
1. 实验名称及目的

1.1. 实验名称

避障控制基础实验

1.2. 实验目的

- (1) 理解与熟悉人工势场法的理论与推导过程；
- (2) 实现多旋翼的单机避障控制并分析各个参数对避障控制的作用；
- (3) 使用相同的控制器进行仿真 2.0 实验，对比两种模型的仿真结果。

在给定的仿真模型和路径跟随控制器基础上，其中控制器如下：

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{k_0}\mathbf{v} - \frac{1}{k_0}\text{sat}_{\text{gd}}\left(a\tilde{\xi}_{\text{wp}} - b\tilde{\xi}_0, a_0\right)$$

分别修改参数 ，对比所获得的避障路径轨迹的变化，分析各个参数的作用，总结规律并得出结论。

1.3. 关键知识点

关键知识点 1：实验整体流程

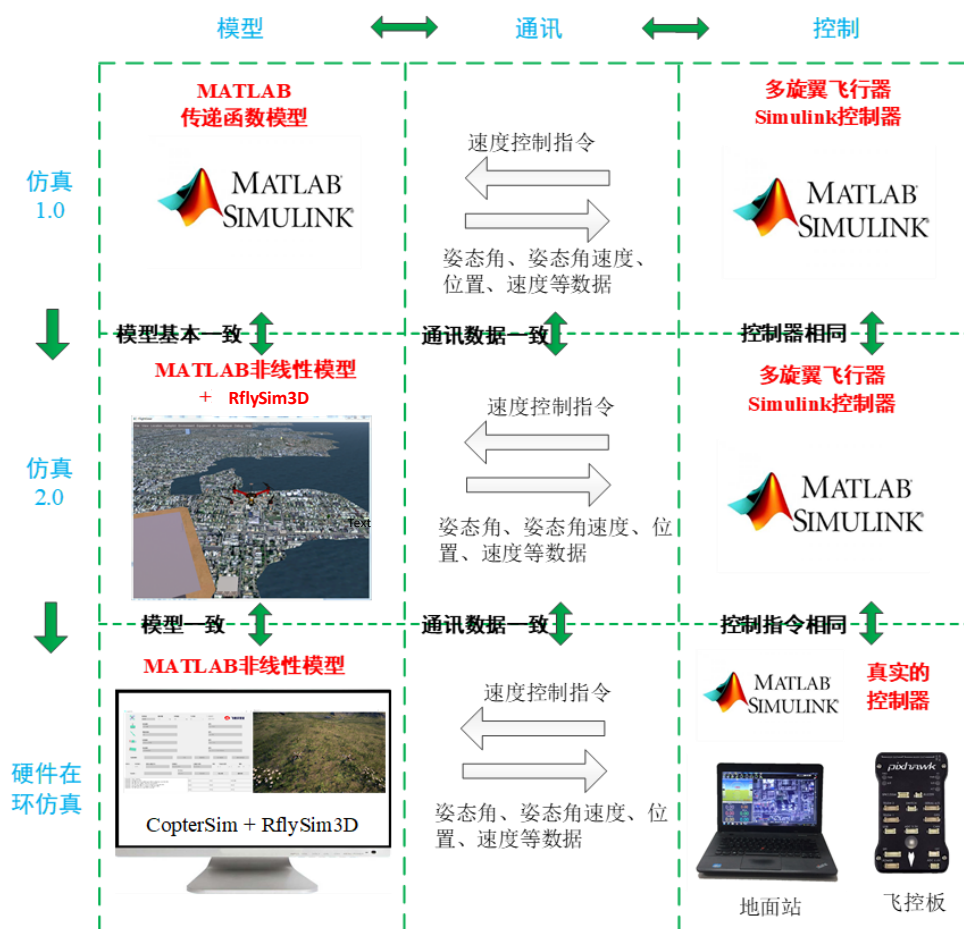


图 仿真阶段流程

针对设计所需要的仿真实验平台，如下图所示。仿真 1.0、仿真 2.0 和硬件在环仿真三者的区别在于多旋翼模型模块不一样：仿真 1.0 的多旋翼模型模块内部主要包含通过“系统辨识”实验得到的传递函数模型，即设计模型；仿真 2.0 的多旋翼模型模块内部包含一个给定的非线性模型和 RflySim3D 显示模块；硬件在环仿真的多旋翼模型模块内部包含了与 CopterSim 联合仿真的通信接口。

