

1. 实验名称及目的

避障控制器设计实验 (基础实验):

给定一个障碍物和一个多旋翼仿真模型，以及第 6 章 6.2 节设计的跟踪控制器，利用人工势场法进行避障控制。假设多旋翼初始位置为(0,0)，障碍物位置为(12,0)，障碍物半径为 2m，安全半径为 3m。如图 8.3 所示，目标位置分别设定为(25,6)、(25,0)和(25,-6)，引导多旋翼避开障碍物到达目的地，并记录多旋翼避障轨迹。本实验具体目标包括以下几点：

- (1) 理解与熟悉人工势场法的理论与推导过程；
- (2) 实现单架多旋翼趋于不同目标点的避障控制；
- (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。

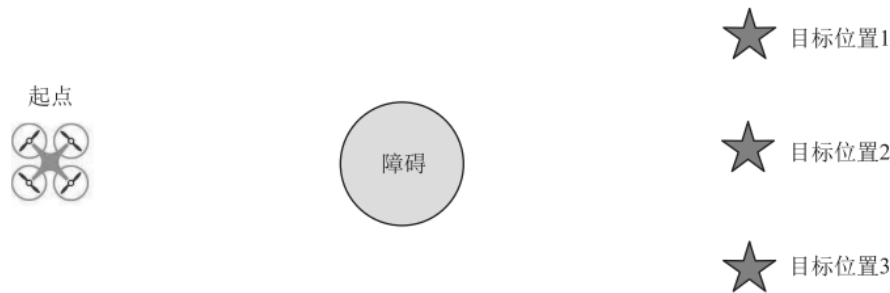


图 8.3 基础实验示意图

2. 实验原理

根据 8.1 节原理分析，需要建立如图 8.4 所示的模型。具体地，“避障控制器”模块用于生成期望位置或实时航路点，“跟踪控制器”模块用于跟踪给定位置，“多旋翼”模块是仿真 1.0 中的线性模型或者仿真 2.0 中的非线性模型。

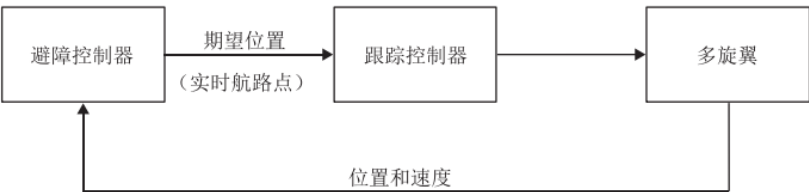


图 8.4 闭环控制原理图

整体模型如图 8.5 所示，包括控制输入模块、控制器模块和多旋翼模块，分别对应图 8.4 的避障控制器、跟踪控制器和多旋翼。

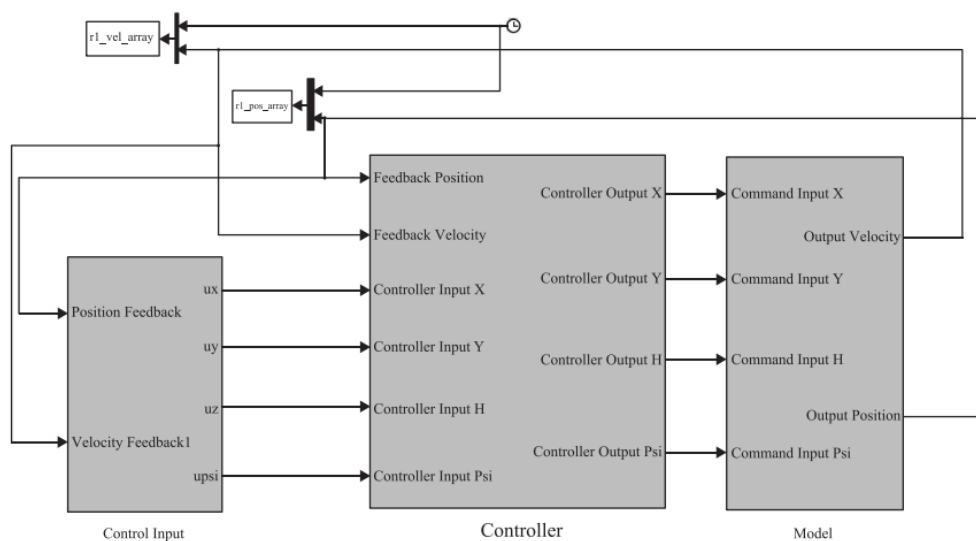


图 8.5 整体模型, Simulink 模型详见 “e5\c5.1\sim1.0\ e5_1_Avoidance_Segment.slx”

2) 控制输入模块

打开图 8.5 中的“Control Input”模块, 控制输入模块内部如图 8.6 所示。进一步打开该控制输入模块, 可以看到如图 8.7 所示的内部结构。因为本次实验只考虑二维水平方向的避障问题, 并且让机头朝一个方向不变。因此, 将高度和偏航设定为固定不变值, 再对水平前向通道和水平侧向通道进行控制。

由式 (8.12) 可知, 期望位置轨迹方程包含实际速度和位置。于是, 在图 8.7 中首先加入了水平前向通道和水平侧向通道的实时位置和速度反馈。打开图中的“X”模块 (也称为避障控制器, 用于输出期望位置轨迹), 关键代码如表 8.1 所示。该代码实现了式 (8.12), 能根据输入不断迭代更新, 实时调整水平前向通道和水平侧向通道的期望位置, 该位置作为跟踪控制器的输入。该模块还对与期望轨迹方程相关的参数进行赋值, 并给定了目标位置、障碍物位置和半径等。此外, 为了保证多旋翼到达目标位置后不会因为斥力场的存在出现较大偏差, 这里限制了斥力场的作用范围。当多旋翼与障碍物中心的距离超过一定值时, 斥力场作用失效。在失效前到完全失效这一中间过程应当尽量平滑, 因此设计了一个三阶函数用于过渡, 平滑函数关键代码见表 8.2。图 8.7 的“Cache”变量打包需要的数据并发送到工作区, 用于绘图显示 (见“e5_plot.m”文件)。

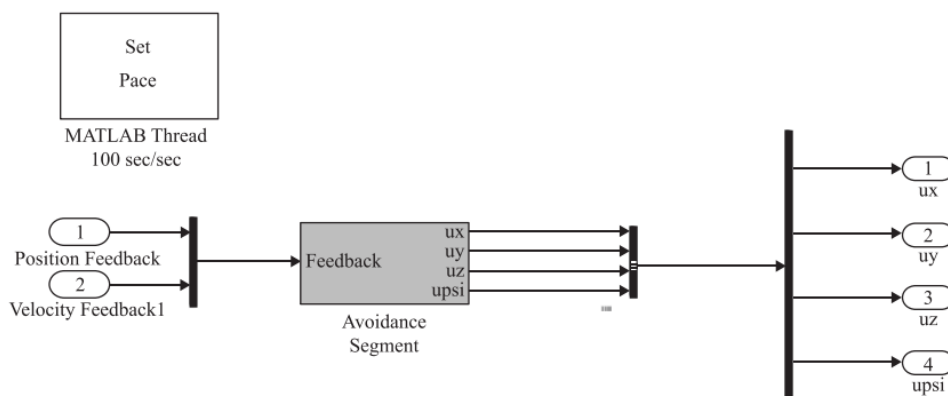


图 8.6 控制输入模块

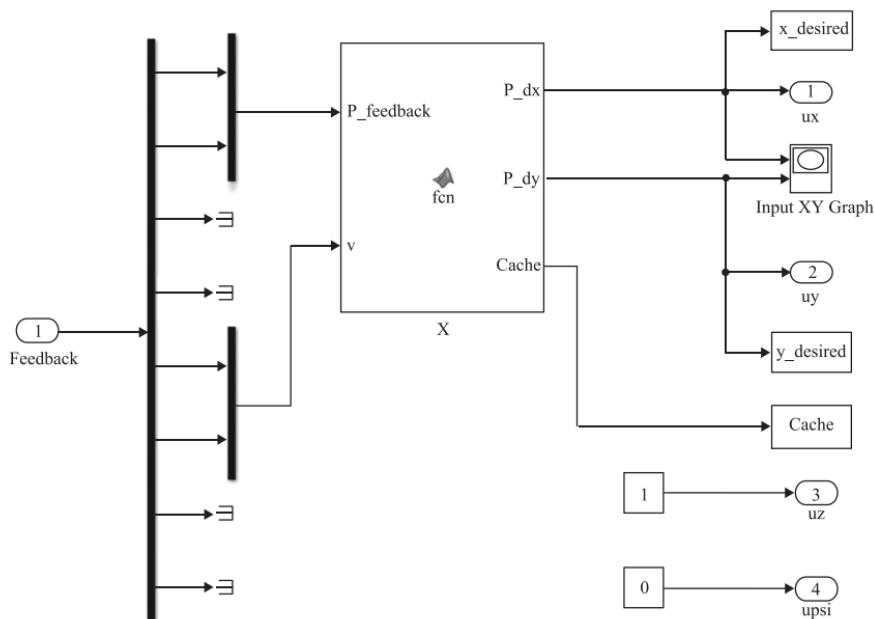


图 8.7 各通道控制输入

表 8.1 路径生成关键代码

```

1 temp = satgd(-a*ksi_wp+b*ksi_0,a0);
2 P_d = P_feedback+ temp;
3 P_dx=P_d(1);
4 P_dy=P_d(2);

```

表 8.2 平滑函数关键代码

```

1 % Smooth transition curve
2 A=-2*d0/(d1-d2)^3;
3 B=-3/2*(d1+d2)*A;
4 C=-3*A*d1^2-2*B*d1;
5 D=d0-A*d1^3-B*d1^2-C*d1;
6 a=k1;
7 % Limit the range of repulsion field
8 if norm(ksi_0)>=d2
9     b=0;
10 elseif norm(ksi_0)<=d1
11     b=k2/((norm(ksi_0)-r_0)^2+0.000001)/(norm(ksi_0)+0.000001);
12 else
13     q=norm(ksi_0);
14     b=A*q.^3+B*q.^2+C*q+D;
15 end

```

3) 控制器模块

该模块也称为跟踪控制器，用于跟踪避障控制器的输出。根据实验原理部分的分析可知，式 (8.3) 能解决避障问题，并且可以写成如式 (8.11) 所示的 PD 控制器形式。打开图 8.5 的“Controller”模块，内部结构如图 8.8 所示。打开其中的一个控制器，水平前向通道控制器如图 8.9 所示，该控制器输入为位置反馈和速度反馈，采用的控制器形式与式 (8.11) 一致。相关的变量已经在仿真前运行“startSimulation.m”和“e5_1_Avoidance_Code.m”文件进行了初始化。

4) 多旋翼模块

仿真 1.0 使用的多旋翼是各通道的传递函数模型，仿真 2.0 使用的是非线性模型。

3. 实验效果

通过示波器显示出仿真模型水平通道期望位置与实际位置输出曲线、不同目标位置水平通道期望位置与实际位置输出曲线、不同多旋翼模型期望位置轨迹对比。

4. 文件目录

文件夹/文件名称		说明
Sim1.0	e5_1_Avoidance_Code.m	控制器参数文件
	e5_plot.m	绘图文件
	e5_1_Avoidance_Segment_2017b.slx	多旋翼避障控制器 simulink 仿真 1.0 文件
	startSimulation.m	初始化参数文件
	SaveData.m	保存文件
sim1.0_vs_sim2.0	e5_compare_plot.m	绘图文件
	LoadData.m	上传日志文件
sim2.0	e5_1_TF_Avoidance_code.m	控制器参数文件
	e5_plot.m	绘图文件
	e5_1_TF_Avoidance_Segment_2017b.slx	多旋翼避障控制器 simulink 仿真 2.0 文件
	startSimulation.m	初始化参数文件
	SaveData.m	保存文件

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:

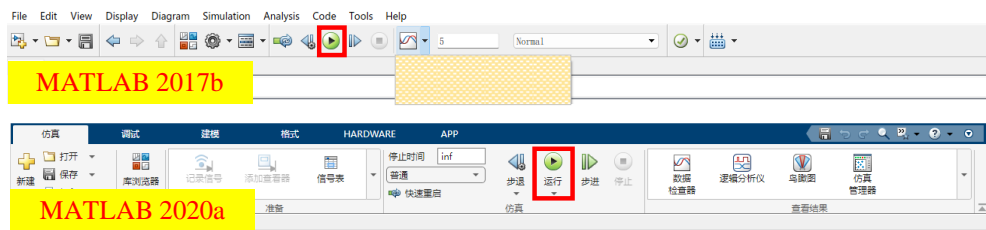
学习本书第 2 章的内容，对于 simulink 模型有一个初步的了解。

Step 2:

打开本章所附带文件夹中的“e5\5.1\sim1.0”文件夹，打开“e5\5.1\sim1.0\ startSimulation.m”文件，并单击“运行”按钮，初始化参数。

Step 3:

打开“e5\5.1\sim1.0\5_1_TF_Avoidance_Segment_2017b.slx”模型文件，将看到多旋翼避障 Simulink 仿真平台，如图 8.8 所示。



Step 4:

在仿真之前，打开图 8.7 中的“X”模块，根据实验目标依次修改目标位置变量“P_wp”的值为“[25;6]”，“[25;0]”和“[25;-6]”，然后运行 Simulink 文件进行仿真。每次仿真结束后打开并运行“e5_plot.m”文件，可以绘制期望位置轨迹和实际位置轨迹。若想改变多旋翼的初始位置，需要修改“e5_1_Avoidance_Code.m”文件内的初始位置变量“P0_x”和“P0_y”，然后运行该文件进行 Simulink 仿真。注意，对于仿真 2.0 需要打开“startSimulation.m”文件，修改表 8.3 中的初始位置变量。

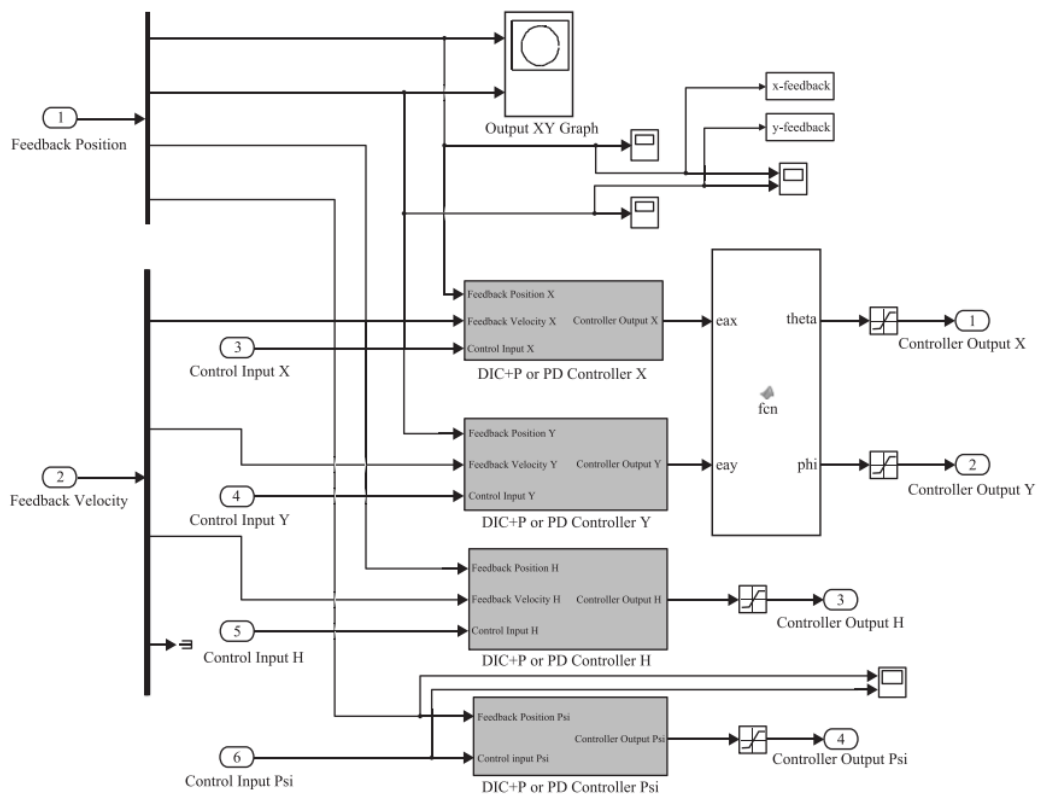


图 8.8 各通道控制器

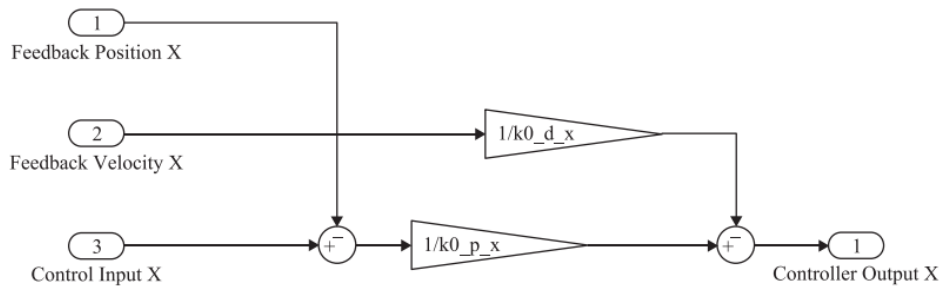


图 8.9 水平前向通道控制器

表 8.3 仿真 2.0 修改初始位置

```

1 %多旋翼初始状态
2 ModelInit.PosE=[0,0,0]; %初始位置 (单位: m)
3 ModelInit.VelB=[0,0,0]; %初始速度 (单位: m/s)
4 ModelInit.AngEuler=[0,0,0]; %初始角度 (单位: rad)
5 ModelInit.RateB=[0,0,0]; %初始角速度 (单位: rad/s)
6 ModelInit.RPM=[0 0 0]; %电机初始转速 (单位: rad/s)

```

Step 5:

Simulink 仿真结束后，可以打开并运行“e5_plot.m”文件，绘制期望位置 and 实际位置曲线图。曲线以水平前向通道位置值为横坐标，以水平侧向通道位置值为纵坐标，绘制结果如图 8.10 所示。图中包含起点位置、目标位置、障碍物信息、期望位置轨迹与实际位置轨迹。

此时， $a_0 = 1$ ， $k_1 = 0.5$ ， $k_2 = 10$ 。从图 8.10 可以看出，自初始位置开始，多旋翼的期望位置轨迹与实际位置轨迹十分吻合，并且成功避开障碍物到达目标位置，可以认为该避障算法是可行的。运行文件“e5_plot.m”后，无须关闭生成的 Figure 图。改变不同目标位置进行仿真，再次运行文件“e5_plot.m”，可以将得到的曲线绘制在同一张图，最后得到的结果如图 8.11 所示。从图中可以看出：当起点位置、障碍物中心以及目标位置三点不共线时，多旋翼可以绕过障碍物准确到达目标位置；当三点共线时，会出现死锁情况导致无法到达目标位置，后续的设计实验将对此问题进行详细解释。

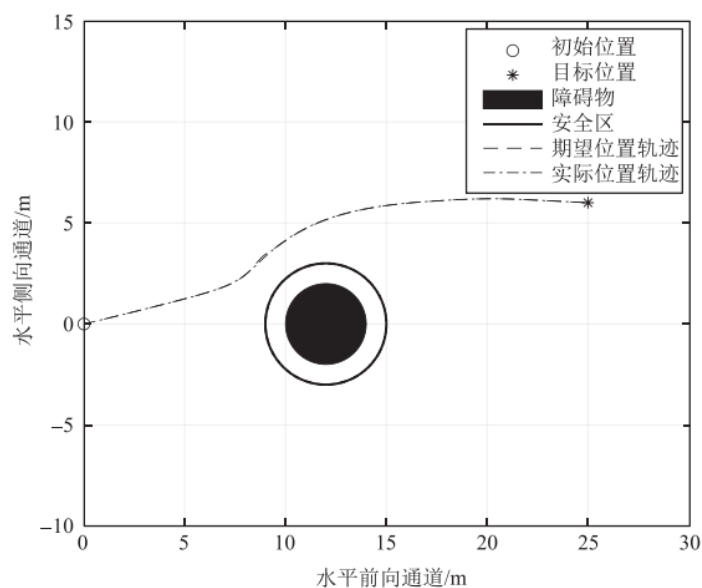


图 8.10 水平通道期望位置与实际位置输出曲线

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。

Step 1:

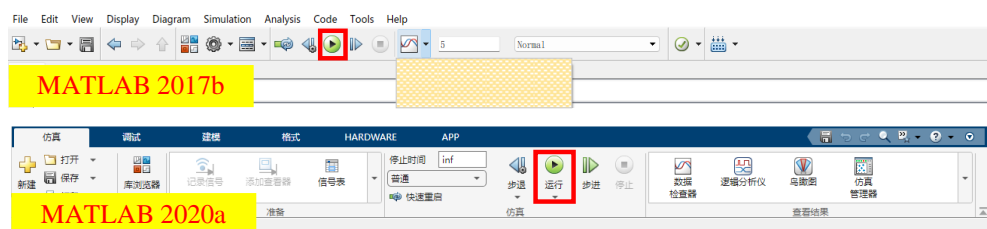
打开命名为“e5\e5.1\sim2.0”的文件夹，其中的文件与上面的“e5\e5.1\sim1.0”文件夹相同，而区别在于文件“e5\e5.1\sim2.0”中的模型为非线性模型。

Step 2:

打开本章所附带文件夹中的“e5\e5.1\sim2.0”文件夹，打开“e5\e5.1\sim2.0\e5_1_TF_Avoidance_code.m”文件以及“e5\e5.1\sim2.0\startSimulation.m”文件，并单击“运行”按钮，初始化参数。

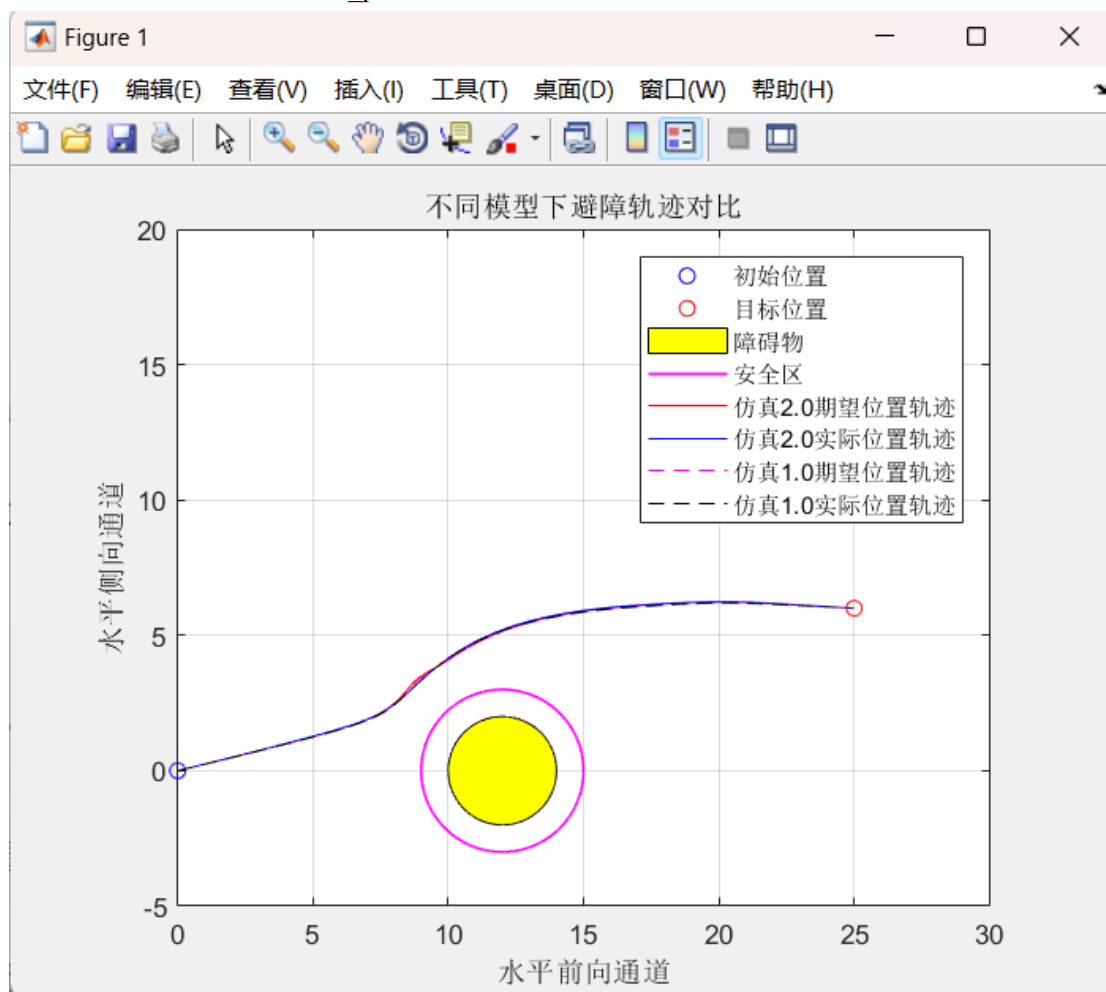
Step 3:

打开“e4\e4.1\sim1.0\e5_1_TF_Avoidance_Segment_2017b.slx”模型文件，将看到多旋翼避障控制器 Simulink 仿真平台，如图 8.7 所示。



Step 4:

打开“e5\5.2\sim2.0\e5_plot.m”文件，并单击“运行”按钮，开始画图。

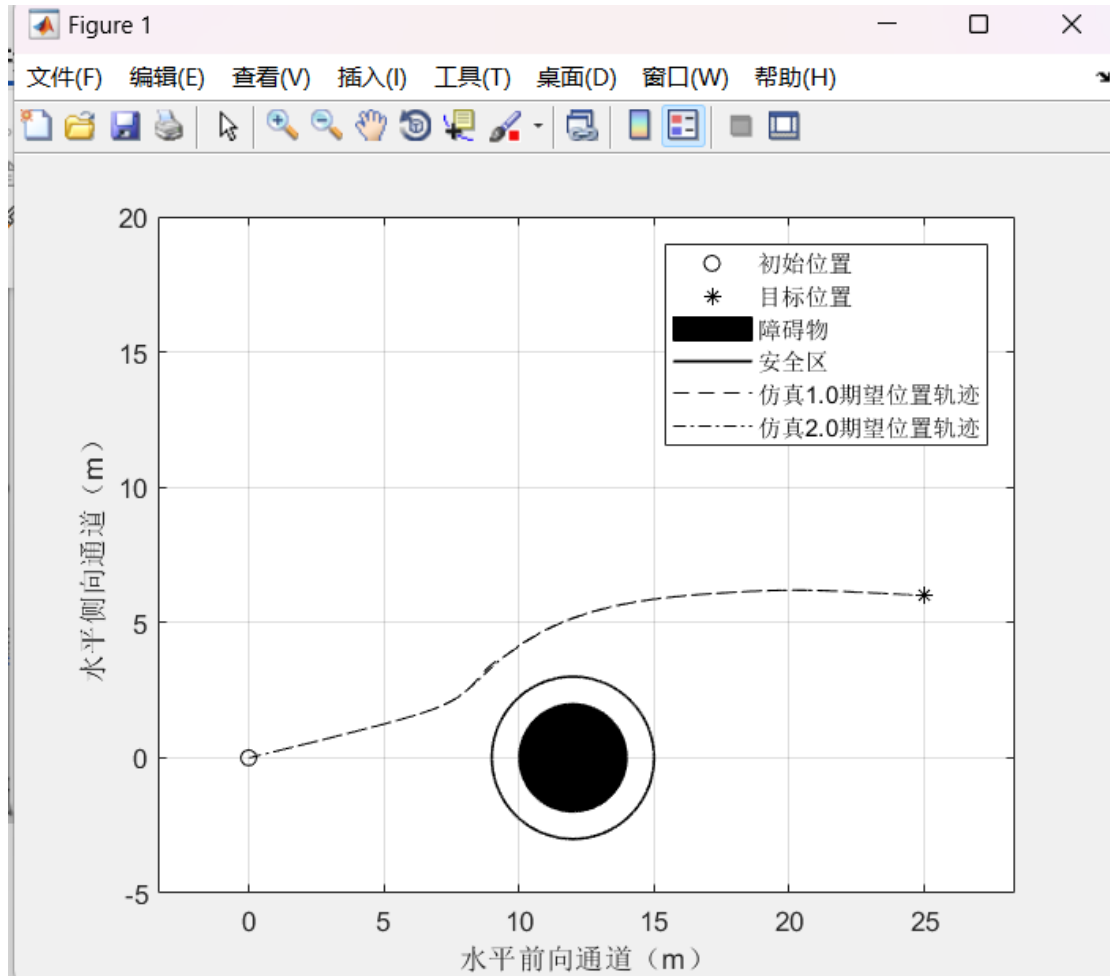


Step 5:

打开“e5\5.2\ sim1.0_vs_sim2.0\ LoadData.m”文件，并单击“运行”按钮，对前面步骤中的图像文件上传。

Step 6:

打开“e5\5.2\ sim1.0_vs_sim2.0\ e5_compare_plot.m”文件，并单击“运行”按钮，开始绘图。



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: ****