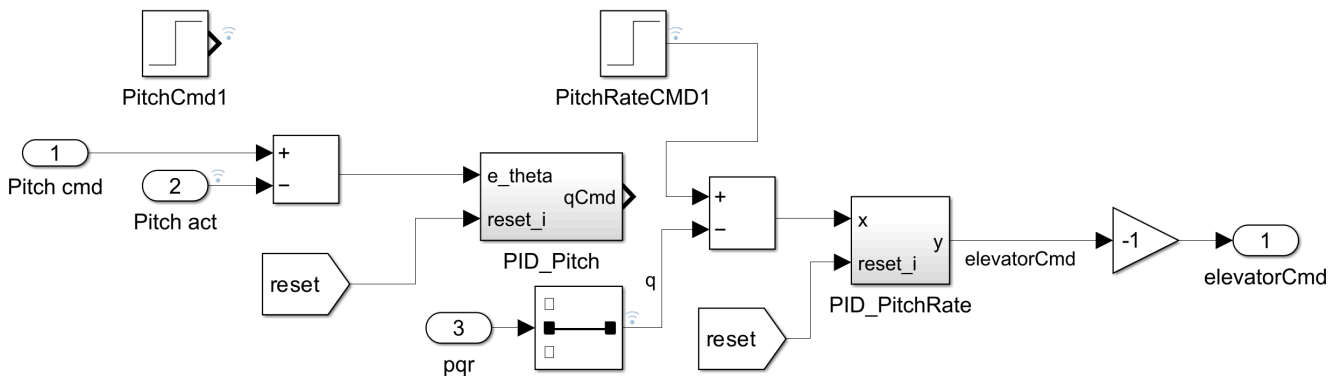
5.1 步骤1：角速率环参数调节

1. 使用MATLAB运行InitDatactrl.m，并打开SmallFixedWingUAVanalysis.slx模型。

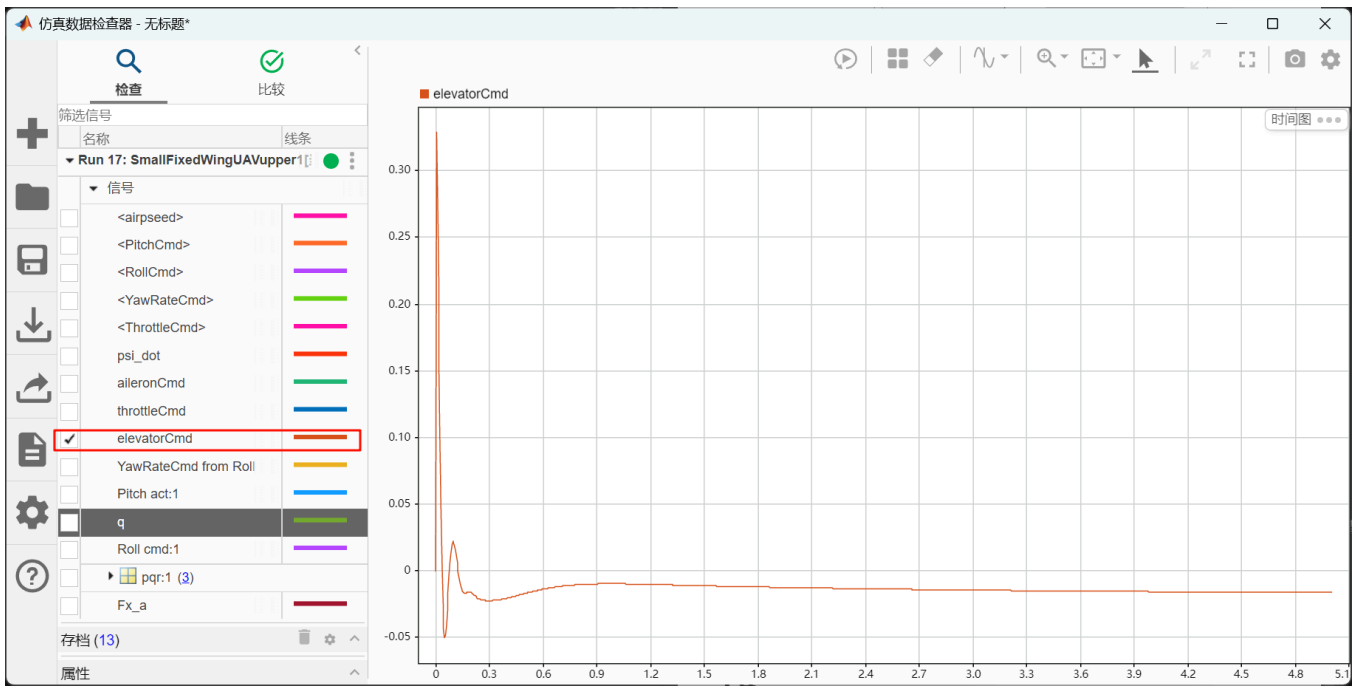


2. 进入到Controller/Pitch Controller模块中，将PID_Pitch线断开，PitchRateCMD1连接到ADD6中

SmallFixedWingUAVanalysis > Controller > Pitch Controller