关键知识点 2：Simulink 模型整体框架

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。

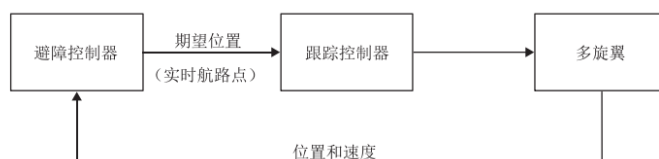
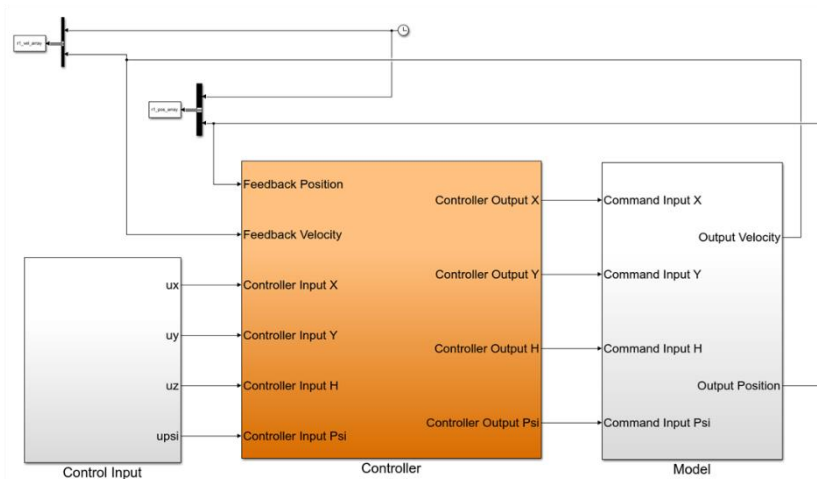


