

1. 实验名称及目的

路径跟随控制器设计实验 (设计实验):

在直线路径跟随理论的基础上, 设计圆轨迹路径跟随算法。已知所跟随圆的圆心位于点(0,0), 半径为 3m, 多旋翼初始位置可定为点(0,0)。此外偏航角需要始终保持为 0, 高度始终保持在 2m。在完成圆轨迹路径跟随算法的设计和验证之后, 改变参数的值, 分析其作用。最后进行仿真 1.0、仿真 2.0 和硬件在环仿真。

2. 实验原理

该问题可以描述为: 当前多旋翼位置为 $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^2$, 航路轨迹为圆, 圆心为 $\mathbf{o} \in \mathbb{R}^2$, 半径为 R ; 设计虚拟控制 $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^2$ 使得多旋翼最终能够绕圆周进行逆时针飞行。前两个实验实现了直线的路径跟随, 对于圆轨迹路径跟随, 也可以采用相同的思路。如图 7.18 所示, $\mathbf{p}_{\text{perp}} \in \mathbb{R}^2$ 表示多旋翼与圆的最近距离点, 可以表示为

$$\mathbf{p}_{\text{perp}} = \mathbf{o} + (\mathbf{p} - \mathbf{o}) \frac{R}{\|\mathbf{p} - \mathbf{o}\|} \quad (7.16)$$

那么

$$\mathbf{p} - \mathbf{p}_{\text{perp}} = \lambda (\mathbf{p} - \mathbf{o}) \quad (7.17)$$

其中

$$\lambda = 1 - \frac{R}{\|\mathbf{p} - \mathbf{o}\|} \quad (7.18)$$

令 \mathbf{p}_{perp} 能够产生吸引多旋翼的引力, 这样多旋翼的飞行轨迹就会趋近圆。另外, 我们希望多旋翼能够绕圆周进行逆时针飞行, 这就需要设计多旋翼绕圆周进行逆时针切向方向的吸引力, 同时切向方向引导点 \mathbf{p}_{tan} 到当前多旋翼的位置具有单位长度, 可以得到

$$\mathbf{p}_{\text{tan}} - \mathbf{p} = \mathbf{R}_{\alpha=90^\circ} \frac{\mathbf{p}_{\text{perp}} - \mathbf{o}}{\|\mathbf{p}_{\text{perp}} - \mathbf{o}\|} \quad (7.19)$$

这里, \mathbf{R}_α 表示旋转矩阵, 定义为

$$\mathbf{R}_\alpha = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (7.20)$$

其意义为, 一个向量与其相乘后, 向量可以逆时针旋转 α 角度。综上所述, 设计圆轨迹路径跟随控制器为

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{k_2} (\mathbf{p} - \mathbf{p}_d) - \frac{1}{k_2} \mathbf{v} \quad (7.21)$$

其中, $\mathbf{p}_d = \text{sat}_{\text{gd}}(k_0 (\mathbf{p}_{\text{tan}} - \mathbf{p}) + k_1 (\mathbf{p}_{\text{perp}} - \mathbf{p}), a_0)$ 。参数 $k_0, k_1 > 0$ 分别表示趋向 \mathbf{p}_{tan} 和 \mathbf{p}_{perp} 的增益大小, 饱和的作用在于限制 \mathbf{p}_d 大小。

(1) 若多旋翼离圆很远, 那么

$$\mathbf{p}_d \approx \text{sat}_{\text{gd}}(k_1 (\mathbf{p}_{\text{perp}} - \mathbf{p}), a_0)$$

(2) 若多旋翼已经在圆上, 那么

$$\mathbf{p}_d = \text{sat}_{\text{gd}}(k_0 (\mathbf{p}_{\text{tan}} - \mathbf{p}), a_0)$$

此时多旋翼的绝大部分控制是绕圆飞行。为了更好地理解 \mathbf{p}_d 的物理意义，令 $k_0 = k_1 = 1$ ，那么

$$\mathbf{p}_d = \text{sat}_{\text{gd}} \left((\mathbf{p}_{\text{tan}} - \mathbf{p}) + (\mathbf{p}_{\text{perp}} - \mathbf{p}), a_0 \right) \quad (7.22)$$

