

1. 实验名称及目的

路径跟踪控制器设计实验 (分析实验):

对于直线路径跟随，修改参数 a_0 和 k_1 ，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 2 m。

2. 实验原理

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

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

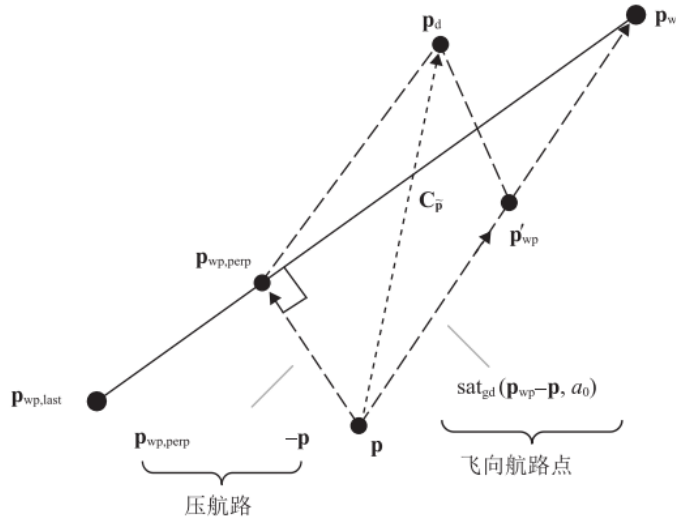


图 7.1 基于人工势场压航线的路径规划

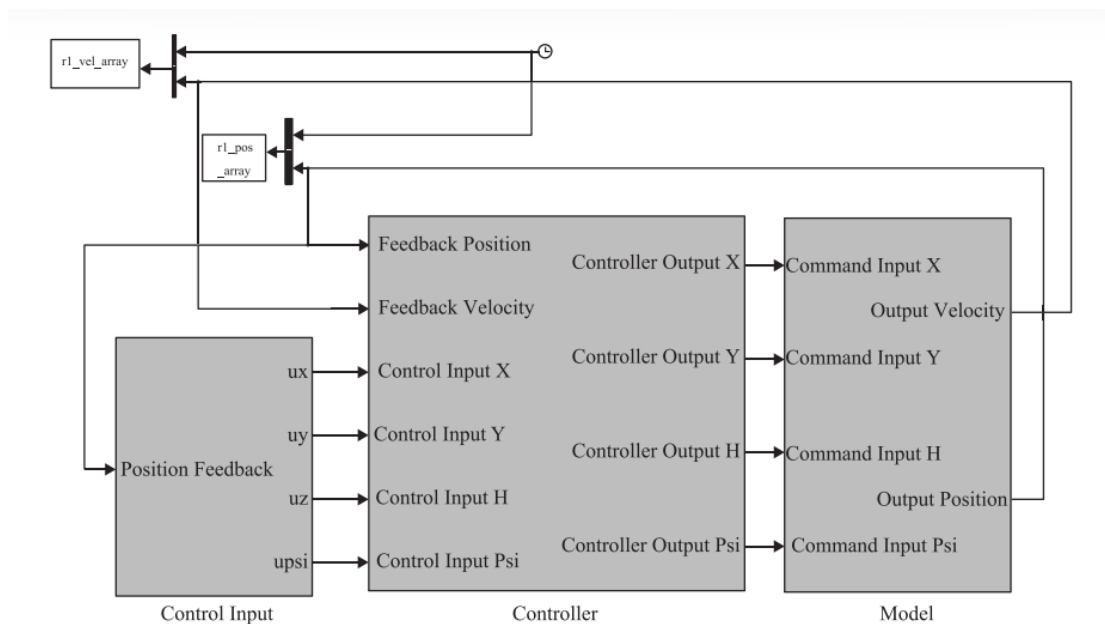


图 7.2 整体模型，Simulink 模型详见 “e4\4.1\sim1.0\4_1_TF_TrajectoryPlanning_Segment.slx”

3. 实验效果

通过示波器显示出仿真模型路径跟随控制器响应时间的曲线，输出轨迹与期望轨迹的对比图。

4. 文件目录

文件夹/文件名称		说明
Sim1.0	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_Adjustin gr2017b.slx	多旋翼路径跟踪 simulink 仿真 1.0 文件
	startSimulation.m	初始化参数文件
sim2.0	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_Adju stingr2017b.slx	多旋翼路径跟踪 simulink 仿真 2.0 文件
	startSimulation.m	初始化参数文件

5. 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		
3	MATLAB 2017B 及以上版本		

①：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com>

6. 仿真 1.0(sim1.0)实验步骤

Step 1:

学习本书第 2 章的内容，对于 simulink 模型有一个初步的了解。

Step 2:

打开本章所附带文件夹中的“e4\4.2\sim1.0”文件夹，打开“e4\4.2\sim1.0\ startSimulation.m”文件，并单击“运行”按钮，初始化参数。

Step 3:

打开“e4\4.2\sim1.0\ 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，如图 7.2 所示。



Step 4:

(1) 改变参数 a_0

选取如下参数进行实验，分别为 $k_0 = 0.2$, $k_1 = 1$, $a_0 = 0.1、0.5、2$ (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 a_0 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 a_0 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 $a_0=2$ 时出现了一种类似“超调”的现象。

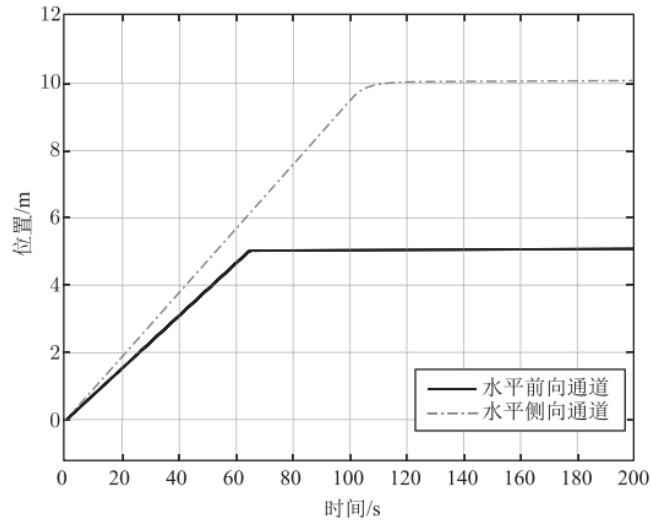


图 7.8 $a_0 = 0.1$ 时路径跟随控制器响应

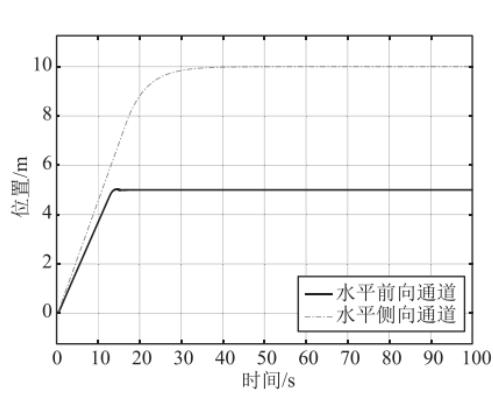


图 7.9 $a_0 = 0.5$ 时路径跟随控制器响应

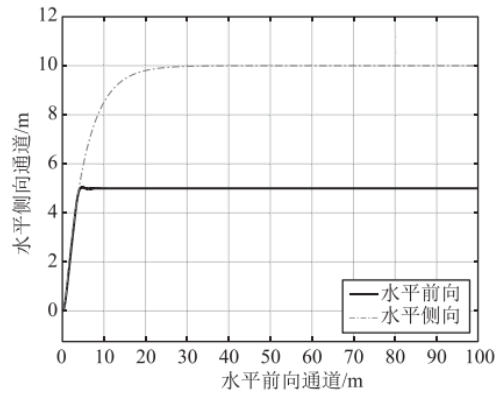


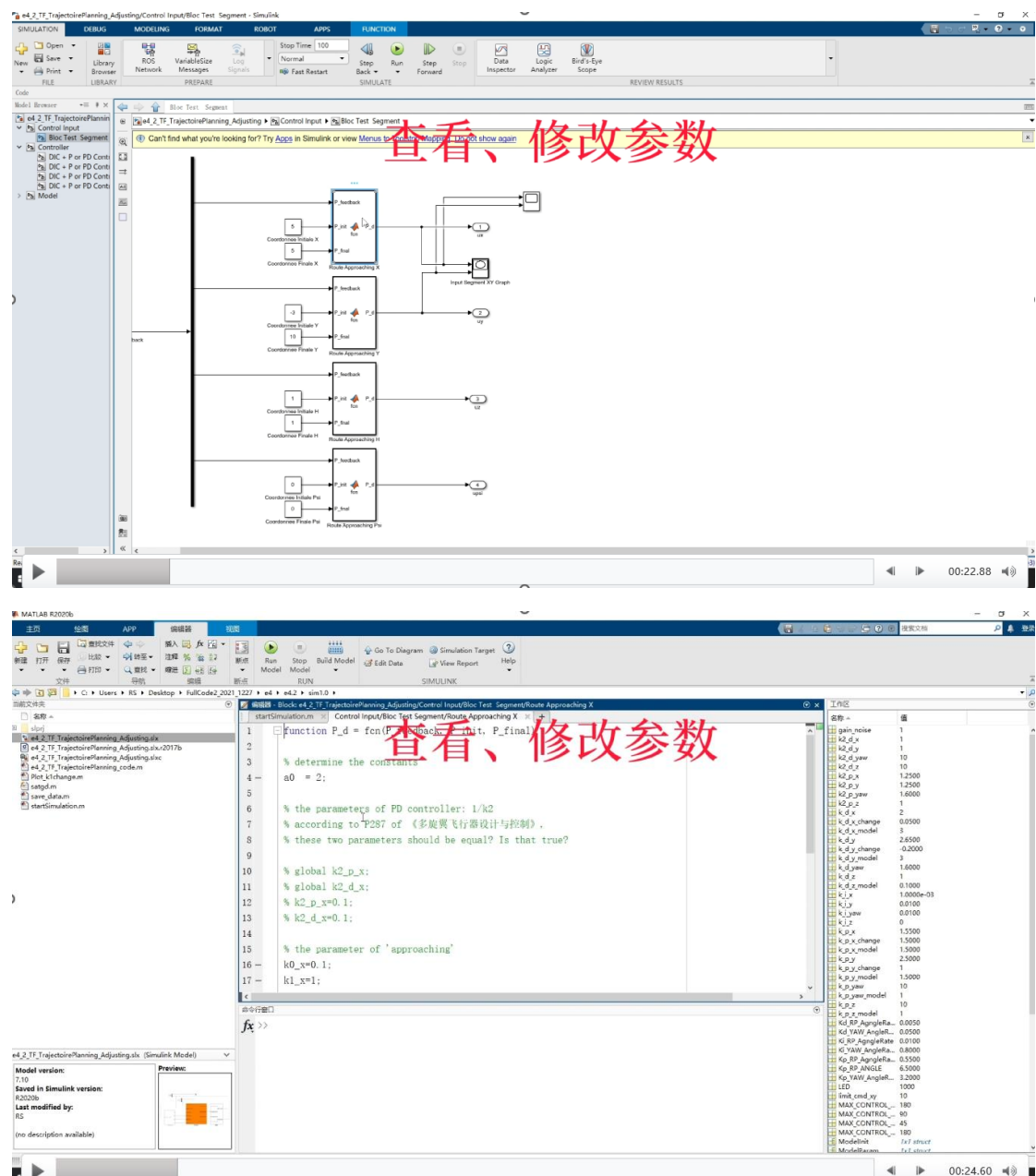
图 7.10 $a_0 = 2$ 时路径跟随控制器响应

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;

```



(2) 改变参数 k_1

选取如下参数进行实验，分别为 $k_0 = 0.1$, $a_0 = 2$, $k_1 = 0.1、0.5、1$ 。每次运行模型前改变表 7.1 中的 $k1_x$ 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 k_1 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 k_1 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 k_1 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。

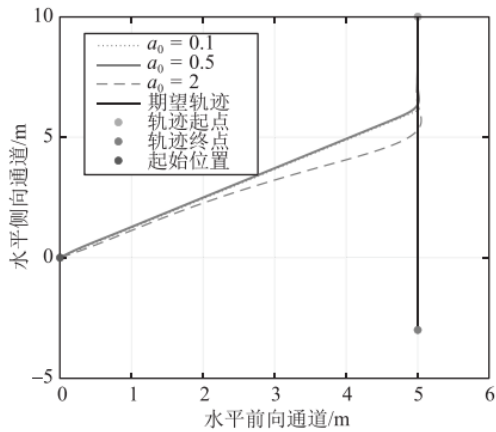


图 7.11 路径跟随控制器输出与期望轨迹对比图

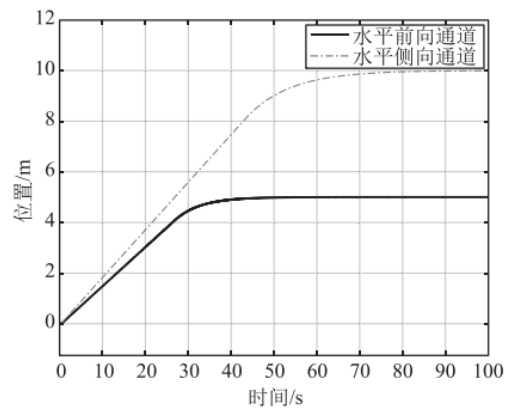


图 7.12 $k_1 = 0.1$ 时路径跟随控制器响应

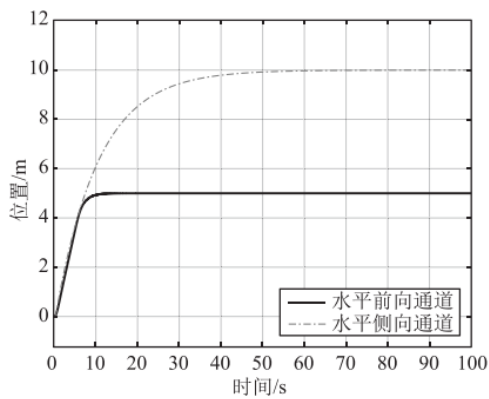


图 7.13 $k_1 = 0.5$ 时路径跟随控制器响应

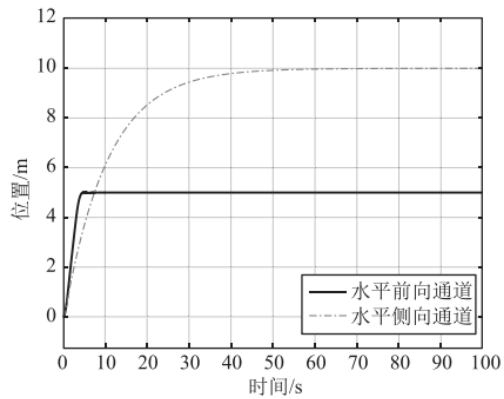
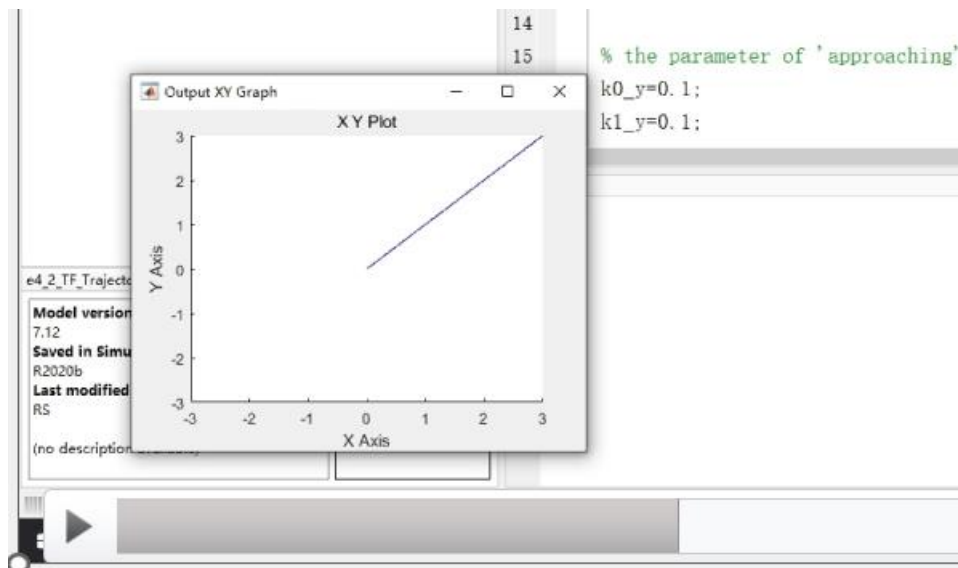


图 7.14 $k_1 = 1$ 时路径跟随控制器响应

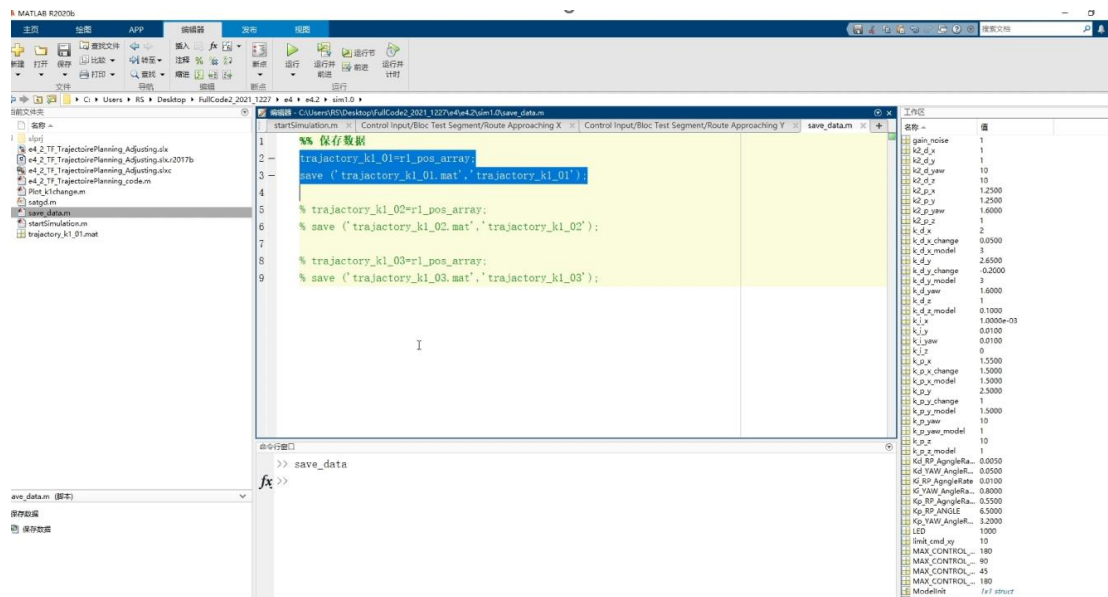
Step 5:

单击 Simulink “开始仿真” 按钮进行仿真。



Step 6:

点击 save data.m 保存文件。



Step 7:

在几种参数都运行并保存后，打开“e4\c4.2\sim1.0\ Plot_k1change.m”文件，并单击“运行”按钮，开始画图。

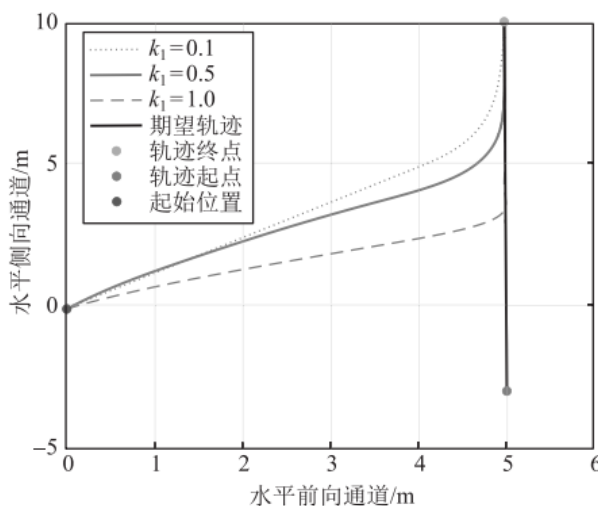


图 7.15 路径跟随控制器输出与期望轨迹对比图

(3) 小结

在对结果进行分析后,可以得出如下结论。首先,在保持其他两个参数的不变的情况下,饱和上限 a_0 值越大,多旋翼靠近轨迹的速度会越来越快,直到到达最大速度,但靠近终点时会因速度太大而产生超调。其次,在保持其他两个参数值不变的情况下,参数 k_1 越大,多旋翼靠近轨迹的程度越“直接”,也就是说多旋翼更倾向于以优先靠近“当前位置在期望轨迹上的垂足”的方式靠近期望轨迹,这与式(7.14)是一致的。这里,参数 k_1 是 $\tilde{p}_{wp, \text{ perp}} - p$ 的系

数，其值越大，多旋翼就会越倾向于靠近垂足。另外，参数 k_0 是 $p_{wp} - p$ 的系数，其值越大，多旋翼就会越倾向于靠近目标终点。

7. 仿真 2.0(sim2.0)实验步骤

接下来，我们将进行仿真 1.0 和仿真 2.0 的对比。对于在传递函数模型中已经完成的实验过程，在这里需要进一步在非线性模型上进行验证，即在仿真 2.0 上验证卡尔曼滤波的效果。

Step 1:

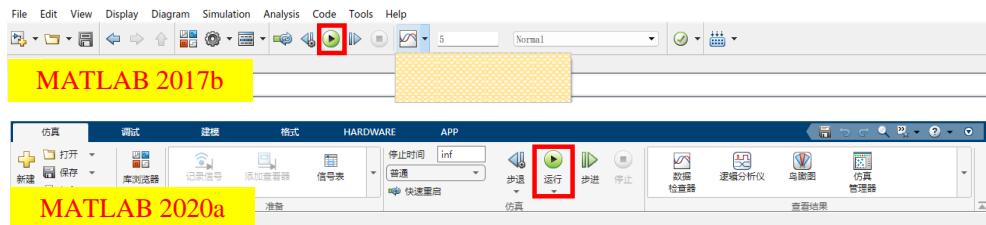
打开文件夹“e4\4.2\sim2.0”，其中的文件与“e4\4.2\sim1.0”相同，区别在于其中的模型为非线性模型。采用与传递函数模型实验中完全相同的实验步骤，将两种模型的关键结果进行对比。为了尽可能简略且清楚地显示对比效果，这里选取 $a_0 = 2$ 与 $k_1 = 1$ 时的跟随轨迹情况进行对比。从对比结果图 7.16 和图 7.17 可以看出，我们采用系统辨识获得的传递函数模型进行实验时，可以产生与基于非线性模型设计非常接近的效果，同时也可以查看 FlightGear 中查看仿真飞行效果。

Step 2:

打开本章所附带文件夹中的“e4\4.2\sim2.0”文件夹，打开“e4\4.2\sim2.0\startSimulation.m”文件，并单击“运行”按钮，初始化参数。

Step 3:

打开“e4\4.2\sim1.0\4_2_Model_TrajectoirePlanning_Adjustingr2017b.slx”模型文件，将看到多旋翼路径跟踪 Simulink 仿真平台，如图 7.2 所示。



Step 4:

按照 sim1.0 的步骤运行，并保存数据。

Step 5:

打开“e4\4.1\sim2.0\ Plot_comparison.m”文件，并单击“运行”按钮，开始画图。

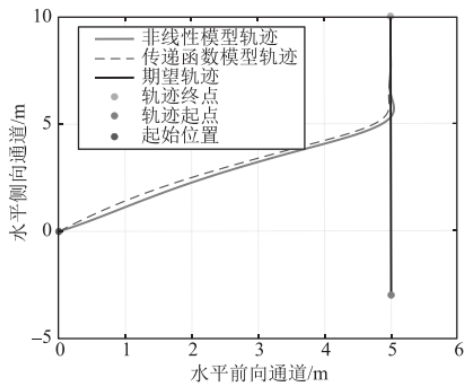


图 7.16 $\alpha_0 = 2$ 时不同模型跟随轨迹对比图

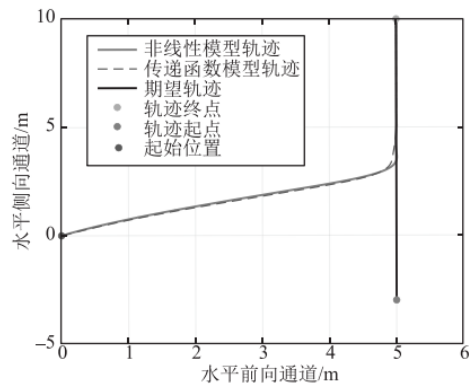


图 7.17 $k_1 = 1$ 时不同模型跟随轨迹对比图

8. 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 [M] 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 [M] 电子工业出版社 2020.
- [4]. 全权 等.多旋翼无人机远程控制实践[M].电子工业出版社,2022.

9. 常见问题

Q1: ****

A1: ****