图 8.4 闭环控制原理图



期望输入模块—Control Input: 用于输入期望的飞行器位置信息；

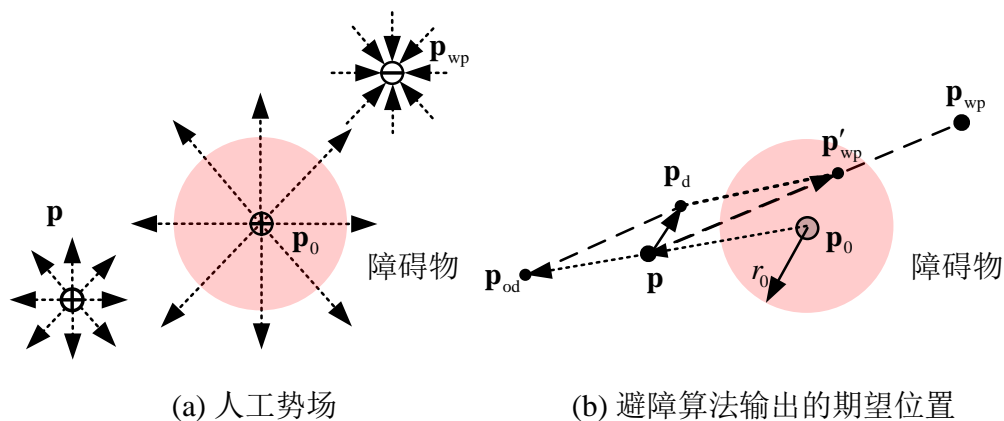
控制器模块—Controller: 用于设计控制器，实现飞行器的有效位置控制；

多旋翼模型模块—Model: 飞行器仿真模型模块，用于接收控制器输出的控制量，并输出飞行器的运动状态（这里是位置信息和速度信息；）

飞行器状态数据收集: 这里拥有两个变量——“r1_pos_array”与“r1_vel_array”，分别用于收集单次仿真过程中飞行器的位置信息与速度反馈，并以矩阵的形式保存在 MATLAB 工作空间。矩阵的每一行信息均是以“时间，水平前向通道位置/速度，水平侧向通道位置/速度，高度通道位置/速度，偏航通道角度/偏航角速度”方式自左而右排列的一组值，矩阵的列按时间顺序自上而下排列。

关键知识点 3: 人工势场法和避障

给目标航路点和直线路径分配吸引势场，给障碍物分配排斥势场，使三维飞行区域处于目标航路点、直线路径和障碍物的叠加势场中，飞行在该区域中的多旋翼将会被目标航路点和直线路径同时吸引，而被障碍物排斥，使得多旋翼在飞向目标航路点的同时沿着直线飞行，且能避开障碍物。



关键知识点 4：模型模块详解

“Control Input”期望输入模块（“避障器”模块）

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。

期望位置轨迹方程包含实际速度和位置，因此需要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。关键代码如下图所示，该代码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。