其中， \mathbf{p}_d 的物理意义如图 7.18 所示。由图可见，无论多旋翼在给定的圆内还是圆外，都有趋向圆的趋势。

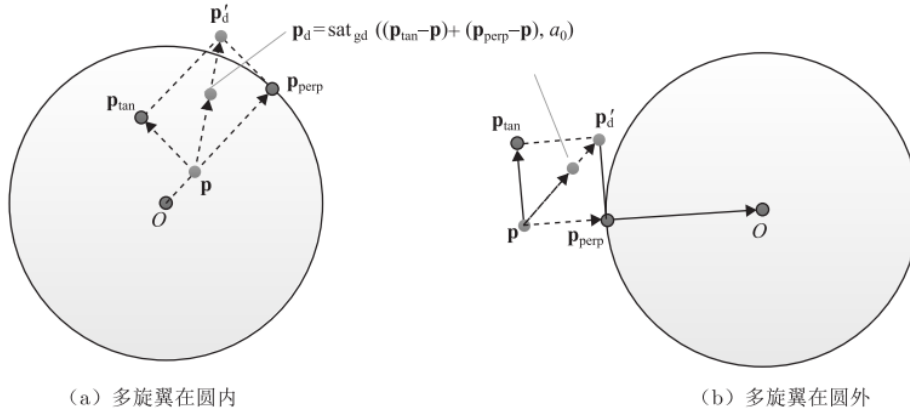


图 7.18 圆轨迹路径跟随过程中实时航路点的物理意义

1) 整体模块

打开 Simulink 文件 “e4\4.3\sim1.0\ e4_3_TF_TrajectoryPlanning_Cercle.slx”，如图 7.19 所示。

2) 控制输入模块

高度通道和偏航通道模块与基础实验一致。对于水平方向的两个通道，单击图 7.19 中的 “Controller” 模块查看完整代码，其中的关键代码如表 7.2 所示。

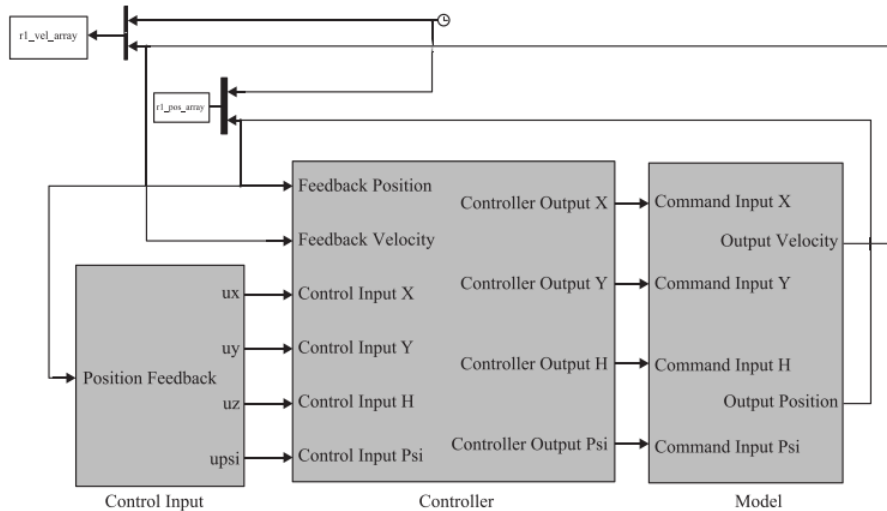


图 7.19 修改后的模型, Simulink 模型详见 “e4\4.3\ sim1.0\4_3_TF_TrajectoryPlanning_Cercle.slx”

表 7.2 圆轨迹路径跟随控制器参数修改

```
1 function [P_dx,P_dy] = fcn(P_Rayon, P_feedback, P_Origine)
2 % 参数赋值
3 a0 = 3;
4 % PD控制器的参数: 1/k2
5 % 根据《多旋翼飞行器设计与控制》的287页
6 persistent P_static;
7 if isempty(P_static) P_static=P_init;
8 end
9 P_static = P_feedback;
10 % 除了起始值, 其他位置都是反馈得到
11 % 迭代过程
12 P_perp_rayon = P_Origine+(P_static-P_Origine)*(P_Rayon/(norm((P_static-P_Origine)+
    0.000001))));
13 % '+ 0.000001'项是为了防止分母为0
14 A = P_Rayon*[0,1;-1,0]*((P_perp_rayon - P_static)+0.000001)/(norm((P_perp_rayon -
    P_static))+0.000001)); temp = satgd(k0_x*A+k1_x*(P_perp_rayon-P_static),a0);
15 P_d0 = P_static + temp;
16 P_dx=P_d0(1);
17 P_dy=P_d0(2);
```

