

路径跟随控制器设计实验 (设计实验)

1. 实验目的

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. 实验要求

- 软件要求：Windows 10及以上版本；RflySim工具链^[1]；MATLAB 2022b及以上。
- 硬件要求：笔记本/台式电脑1台^[2]；Pixhawk 6C 1台；遥控器 1台；遥控器接收器 1台；数据线、杜邦线等 若干台。

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>

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：<https://rflysim.com/doc/zh/B/2.3Pixhawk6X.html>

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：<https://rflysim.com/doc/zh/B/3.1ET10.html>

3. 实验地址

例程路径：

[安装目录]\RflySimAPIs\6.RflySimExtCtrl\1.BasicExps\e10_TrajectoirePlanning\e4.3

[相对路径文件名]：[功能描述]

sim1.0/Plot.m：绘图文件

sim1.0/e4_3_TF_TrajectoirePlanning_code.m：控制器参数文件

sim1.0/save_data.m：保存数据文件

sim1.0/e4_3_TF_TrajectoirePlanning_Cercle_r2017b.slx：多旋翼路径跟随控制器仿真1.0文件

sim1.0/startSimulation.m：初始化参数文件

sim1.0/satgd.m：辅助函数文件

sim2.0/Plot.m：绘图文件

sim2.0/e4_3_Model_TrajectoirePlanning_code.m：控制器参数文件

sim2.0/save_data.m：保存数据文件

sim2.0/e4_3_Model_TrajectoirePlanning_Cercle_r2017b.slx：多旋翼路径跟随控制器仿真2.0文件

sim2.0/startSimulation.m：初始化参数文件

sim2.0/satgd.m：辅助函数文件

HIL/4.2/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

HIL/4.2/e4_3_Model_TrajectoirePlanning_code.m：控制器参数文件

HIL/4.2/startSimulation.m：初始化参数文件

HIL/4.2/RflyUdpFast.mexw64：动态链接库

HIL/4.2/satgd.m：辅助函数文件

HIL/4.1/e4_1_Model_TrajectoirePlanning_HITL_code.m：HIL 4.1版本控制器参数文件

HIL/4.1/satgd.m：HIL 4.1版本辅助函数文件

HIL/4.1/startSimulation.m：HIL 4.1版本初始化参数文件

HIL/4.1/RflyUdpFast.mexw64：HIL 4.1版本动态链接库

HIL/4.1/e4_1_Model_TrajectoirePlanning_HITL_Segment.slx：HIL 4.1版本线段路径跟随控制器仿真文件

HIL/4.1/e4_1_Model_TrajectoirePlanning_HITL_Segment.slx.r2017b：HIL 4.1版本线段路径跟随控制器仿真文件(MATLAB 2017b兼容版)

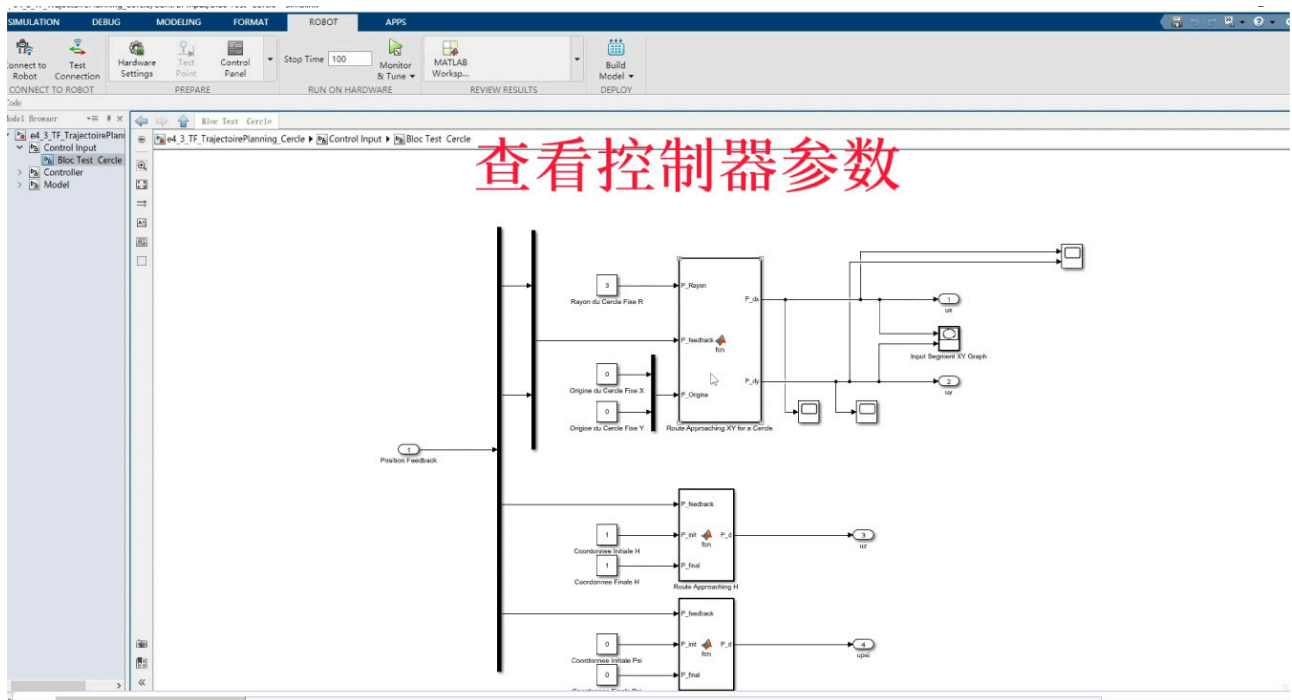
4. 实验内容或步骤

4.1 步骤1：仿真1.0(sim1.0)实验

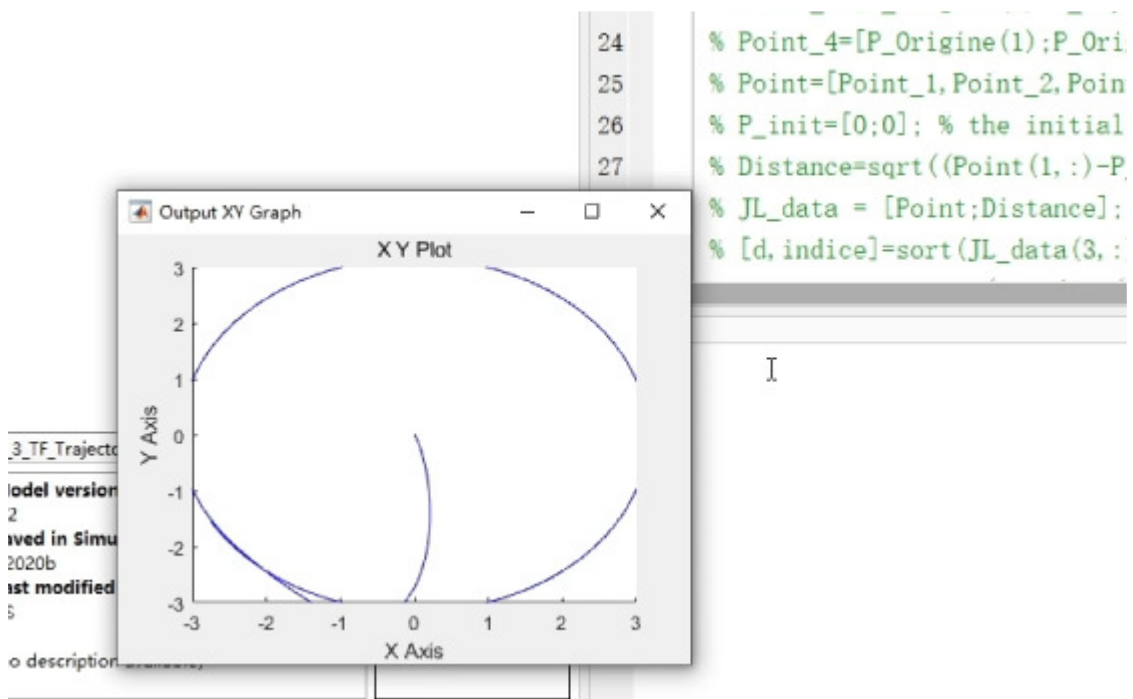
打开本章所附带文件夹中的“e4\4.3\sim1.0”文件夹，打开“e4\4.3\sim1.0\startSimulation.m”文件和“e4\4.3\sim1.0\ e4_3_TF_TrajectoirePlanning_code.m”，并单击“运行”按钮，初始化参数。

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。

查看控制器参数，对控制器参数进行修改。



点击运行程序。



点击运行文件“e4\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。

- start_simulation.m
- trajectory_cercle_01.mat
- trajectory_cercle_02.mat
- trajectory_cercle_03.mat

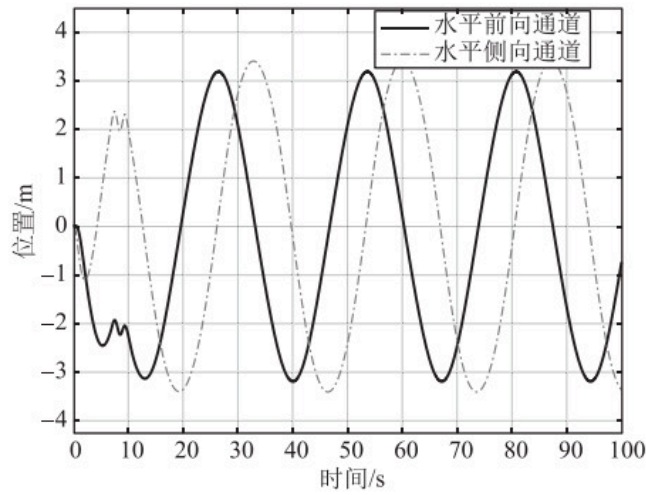


图 7.20 $k_1 = 0.3$ 时路径跟随控制器输出时间曲线对比图

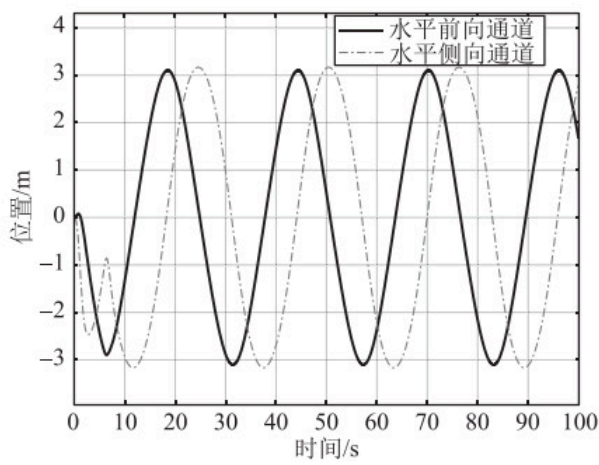


图 7.21 $k_1 = 0.7$ 时路径跟随控制器输出时间曲线对比图

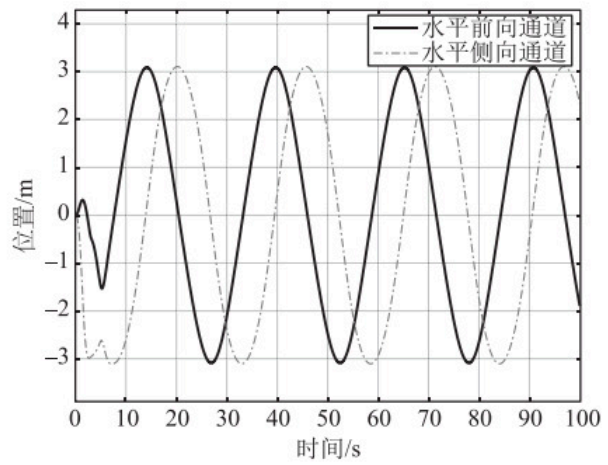


图 7.22 $k_1 = 1$ 时路径跟随控制器输出时间曲线对比图

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。

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。

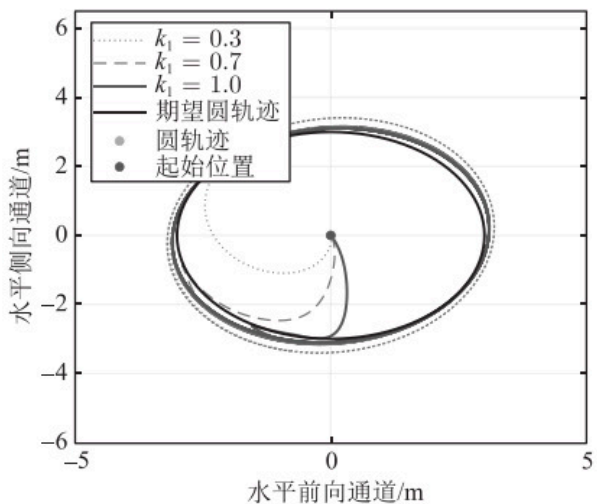


图 7.23 路径跟随控制器输出与期望轨迹对比图

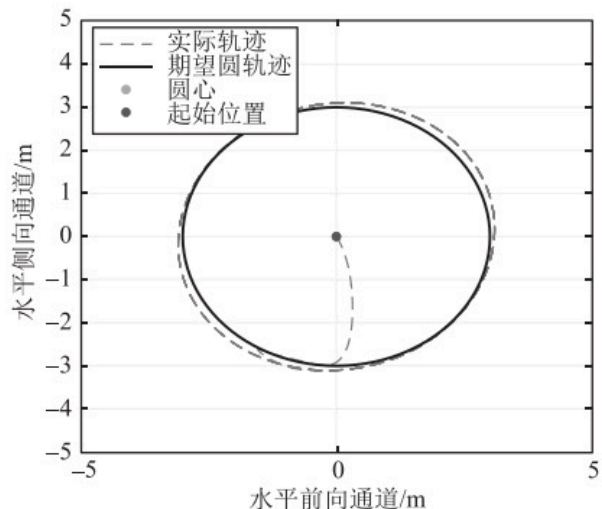


图 7.24 $k_1 = 1$ 时路径跟随控制器输出与期望轨迹对比图

(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。)

4.2 步骤2：仿真2.0(sim2.0)实验

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。

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。

按照仿真1.0中的步骤完成实验。

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，同时也可以可以在FlightGear中查看仿真飞行效果。

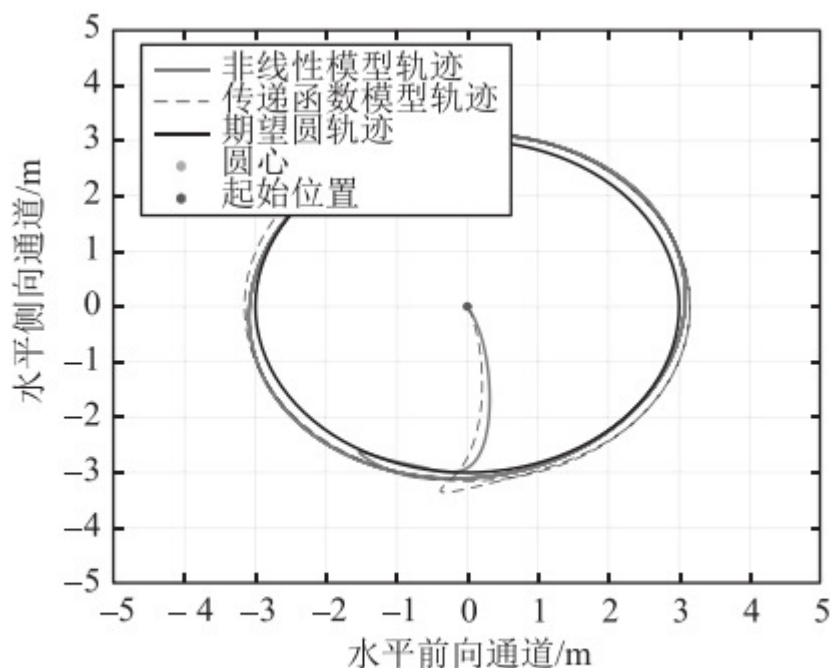


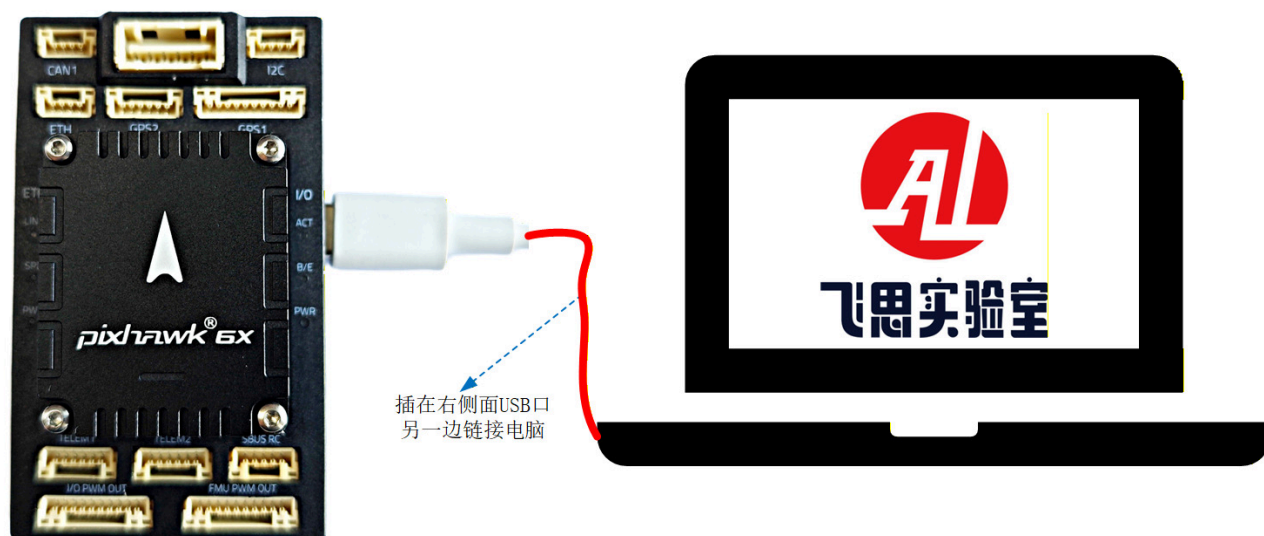
图 7.25 $k_1 = 1$ 时不同模型跟随轨迹对比图

(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。)

4.3 步骤3：硬件在环仿真(HIL)实验步骤

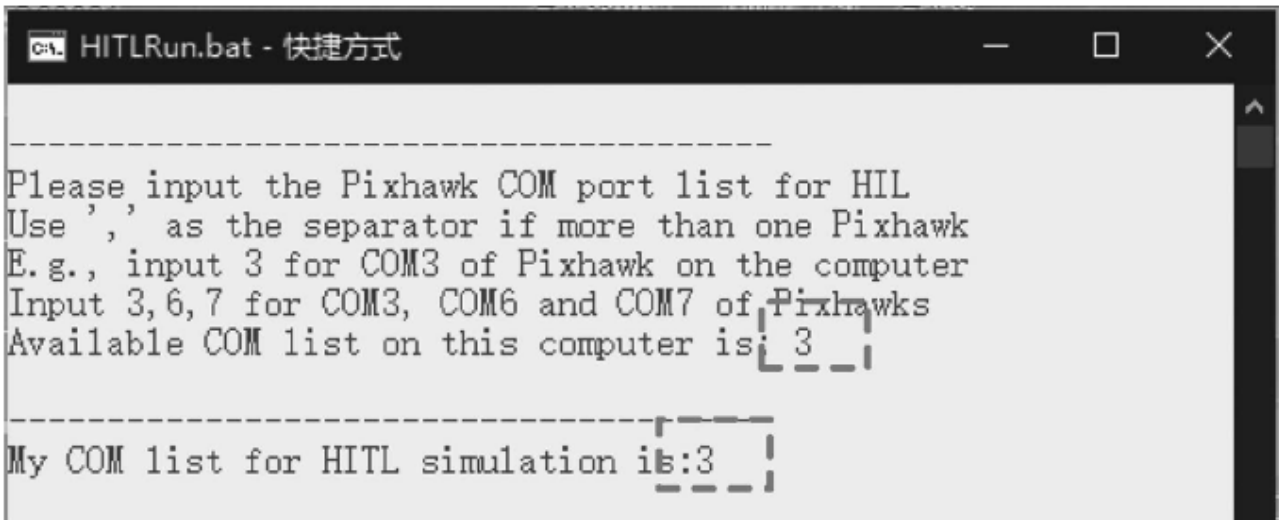
硬件在环仿真实验的内容与设计实验相同,只是把设计实验中的多旋翼模型模块替换成了硬件在环模块，硬件在环仿真所需设备如图所示。

连接硬件：将Pixhawk自驾仪与计算机通过USB数据线连接。



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。

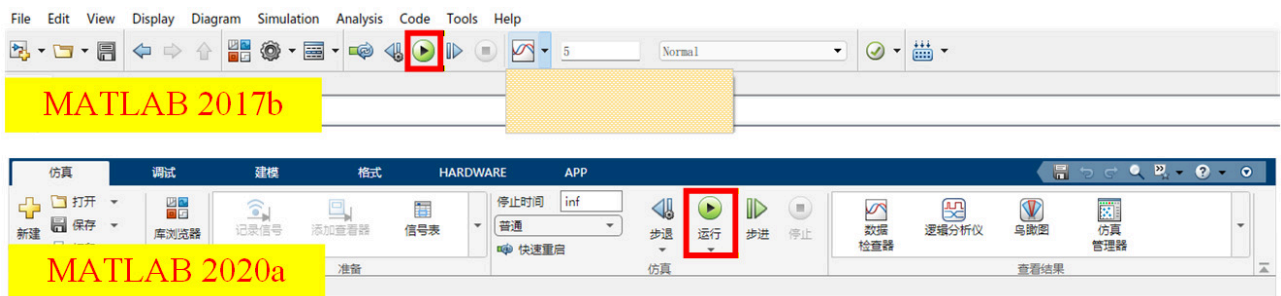


打开本章所附带文件夹中的“e4\4.3\HIL”文件夹，打开“e4\4.3\HIL\startSimulation.m”文件，并单击“运行”按钮，初始化参数。

在Simulink中打开[HIL\4.3_Model_TrajectoryPlanning_HITL_R2017b.slx] (file:///E:/5.%20多旋翼无人机远程控制实践/0_课件完整最新代码/e4/e4.3/HIL/4.2/e4_3_Model_TrajectoryPlanning_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“ModelConfiguration Parameters”进入如下图所示的界面，在其中单击“Solver”“Sloveroptions”“Type”，在下拉菜单中选择“Fixed-Step”选项。单击其下方的“AdditionalParameters”，在“Fixed-Stepsize”一栏中填入变量名“sampleTime”。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。

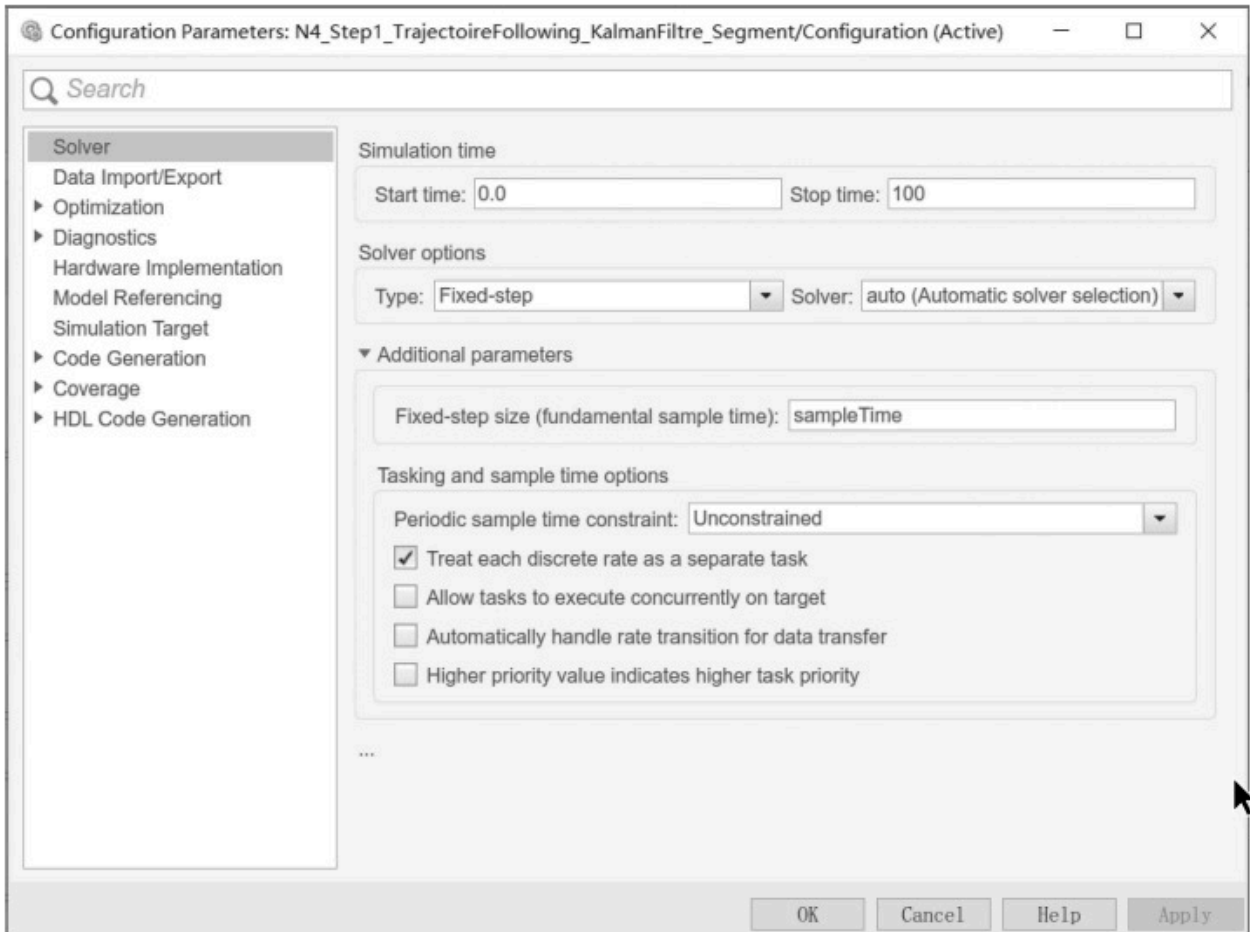


图 3.10 仿真步长设置示意图

实验数据记录在“Pos”文件中，结果如图7.26所示。

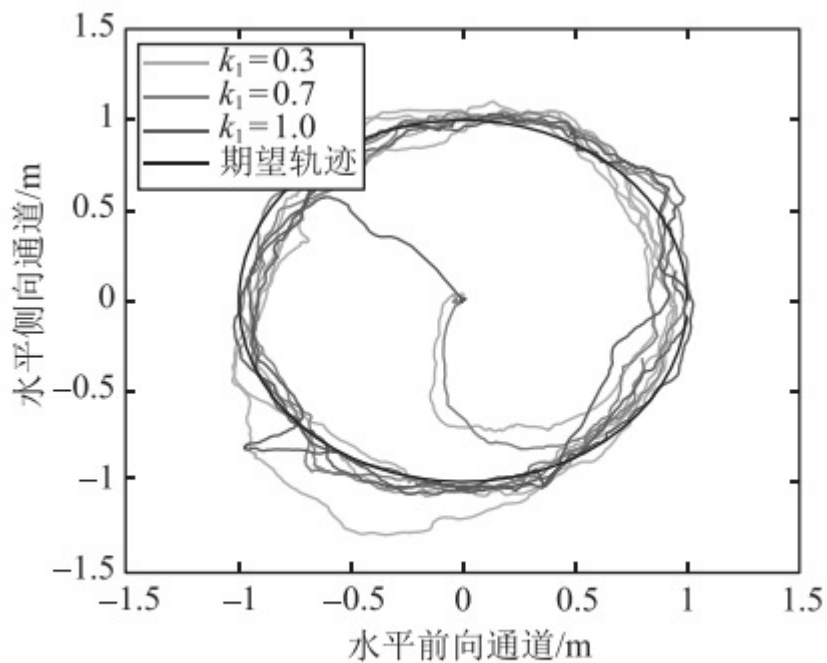


图 7.26 硬件在环仿真结果

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 $\lambda=0.3, 0.7, 1.0$ 的飞行实验，从实验结果可以看出，控制不变，改变 λ 的大小，轨迹随着 λ 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，决定切向命令的权重大小，决定径向命令的权重。增大 λ 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。)

I 5. 关键知识点

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

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

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。

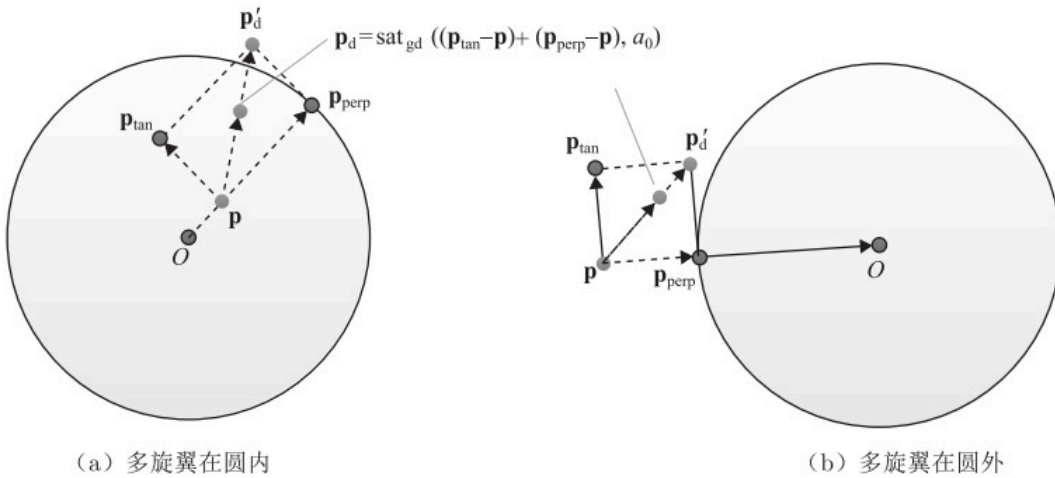


图 7.18 圆轨迹路径跟随过程中实时航路点的物理意义

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。

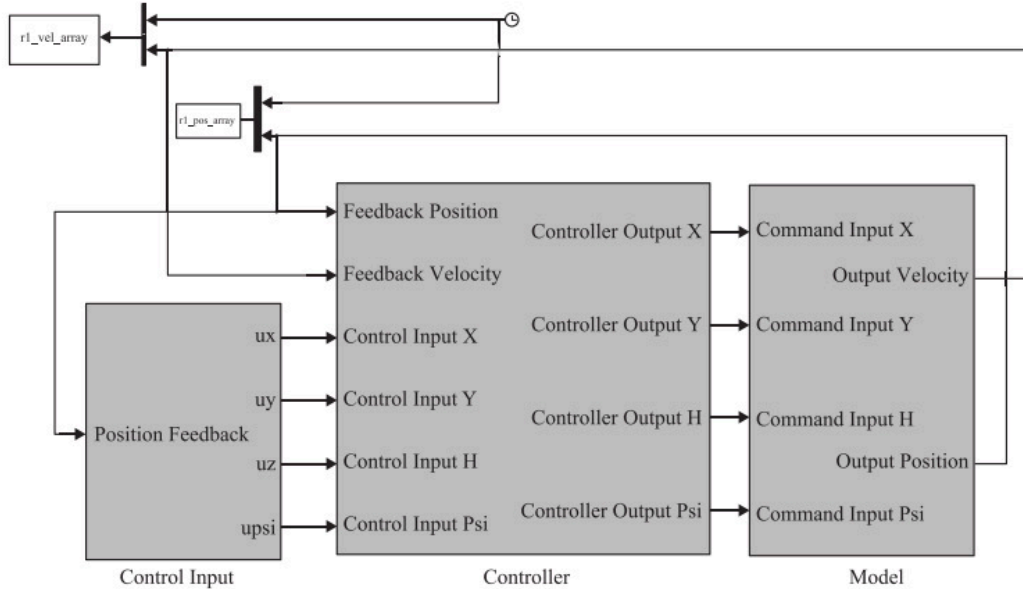


图 7.19 修改后的模型, Simulink 模型详见“e4\4.3\ sim1.0\4_3_TF_TrajectoirePlanning_Cercle.slx”

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);

```

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 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.

7.常见问题

Q1: ***

A1: ***

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