整体结构

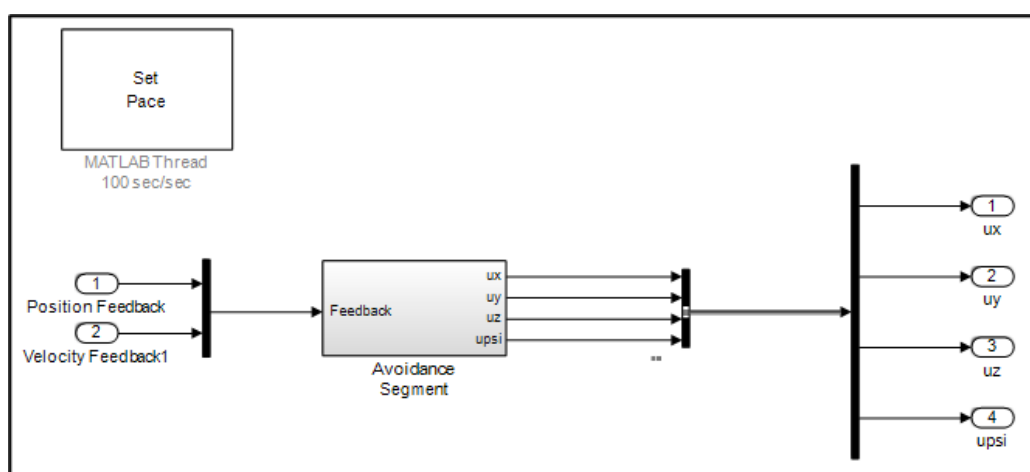


图 1 期望输入模块

期望输入的具体结构

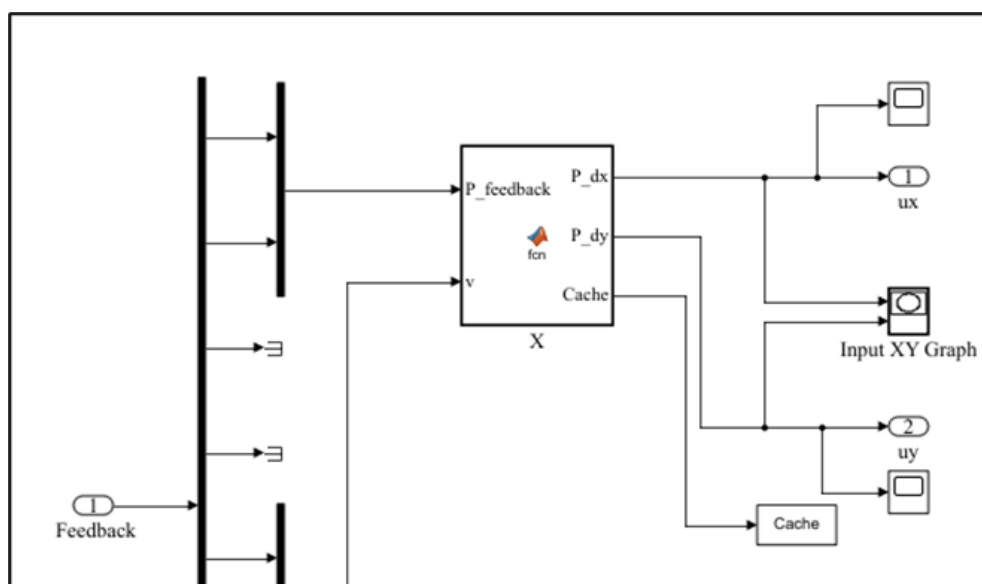


图 2 期望输入

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
```

“Controller”控制器模块（“跟踪器”模块）

该模块也称跟踪控制器，用于跟踪前面跟随控制器的输出，PD 控制器能解决避障问题。

整体结构

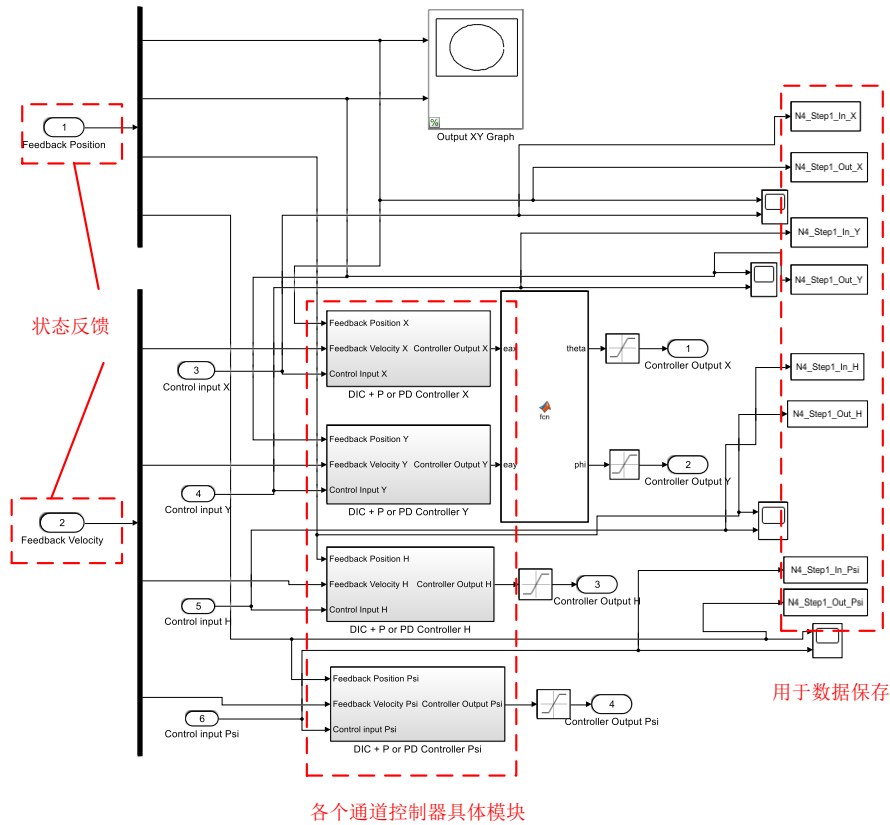


图 3 控制器模块

控制器具体结构

四个通道的 PID 控制器具体结构基本一致，以水平前向通道控制器为例

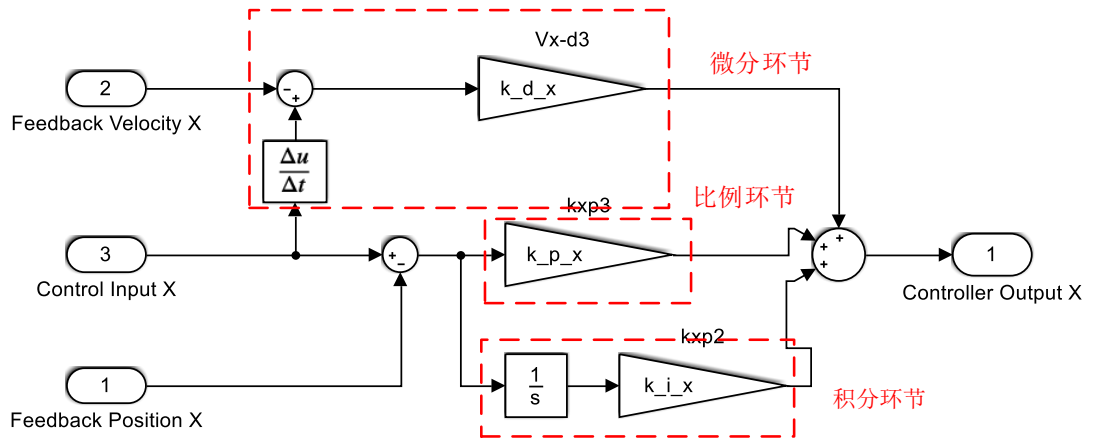


图 4 水平前向通道的 PID 控制器具体结构

三通道模型

	控制器	期望
高度通道	$u_T(t) = -k_{p_z p}(p_{z_e}(t) - p_{z_{ed}}(t)) - k_{p_z d}(\dot{p}_{z_e}(t) - \dot{p}_{z_{ed}}(t)) - k_{p_z i} \int_0^t (p_{z_e}(\tau) - p_{z_{ed}}(\tau)) d\tau$	$p_{z_{ed}} \in \mathbb{R}$

