

1. 实验名称及目的

跟踪控制器设计实验 (基础实验):

- (1) 了解多旋翼三通道线性化传递函数模型和相应的跟踪控制器。
- (2) 给定多旋翼各通道幅值为 1，响应时间为第 5s 的阶跃信号，观察效果。进一步，保持偏航角为 0，修改输入期望，实现多旋翼跟踪圆和“8”字轨迹，并逐渐缩输入信号的周期 (20s、10s、5s)，观察跟踪效果的变化，分析输入信号频率对跟踪效果的影响。
- (3) 使用相同的控制器进行仿真 2.0 实验，即非线性模型实验。

2. 实验原理

带有半自主自驾仪的多旋翼控制结构如图 6.1 所示。遥控指令能直接控制多旋翼的以下状态变量：多旋翼的姿态角 θ 和 ϕ （或者多旋翼在机体坐标系下的速度 v_{x_b} 和 v_{y_b} ）、姿态角速度 ω_z ，以及拉力的大小 u_T （或者垂直速度 v_{z_c} ）。进一步，可以通过这些变量控制多旋翼的位置 $(p_{x_c}, p_{y_c}, p_{z_c})$ 以及偏航角 ψ 。真实情况下的多旋翼模型为非线性化的模型，为了便于理解和设计控制器，可以利用线性化的方法对多旋翼的非线性模型进行简化处理。也就是说，如图 6.1 所示的系统可以分成三个通道，分别为从 u_T 到 p_{z_c} 的高度通道、从 u_{ω_z} 到 ψ 的偏航通道以及从 \mathbf{u}_h 到 \mathbf{p}_h 的水平位置通道，其中 $\mathbf{u}_h = [u_\phi \ u_\theta]^T$ ， $\mathbf{p}_h = [p_{x_c} \ p_{y_c}]^T$ 。在半自主自驾仪的控制下，这些通道的模型表示如下。

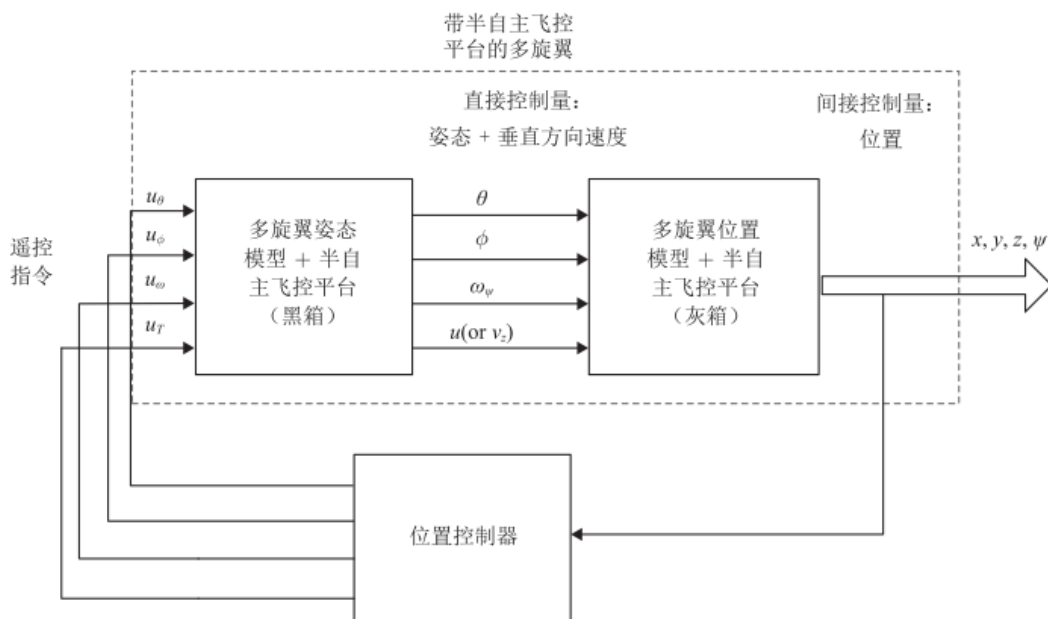


图 6.1 带有半自主自驾仪的多旋翼控制结构

当今的闭环自动控制技术都是基于反馈的概念以减少不确定性。反馈理论的要素包括三个部分：测量、比较和执行。测量得到的是被控变量的实际值，将其与期望值相比较，用两者的偏差来校正系统的响应。在工程实际中，应用最为广泛的调节器为比例、积分、微分控制，简称 PID 控制。