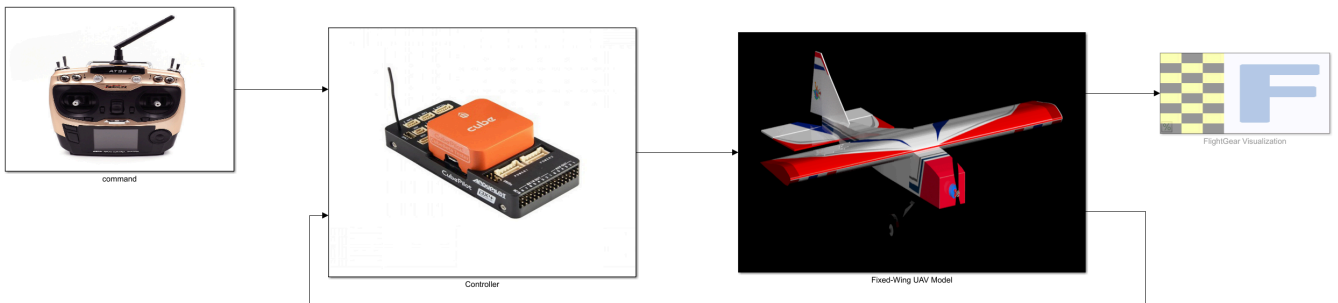


3. 运行SmallFixedWingUAVanalysis.slx，点击数据检查器，并找到对应信号。

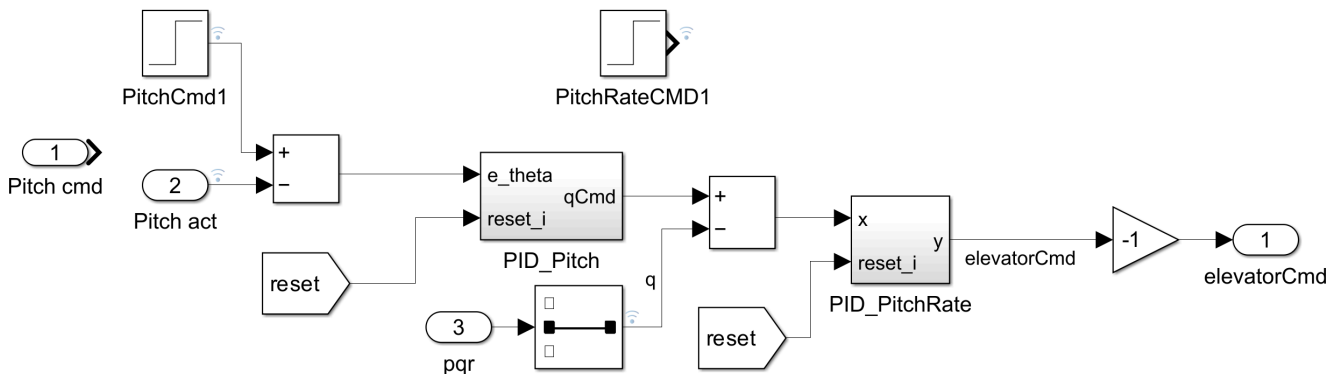


5.2 步骤2：角度环参数调节

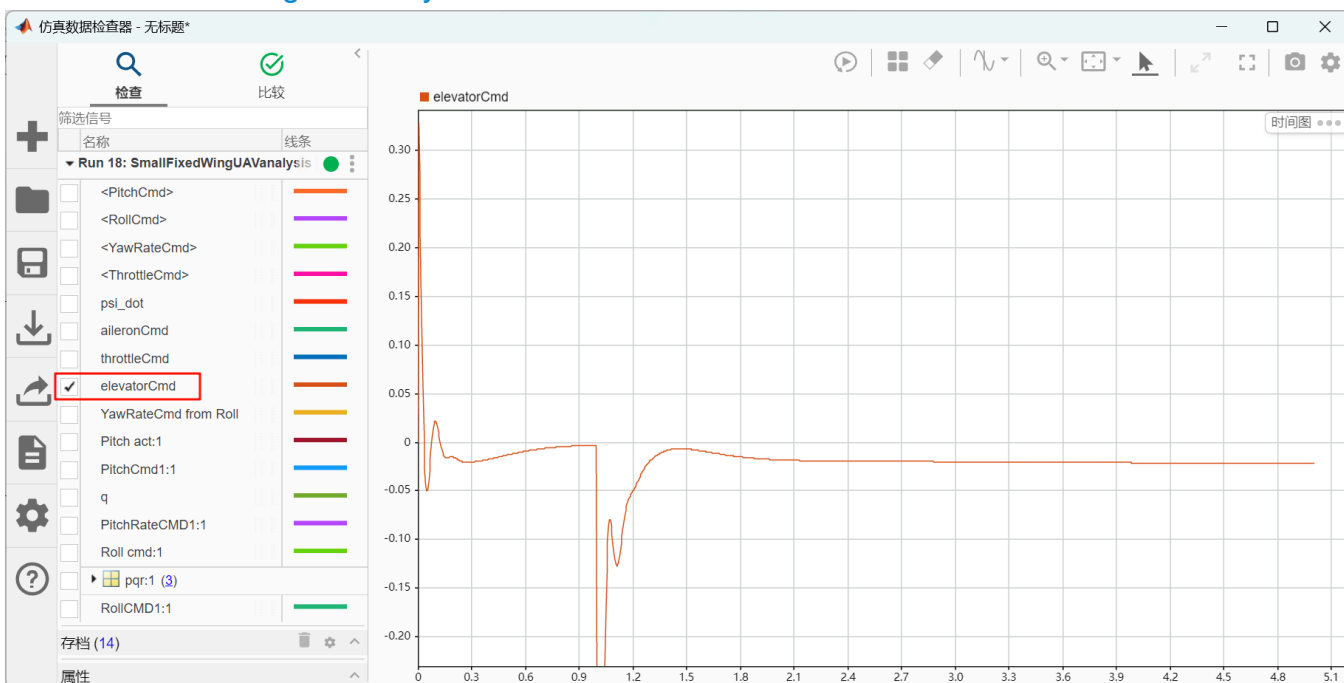
1. 使用MATLAB运行InitDatactrl.m，并打开SmallFixedWingUAVanalysis.slx模型。



2. 进入到Controller/Pitch Controller模块中，将Pitch cmd线断开，PitchCmd1连接到ADD1中。

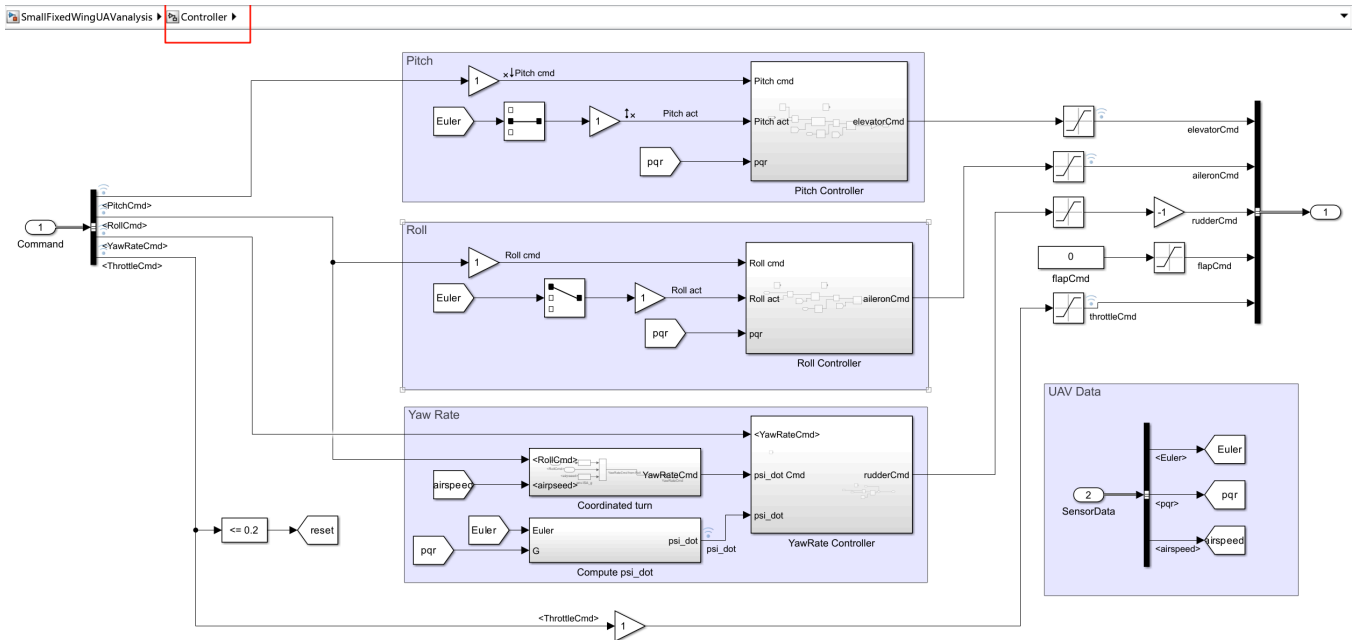


3. 运行SmallFixedWingUAVanalysis.slx，点击数据检查器，并找到对应信号。



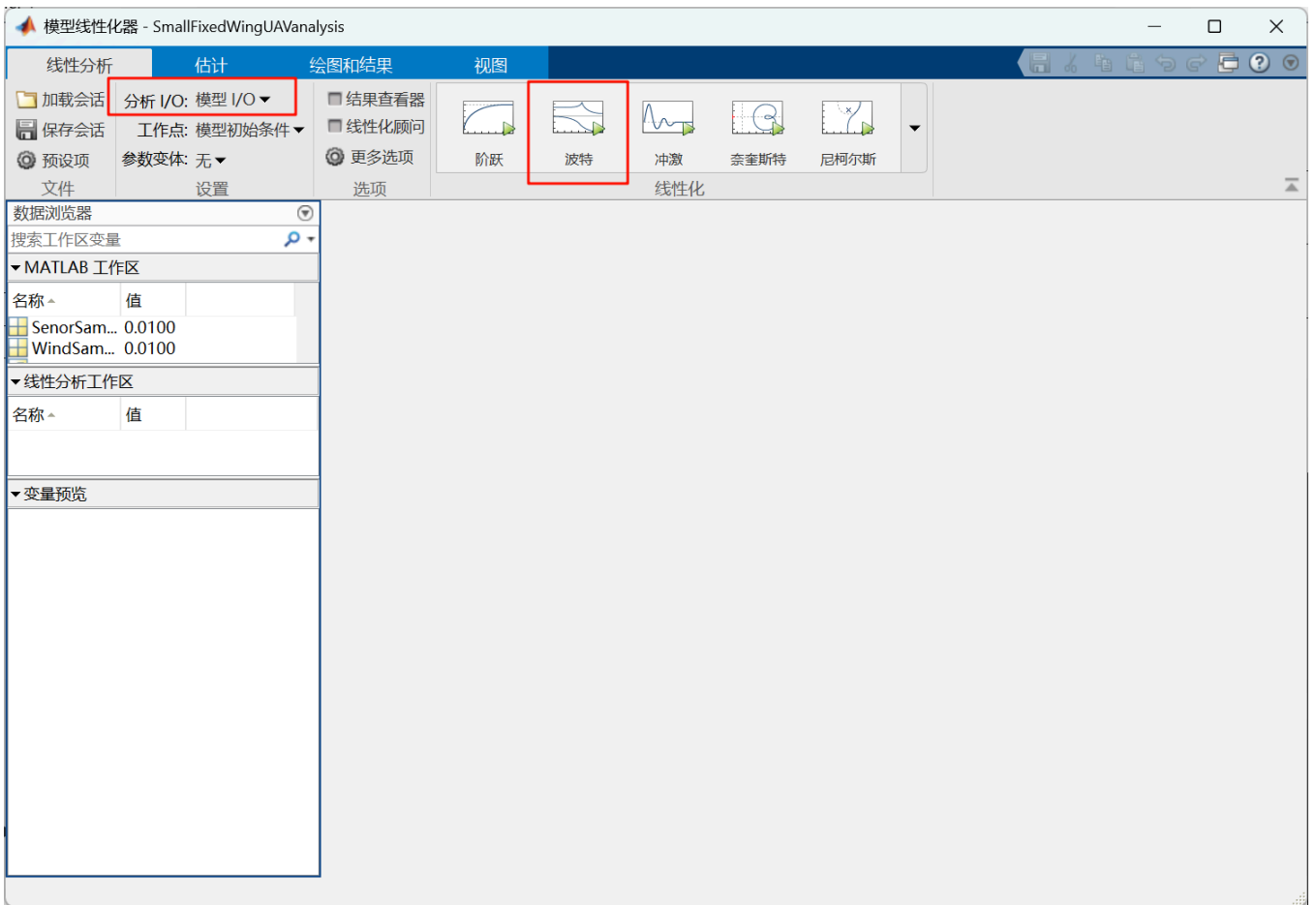
5.3 步骤3:扫频得到Bode图