偏航通道	$u_{\omega_z}(t) = -k_{\psi p}(\psi(t) - \psi_d(t)) - k_{\psi d}(\omega_z(t) - \dot{\psi}_d(t)) - k_{\psi i} \int_0^t (\psi(\tau) - \psi_d(\tau)) d\tau$	$\psi_d \in \mathbb{R}$
水平通道	$\mathbf{u}_h(t) = -\mathbf{K}_{hp} \mathbf{R}_{\psi}^T (\mathbf{p}_h(t) - \mathbf{p}_{hd}(t)) - \mathbf{K}_{hd} \mathbf{R}_{\psi}^T (\dot{\mathbf{p}}_h(t) - \dot{\mathbf{p}}_{hd}(t)) - \mathbf{K}_{hi} \int_0^t \mathbf{R}_{\psi}^T (\mathbf{p}_h(\tau) - \mathbf{p}_{hd}(\tau)) d\tau$	$\mathbf{p}_{hd} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$

多旋翼模型模块

Sim1.0 (系统辨识得到的各通道传递函数模型)

Sim2.0 (使用辨识参数的多旋翼机理模型)

2. 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。

3. 文件目录

例程目录: [\[安装目录\]\RflySimAPIs\6.RflySimExtCtrl\1.BasicExps\7_MutUAVRemoteCtrl\5.Avoidance_Segment\5.2\](#)

