

路径跟随控制分析实验

1. 实验目的

对于直线路径跟随，修改参数和，对比所获得的路径跟随轨迹的变化，总结规律并得出结论。此处仍采用与基础实验相同的路径跟随控制器。直线初始点为(5,-3),终点为(5,10)，多旋翼初始位置随机，可以定为(0,0)。此外偏航角需要始终保持为0,高度始终保持在2m。

2. 实验要求

- 软件要求：Windows 10及以上版本；RflySim工具链^[1]；MATLAB 2022b及以上版本。

①：若使用Pixhawk 6X飞控，平台安装时的编译命令为：px4_fmu-v6x_default，推荐PX4固件版本为：1.12.3。其他配套飞控及编译命令请见：<https://rflysim.com/doc/zh/1/Hardware.html>

- 硬件要求：笔记本/台式电脑① 1台^[2]。

3. 实验地址

例程路径：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\6.RflySimExtCtrl\1.BasicExps\e10_TrajectoirePlanning\e4.2](#)

[e4_2_TF_TrajectoirePlanning_code.m](#): 控制器参数文件

[satgd.m](#): 饱和函数文件

[e4_2_TF_TrajectoirePlanning_Adjustingr2017b.slx](#): 多旋翼路径跟踪simulink仿真1.0文件

[startSimulation.m](#): 初始化参数文件

[Plot_k1change.m](#): 绘制k1参数变化对比图

[readme.m](#): sim1.0模块说明文件

[save_data.m](#): 数据保存文件

[e4_2_Model_TrajectoirePlanning_code.m](#): 控制器参数文件

[satgd.m](#): 饱和函数文件

[e4_2_Model_TrajectoirePlanning_Adjustingr2017b.slx](#): 多旋翼路径跟踪simulink仿真2.0文件

[startSimulation.m](#): 初始化参数文件

[Plot_comparison.m](#): 绘制仿真对比图

[readme.m](#): sim2.0模块说明文件

[save_data.m](#): 数据保存文件

4. 实验内容或步骤

4.1 步骤1：基于多旋翼线性模型的数值仿真1.0(sim1.0)

步骤1.1：参数初始化

打开本章所附带文件夹中的“sim1.0”文件夹，运行“startSimulation.m”文件，初始化参数。

打开“e4_2_TF_TrajectoirePlanning_Adjustingr2017b.slx”模型文件，将看到多旋翼路径跟踪Simulink仿真平台。

步骤1.2: 修改参数

表 7.1 路径跟随控制器关键代码

```

1 P_perp = P_final+(P_init-P_final)*((P_static-P_final)^(P_init-P_final))/(norm(P_
   final-P_init + 0.000001))^2;
2 temp = k1_x*satgd(((k0_x/k1_x)*(P_final - P_static)+(P_perp-P_static)),a0);
3 P_d = P_static + temp;

```

(1) 改变参数

选取如下参数进行实验，分别为 $\alpha_0 = 0.2, 1; \alpha_0 = 0.1, 0.5, 2$ (对应表7.1代码中的 $k0_x, k1_xx, a0$)。每次运行模型前改变表7.1中的参数，得到水平前向通道和水平侧向通道的路径跟随控制器响应，如图7.8至图7.10所示。从图中可以看出，在保持其他两个参数不变的情况下，改变饱和上限的值，多旋翼贴合到期望轨迹上的速度越来越快。三种不同饱和上限的情况下，路径跟随控制器输出与期望轨迹对比图如图7.11所示。另外，随着饱和上限的增大，多旋翼靠近期望轨迹的斜率增加，甚至在 $\alpha_0 = 2$ 时出现了一种类似“超调”的现象。

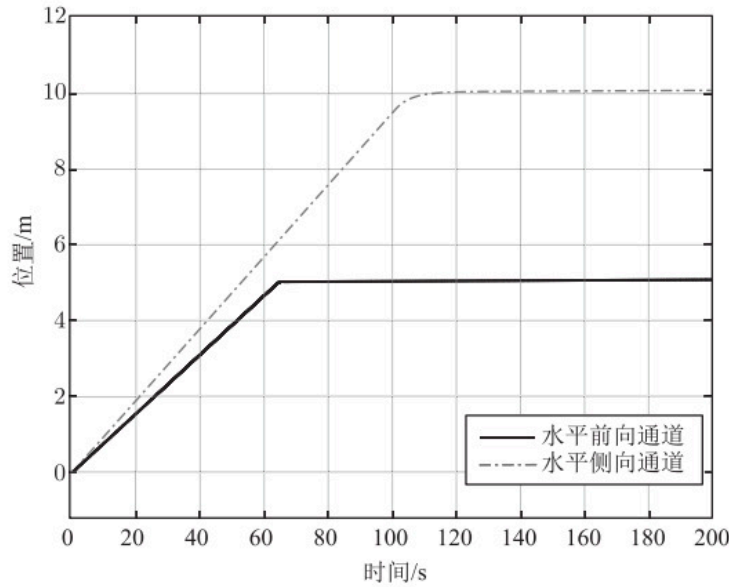


图 7.8 $\alpha_0 = 0.1$ 时路径跟随控制器响应

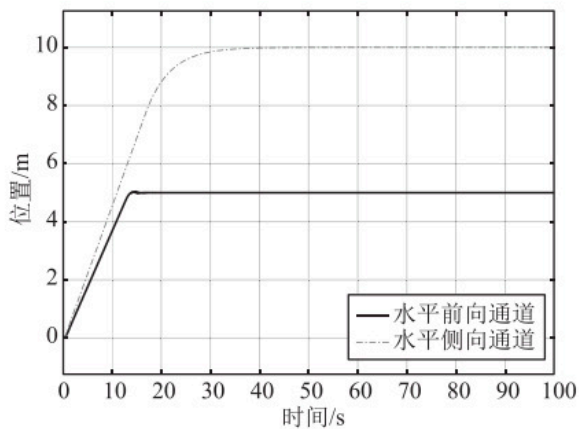


图 7.9 $\alpha_0 = 0.5$ 时路径跟随控制器响应

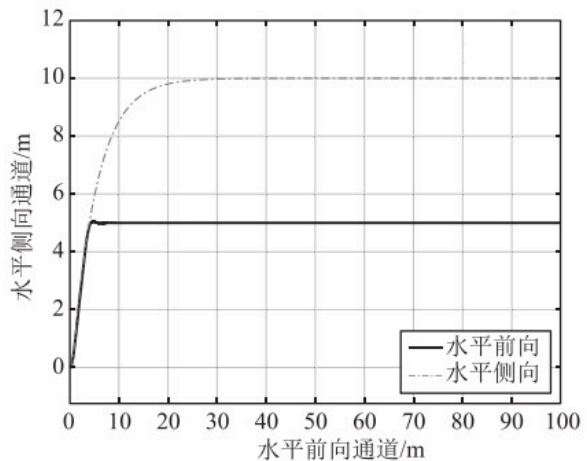
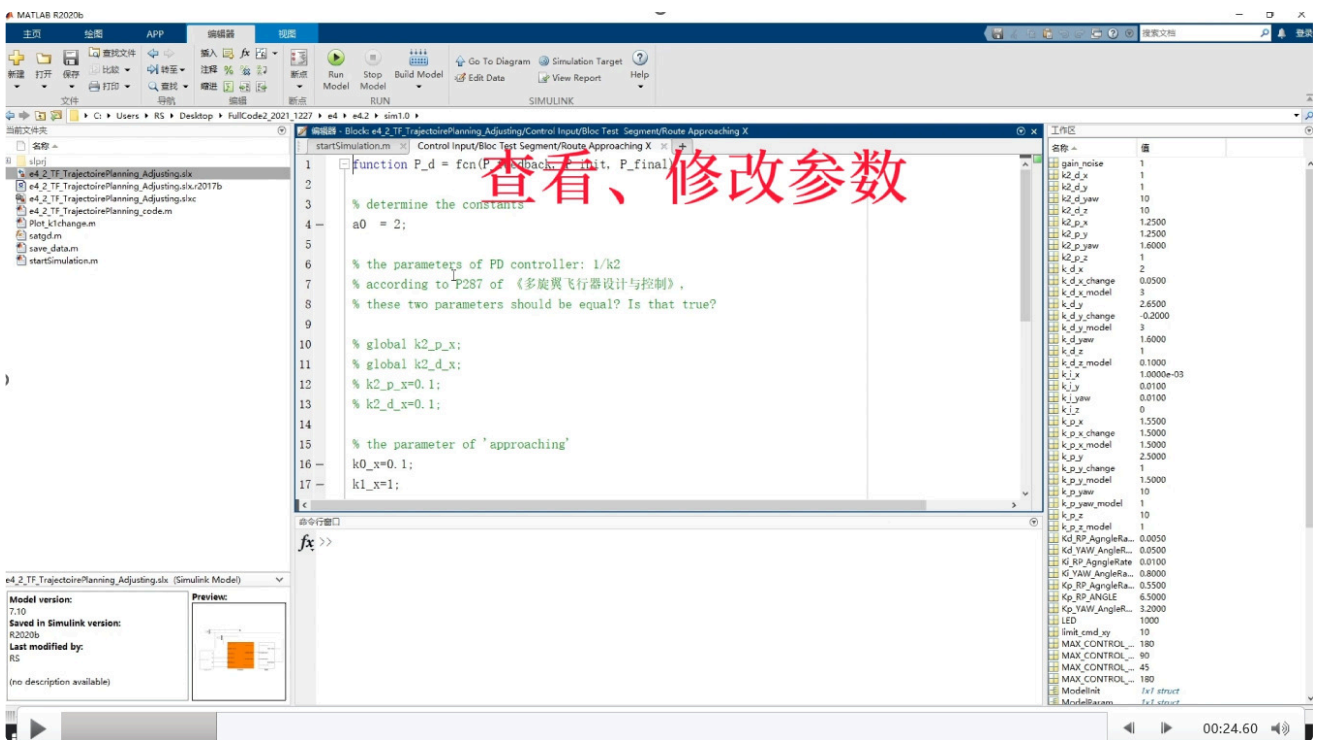
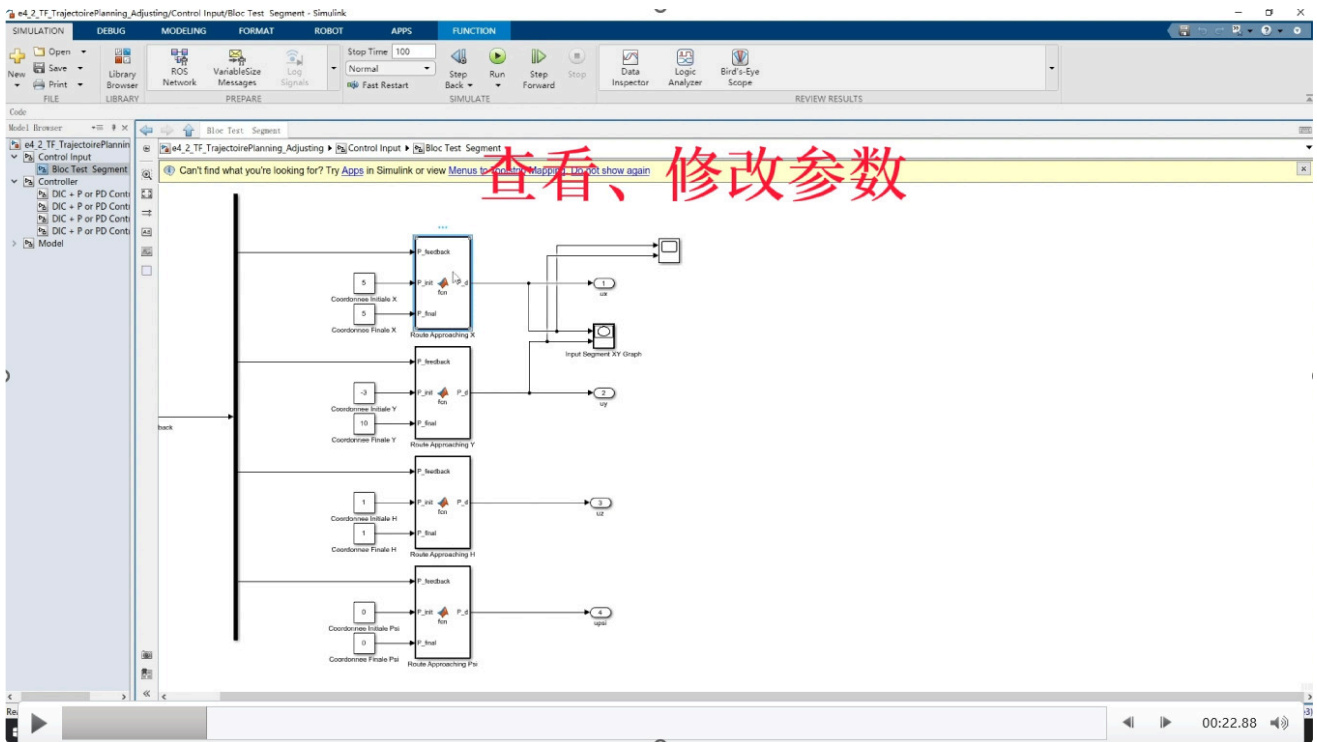


图 7.10 $\alpha_0 = 2$ 时路径跟随控制器响应



(2) 改变参数

选取如下参数进行实验，分别为 $k_1_x = 0.1$ 、 $k_1_x = 2$ 、 $k_1_x = 0.1$ 、 $k_1_x = 0.5$ 、 $k_1_x = 1$ 。每次运行模型前改变表 7.1 中的 k_1_x 参数，得到水平前向通道和水平侧向通道的路径跟随控制器响应，如图 7.12 至图 7.14 所示。从图中可以看出，在保持其他两个参数不变的情况下，改变参数的值，多旋翼可以更“直接”地贴合到期望轨迹上。这也就说明参数的作用便是使多旋翼更快地靠近期望轨迹。在三种不同参数的情况下，路径跟随控制器输出与期望轨迹对比图如图 7.15 所示，该图也说明了这个规律。

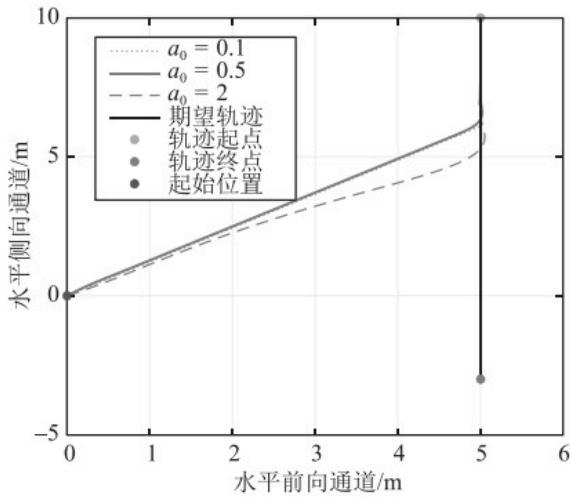


图 7.11 路径跟随控制器输出与期望轨迹对比图

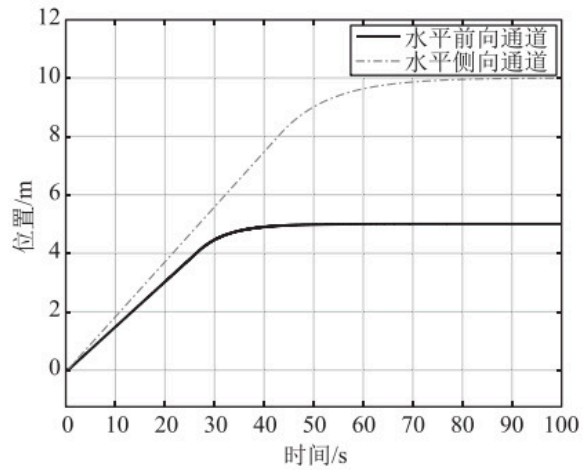


图 7.12 $k_1 = 0.1$ 时路径跟随控制器响应

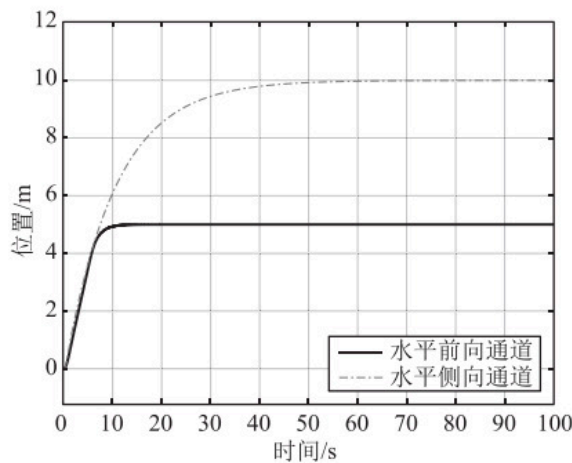


图 7.13 $k_1 = 0.5$ 时路径跟随控制器响应

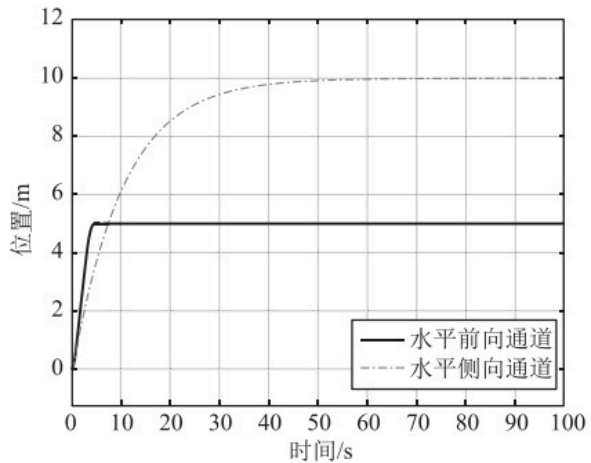
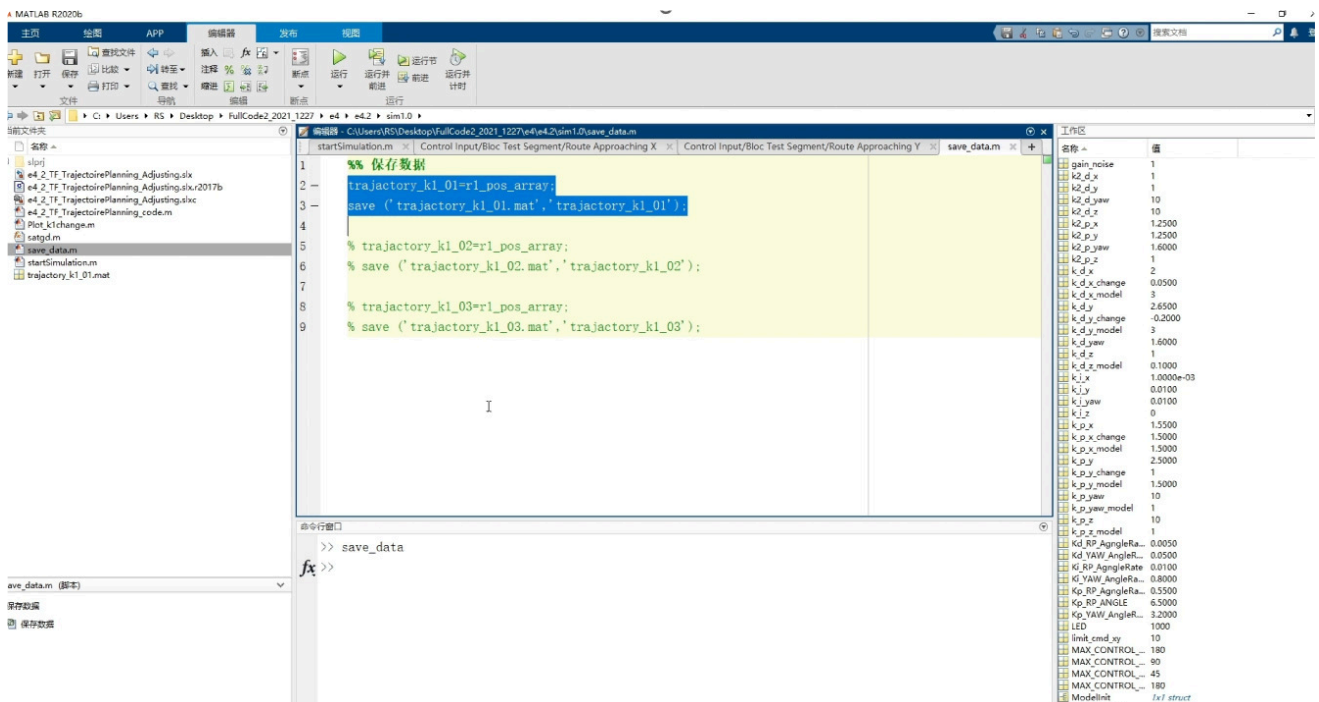


图 7.14 $k_1 = 1$ 时路径跟随控制器响应

步骤1.3: 保存每次修改参数后的仿真结果

每次修改参数并运行Simulink后，运行save_data.m保存数据。



步骤1.4：画图对比每次修改参数后的仿真结果

在几种参数都运行并保存后，打开“Plot_k1change.m”文件，运行该文件，开始画图。

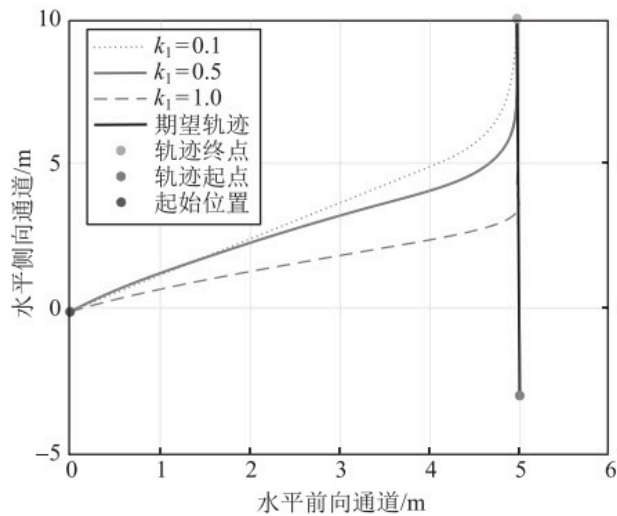


图 7.15 路径跟随控制器输出与期望轨迹对比图

4.2 步骤2：基于多旋翼六自由度模型的仿真2.0(sim2.0)

步骤2.1：参数初始化

打开“sim2.0”文件夹，运行“startSimulation.m”文件，初始化参数。

步骤2.2：仿照sim1.0运行仿真

按照 仿真1.0中的步骤 步骤1.2~1.3完成实验，这里保存 $a_0=2$ ， $k_1=1$ 时的数据为例。

步骤2.3：与仿真1.0对比路径跟随效果

打开“Plot_comparison.m”文件，运行该文件，开始画图。

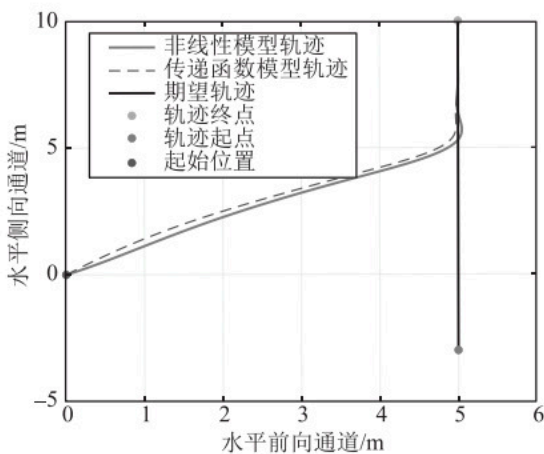


图 7.16 $\alpha_0 = 2$ 时不同模型跟随轨迹对比图

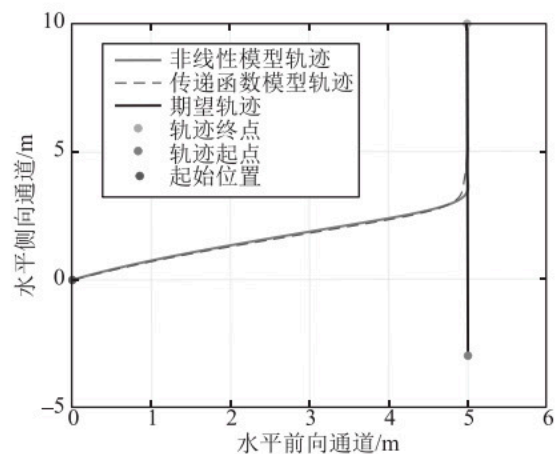


图 7.17 $k_1 = 1$ 时不同模型跟随轨迹对比图

5. 关键知识点

在多旋翼执行喷洒药物或者电线巡线任务时，会要求多旋翼能够严格压着航线进行飞行，如图 7.1 所示。该问题可以描述为：当前多旋翼水平位置为 $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^2$ ，当前航路点为 $\mathbf{p}_{wp} \in \mathbb{R}^2$ ，上一个航路点为 $\mathbf{p}_{wp,last} \in \mathbb{R}^2$ ，点 $\mathbf{p}_{wp,last}$ 和点 \mathbf{p}_{wp} 可以构成一条直线；设计出实时航路点 $\mathbf{p}_d \in \mathbb{R}^2$ 引导多旋翼到达该直线并沿直线飞行，最终到达目标航路点 \mathbf{p}_{wp} 。

可以将多旋翼视为质点，其满足牛顿第二定律：

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{p}} &= \mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{u}\end{aligned}\tag{7.1}$$

其中， $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^2$ 表示虚拟控制量。如图 7.1 所示，多旋翼位置 \mathbf{p} 到这条航线的距离为 $\|\mathbf{p} - \mathbf{p}_{wp,perp}\|$ ，其中 $\mathbf{p}_{wp,perp}$ 表示垂足，为

$$\mathbf{p}_{wp,perp} = \mathbf{p}_{wp} + (\mathbf{p}_{wp,last} - \mathbf{p}_{wp}) \frac{(\mathbf{p} - \mathbf{p}_{wp})^T (\mathbf{p}_{wp,last} - \mathbf{p}_{wp})}{\|\mathbf{p}_{wp} - \mathbf{p}_{wp,last}\|^2}\tag{7.2}$$

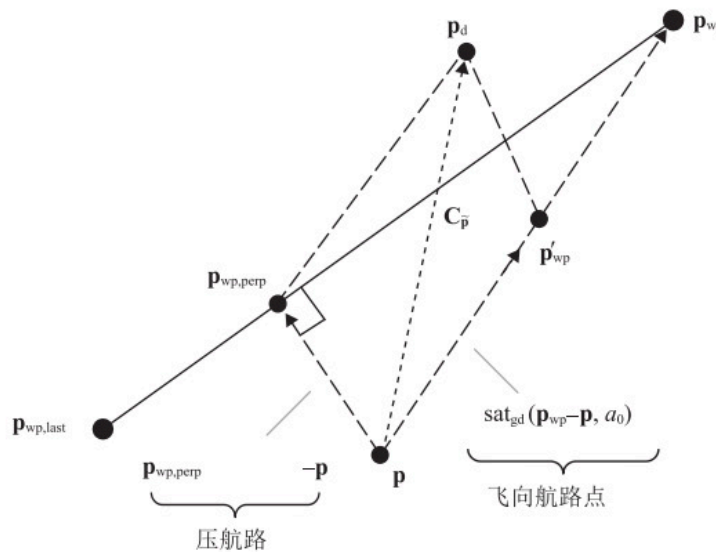


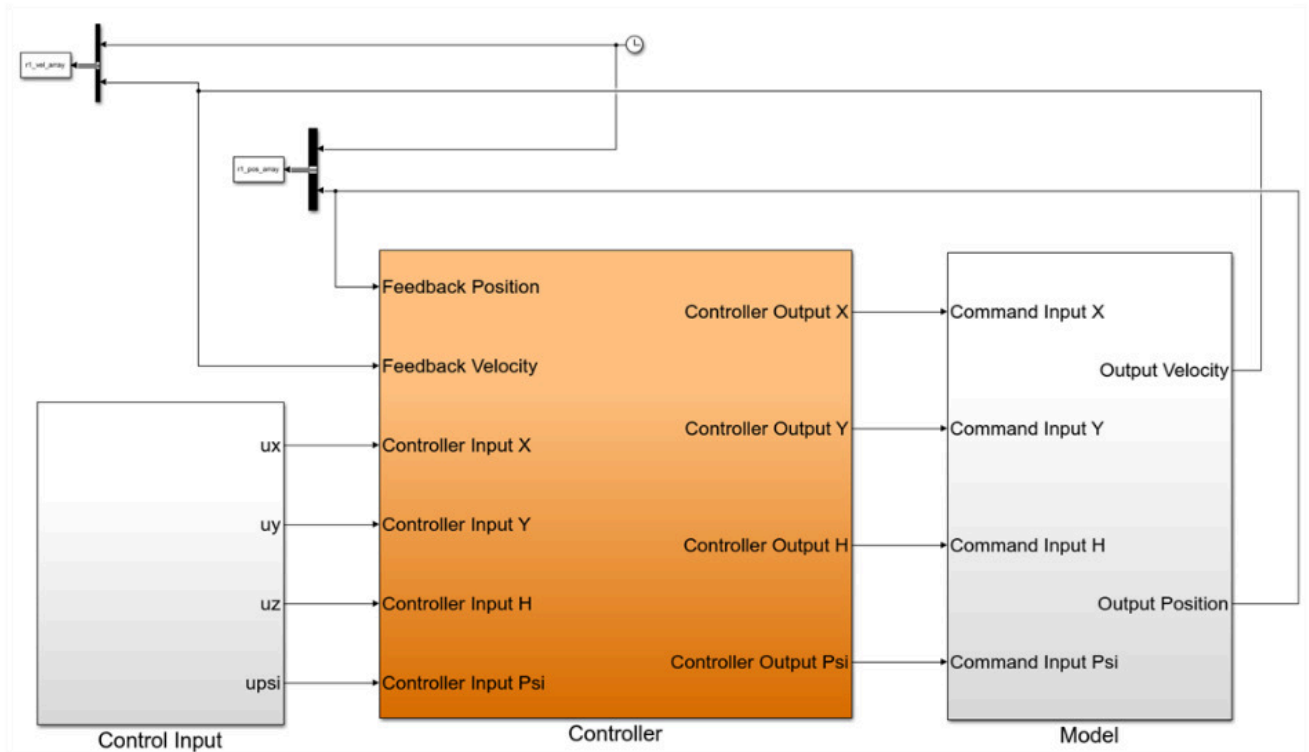
图 7.1 基于人工势场压航线的路径规划

关键知识点1：实验整体流程

图 仿真阶段流程

针对设计所需要的仿真实验平台，如下图所示。仿真1.0、仿真2.0和硬件在环仿真三者的区别在于多旋翼模型模块不一样：仿真1.0的多旋翼模型模块内部主要包含通过“系统辨识”实验得到的传递函数模型，即设计模型；仿真2.0的多旋翼模型模块内部包含一个给定的非线性模型和RflySim3D显示模块；硬件在环仿真的多旋翼模型模块内部包含了与CopterSim联合仿真的通信接口。

关键知识点2: Simulink模型整体框架



期望输入模块—Control Input: 用于输入期望的飞行器位置信息;

控制器模块—Controller: 用于设计控制器, 实现飞行器的有效位置控制;

多旋翼模型模块—Model: 飞行器仿真模型模块, 用于接收控制器输出的控制量, 并输出飞行器的运动状态 (这里是位置信息和速度信息;)

飞行器状态数据收集: 这里拥有两个变量——“r1_pos_array”与“r1_vel_array”, 分别用于收集单次仿真过程中飞行器的位置信息与速度反馈, 并以矩阵的形式保存在MATLAB工作空间。矩阵的每一行信息均是以“时间, 水平前向通道位置/速度, 水平侧向通道位置/速度, 高度通道位置/速度, 偏航通道角度/偏航角速度”方式自左而右排列的一组值, 矩阵的列按时间顺序自上而下排列。

关键知识点3: 开环线性分析和校正

关键知识点4: 模型模块详解

“Control Input” 期望输入模块

整体结构

该模块包含了三种不同的期望输入, 分别是阶跃信号、圆以及“8”字, 圆以及“8”字信号有三种不同的周期。

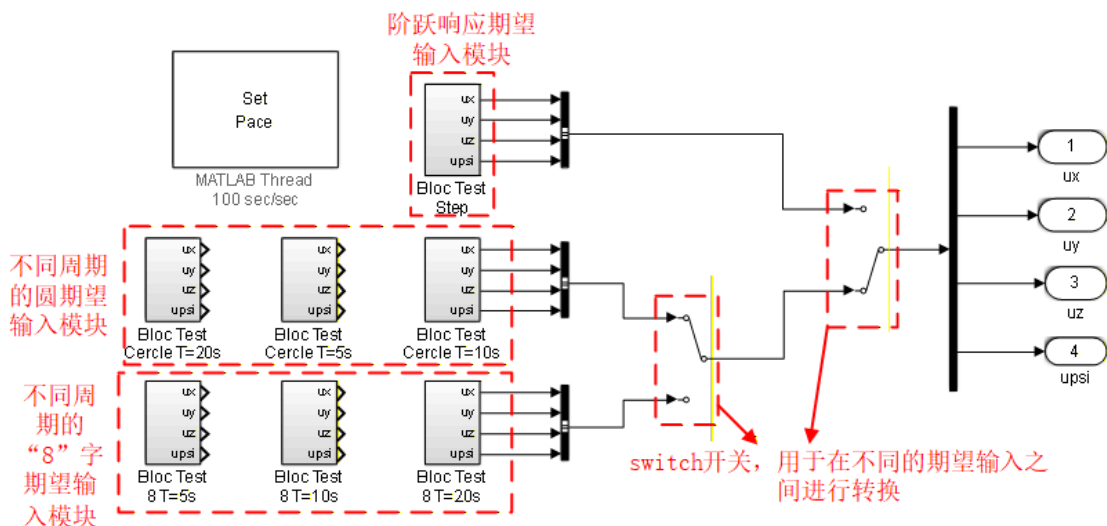


图 1 期望输入模块

期望输入的具体结构

以周期为10s的“8”字轨迹期望输入为例

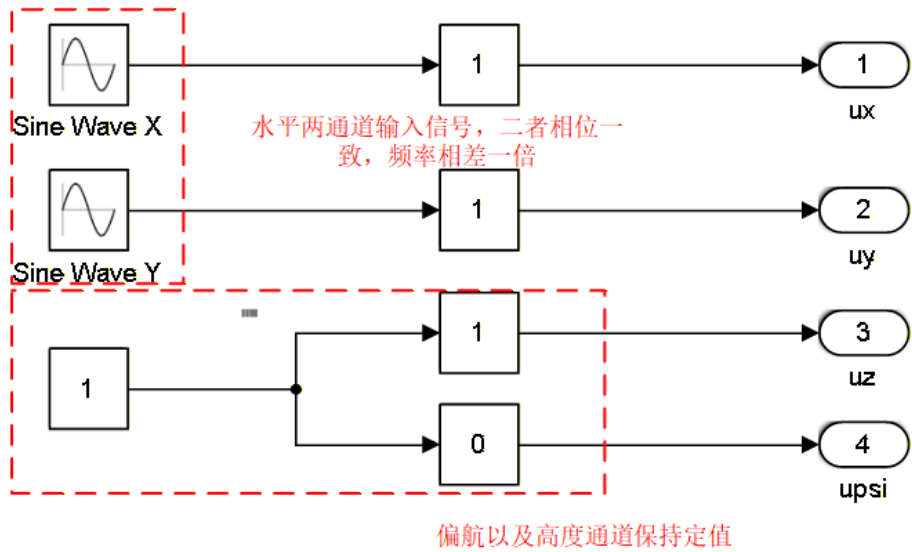


图 2 “8”字轨迹期望输入

“Controller” 控制器模块

整体结构

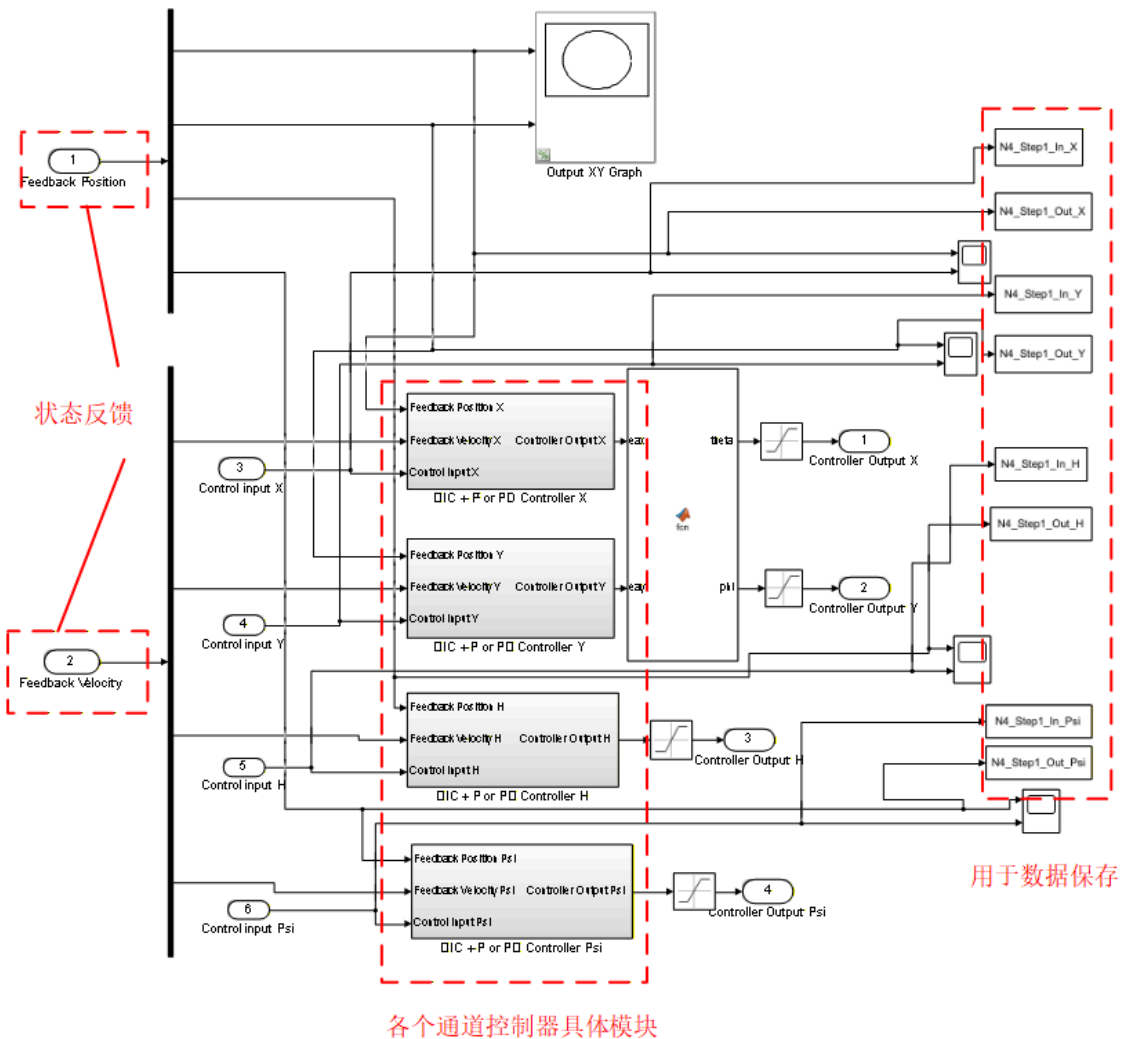


图 3 控制器模块

控制器具体结构

四个通道的PID 控制器具体结构基本一致，以水平前向通道控制器为例

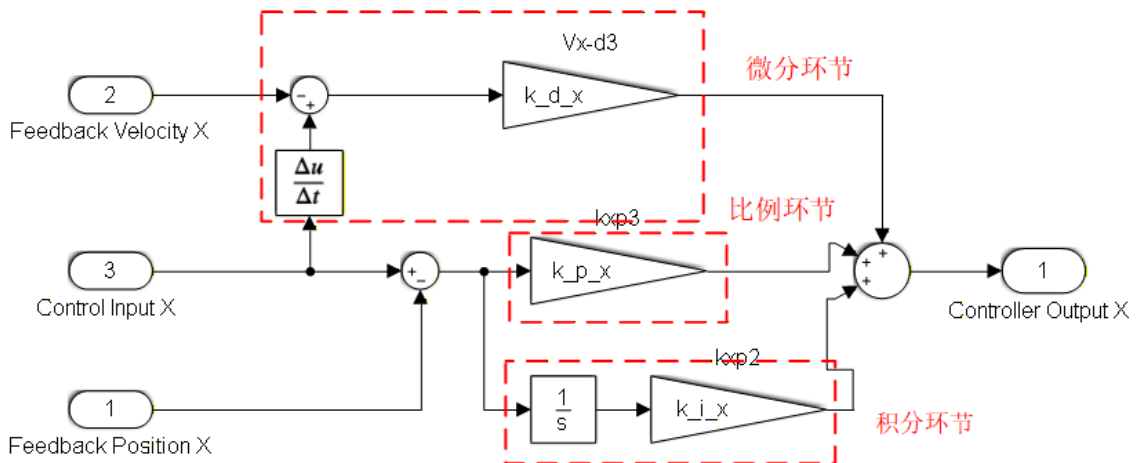


图 4 水平前向通道的PID 控制器具体结构

三通道模型

高度通道:

$$u_T(t) = -k_{p_z} \text{left}(p_{z_e}(t) - p_{z_e,d}(t)\text{right}) - k_{p_z} \text{left}(\dot{p}_{z_e}(t) - \dot{p}_{z_e,d}(t)\text{right}) - k_{p_z} \int_0^t \text{left}(p_{z_e}(au) - p_{z_e,d}(au)\text{right}) d\tau$$

期望:

$$p_{z_e,d} \in \mathbb{R}$$

偏航通道: ParseError: KaTeX parse error: Expected 'EOF', got '\right' at position 71: ...\psi_{d}(t) \underline{\text{right}}) - k_{\{\psi d\}} ...

期望:

$$\psi_d \in \mathbb{R}$$

水平通道: ParseError: KaTeX parse error: Expected 'EOF', got '\right' at position 129: ...ext{hd}} (t) \underline{\text{right}}) - \mathbf{k}_{\dots

期望:

$$\mathbf{p}_{hd} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$$

多旋翼模型模块

Sim1.0: 系统辨识得到的各通道传递函数模型

Sim2.0: 使用辨识参数的多旋翼机理模型

6. 参考资料

1. Quan Quan. Introduction to Multicopter Design and Control. Springer, Singapore, 2017.
2. 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. 电子工业出版社, 2018.
3. 全权 戴训华 王帅. 多旋翼飞行器设计与控制 实践. 电子工业出版社, 2020.
4. 全权 等. 多旋翼无人机远程控制实践. 电子工业出版社, 2022.

7. 常见问题

Q1: 运行startSimulation.m时出现参数未定义的错误。

A1: 请确保当前MATLAB工作目录已设置为sim1.0或sim2.0文件夹，并重新运行startSimulation.m文件以初始化所有必要参数。

Q2: 修改控制器参数后，仿真模型不稳定或发散。

A2: 检查参数 $k2_p_x$, $k2_d_x$ 等是否在合理范围内 (如 $k2_p_x > 0$)，并确认 saturation_x 等饱和和限制值设置正确。建议从小幅调整开始，逐步优化参数。

Q3: Plot_k1change.m绘图时找不到数据文件。

A3: 请确认已成功运行仿真并执行了`save_data.m`脚本。数据文件 (如`trajactory_k1_01.mat`) 应存在于`sim1.0`目录下。如果文件缺失，请重新运行仿真和保存步骤。

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