1. 使用MATLAB运行InitDatactrl.m，并打开SmallFixedWingUAVanalysis.slx模型。进入到Controller模块。

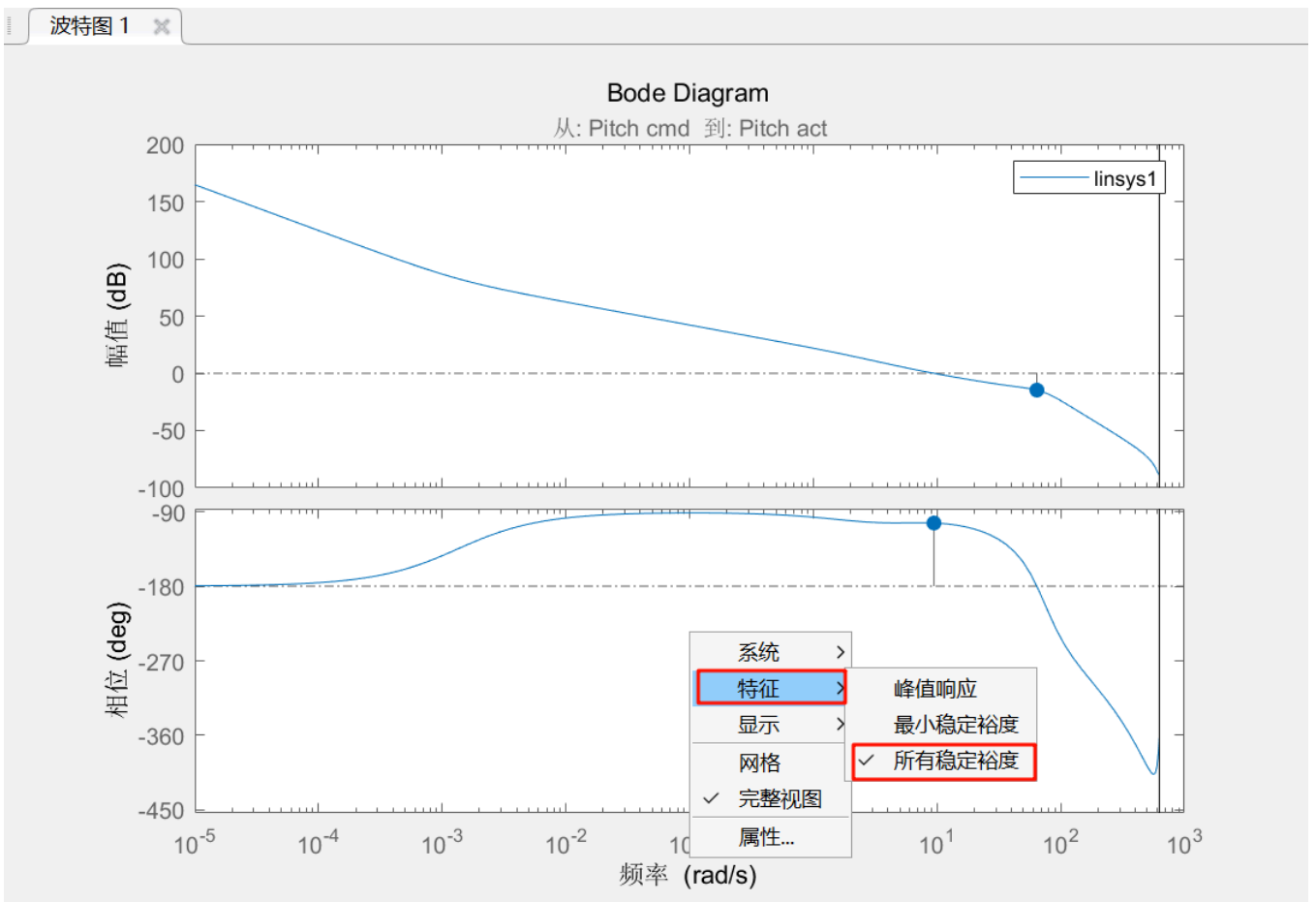


2. 在工具栏中APP中点击线性化管理器-模型线性化器

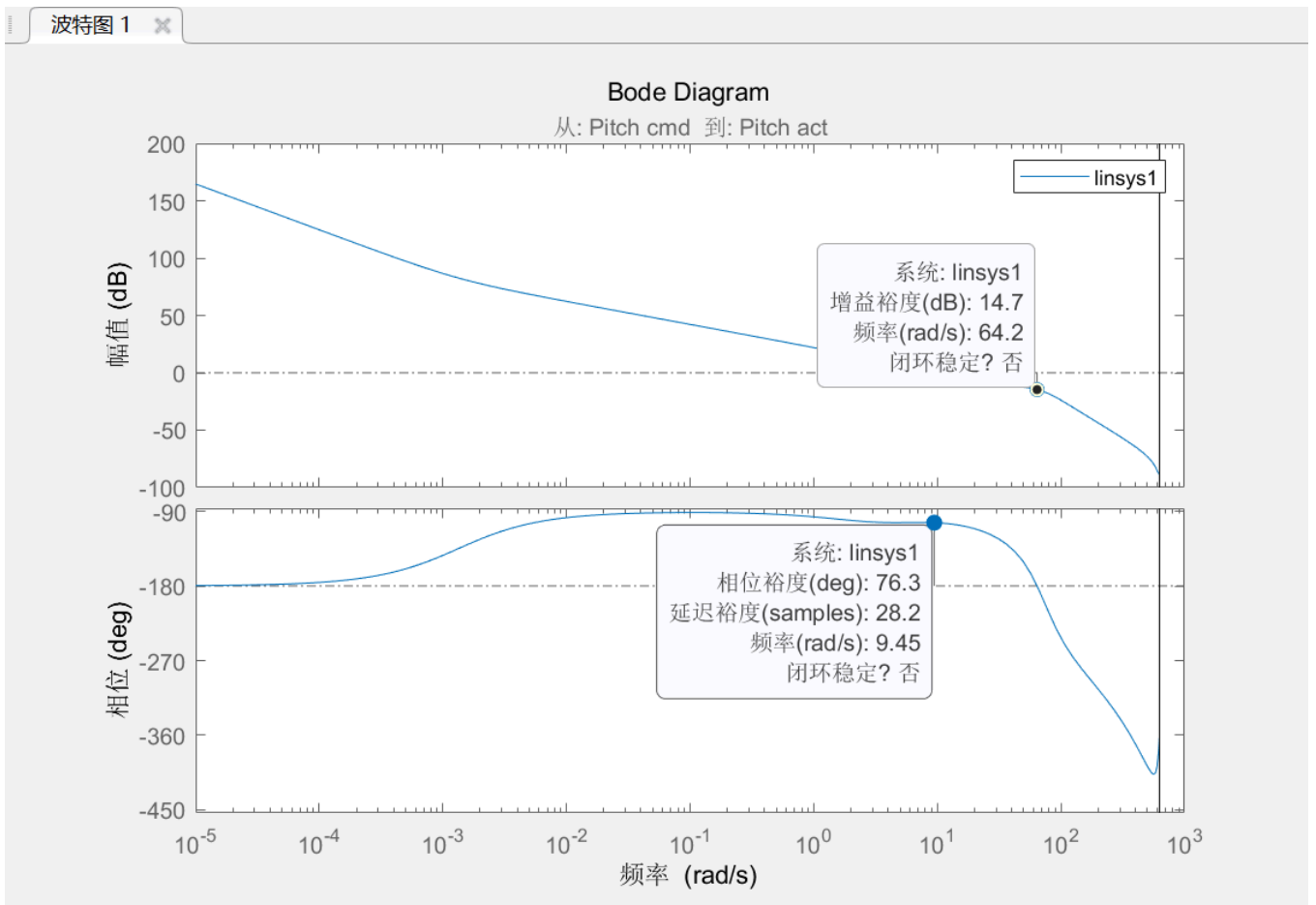
3. 分析I/O选择为模型I/O后，点击波特，生成波特图



4. 在生成的波特图中空白处，点击右键，在特征中找到所有稳定裕度，进行勾选。

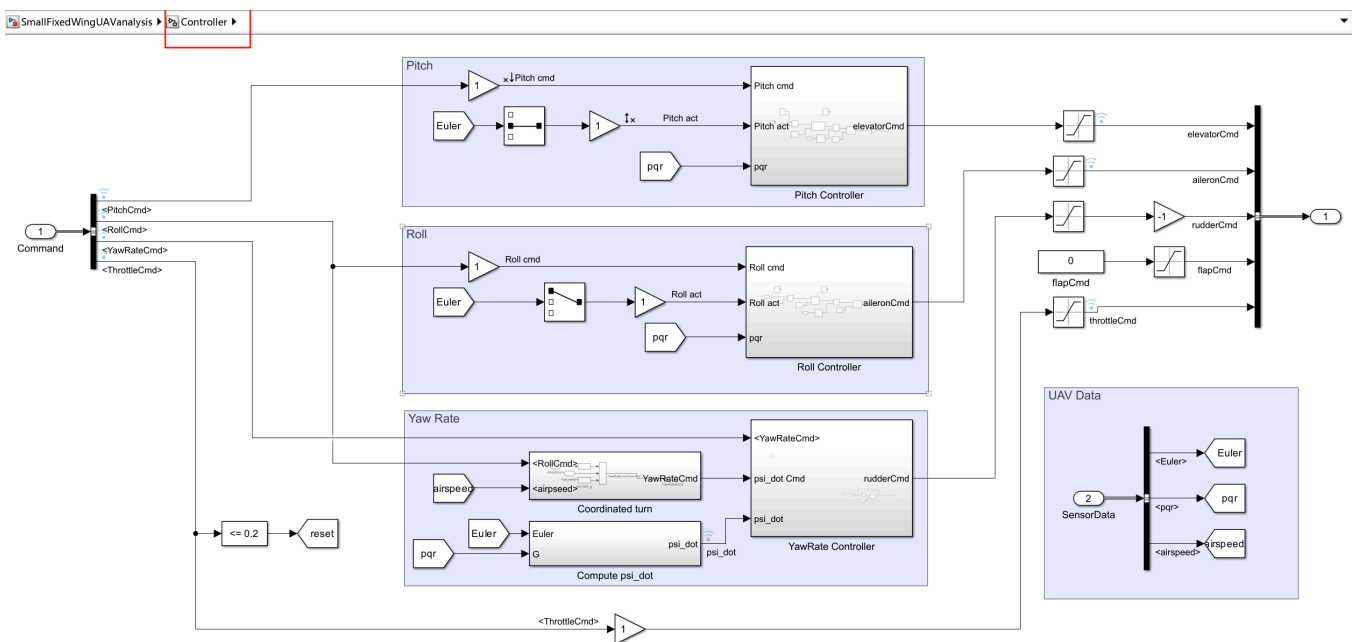


5. 可以看到扫频得到的幅值裕度，频率，相位裕度。

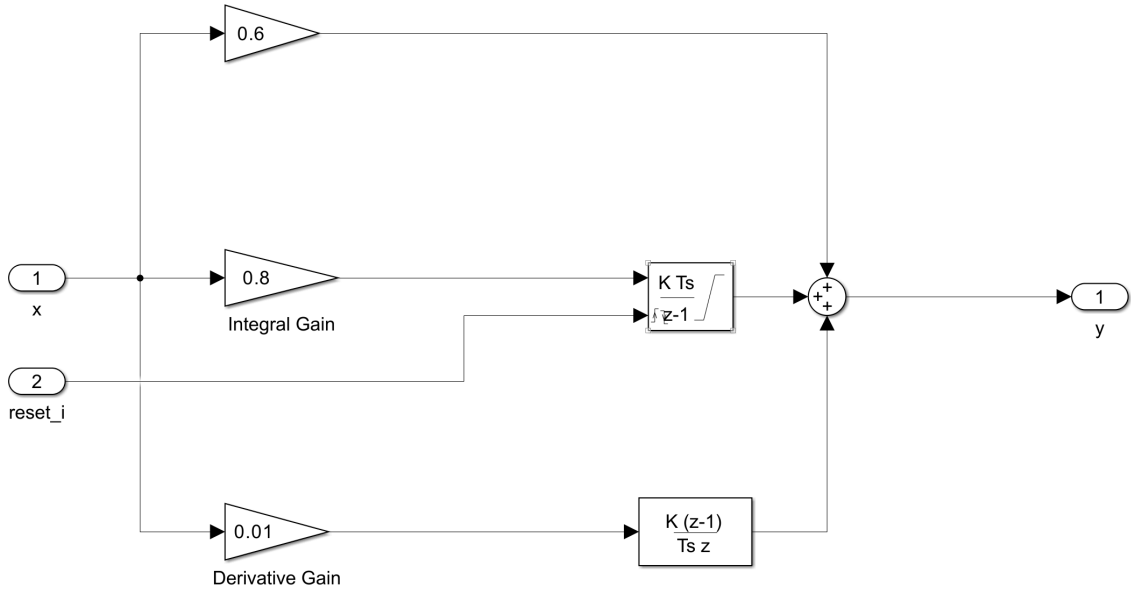


5.4 步骤4：横侧向通道控制性能分析

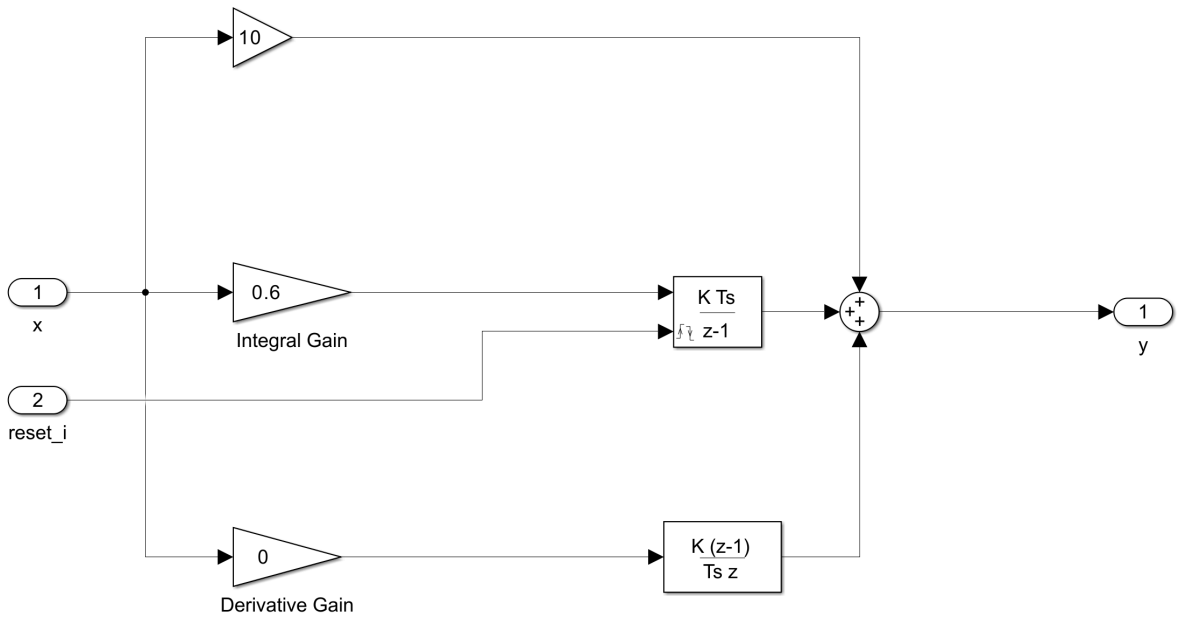
1. 使用MATLAB运行InitDatactrl.m，并打开SmallFixedWingUAVanalysis.slx模型。进入到Controller模块。



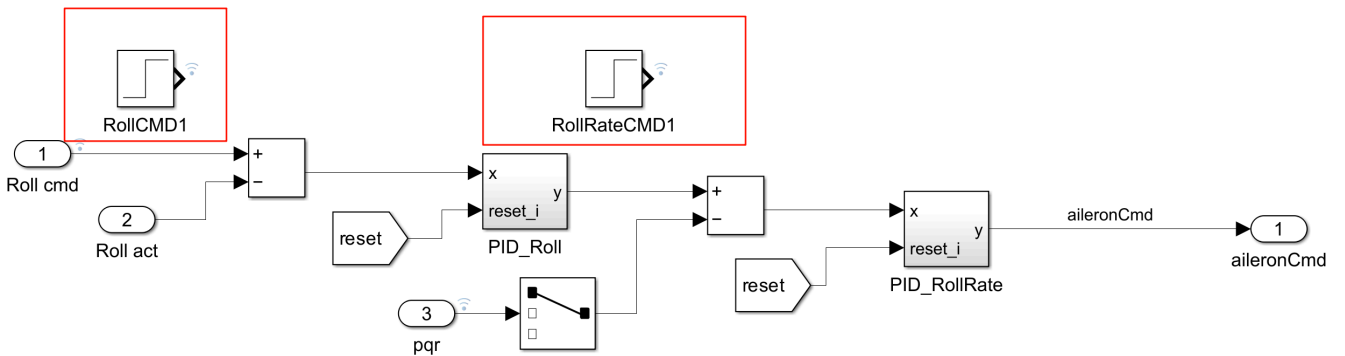
2. 进入到Roll Controller模块调整参数。



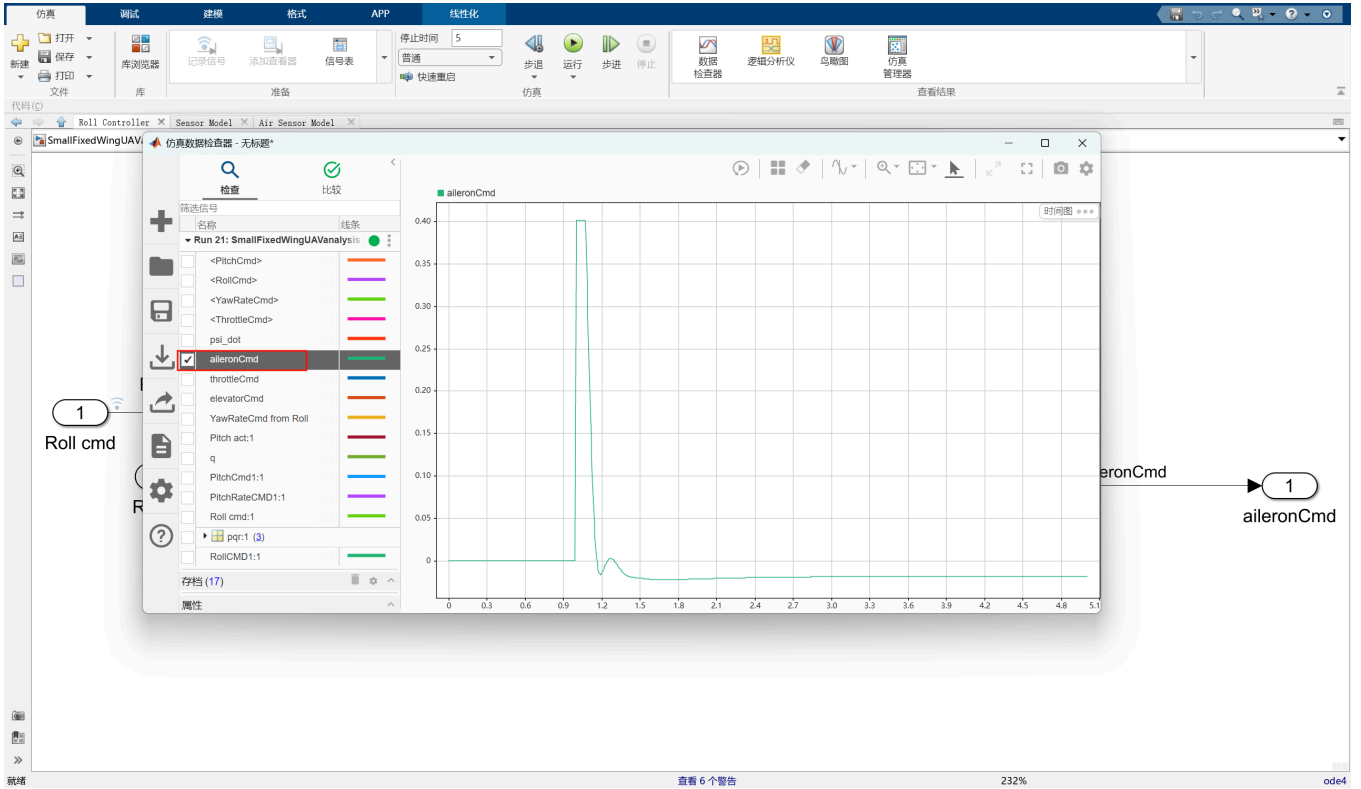
3. 进入到PID_Roll模块调整参数。



4. 根据步骤2和步骤3调整RollCMD1和RollRateCMD1模块。

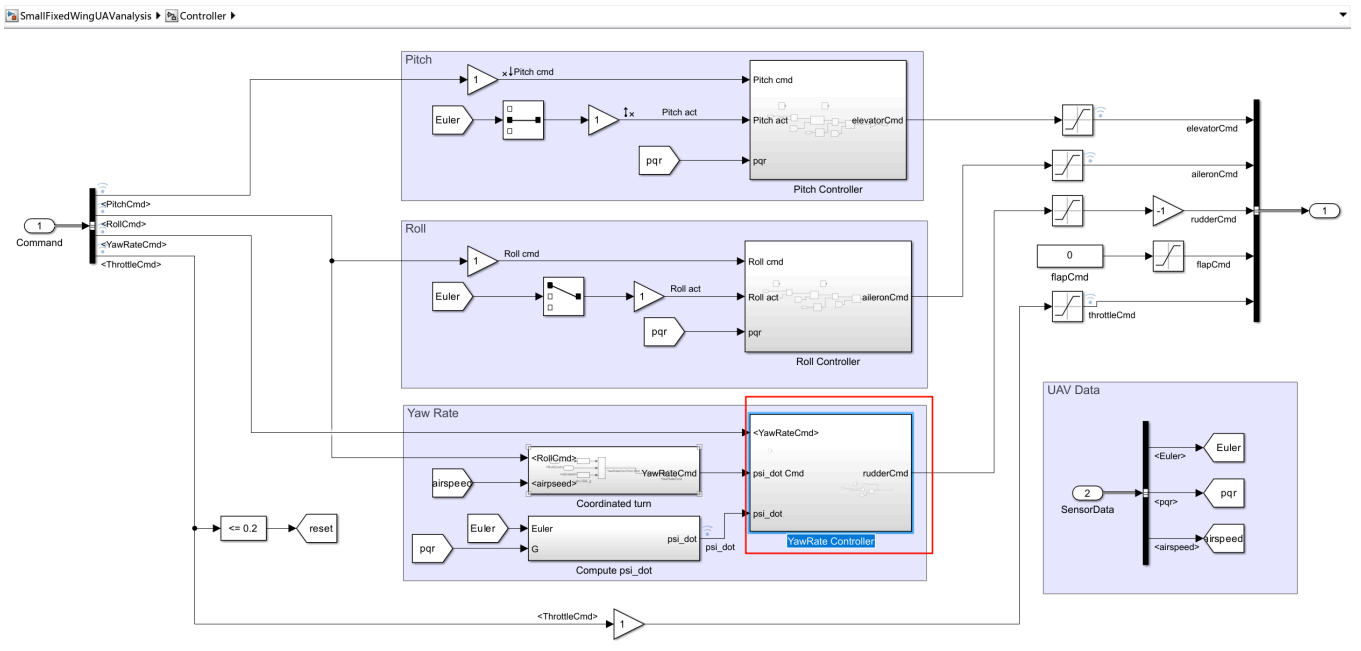


5. 运行SmallFixedWingUAVAnalysis.slx，点击数据检查器，并找到对应信号。

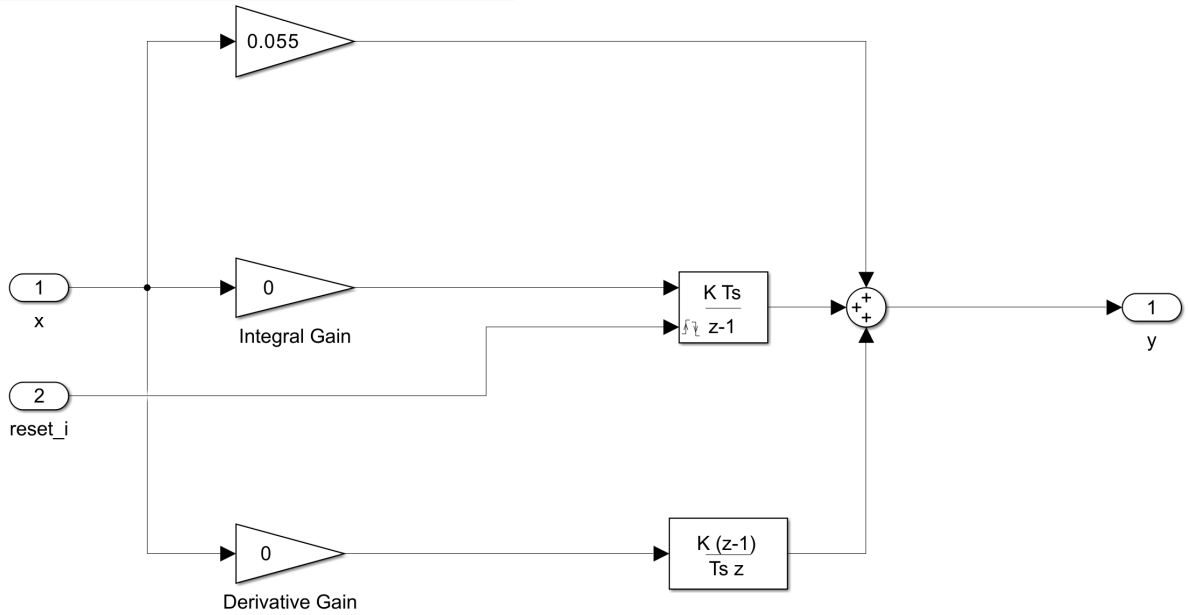


5.5 步骤5：高度速度通道控制性能分析

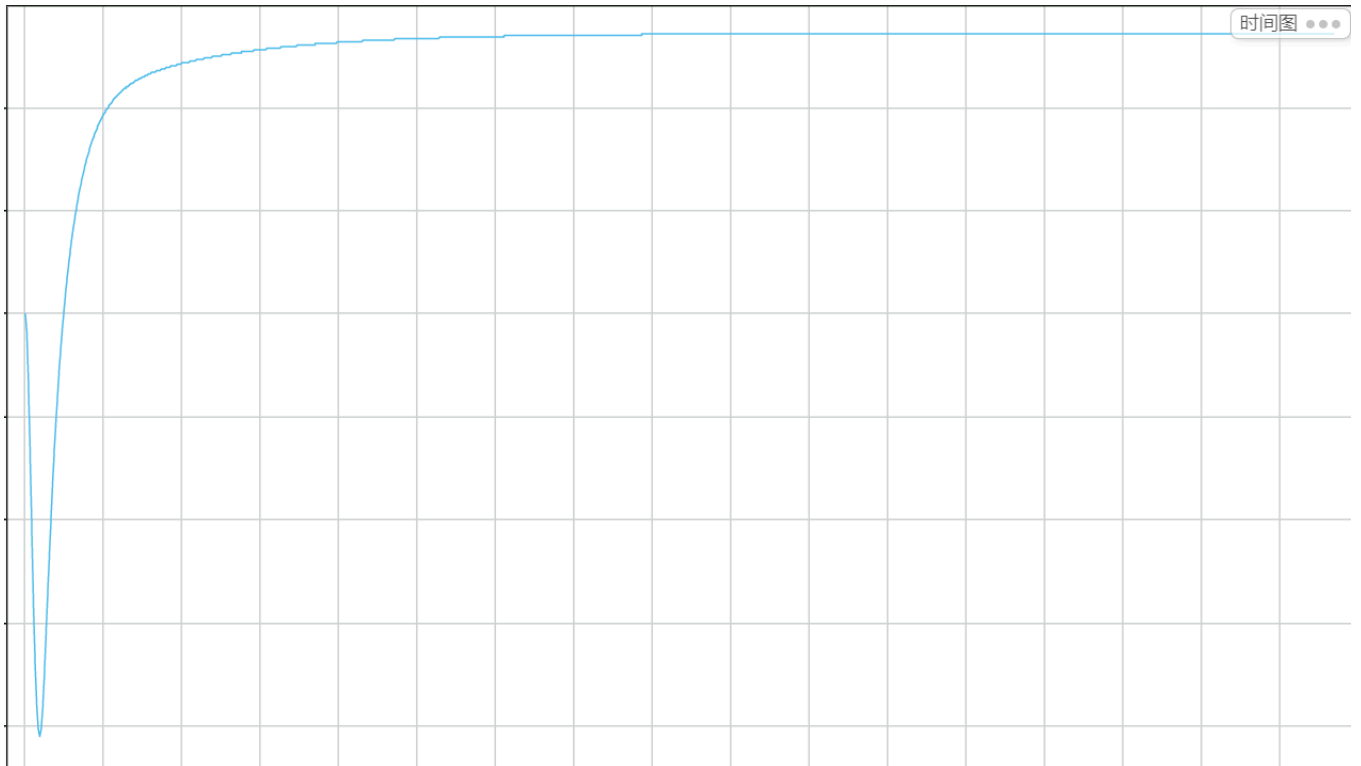
1. 使用MATLAB运行InitDatactrl.m，并打开SmallFixedWingUAVupper.slx模型。进入到YawRate Controller模块。



2. 进入到SmallFixedWingUAVupper/Control/Altitude and Airspeed Controller/altitude controller/PID_Altitude模块下修改参数高度比例参数：0.055，高度积分参数为0，高度微分参数为0

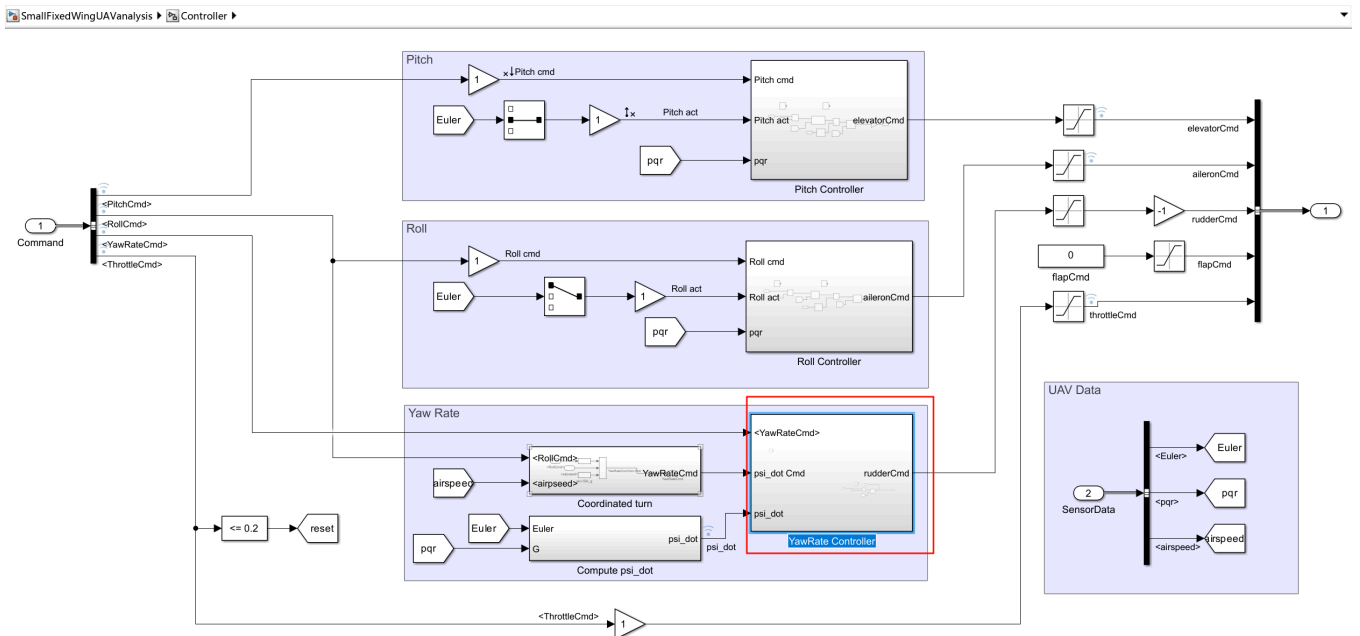


3. 运行SmallFixedWingUAVupper.slx，点击数据检查器，并找到对应信号。

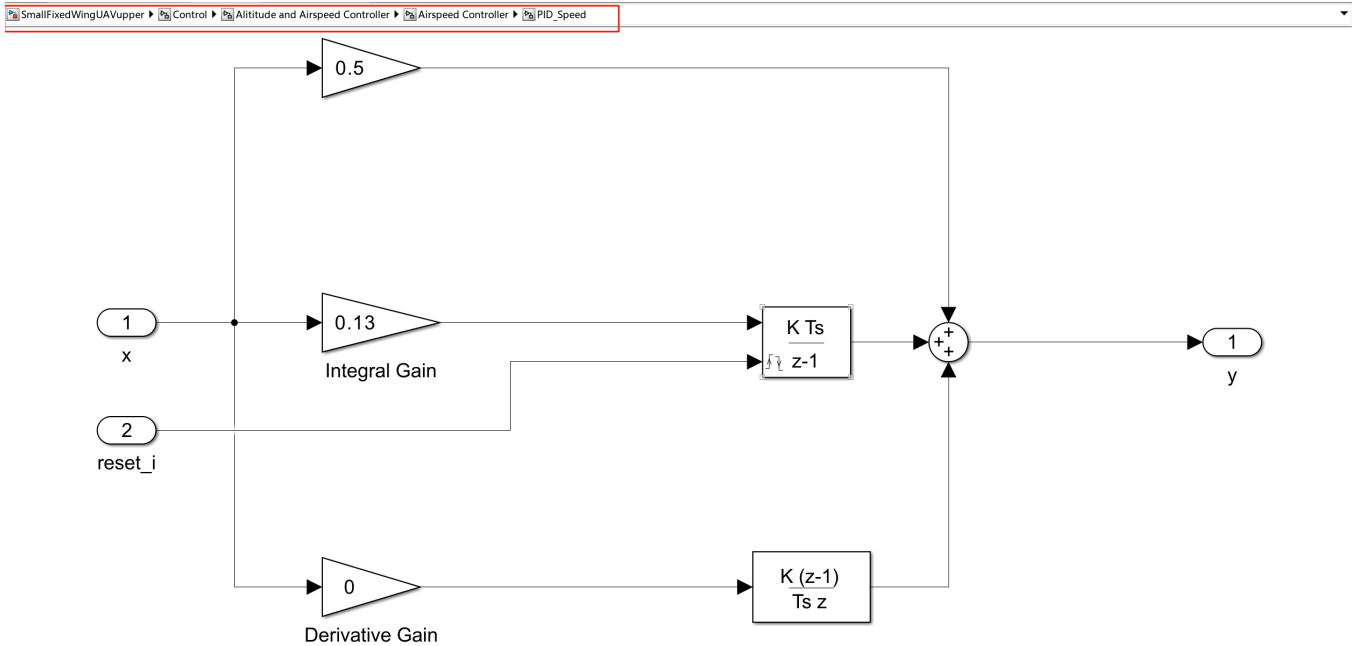


5.6 步骤6：速度控制器实现

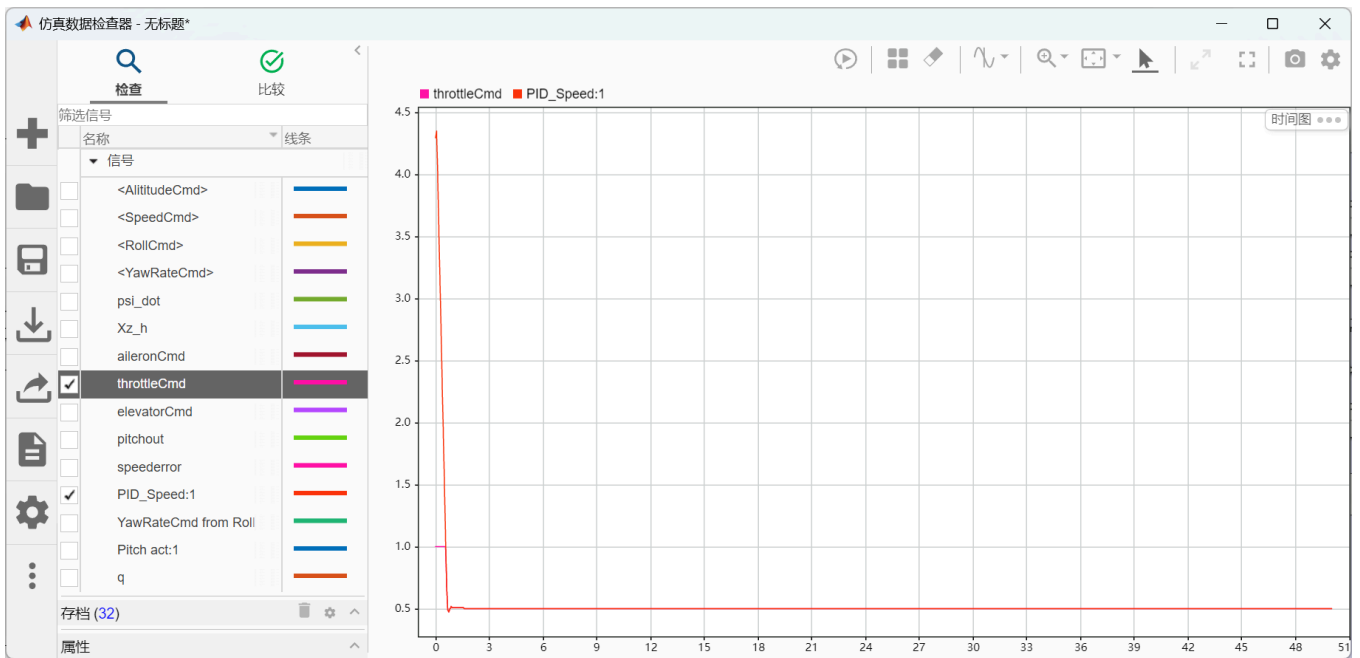
1. 使用MATLAB运行InitDatactrl.m，并打开SmallFixedWingUAVupper.slx模型。进入到YawRate Controller模块。



2. 进入到SmallFixedWingUAVupper/Control/Altitude and Airspeed Controller/Airspeed Controller/PID_Speed模块下修改参数高度比例参数：0.05，高度积分参数为0.13，高度微分参数为0



3. 运行SmallFixedWingUAVupper.slx，点击数据检查器，并找到对应信号。



6.参考资料

1. 全权,高文瀚,刘润潇,陈鑫泉,戴训华,吕书礼,徐琳,李悦.微小型固定翼无人机飞行控制设计与实践.北京, 2025.

7.常见问题

Q1: 执行InitDatactrl.m脚本时出现变量未定义错误

在运行InitDatactrl.m脚本时, MATLAB提示某些变量未定义或出现维度不匹配错误。

A1: 这种情况通常是由于MATLAB工作区中存在与脚本中同名的变量, 导致初始化过程出现问题。解决方法是先执行clear all命令清除工作区中的所有变量, 然后再重新运行InitDatactrl.m脚本。此外, 确保使用MATLAB R2022b或更高版本, 以避免兼容性问题。

Q2: 模型线性化器无法生成Bode图

在步骤3中使用模型线性化器时, 无法正确生成系统的Bode图或生成的图形不完整。

A2: 首先检查是否正确选择了分析I/O点, 确保在Controller模块中正确设置了输入和输出点。其次确认已勾选"所有稳定裕度"选项以显示完整的频率响应信息。如果仍有问题, 尝试重启MATLAB并重新打开模型文件, 然后再次执行线性化操作。

Q3: PID参数调整后系统响应不理想

调整PID参数后，系统响应出现振荡过大、响应速度慢或稳态误差明显等问题。

A3: PID参数调整需要遵循一定的原则和顺序。建议按照以下步骤进行：首先调整比例增益 K_p 直到获得较快的响应速度但允许一定的超调；然后增加积分增益 K_i 以消除稳态误差，但要注意避免引起振荡；最后添加微分增益 K_d 来减小超调和振荡。每次只调整一个参数，观察系统响应变化后再进行下一步调整。