文件夹/文件名称		说明
Sim1.0	e5_2_Avoidance_code.m	控制器参数文件
	e5_plot.m	绘图文件
	e5_2_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
sim2.0	e5_2_TF_Avoidance_code.m	控制器参数文件
	e5_plot.m	绘图文件
	e5_2_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
	e5_compare_plot.m	比较两次结果绘图文件

4. 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 工具链		

3	MATLAB 2022b 及以上版本		
---	--------------------	--	--

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

5. 实验步骤

5.1. 必做实验：基于多旋翼线性模型的数值仿真 1.0(sim1.0)

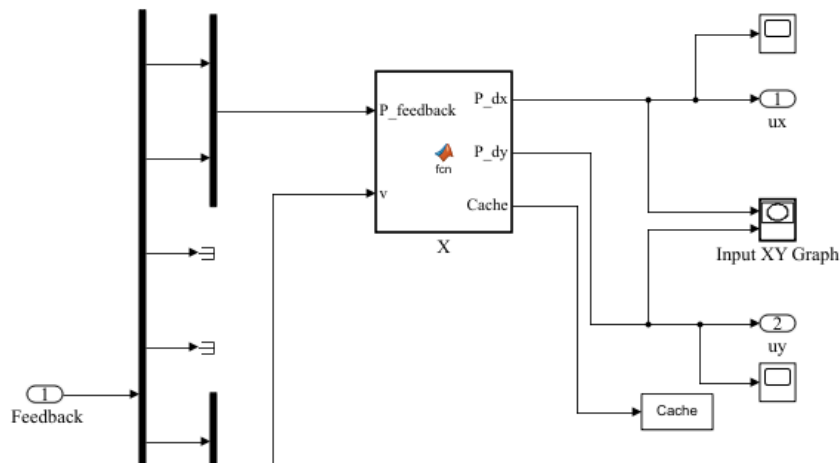
这里我们给出一个设计好的例子，见文件“e5\5.2\sim1.0\5_2_Avoidance_Segment.slx”。

Step 1: 参数初始化

用 MATLAB 打开文件夹“e5\5.2\sim1.0”，运行“startSimulation.m”文件对参数进行初始化，然后打开“5_2_Avoidance_Segment.slx”文件。