比例控制（P）是一种最简单的控制方式，其输出与输入误差信号呈比例关系。仅用比

例控制，根据负载的变动及设备的固有特性不同，结果可能会出现不同的稳态误差。

积分控制（I），就是在出现稳态误差时自动改变控制器输出量，以消除稳态误差。当系统存在误差时,进行积分控制,根据积分时间的大小,控制器的输出会相应的变化减小误差。只要误差还存在，就会不断进行调整。

微分控制（D）的功能是通过误差的变化率预报误差信号的未来变化趋势。通过提供超前控制作用，微分控制能使被控过程趋于稳定。因此，它经常用来抵消积分控制以及比例控制产生的不稳定趋势。

3. 实验效果

通过示波器显示出仿真模型各种轨迹的波形。

4. 文件目录

文件夹/文件名称		说明
Sim1.0	Save_Cercle.m	保存数据文件
	N4_Step1_cercle_comparaison_T10tf.mat	圆轨迹输入输出融合数据文件
	e3_1_TF_TrajectoireFollowing_Segment_2017b.slx	多旋翼轨迹控制器仿真 1.0 文件
	startSimulation.m	初始化参数文件
sim2.0	N4_Step1_cercle_comparaison_T10.mat	圆轨迹输入输出融合数据文件
	N4_Step1_cercle_comparaison_T10tf.mat	圆轨迹输入输出融合数据文件
	Save_Cercle.m	保存数据文件
	e3_1_Model_TrajectoireFollowing_Segment_2017b.slx	多旋翼轨迹控制器仿真 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:

打开本章所附带文件夹中的“e3\sim1.0”文件夹，打开“e3\sim1.0\startSimula

tion.m”文件，并单击“运行”按钮，初始化参数。

Step 2:

打开 Simulink 文件 “e3\sim1.0\TF_TrajectoryFollowing_Segment_2017b.slx”，整体模块如图 6.2 所示。

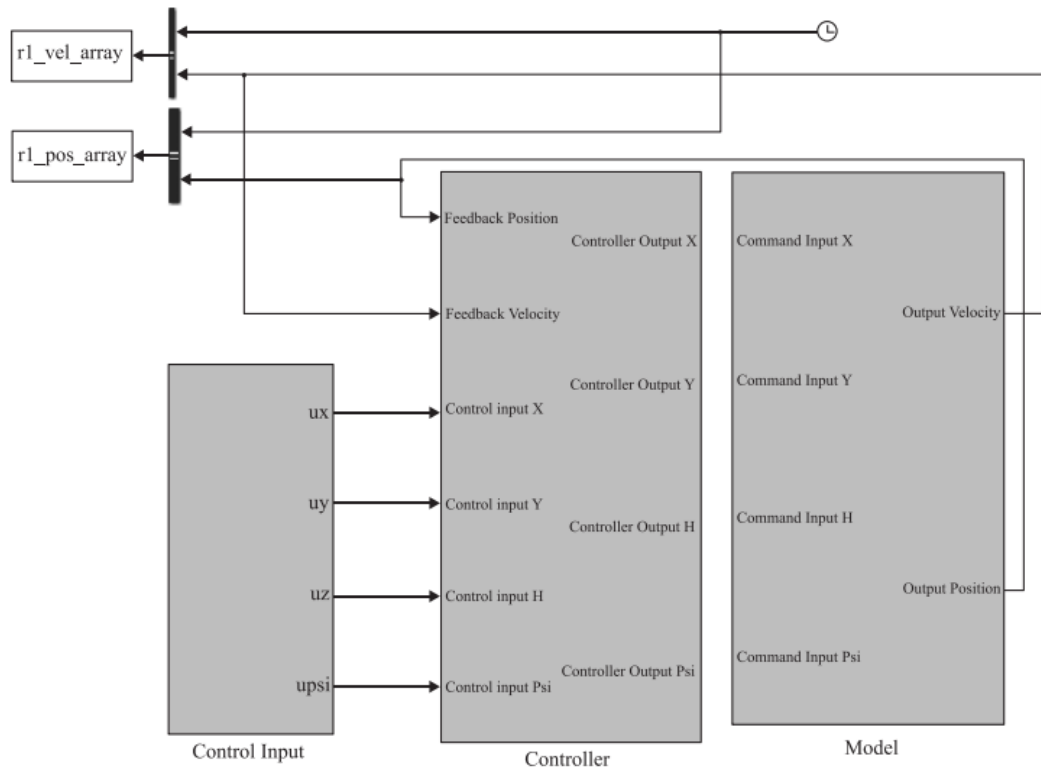


图 6.2 模块整体示意图，Simulink 模型详见 “e3_1_TF_TrajectoryFollowing_Segment.slx”

Step 3:

打开图 6.2 中的“Control Input”模块，其内部如图 6.3 所示。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，每种信号有三种不同的周期。以周期为 10 s 的“8”字信号为例，其内部如图 6.4 所示。

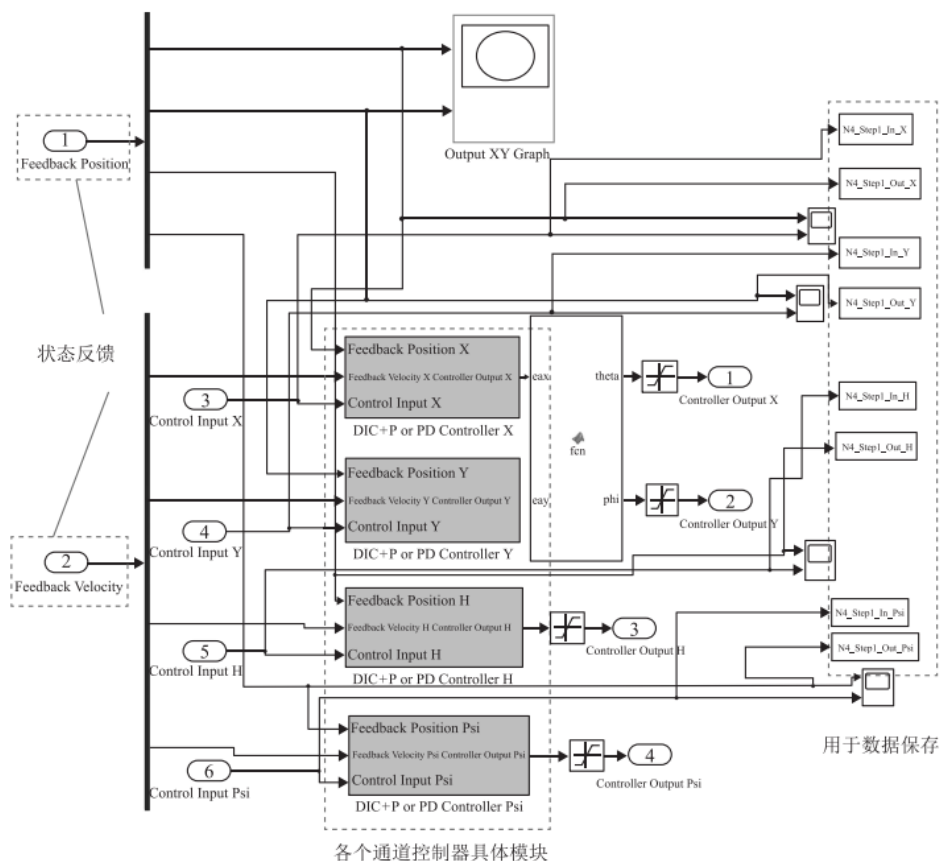


图 6.5 控制器模块内部示意图

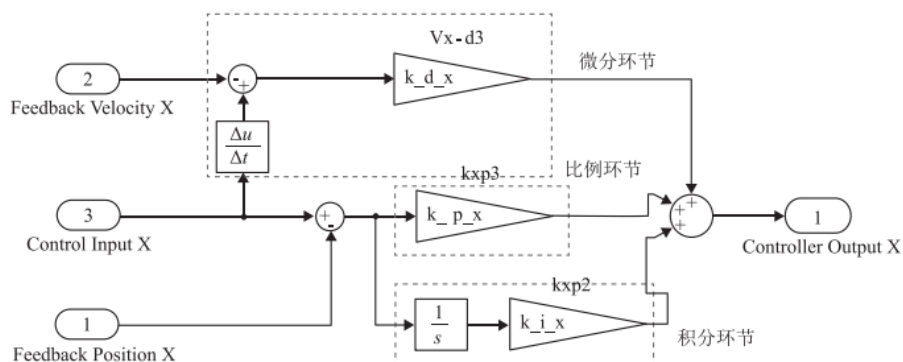


图 6.6 水平前向通道控制器具体结构

Step 4:

将“Control Input”模块的三种不同周期的圆轨迹信号接入，以水平前向通道为例,其仿真结果如图 6.8 至图 6.10 所示。为获得更好的对比效果，将不同周期输入激励下的水平两方向通道响应画到一张图中，如图 6.11 所示。从图中可以看出，随着周期的增大，多旋翼对期望曲线的跟踪效果更加理想。

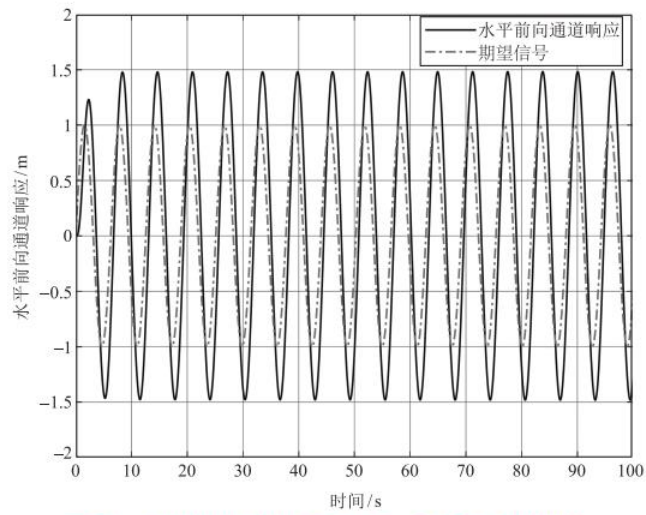


图 6.8 圆轨迹跟踪水平前向通道 $T = 5\text{s}$ 输入/输出对比图

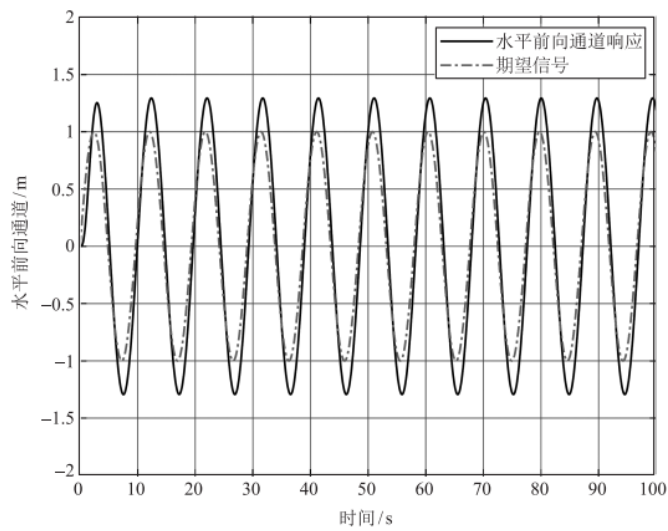


图 6.9 圆轨迹跟踪水平前向通道 $T = 10\text{s}$ 输入/输出对比图

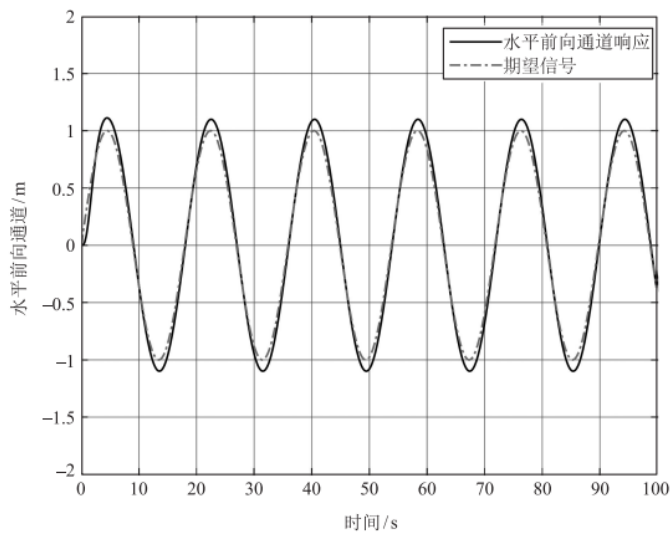


图 6.10 圆轨迹跟踪水平前向通道 $T = 20\text{s}$ 输入/输出对比图

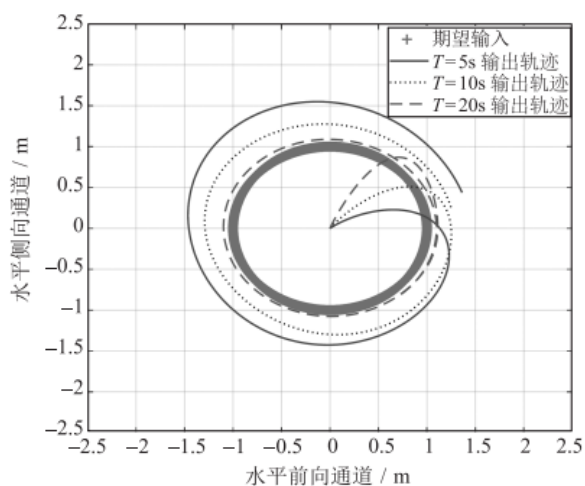


图 6.11 不同周期圆轨迹跟踪曲线对比图

Step 5:

将“Control Input”模块的三种不同周期的“8”字轨迹信号接入，以水平前向通道为例，其仿真结果如图 6.12 至图 6.14 所示。为获得更好的对比效果，将不同周期输入激励下的水平两方向通道响应画到一张图中，如图 6.15 所示。从图中可以看出，随着周期的增大，多旋翼对期望曲线的跟踪效果更加理想。

