

- 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
    - 控制系统设计流程
    - 俯仰通道控制系统设计
    - 控制器设计步骤
    - MATLAB代码实现
    - 控制系统设计器使用
    - 系统稳定性分析
- 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：角速率环分析
  - 步骤2：设计角速环矫正器
- 6.参考资料
- 7.常见问题
  - Q1：线性化模型与实际系统存在偏差
  - Q2：控制器参数调节困难
  - Q3：仿真结果与实际飞行存在差异

# 1.实验名称及目的

## 1.1实验名称

底层飞行控制之设计实验

## 1.2实验目的

固定翼无人机起飞后到达起始点 ( A(100m, 100m, 50m) ), 并以 12.12m/s 的速度直线飞向点 ( B(150m, 100m, 70m) )。设计控制器使得固定翼无人机能够稳定飞行且有较好的飞行品质。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 (  $e_{\text{rss}} \leq 1$  ), 截止频率  $> 10\text{rad/s}$ , 相位裕度  $> 55^\circ$ , 幅值裕度  $> 10\text{dB}$ 。姿态角度环截止频率  $> 5\text{rad/s}$ , 相位裕度  $> 50^\circ$ 。

# 1.3 关键知识点

## 控制系统设计流程

控制系统设计主要包括以下步骤：

1. **系统建模**：使用Simulink模型对无人机进行建模
2. **参数设置**：配置系统参数，如增益、时间常数等
3. **控制器设计**：通过Bode图分析系统特性，设计合适的控制器
4. **性能验证**：通过仿真验证系统性能

## 俯仰通道控制系统设计

- **系统传递函数**：

$$G(s) = \frac{5250(8s + 1)(100s + 1)(0.5 + 2.308 \times 10^3)}{(s + 21.94)(s + 10)(s + 54.13)(s + 55.44)(s + 100)(s + 11.226)}$$

- **Bode图分析**：
  - 俯仰角速度闭环响应
  - 角速率环的闭环阶跃响应
  - 俯仰角速度环的开环Bode图
  - 俯仰角速度环的闭环Bode图

## 控制器设计步骤

1. **系统线性化**：对非线性系统进行线性化处理
2. **开环分析**：分析系统的开环特性
3. **闭环设计**：设计合适的控制器参数
4. **性能验证**：通过仿真验证系统性能

## MATLAB代码实现

```
% 示例代码
num=[ 1.292e05 1.888e07 6.557e08 6.006e09 1.208e10 1.162e-05 6.379e-10];
den=[1 276.6 2.956e04 1.729e06 6.711e07 1.431e09 1.126e10 1.98e10 3.227e09 -6.798e-06 -1.028e-07];
G=tf(num,den);
controlSystemDesigner(G)
```

## 控制系统设计器使用

- 打开控制系统设计器
- 设置输入输出信号
- 调整控制器参数

- 验证系统性能

## 系统稳定性分析

- 通过Bode图分析系统的相位裕度和增益裕度
- 确保系统具有足够的稳定裕度
- 优化控制器参数以提高系统性能

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

通过本实验，成功实现了固定翼无人机的姿态控制系统设计。在完成控制器设计后，系统满足预设的性能指标：

### 1. 姿态角速度环性能：

- 稳态误差 ( $e_{\text{rss}} \leq 1$ )
- 截止频率  $> 10$  rad/s
- 相位裕度  $> 55^\circ$
- 幅值裕度  $> 10$  dB

### 2. 姿态角度环性能：

- 截止频率  $> 5$  rad/s
- 相位裕度  $> 50^\circ$

系统在仿真中表现出良好的动态响应特性，超调量小，调节时间短，稳态精度高。无人机能够稳定跟踪给定的姿态指令，具备良好的飞行品质。

## 3. 文件目录

例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\5.RflySimFlyCtrl\1.BasicExps\10-FixedWingCtrl\code\\_6\4-3](#)

## 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

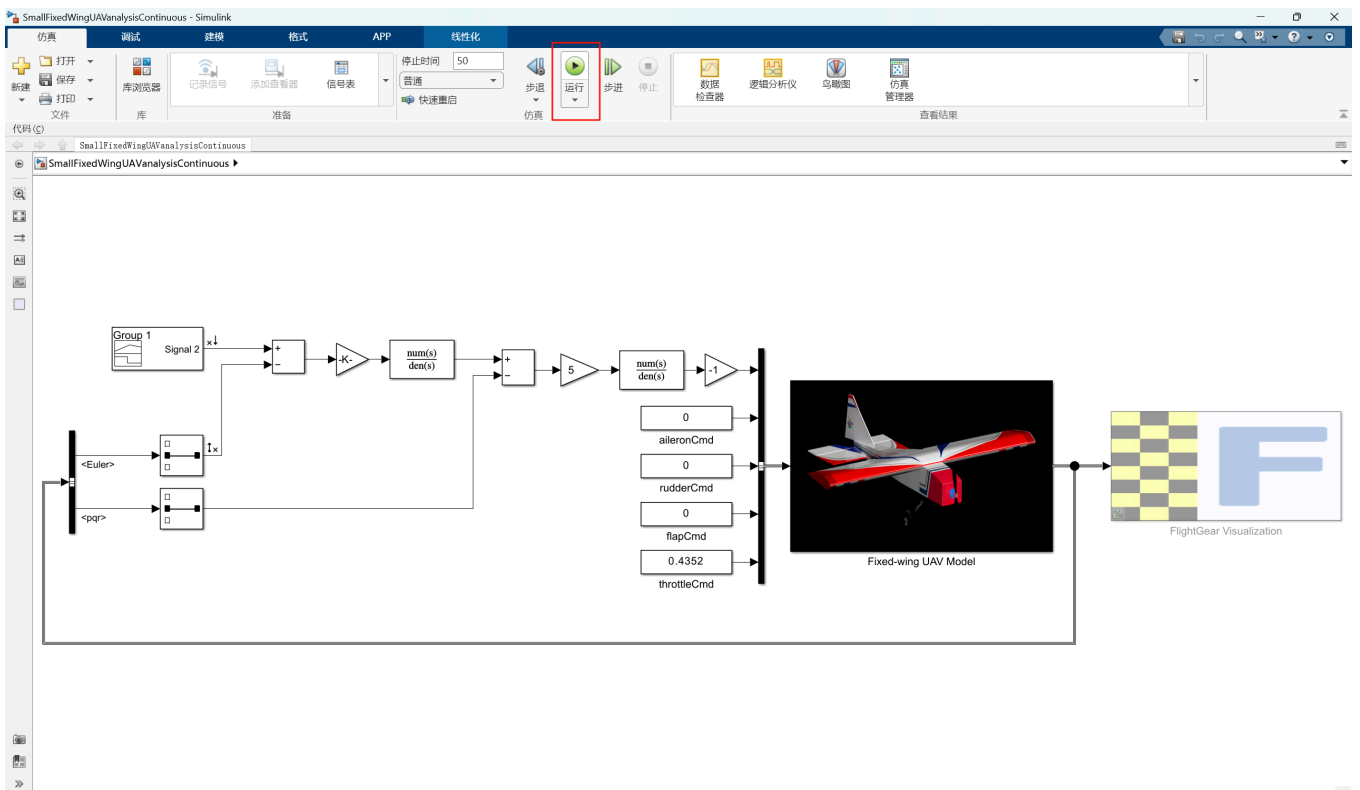
笔记本/台式电脑1台

①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

## 5. 实验步骤

### 5.1 步骤1：角速率环分析

1. 使用MATLAB运行InitDatactrl.m打开并运行SmallFixedWingUAVAnalysisContinuous.slx模型。



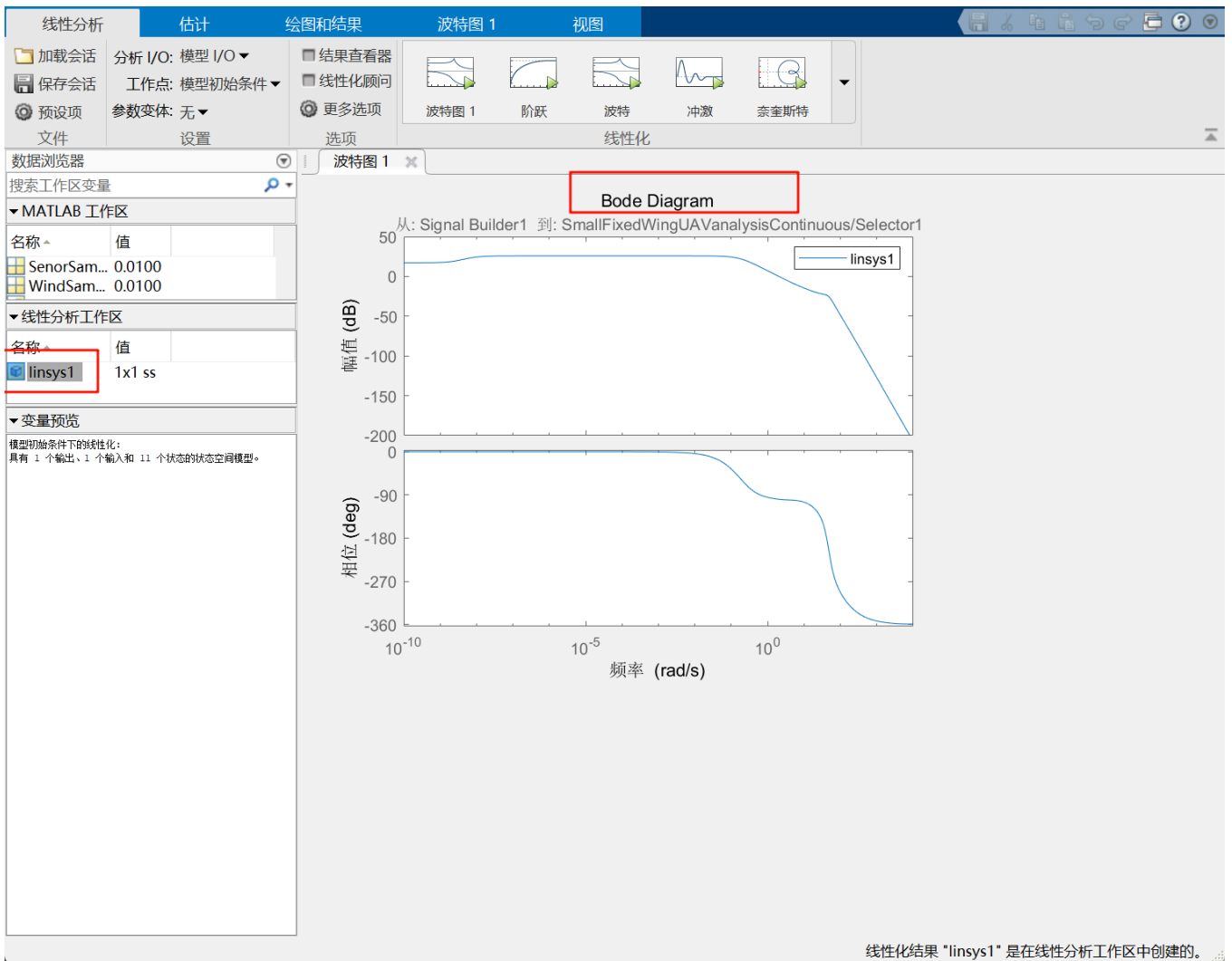
2. 在工具栏点击APP-线性化管理器，会跳转到线性化工具栏



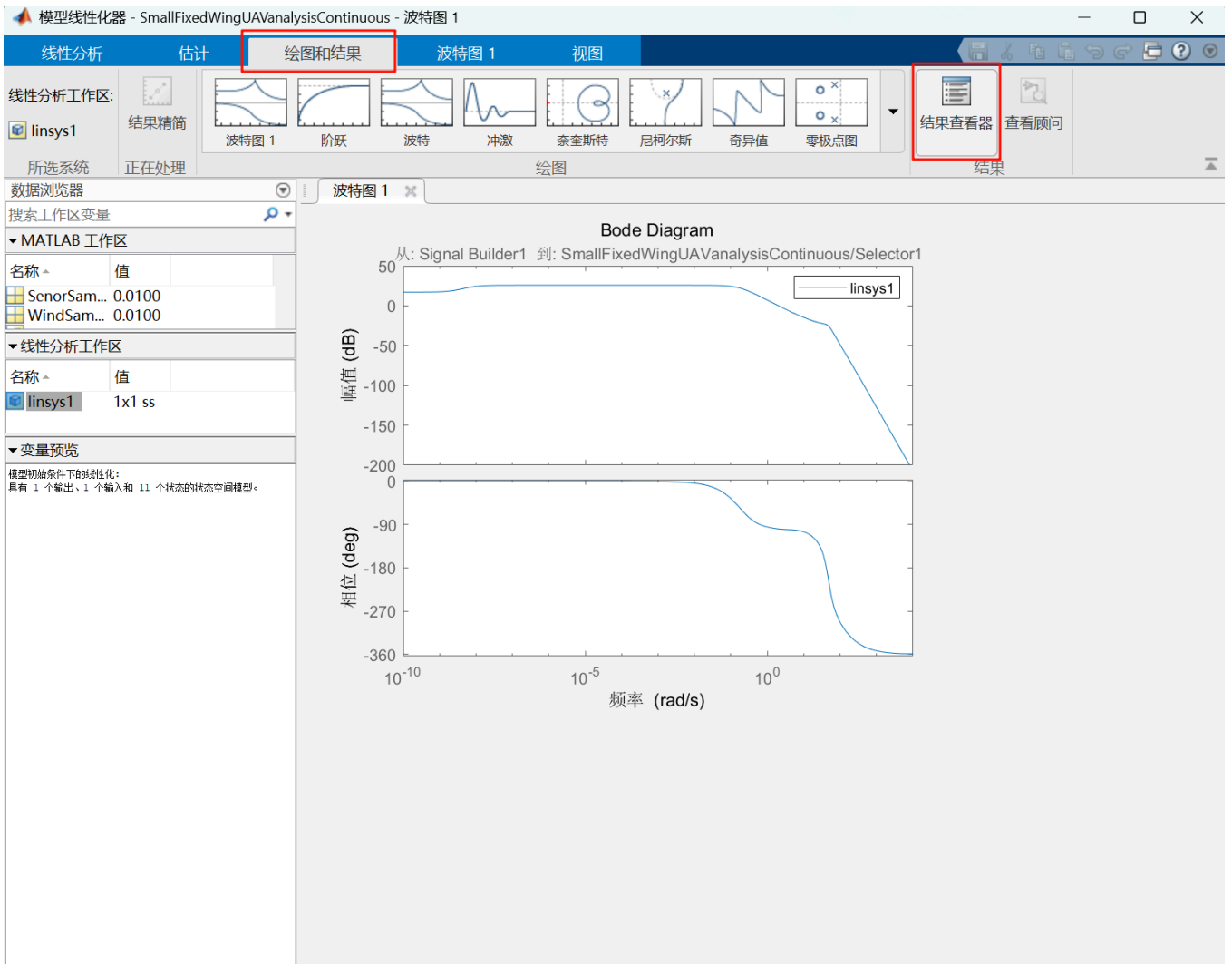
3. 在线性化工具栏中点击模型线性化器。



4. 点击波特生成波特图，可以看到linsys1和波特图1。



5. 进入到绘图和结果后点击结果查看器。



线性化结果 "linsys1" 是在线性分析工作区中创建的。

6. 点击隐藏按钮找到零极点增益，获得模型初始条件下的线性化，连续时间零点/极点/增益模型。

linsys1 的线性化结果详细信息:

选择线性化结果:

将线性化结果显示为: **零极点增益**

**一般信息:**

状态空间

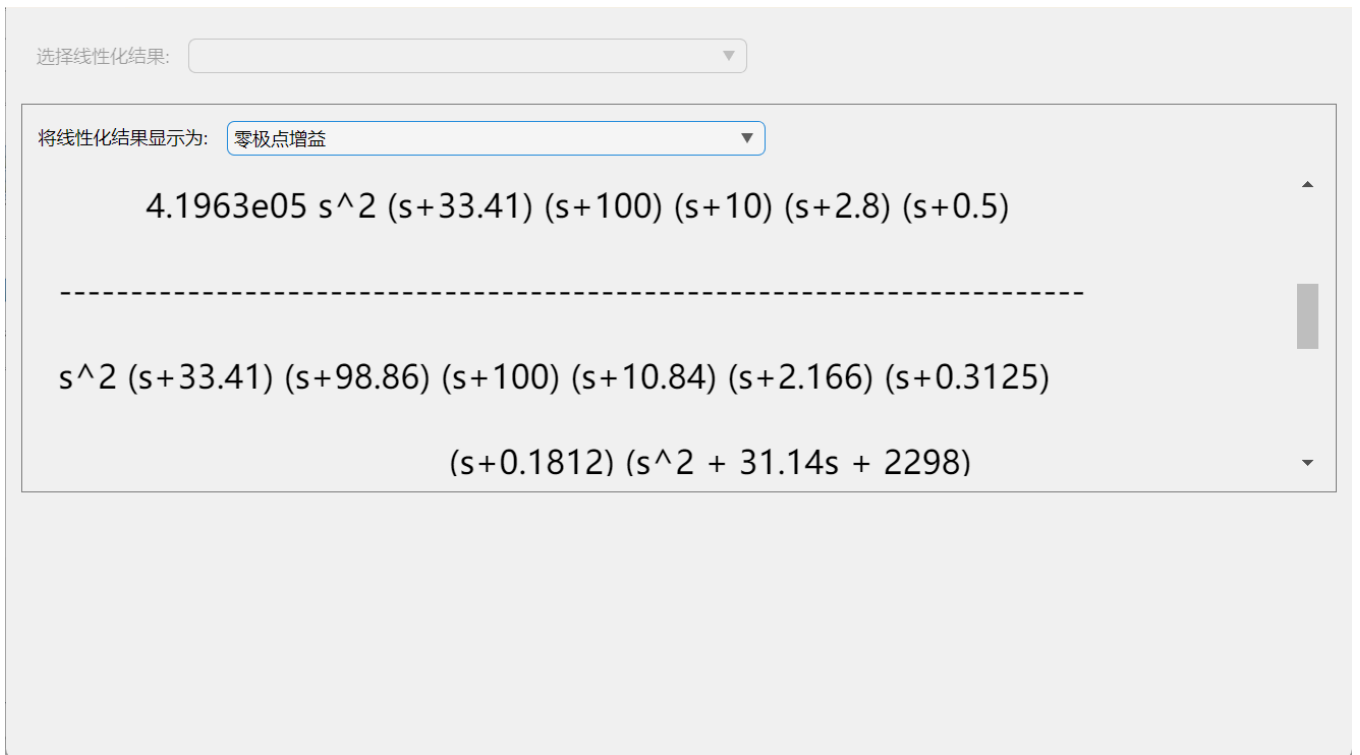
传递函数

**零极点增益**

**工作点:** 模型初始条件

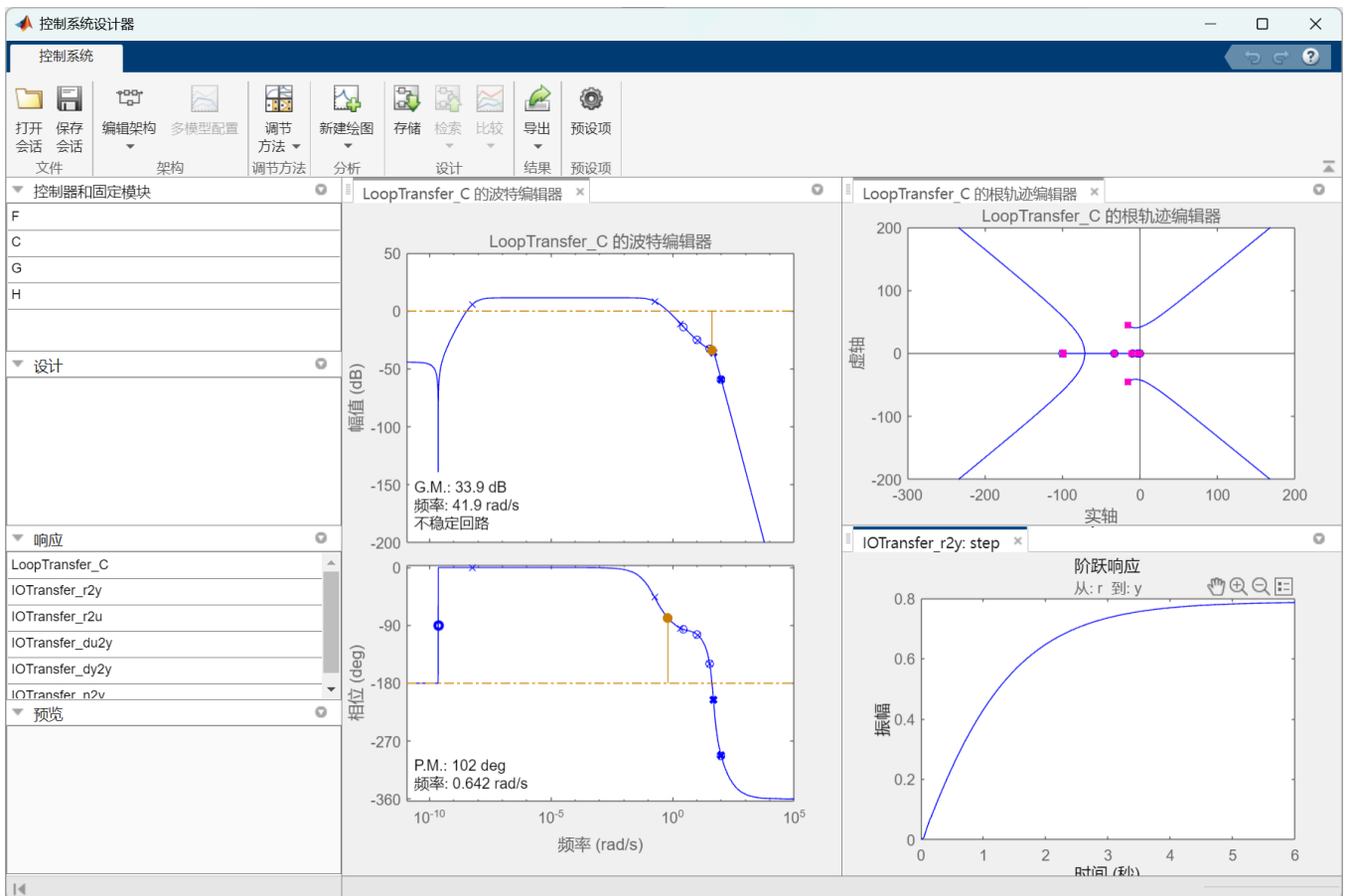
**大小:** 1 个输入, 1 个输出, 11 个状态

**线性化时间:**

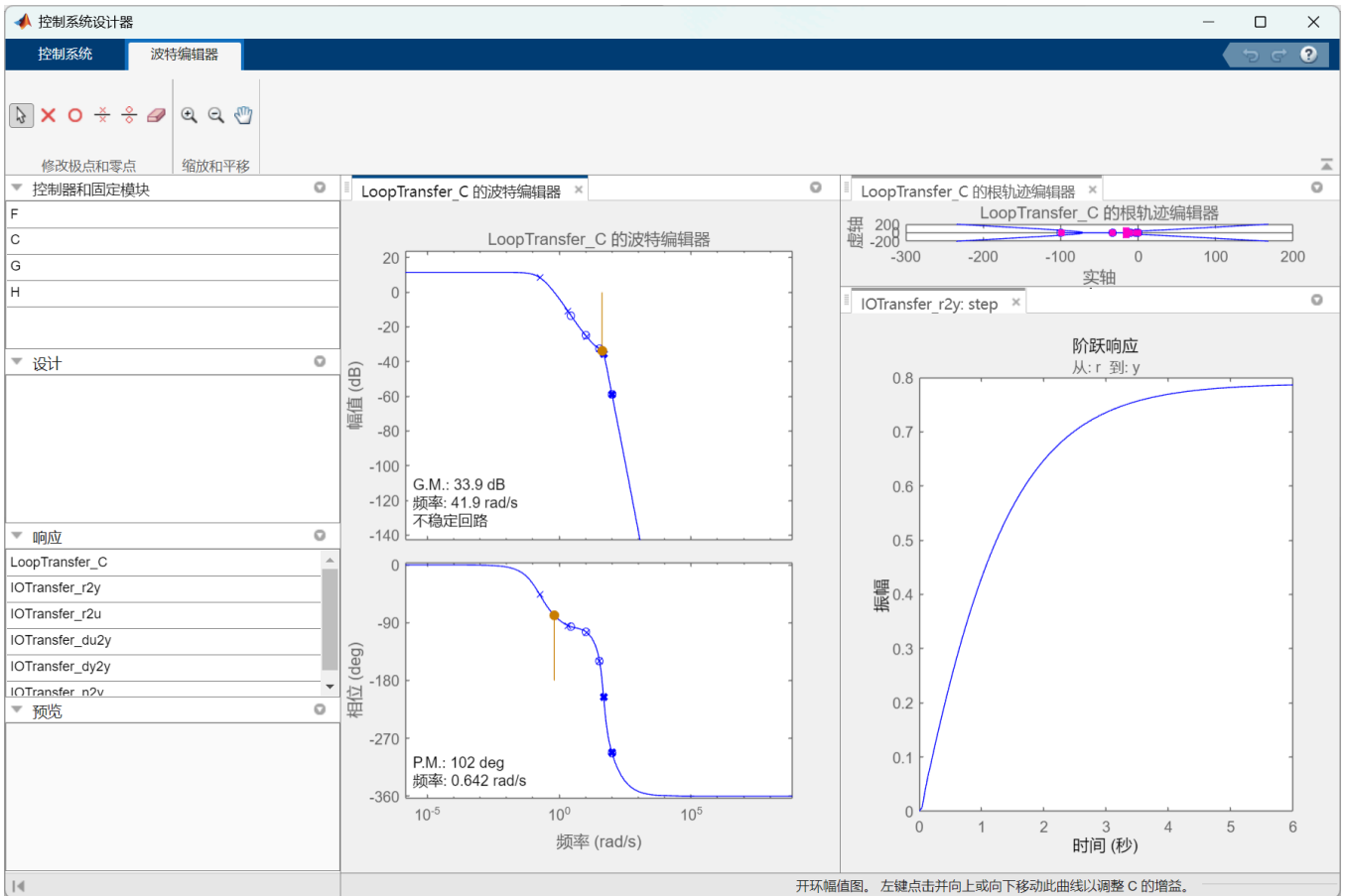


## 步骤2：设计角速环矫正器

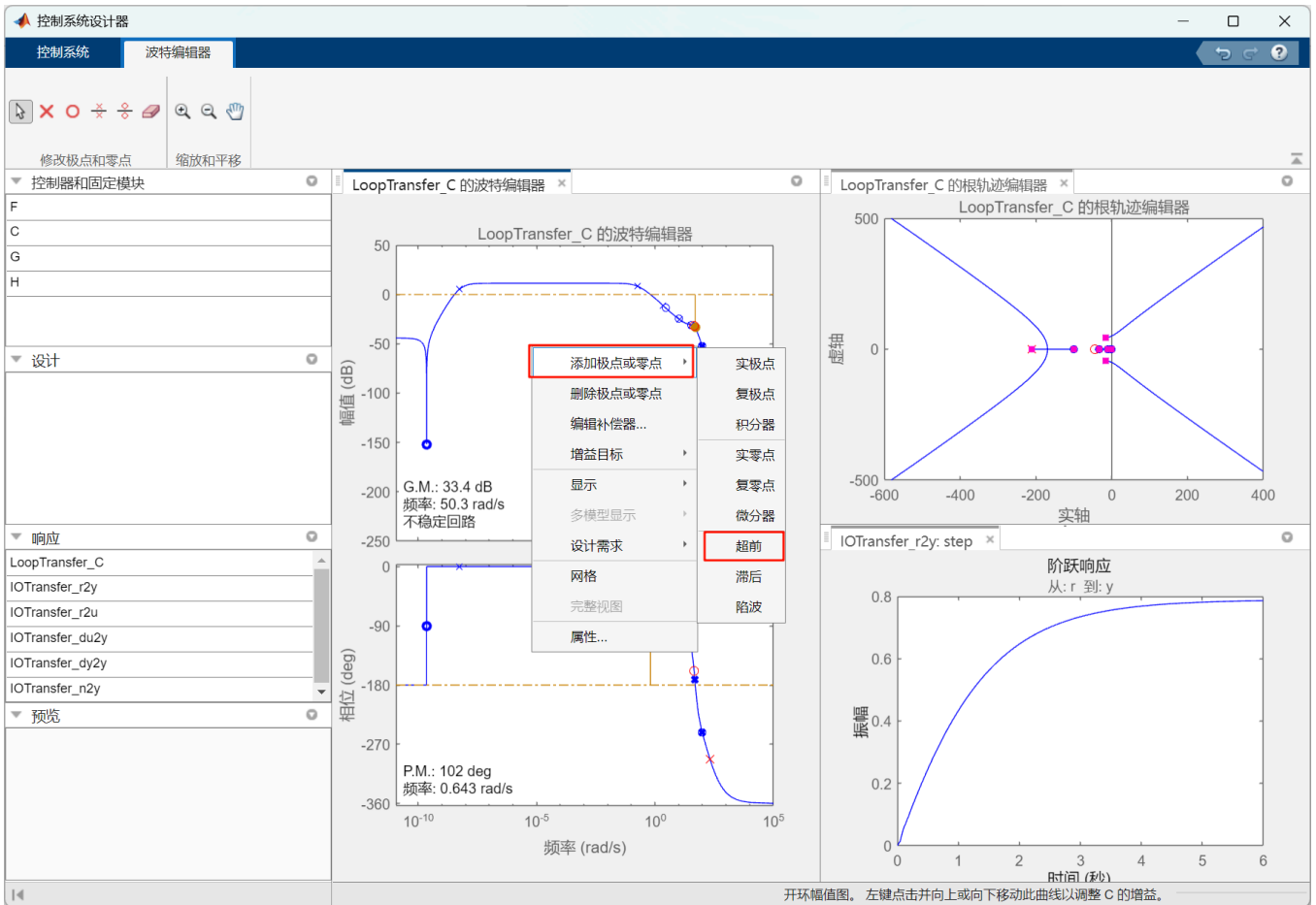
1. 使用MATLAB运行[controlssystemdesigner.m](#)可以看到控制系统设计器。



2. 向上拖拽波特图增大开环增益，缩短像相应时间。

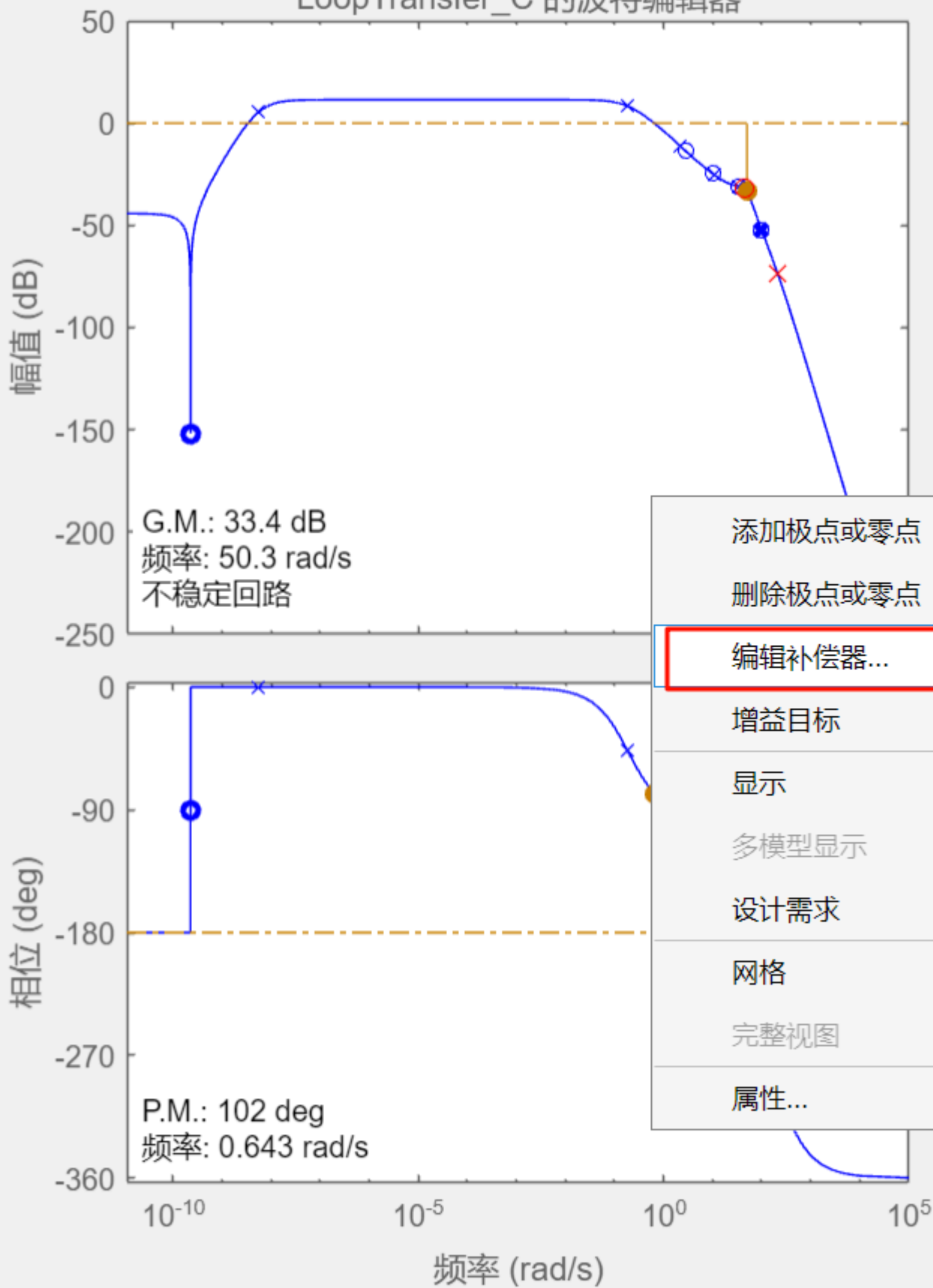


### 3. 波特图空白处点击鼠标右键添加零点或极点选择超前。



### 4. 波特图空白处点击鼠标右键点选择编辑补偿器。

### LoopTransfer\_C 的波特编辑器





## 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: 线性化模型与实际系统存在偏差

在使用Simulink进行系统线性化时，得到的线性模型只能在工作点附近较好地近似实际系统。当系统状态偏离工作点较远时，线性模型的精度会下降，导致控制器性能不理想。

A1: 可以通过多个工作点线性化并设计增益调度控制器来解决此问题。在不同飞行状态下获取多个线性模型，然后根据当前飞行状态实时调整控制器参数。

## Q2：控制器参数调节困难

在使用控制系统设计器调节控制器参数时，难以同时满足相位裕度、幅值裕度、截止频率等多个性能指标要求。

A2：可以采用逐步优化的方法，先满足主要性能指标（如稳定性），再优化次要指标（如响应速度）。同时可以结合根轨迹法、频域设计法等多种方法进行综合设计。

## Q3：仿真结果与实际飞行存在差异

在仿真环境中设计的控制器性能良好，但在实际飞行测试中表现不佳，存在振荡或响应迟缓等问题。

A3：这主要是由于仿真模型未能完全反映实际系统的复杂性和外界干扰。应增加对风扰、传感器噪声、执行器延迟等因素的建模，并在控制器设计中考虑这些因素，提高系统的鲁棒性。