Step 2: 期望控制输入（目标位置）

打开图中的“X”模块，分别修改 a_0, k_1, k_2 的值，进行仿真。



Step 3: 实验数据及分析

1) 参数 a_0 的改变

选取如下参数进行实验，分别为 $k_1 = 0.5, k_2 = 10$ ，而 $a_0 = 0.6, 0.8, 1$ ，因而有如下结果。

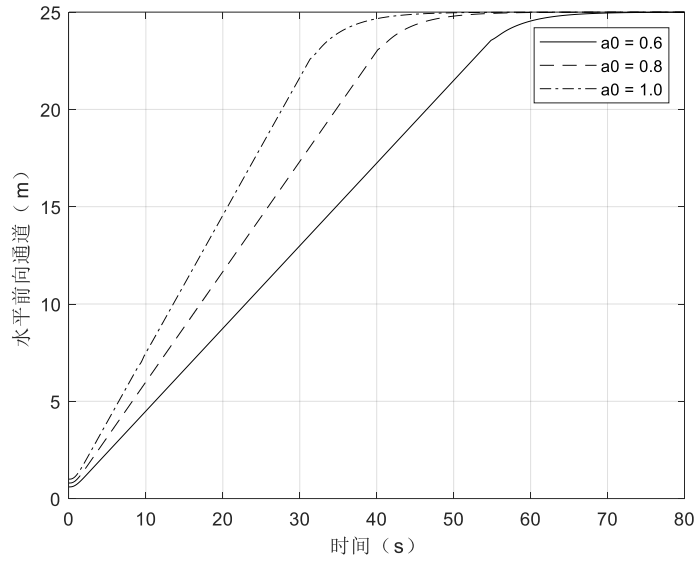


图 5 不同 a_0 下水平前向通道位置响应曲线

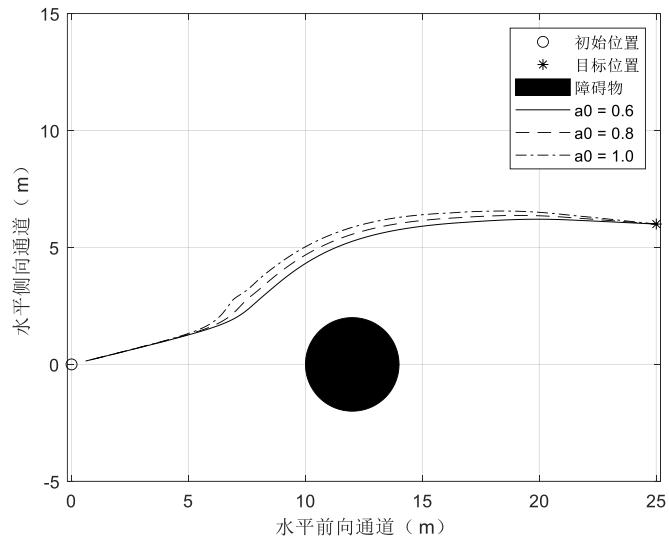
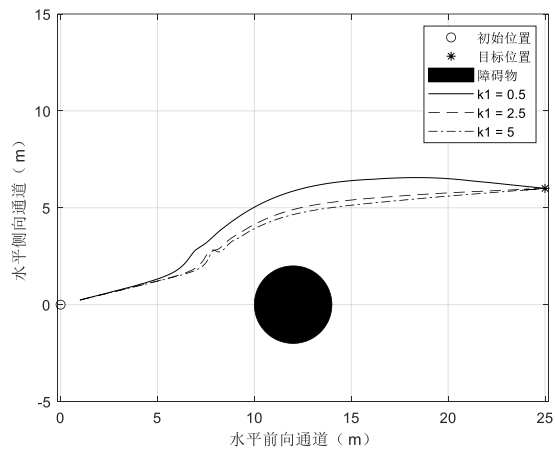
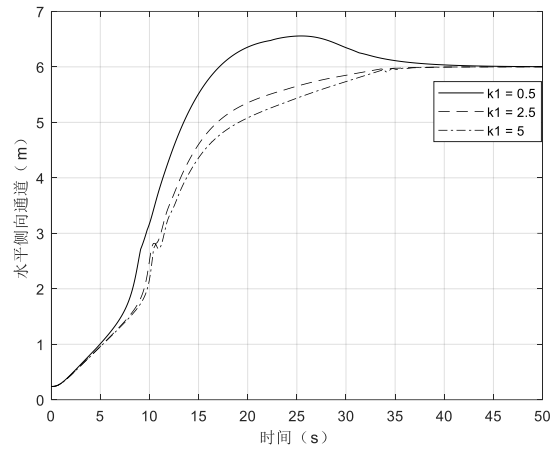


图 6 不同 a_0 下水平通道位置轨迹对比

可以看出，随着饱和上限的增大，多旋翼靠近预定轨迹的期望输入轨迹曲线愈加陡，甚至在时出现了一种类似“超调”的现象。这说明 a_0 值越大，多旋翼靠近轨迹的速度越快。

2) 参数 k_1 的改变

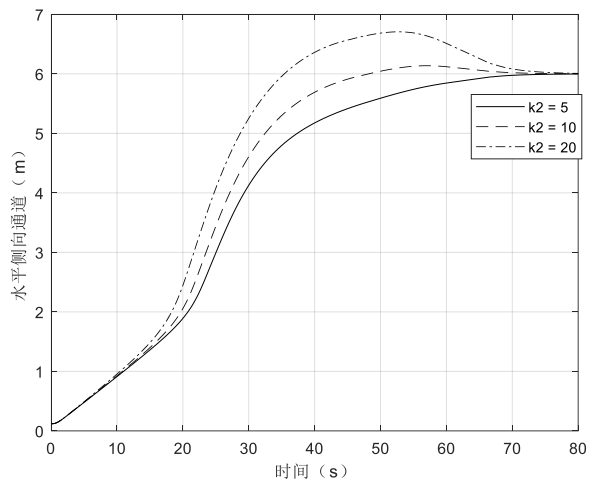
这里选取如下参数进行实验，分别为 $a_0 = 1, k_2 = 10$ ，而 $k_1 = 0.5, 2.5, 5$ ，因而有如下结果。

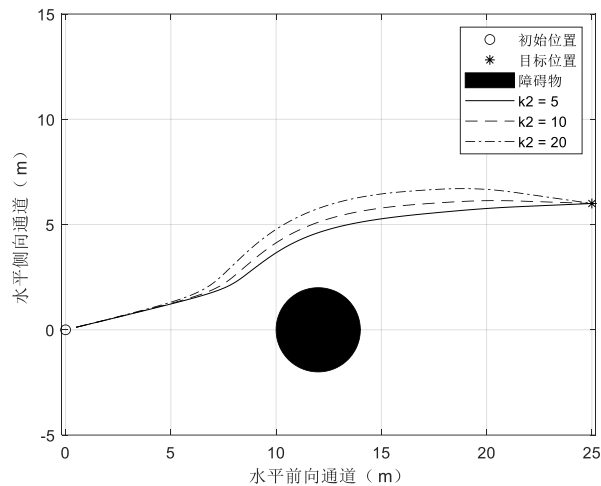


随着参数 k_1 的增大，多旋翼越晚开始避障，避障过程越靠近障碍物。