3. 实验效果

输出在不同 k_1 值下, 路径跟随控制器输出时间曲线对比图, 以及路径跟随控制器输出与期望轨迹对比图。

4. 文件目录

文件夹/文件名称		说明
Sim1.0	Plot.m	绘图文件
	e4_3_TF_TrajectoirePlanning_code.m	控制器参数文件
	save_data.m	保存数据文件
	e4_3_TF_TrajectoirePlanning_Cercle_r2017b.slx	多旋翼路径跟随控制器仿真 1.0 文件
	startSimulation.m	初始化参数文件
sim2.0	e4_3_Model_TrajectoirePlanning_code.m	控制器参数文件
	Plot.m	绘图文件
	save_data.m	保存数据文件
	e4_3_Model_TrajectoirePlanning_Cercle_r2017b.slx	多旋翼路径跟随控制器仿真 2.0 文件
	startSimulation.m	初始化参数文件
HIL	e4_3_Model_TrajectoirePlanning_HITL_R2017b.slx	多旋翼路径跟随控制器硬件在环仿真文件
	e4_3_Model_TrajectoirePlanning_code.m	控制器参数文件
	startSimulation.m	初始化参数文件
	RflyUdpFast.mexw64	动态链接库

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 平台个人版	Pixhawk 6C ^②	1
3	MATLAB 2017B 及以上	遥控器 ^③	1
		遥控器接收器	1
		数据线、杜邦线等	若干

①：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com>

②：须保证平台安装时的编译命令为：px4_fmu-v6c_default，固件版本为：1.13.3。其他配套飞控请见：<http://doc.rflysim.com>

③：本实验演示所使用的遥控器为：天地飞 ET10、配套接收器为：WFLY RF209S。遥控器相关配置见：[..\e11_RC-Config\Readme.pdf](#)

6. 仿真 1.0(sim1.0)实验步骤

Step 1:

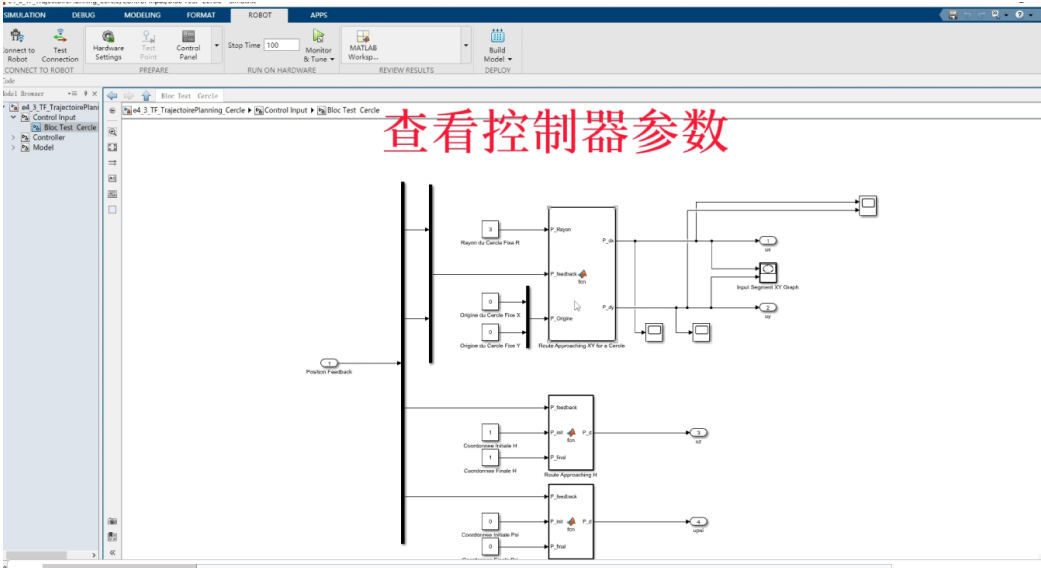
打开本章所附带文件夹中的“e4\4.3\sim1.0”文件夹，打开“e4\4.3\sim1.0\startSimulation.m”文件和“e4\4.3\sim1.0\ e4_3_TF_TrajectoirePlanning_code.m”，并单击“运行”按钮，初始化参数。

Step 2:

打开 Simulink 文件“e4\4.3\sim1.0\ e4_3_TF_TrajectoirePlanning_Cercle_r2017b.slx”，整体模块如图 7.19 所示。

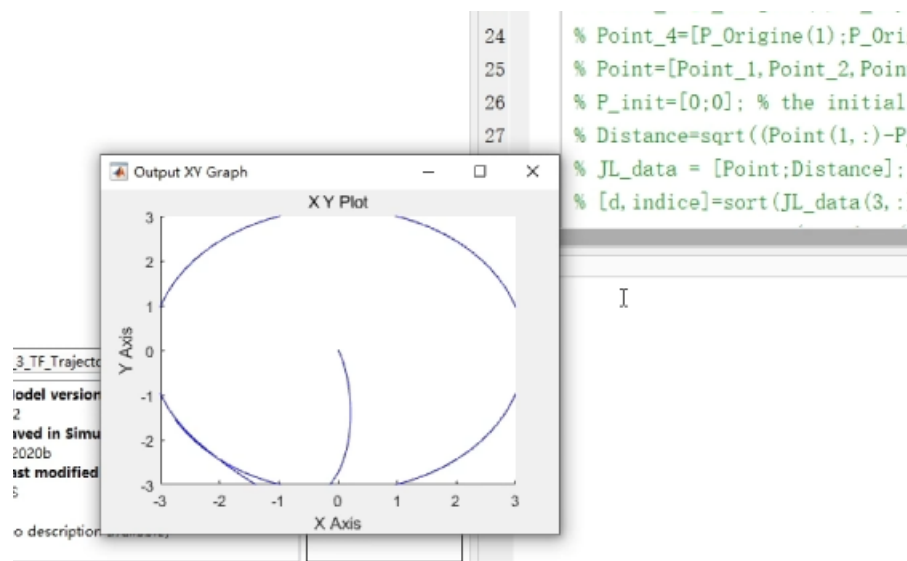
Step 3:

查看控制器参数，对控制器参数进行修改。



Step 4:

点击运行程序。



Step 5:

点击运行文件“e4\4.3\sim1.0\ save_data.m”，能够对例程生成的数据进行保存，会生成“.mat”文件。

startSimulation.m
trajectory_cercle_01.mat
trajectory_cercle_02.mat
trajectory_cercle_03.mat

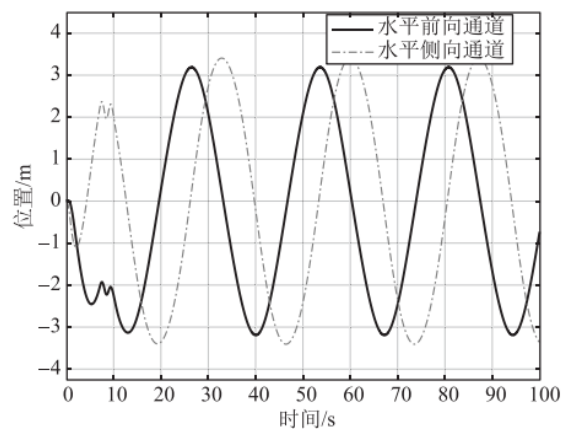


图 7.20 $k_1 = 0.3$ 时路径跟随控制器输出时间曲线对比图

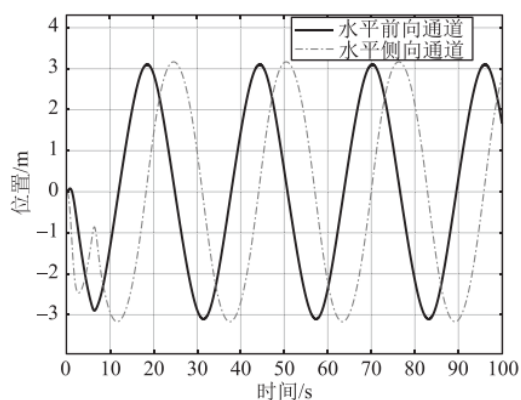
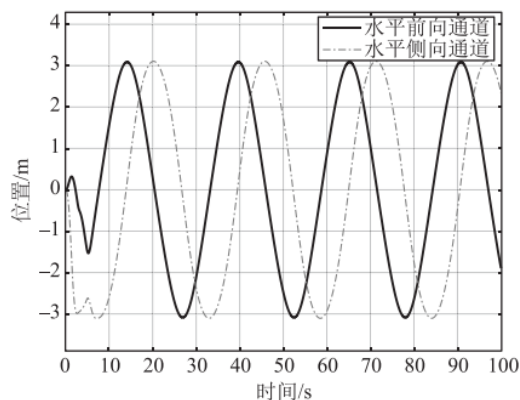


图 7.21 $k_1 = 0.7$ 时路径跟随控制器输出时间曲线对比图



对比图

Step 6:

重复上述的步骤，对文件的数据进行修改，修改完之后，同样对文件数据进行保存。

Step 7:

点击运行文件“e4\4.3\sim1.0\Plot.m”，会生成之前三次数据的对比图。

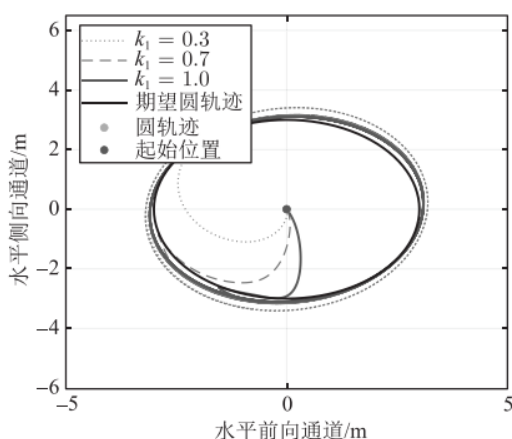


图 7.23 路径跟随控制器输出与期望轨迹对比图

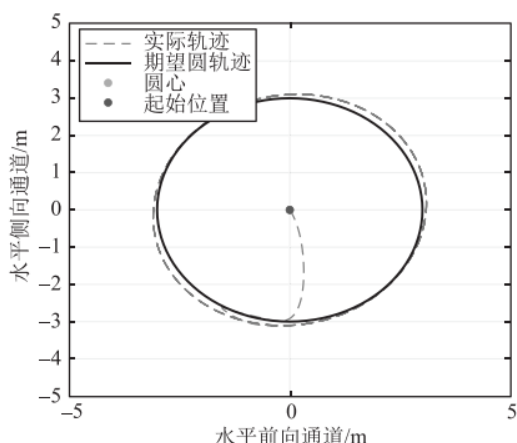


图 7.24 $k_1 = 1$ 时路径跟随控制器输出与期望轨迹对比图

(具体操作步骤可以观看每章相对应的 PPT，其中有各个实验相对应的演示视频。)

7. 仿真 2.0(sim2.0)实验步骤

打开 Simulink 文件“e4\4.3\sim2.0”，其中的闭环系统结构与“e4\4.3\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。对比结果图。

Step 1:

打开本章所附带文件夹中的“e4\4.3\sim2.0”文件夹，打开“e4\4.3\sim2.0\startSimulation.m”文件，并单击“运行”按钮，初始化参数。

Step 2:

按照仿真 1.0 中的步骤完成实验。

Step 3:

从对比结果图 7.25 可以看出，我们采用系统辨识获得的模型进行路径跟随控制器设计，可以产生与基于非线性模型设计非常接近的效果。另外，这里的非线性模型所获得的圆跟随轨迹并不对称，这是因为非线性模型存在着诸多不确定性和限制，同时也可以在此 **FlightGear** 中查看仿真飞行效果。

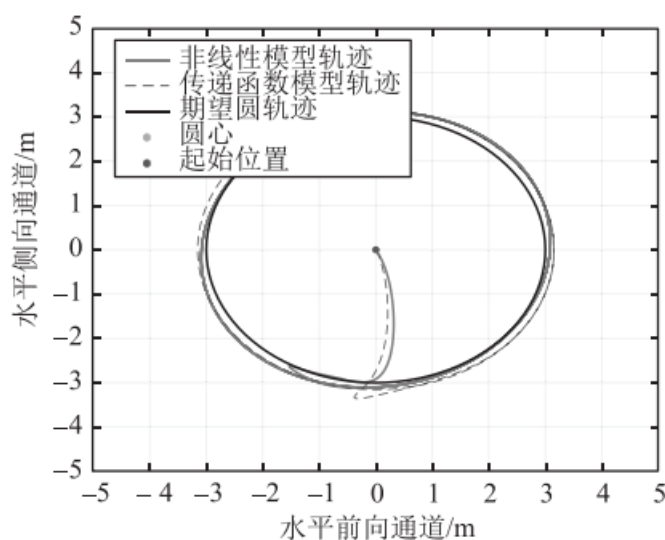


图 7.25 $k_1 = 1$ 时不同模型跟随轨迹对比图

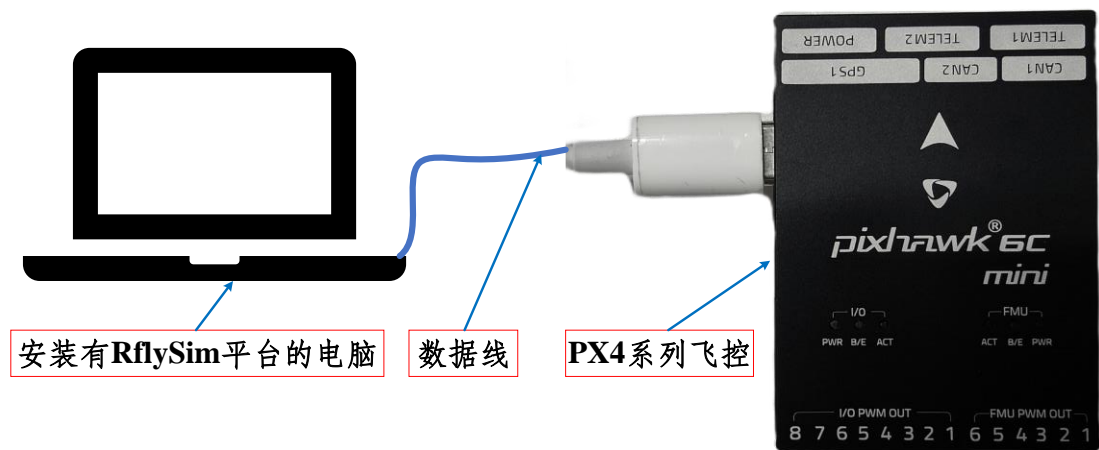
（具体操作步骤可以观看每章相对应的 PPT，其中由各个实验相对应的演示视频。）

8. 硬件在环仿真(HIL)实验步骤

硬件在环仿真实验的内容与设计实验相同,只是把设计实验中的多旋翼模型模块替换成了硬件在环模块，硬件在环仿真所需设备如图所示。

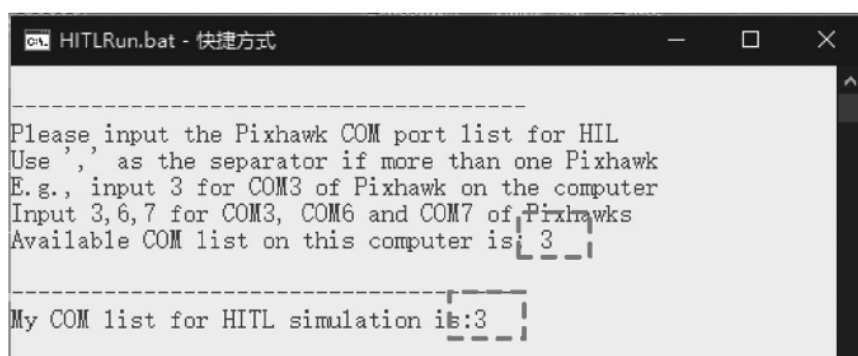
Step 1:

连接硬件：将 Pixhawk 自驾仪与计算机通过 USB 数据线连接。



Step 2:

选择 HIL 脚本：打开桌面“*\桌面\RflyTools\HITLRun.lnk”一键启动硬件在环仿真脚本，在弹出的命令行中。输入 PX4 系列自驾仪显示的串口号，如这里是“3”，只需把该串口号输入下方即可。**注：**本脚本也可支持多机仿真，多机硬件在环仿真时，需要插入多个飞控到电脑中，双击“*\桌面\RflyTools\HITLRun.lnk”后弹出的命令行中提示的串口号个数应与连接的自驾仪个数一致，需要在下方输入所有给出的串口号，每个串口号用逗号分隔开。



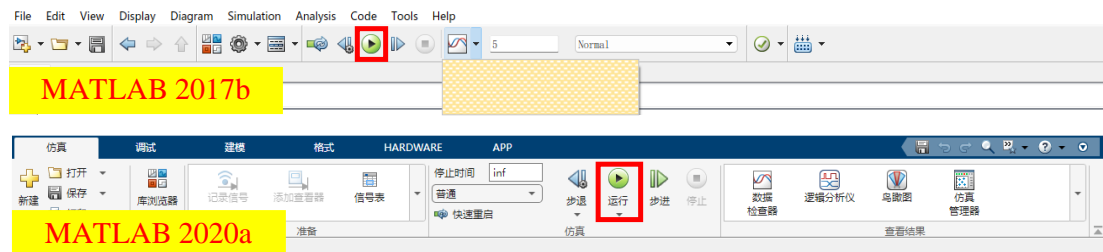
在填写完串口号后，按下回车键，系统会自动打开所有与硬件在环仿真相关的 RflySim3D、CopterSim 和 QGC 地面站。等待 CopterSim 的左下角状态框中显示：PX4: GPS 3D fixed & EKF initialization finished。

Step 3:

打开本章所附带文件夹中的“e4\4.3\HIL”文件夹，打开“e4\4.3\HIL\startSimulation.m”文件，并单击“运行”按钮，初始化参数。

Step 4:

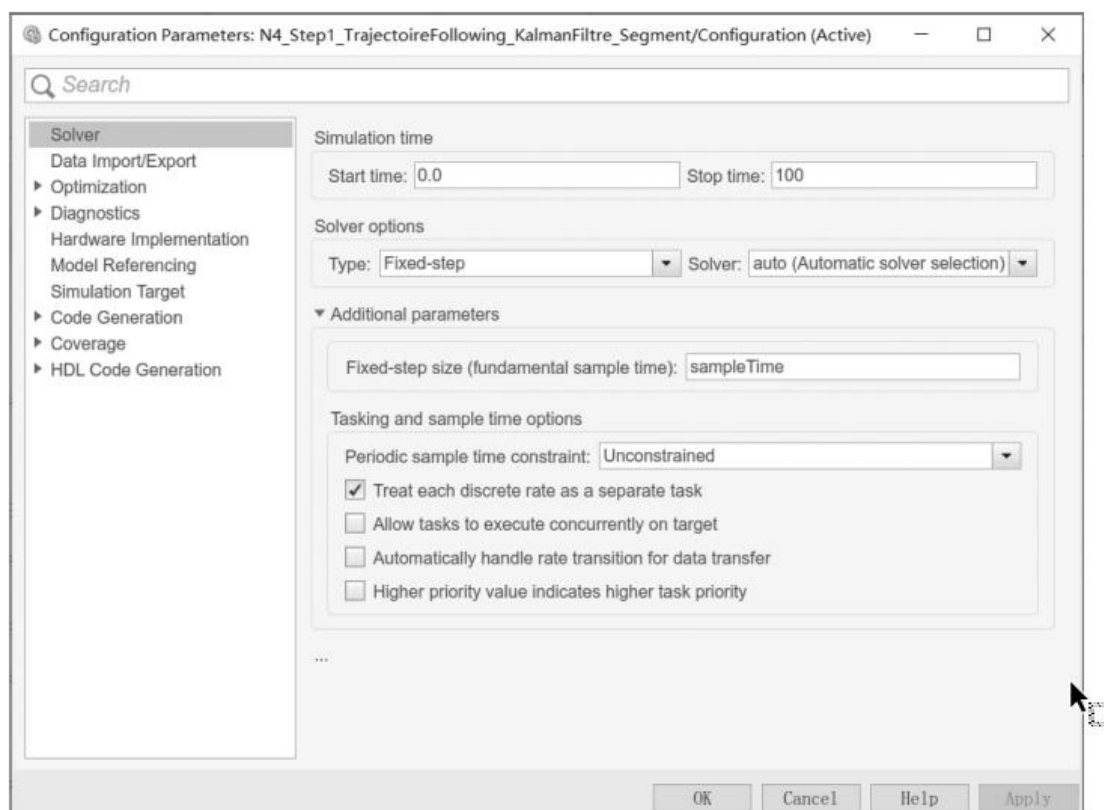
在 Simulink 中打开 [HIL\4_3_Model_TrajectoirePlanning_HITL_R2017b.slx](#) 程序，单机“运行”。便可以在 RflySim3D 软件中看到硬件在环仿真的效果，具体硬件在环仿真实验步骤可以参考第 3 章 3.2.2.3 节。



可以实现自驾仪硬件在环仿真，仿真结果通过 RflySim3D 软件实时显示。



注意：1）本实验中的仿真模型均在 R2017b 版本中运行，所以需要计算机中的版本为 R2017b 及以上。2）所有的仿真模型均需要设定固定的仿真步长。在 Simulink 界面的上方菜单栏中单击“Model Configuration Parameters”进入如下图所示的界面，在其中单击“Solver”“Solver options”“Type”，在下拉菜单中选择“Fixed-Step”选项。单击其下方的“Additional Parameters”，在“Fixed-Stepsize”一栏中填入变量名“sample-Time”。这样就规定好了仿真模型的固定仿真步长，而变量“sampleTime”值设置在“startSimulation.m”文件中。



Step 5:

实验数据记录在“Pos”文件中，结果如图 7.26 所示。

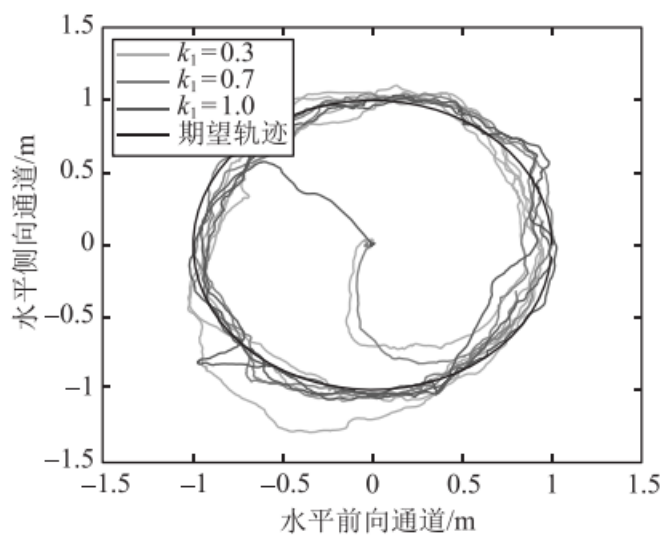


图 7.26 硬件在环仿真结果

实验数据记录在“Pos1”文件中，结果如图 7.26 所示。硬件在环仿真实验分别实现了 $k_1 = 0.3, 0.7, 1.0$ 的飞行实验，从实验结果可以看出，控制 k_0 不变，改变 k_1 的大小，轨迹随着 k_1 的增大而越来越靠近期望轨迹，但是在期望轨迹附近的抖动也更加明显。这是因为在

外加饱和函数的情况下， k_0 决定切向命令的权重大小， k_1 决定径向命令的权重。 k_1 增大则径向命令增大，多旋翼会更加逼近期望轨迹，同时切向命令会减小，从而导致了在期望轨迹周围抖动的情况，这也说明了要均衡选取合适的参数从而达到贴合期望轨迹的目的，同时减少抖动。

（具体操作步骤可以观看每章相对应的 PPT，其中由各个实验相对应的演示视频。）

9. 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.

10. 常见问题

Q1: ****

A1: ****