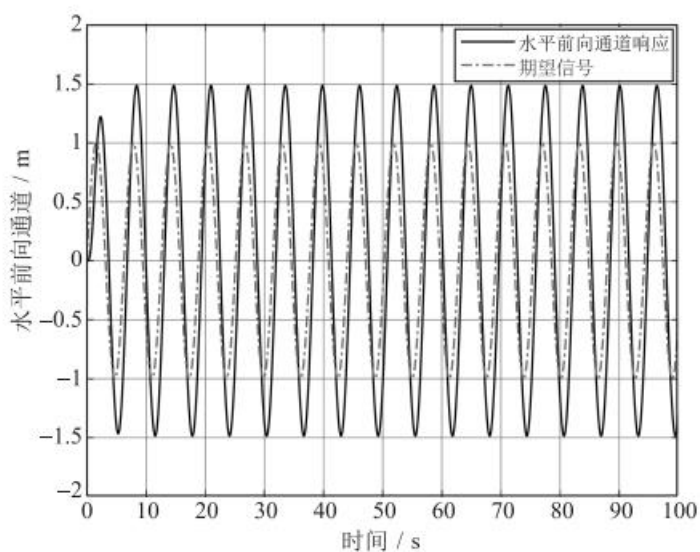


图 6.12 “8”字轨迹跟踪水平前向通道 $T = 5s$ 输入/输出对比图

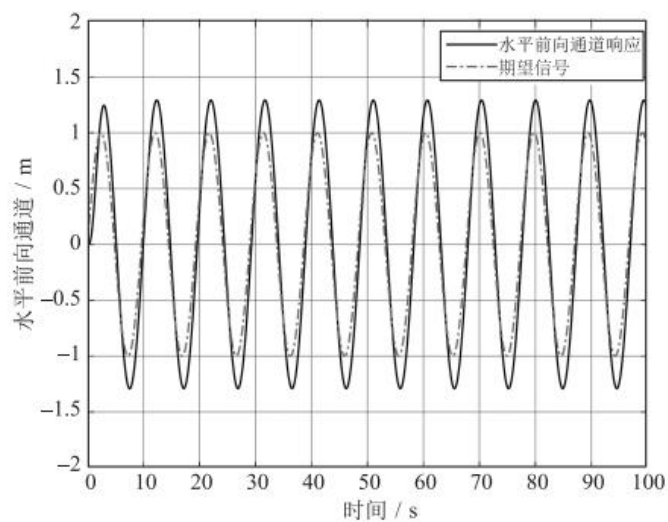


图 6.13 “8”字轨迹跟踪水平前向通道 $T = 10\text{s}$ 输入/输出对比图

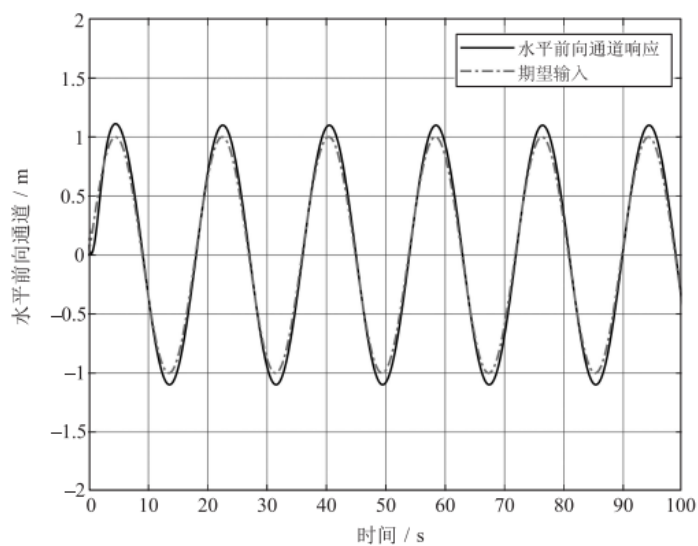


图 6.14 “8”字轨迹跟踪水平前向通道 $T = 20\text{s}$ 输入/输出对比图

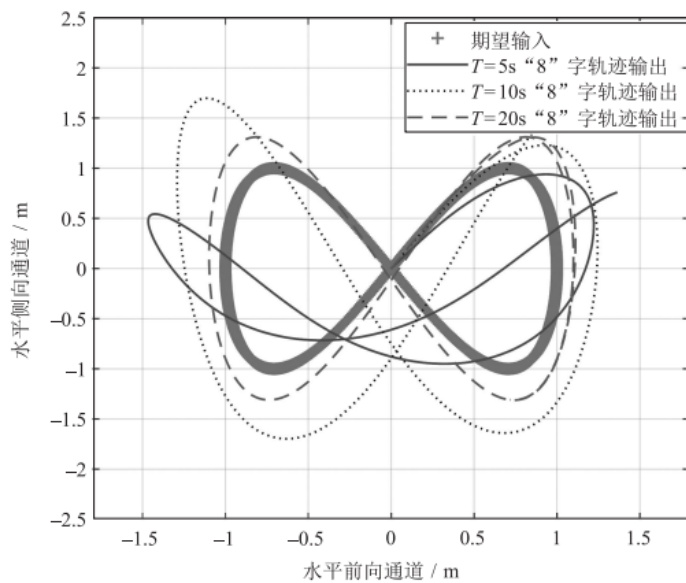


图 6.15 不同周期“8”字轨迹跟踪曲线对比图

(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。)

7. 仿真 2.0(sim2.0)实验步骤

打开 Simulink 文件“e3\3.1\sim2.0”，其中的闭环系统结构与“e3\3.1\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“e3\3.1\sim2.0”文件夹，打开“e3\3.1\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:

对比结果图 6.16 和图 6.17 可以看出，我们采用系统辨识获得的模型进行跟踪控制器设计，可以产生与基于非线性模型设计非常接近的效果。同时也可以在此 FlightGear 中查看仿真飞行效果。

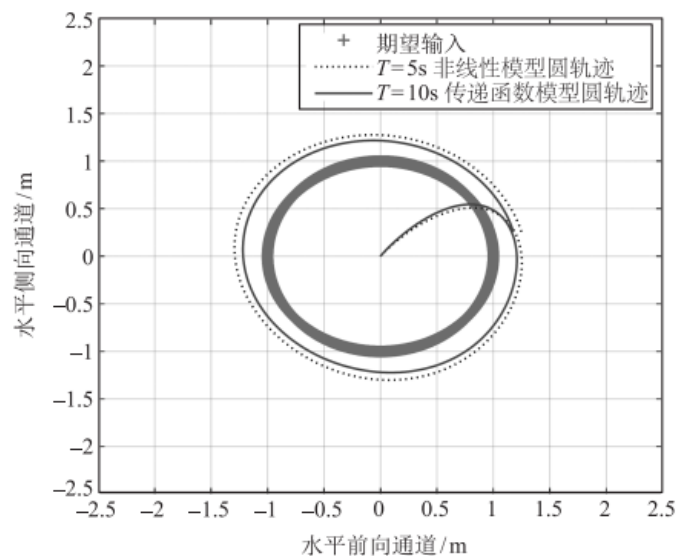


图 6.16 不同模型 $T = 10s$ 的圆轨迹对比图

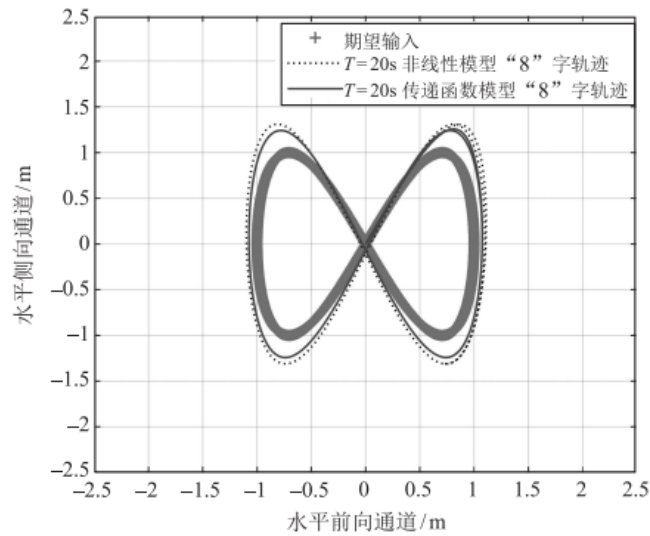


图 6.17 不同模型 $T = 20\text{s}$ 的“8”字轨迹对比图

（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. 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: ****