3) 参数 k_2 的改变

这里选取如下参数进行实验，分别为 $a_0 = 0.5, k_1 = 0.5$ ，而 $k_2 = 5, 10, 20$ ，因而有如下结果。





随着参数 k_2 的增大，多旋翼越早开始避障，避障过程越远离障碍物。

5.2. 必做实验：基于多旋翼六自由度模型的仿真 2.0(sim2.0)

基于设计模型，已经完成了仿真 1.0，下一步需要在非线性模型上进行验证，即仿真 2.0。

Step 1: 参数初始化

打开本章所附带文件夹中的“e5.1\sim2.0”文件夹，打开“e5.2\sim2.0\ e5_2_TF_Avoidance_code.m”文件以及“e5.2\sim2.0\startSimulation.m”文件，并单击“运行”按钮，初始化参数。

打开“e5.1\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

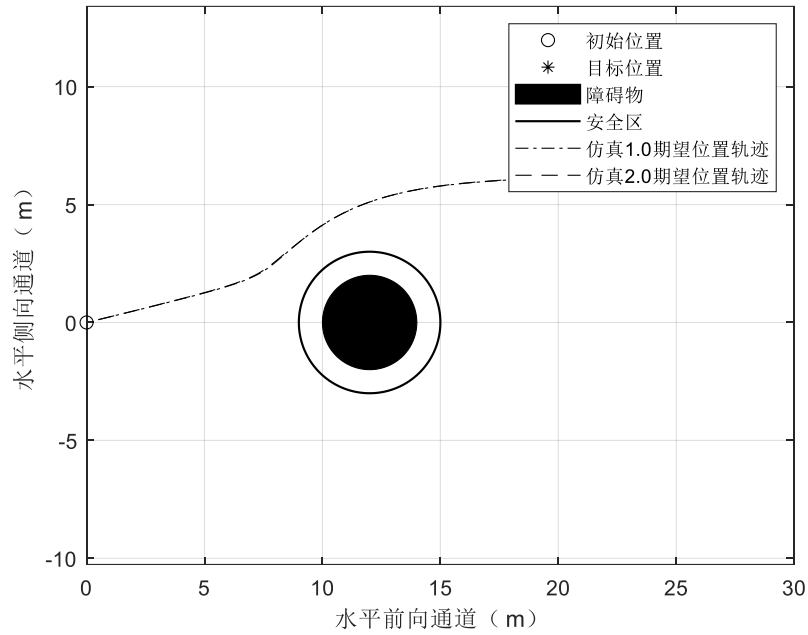
Step 2: 仿照 sim1.0 运行仿真

采用与仿真 1.0 实验完全相同的实验步骤

Step 3: 与仿真 1.0 对比避障效果

打开“e5.2\ sim2.0\ SaveData.m”文件，并单击“运行”按钮，对前面步骤中的图像文件上传。

打开“e5.2\ sim2.0\ e5_compare_plot.m”文件，并单击“运行”按钮，开始绘图。



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: