

# 多旋翼飞行器远程控制实践

## 第8章 避障控制器设计实验

全 权

qq\_buaa@buaa.edu.cn

自动化科学与电气工程学院



北京航空航天大学  
BEIHANG UNIVERSITY



可靠飞行控制研究组

RELIABLE FLIGHT CONTROL GROUP

# 大纲



1. 基本原理
2. 基础实验
3. 分析实验
4. 设计实验
5. 实飞实验
6. 本章小结

# 大纲



**1. 基本原理**

**2. 基础实验**

**3. 分析实验**

**4. 设计实验**

**5. 实飞实验**

**6. 本章小结**

# 1.基本原理

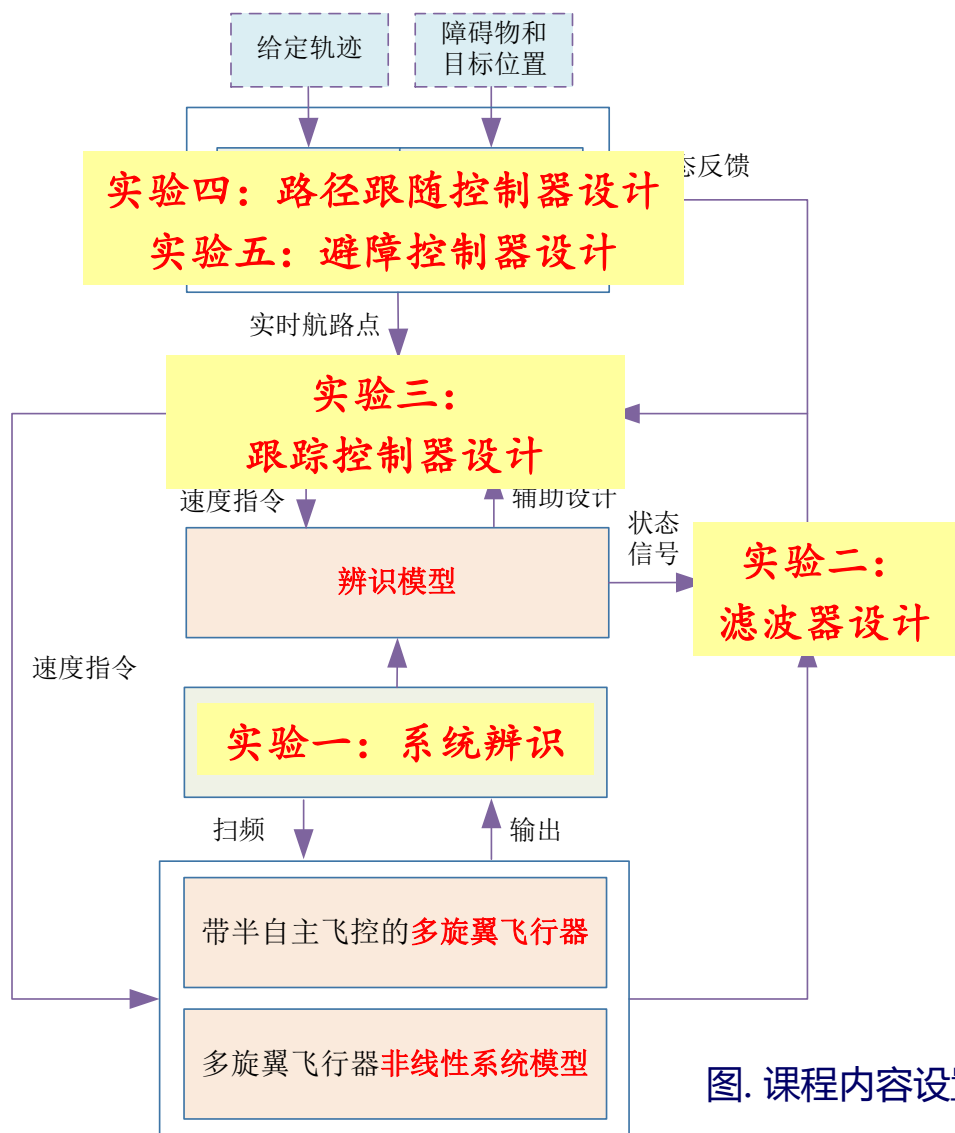


图. 课程内容设置

**可飞性：**路径能满足多旋翼运动学、动力学约束以及机动性约束

**安全性：**避开固定或者移动的障碍物



# 1.基本原理

## □ 人工势场法

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。

问题与改进：引力势函数、斥力势函数、距离计算、局部极小值问题等

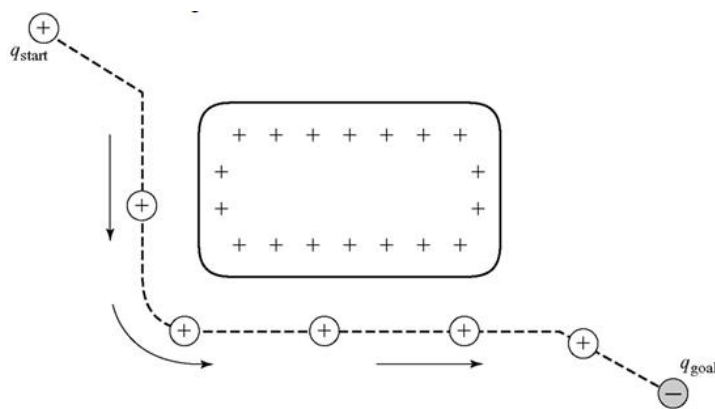


图. 电势场

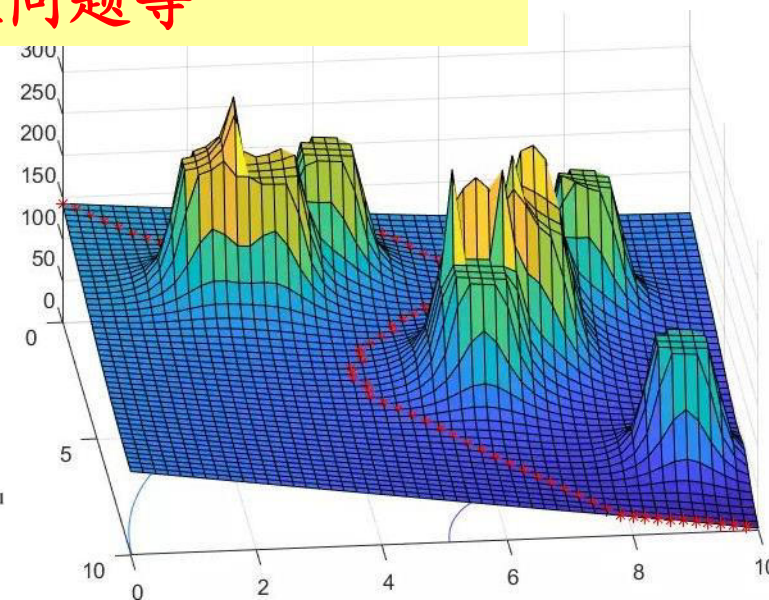


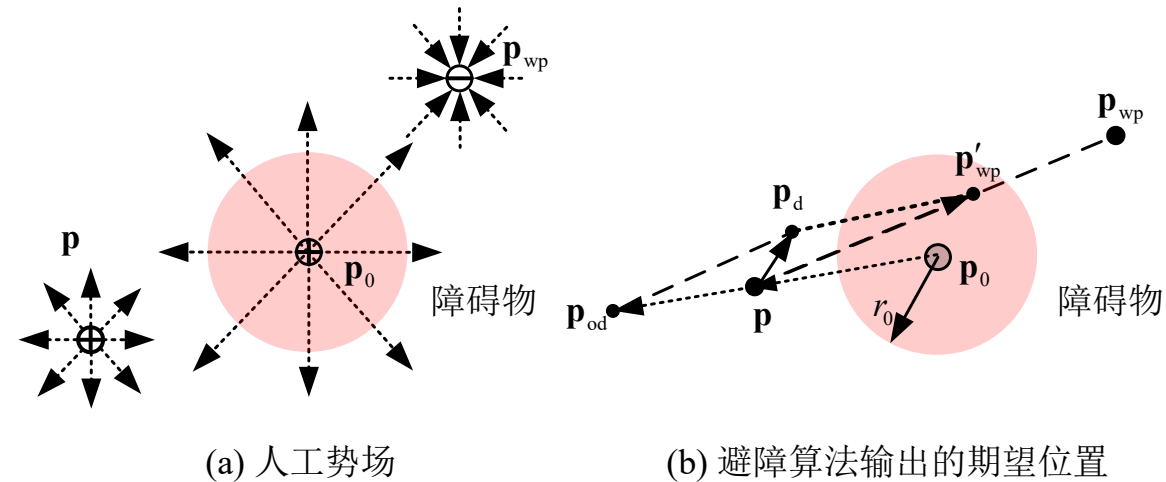
图. 重力势场

O. Khatib, "**Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots,**" Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1985, pp. 500-505, doi: 10.1109/ROBOT.1985.1087247.

# 1.基本原理

## □ 避障

### ■ 问题描述



令  $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^2$  表示多旋翼当前位置， $\mathbf{p}_{wp} \in \mathbb{R}^2$  表示目标航路点， $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^2$  表示多旋翼的速度， $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^2$  表示虚拟控制输入。根据质点模型

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{p}} &= \mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{u}\end{aligned}$$

设计虚拟控制输入  $\mathbf{u}$ ，引导多旋翼飞向目标航路点  $\mathbf{p}_{wp}$ ，同时避开位于  $\mathbf{p}_0 \in \mathbb{R}^2$  处覆盖半径为  $r_0 > 0$  的障碍物。

# 1.基本原理

## □ 假设

假设 8.1. 目标航路点和障碍物的速度满足  $\mathbf{v}_{wp} = \mathbf{v}_o = \mathbf{0}_{2 \times 1}$

假设 8.2. 多旋翼的初始位置和速度满足

$$\|\mathbf{p}(0) - \mathbf{p}_o\| - r' > 0$$

$$\|\tilde{\xi}_o(0)\| - r' > 0$$

其中

$$r' = r_o + k_0 a_0.$$

假设 8.3. 目标航路点满足

$$\frac{1}{\|(\mathbf{p}_{wp} - \mathbf{p}_o) + k_0 (\mathbf{v}_{wp} - \mathbf{v}_o)\| - r'} \approx 0.$$

- 假设 8.1 表示目标航路点和障碍物都是静态的。
- 假设 8.2 表示初始时刻多旋翼不位于障碍物的覆盖半径内，且速度很小或者是受限的。
- 根据假设 8.1 可知，假设 8.3 表示目标航路点应该距障碍物有一定距离。

# 1.基本原理

## □ 避障

1) 定义滤波位置

$$\xi \triangleq \mathbf{p} + k_0 \mathbf{v}$$

可得

$$\dot{\xi} = \bar{\mathbf{u}}$$

其中

$$\bar{\mathbf{u}} \triangleq \mathbf{v} + k_0 \mathbf{u}$$

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{v}$$

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{u}$$

2) 定义滤波误差

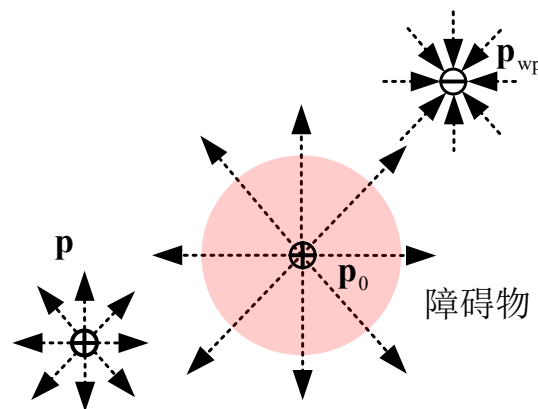
$$\tilde{\xi}_{wp} \triangleq \xi - \xi_{wp}$$

$$\tilde{\xi}_o \triangleq \xi - \xi_o$$

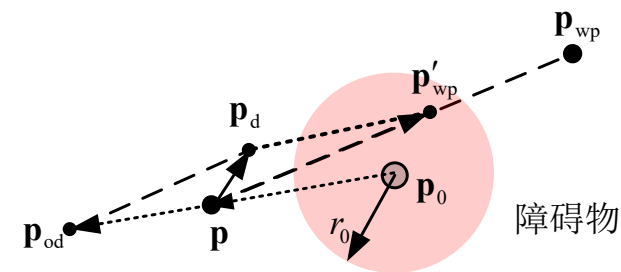
3) 设计虚拟控制输入为

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

跳转推导



(a) 人工势场



(b) 避障算法输出的期望位置

其中

$$a = k_1$$

$$b = k_2 \frac{1}{(\|\tilde{\xi}_o\| - r')^2} \frac{1}{\|\tilde{\xi}_o\|}$$

调节收敛到目标  
航路点和避开障  
碍物的快慢

4) 虚拟控制输入可以写成PD控制器的形式

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{k_0} (\mathbf{p} - \mathbf{p}_d) - \frac{1}{k_0} \mathbf{v}$$

5) 局部期望路径为

$$\mathbf{p}_d = \mathbf{p} + \text{sat}_{\text{gd}} \left( -a \tilde{\xi}_{wp} + b \tilde{\xi}_o, a_0 \right)$$

# 1.基本原理

## □ 平衡点分析

根据式

$$a(\mathbf{p} - \mathbf{p}_{wp}) + b(\mathbf{p} - \mathbf{p}_o) = \mathbf{0}_{2 \times 1}$$

平衡点位于障碍物和目标航路点的直线上

根据系统在  $\mathbf{p}_{wp}$  附近的误差动态方程

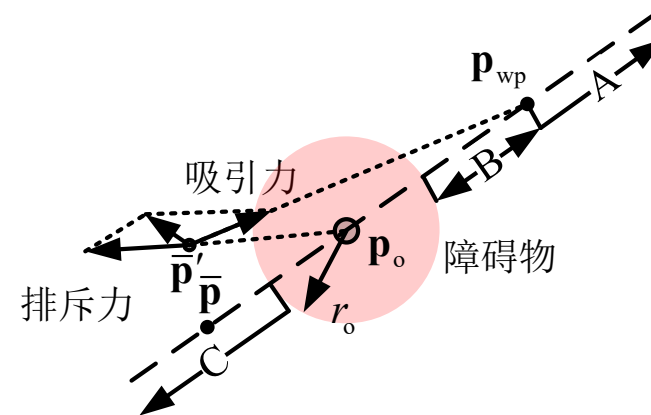
$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{p}}} &= \mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} &= -\frac{1}{k_0}\mathbf{v} - \frac{k_1}{k_0}\tilde{\mathbf{p}} \end{aligned}$$

平衡点  $\bar{\mathbf{p}}$  是依概率1不稳定的

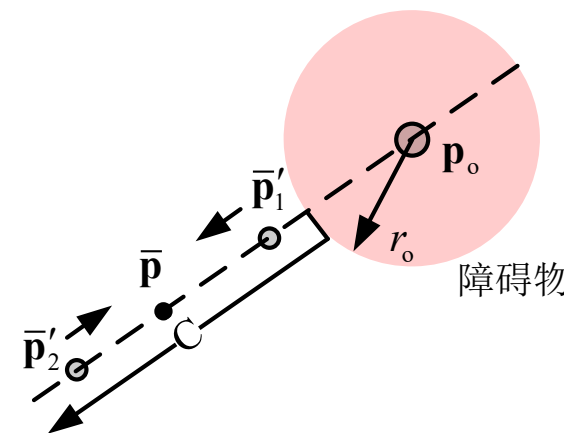
平衡点  $\mathbf{p}_{wp}$  是依概率1全局渐进稳定的

□ 情形一：多旋翼不在射线C上运动

□ 情形二：多旋翼在射线C上运动



(a) 多旋翼不在“射线C”上运动



(b) 多旋翼在“射线C”上运动

# 1.基本原理

## □ 平滑函数设计

### ■ 目的

- 需要**限制斥力场**的作用范围
- 失效过程应**尽量平滑**

### ■ 虚拟控制输入

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

$$a = k_1$$

$$b = k_2 \frac{1}{\left(\|\tilde{\xi}_{\text{o}}\| - r'\right)^2} \frac{1}{\|\tilde{\xi}_{\text{o}}\|}$$

### ■ 平滑函数一般形式

$$\sigma(x, d_1, d_2) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \leq d_1 \\ Ax^3 + Bx^2 + Cx + D & \text{if } d_1 \leq x \leq d_2 \\ 0 & \text{if } d_2 \leq x \end{cases}$$

其中：

$$A = \frac{-2}{(d_1 - d_2)^3}$$

$$B = \frac{3(d_1 + d_2)}{(d_1 - d_2)^3}$$

$$C = \frac{-6d_1d_2}{(d_1 - d_2)^3}$$

$$D = \frac{d_2^2(3d_1 - d_2)}{(d_1 - d_2)^3}$$

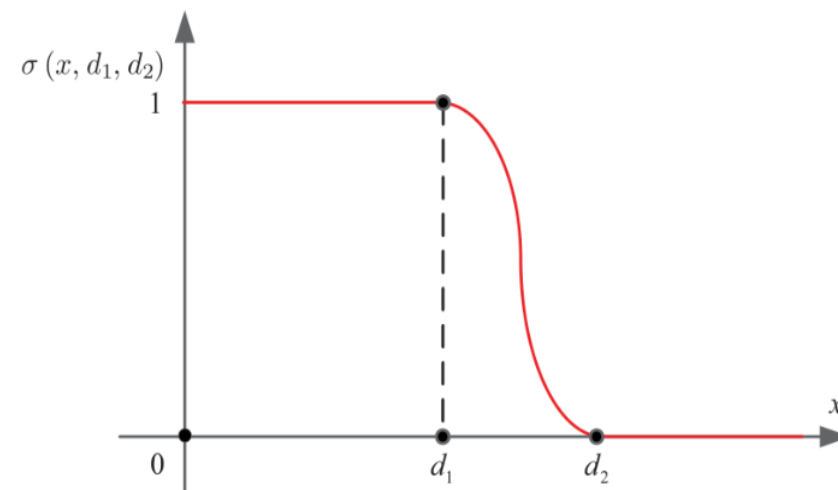


图. 平滑函数

# 1.基本原理

## □ 推导

(1) 滤波误差的一阶导数为

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\xi}}_{wp} &= \bar{\mathbf{u}} \\ \dot{\tilde{\xi}}_o &= \bar{\mathbf{u}}.\end{aligned}$$

(2) 设计如下类李雅普诺夫函数

$$V_2 = \underbrace{\frac{k_1}{2} \tilde{\xi}_{wp}^T \tilde{\xi}_{wp}}_{\text{靠近目标航路点}} + \underbrace{k_2 \frac{1}{\|\tilde{\xi}_o\| - r'}}_{\text{避开障碍物}}$$

求导

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= k_1 \tilde{\xi}_{wp}^T \bar{\mathbf{u}} - k_2 \frac{1}{(\|\tilde{\xi}_o\| - r')^2} \frac{\tilde{\xi}_o^T}{\|\tilde{\xi}_o\|} \bar{\mathbf{u}} \\ &= \left( a \tilde{\xi}_{wp} - b \tilde{\xi}_o \right)^T \bar{\mathbf{u}}.\end{aligned}$$

(3) 虚拟控制输入满足

$$\bar{\mathbf{u}} = -\text{sat}_{\text{gd}} \left( a \tilde{\xi}_{wp} - b \tilde{\xi}_o, a_0 \right)$$

保证

$$\dot{V}_2 = - \left( a \tilde{\xi}_{wp} - b \tilde{\xi}_o \right)^T \text{sat}_{\text{gd}} \left( a \tilde{\xi}_{wp} - b \tilde{\xi}_o, a_0 \right) \leq 0$$

(4) 结论

a. 避开障碍物

$$\|\tilde{\mathbf{p}}_o\| > r_o.$$

b. 抵达航路点且不会陷入除 $\mathbf{v}=0$ 以外的平衡点

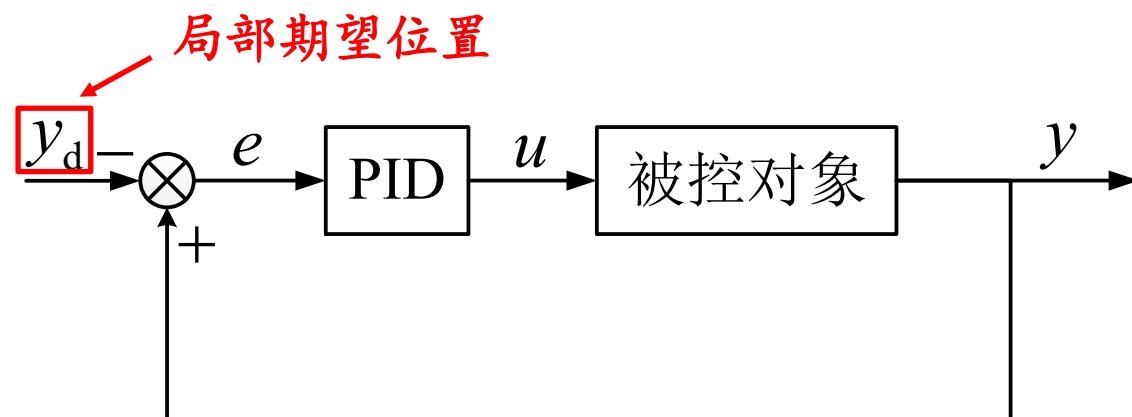
跳转避障

$$a \left( \mathbf{p} - \mathbf{p}_{wp} + k_0 \mathbf{v} \right) + b \left( \mathbf{p} - \mathbf{p}_o + k_0 \mathbf{v} \right) = \mathbf{0}_{2 \times 1}.$$

# 1.基本原理

## □ PID控制器

将得到的局部期望位置作为“多旋翼跟踪控制器设计实验”的PID控制器的输入，完成避障。



|      | 控制器                                                                                                                                                                                                                                                       | 期望                                            |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 高度通道 | $u_T = -k_{p_z p} (p_{z_e} - p_{z_{e,d}}) - k_{p_z d} (\dot{p}_{z_e} - \dot{p}_{z_{e,d}}) - k_{p_z i} \int_0^t (p_{z_e} - p_{z_{e,d}})$                                                                                                                   | $p_{z_{e,d}} \in \mathbb{R}$                  |
| 偏航通道 | $u_{\omega_z} = -k_{\psi p} (\psi - \psi_d) - k_{\psi d} (\omega_z - \dot{\psi}_d) - k_{\psi i} \int_0^t (\psi - \psi_d)$                                                                                                                                 | $\psi_d \in \mathbb{R}$                       |
| 水平通道 | $\mathbf{u}_h = -\mathbf{K}_{hp} \mathbf{R}_{\psi}^T (\mathbf{p}_h - \mathbf{p}_{hd}) - \mathbf{K}_{hd} \mathbf{R}_{\psi}^T (\dot{\mathbf{p}}_h - \dot{\mathbf{p}}_{hd}) - \mathbf{K}_{hi} \int_0^t \mathbf{R}_{\psi}^T (\mathbf{p}_h - \mathbf{p}_{hd})$ | $\mathbf{p}_{hd} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ |



# 1.基本原理



以上原理可以详细参考“**Quan Quan.Introduction to Multicopter Design and Control**. Springer, Singapore, 2017”或者“全权著.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**》,电子工业出版社, 2018.”的第13章。



# 大纲



1. 基本原理
- 2. 基础实验**
3. 分析实验
4. 设计实验
5. 实飞实验
6. 本章小结

## 2.基础实验

### □ 实验目标

#### ■ 准备

- (1) 软件：MATLAB R2017b及以上版本，基于Simulink的控制器设计与仿真平台和实验指导包“e5.1”，FlightGear
- (2) 硬件：计算机

#### ■ 目标

- (1) 理解与熟悉人工势场法避障的理论与推导过程；
- (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，即非线性系统实验。

## 2.基础实验

### □ 实验目标

#### ■ 目标

给定:

- 一个障碍物
- 一个多旋翼仿真模型

要求:

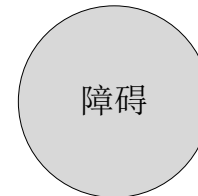
- 多旋翼初始位置为(0,0)
- 障碍物位置为(12,0)
- 障碍物半径为2, 安全半径为3
- 目标位置分别设定为(25,6)、(25,0)和(25,-6)

利用人工势场法, 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。

起点



障碍



★ 目标位置1

★ 目标位置2

★ 目标位置3

图. 实验目标示意图

# 2.基础实验

## □ 实验设计

### ■ 整体模型

- “避障器”模块：生成期望位置或实时航路点
- “跟踪器”模块：跟踪给定位置
- “多旋翼”模块：线性模型和非线性模型

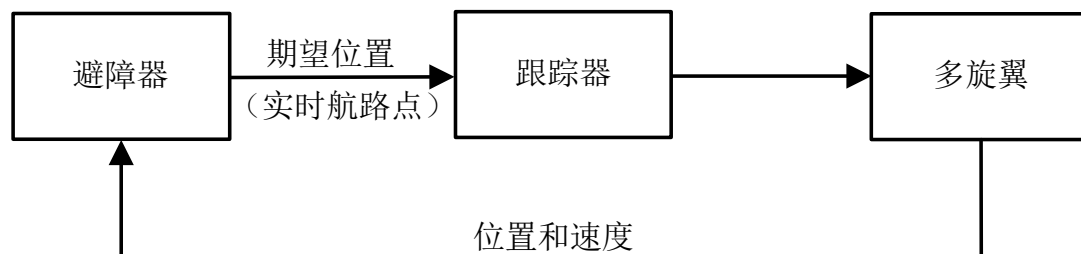


图. 模型原理

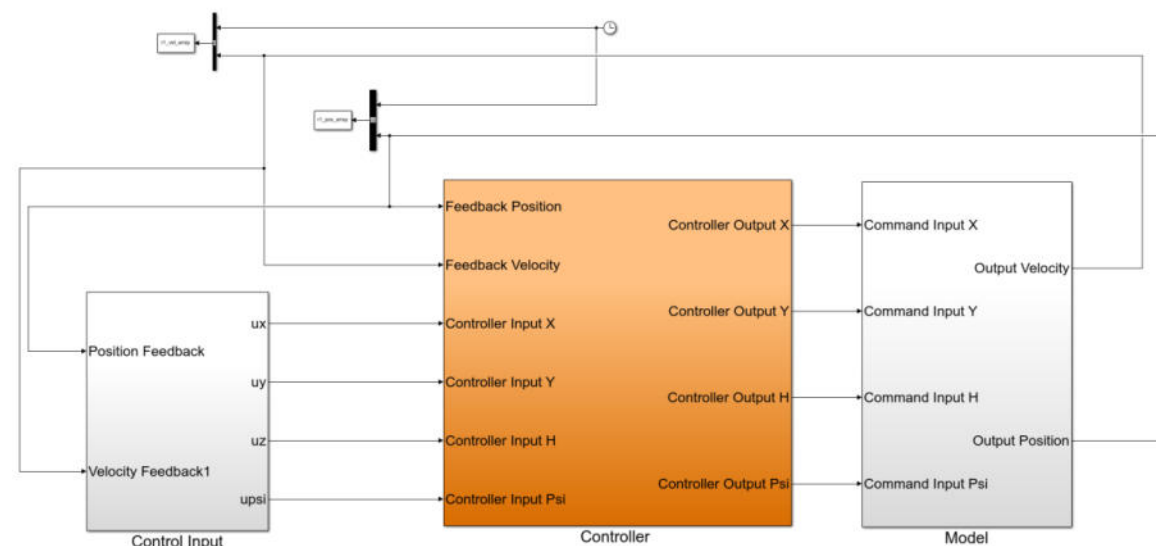


图. 整体模型

# 2.基础实验

## □ 实验设计

### ■ 期望输入模块

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。

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

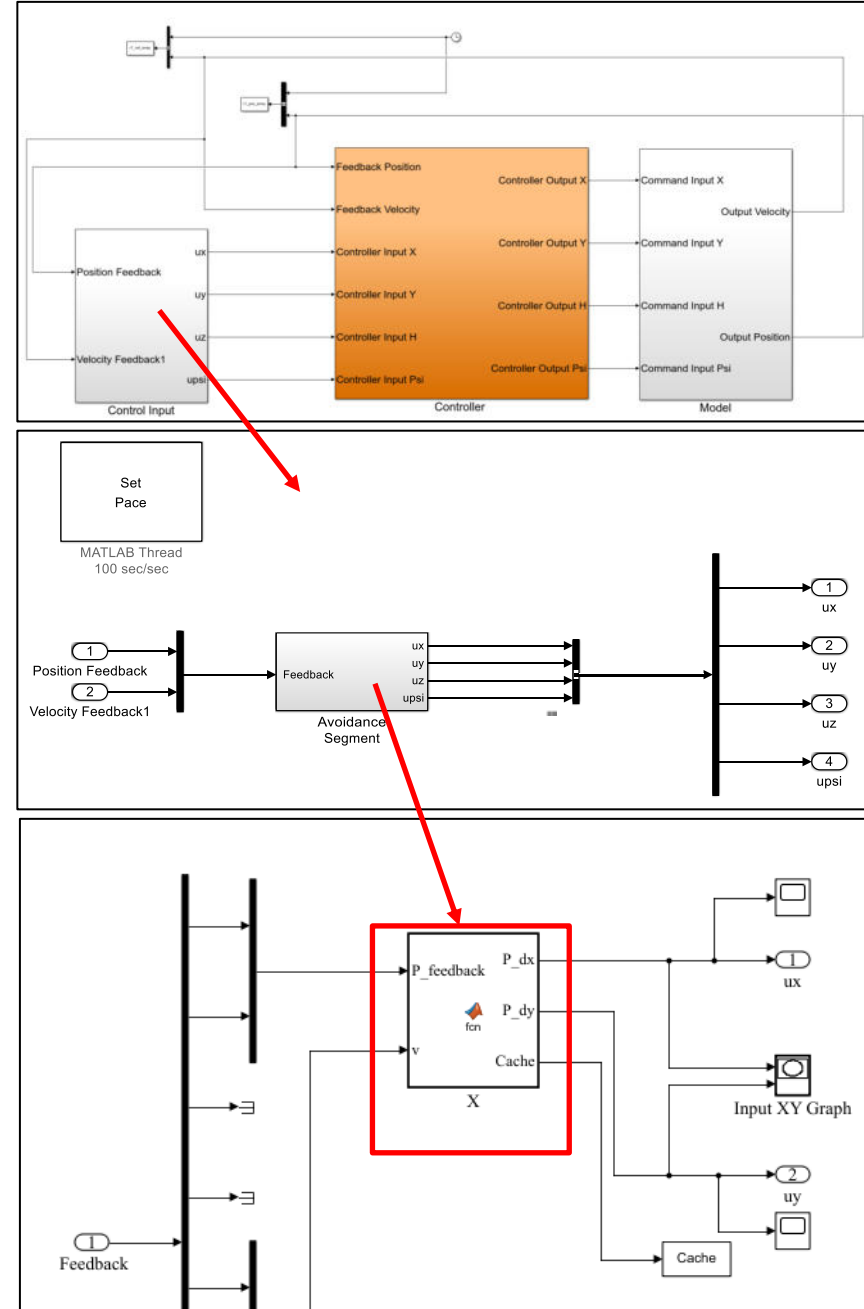


图. 设置期望输入

## 2.基础实验

### □ 实验设计

#### ■ 平滑函数

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

```
% Smooth transition curve
A=-2*d0/(d1-d2)^3;
B=-3/2*(d1+d2)*A;
C=-3*A*d1^2-2*B*d1;
D=d0-A*d1^3-B*d1^2-C*d1;
a=k1;
% Limit the range of repulsion field
if norm(ksi_0)>=d2
    b=0;
elseif norm(ksi_0)<=d1
    b=k2/((norm(ksi_0)-r_0)^2+0.000001)/(norm(ksi_0)+0.000001);
else
    q=norm(ksi_0);
    b=A*q.^3+B*q.^2+C*q+D;
end
```

图. 平滑函数代码

# 2.基础实验

## □ 实验设计

### ■ 控制器模块

该模块也称跟踪控制器，用于跟踪前面跟随控制器的输出。根据实验原理部分的分析可知，PD控制器

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{k_0} (\mathbf{p} - \mathbf{p}_d) - \frac{1}{k_0} \mathbf{v}$$

能解决避障问题。

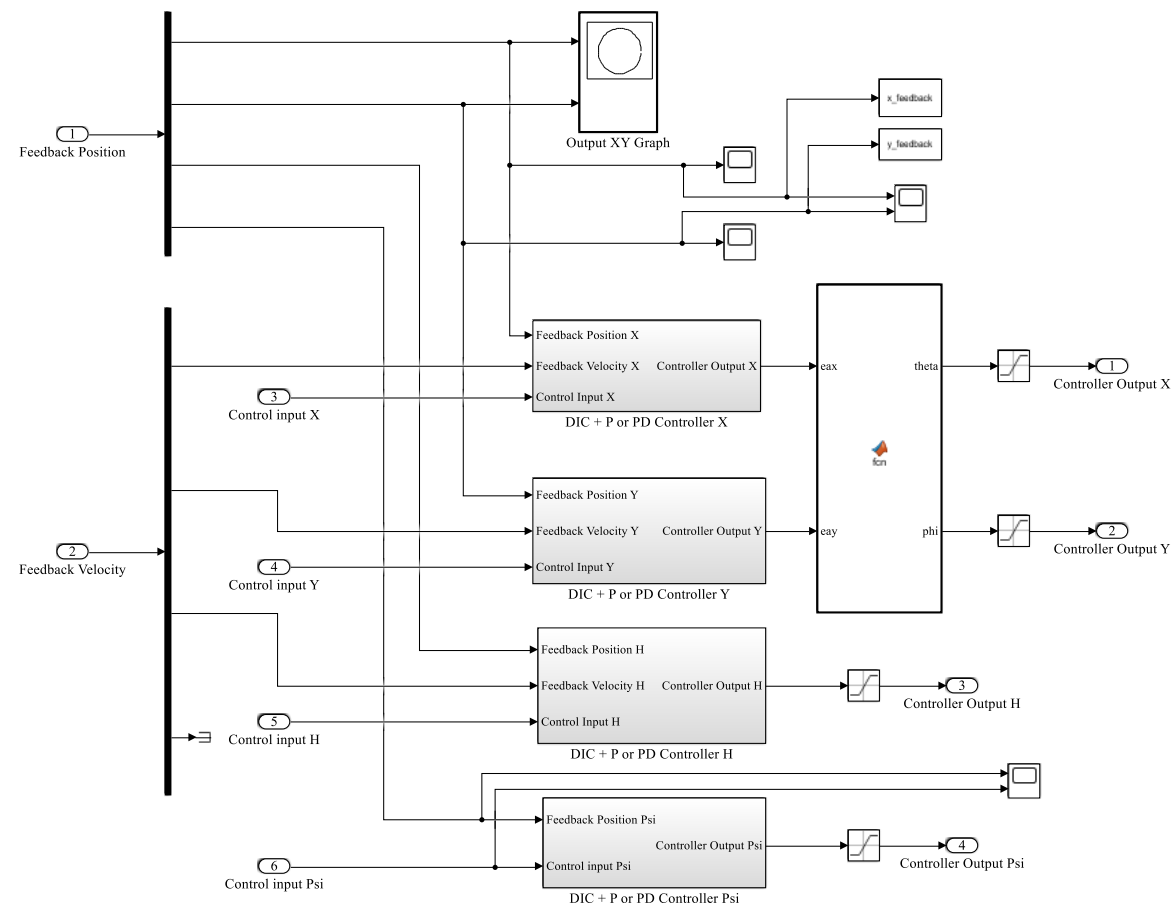


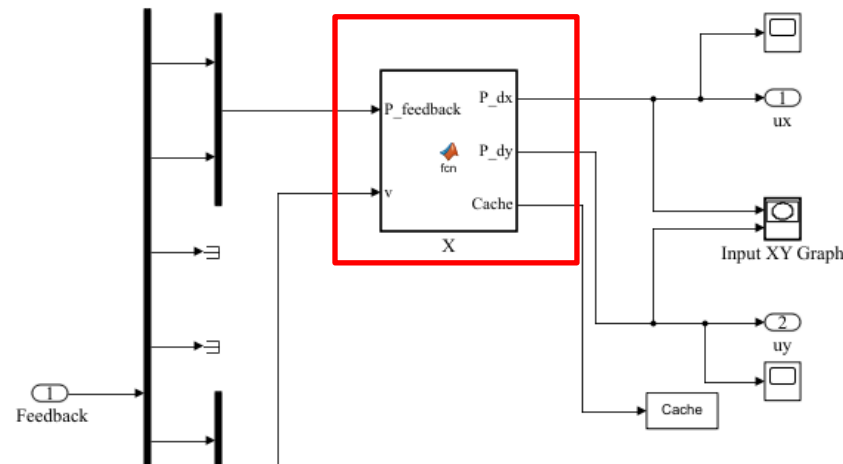
图. 跟踪控制器



## 2.基础实验

### □ 实验步骤

#### ■ 仿真1.0



这里我们给出一个设计好的例子，见文件“e5\e5.1\sim1.0\e5\_1\_Avoidance\_Segment.slx”。

#### (1) 步骤一：参数初始化

用MATLAB打开文件夹“e5\e5.1\sim1.0”，运行“startSimulation.m”文件对参数进行初始化，然后打开“e5\_1\_Avoidance\_Segment.slx”文件。

#### (2) 步骤二：修改目标位置

在仿真之前，打开图中的“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。

## 2.基础实验

### □ 实验步骤

#### (3) 步骤三：实验数据及分析

仿真结束后，打开并运行“e5\_plot.m”文件，绘制期望位置 and 实际位置曲线图。 $a_0=1, k_1=0.5, k_2=10$  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。

改变不同目标位置进行仿真，将得到的曲线绘制在同一张图，如图所示。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。

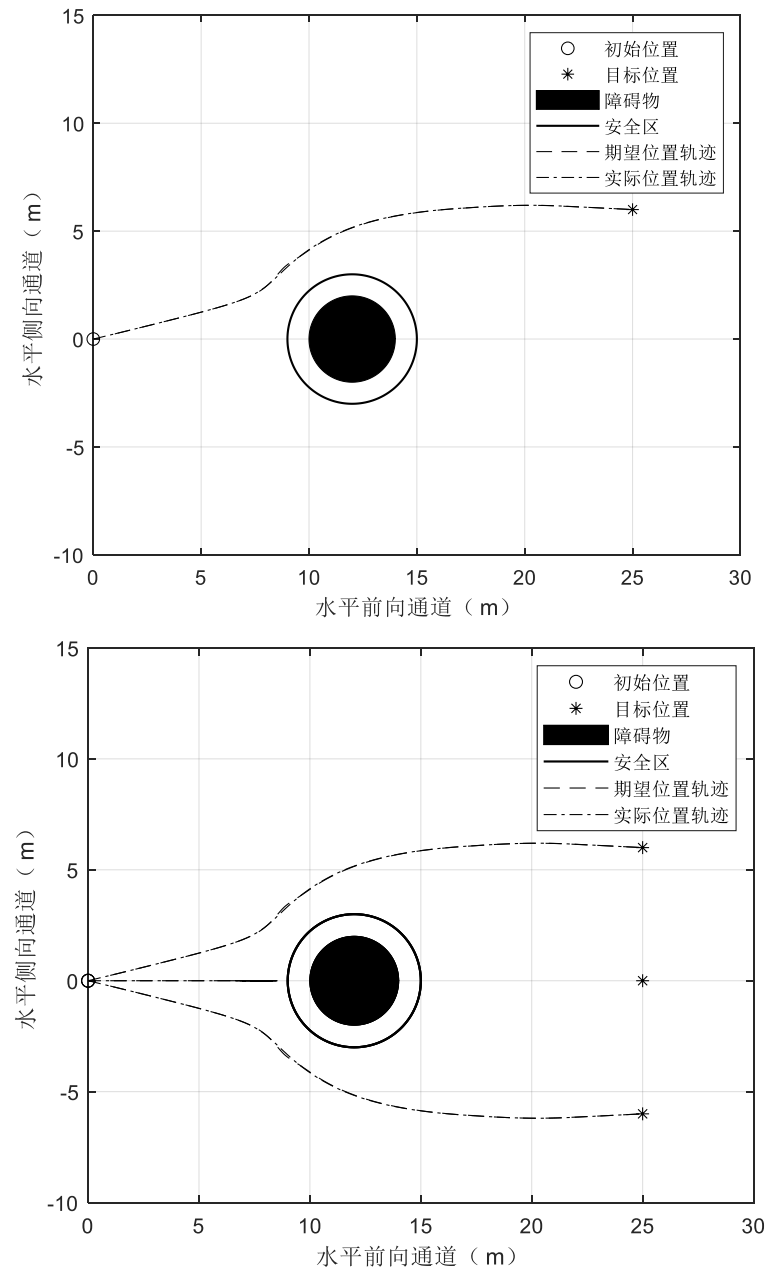


图. 不同目标位置的仿真结果

# 第八章避障控制器设计

基础实验：仿真1.0

# 2.基础实验

## □ 实验步骤

### ■ 仿真2.0

(1) 打开文件夹“e5\e5.1\sim2.0”，其中的文件与“e5\e5.1\sim1.0”基本相同，只不过将Simulink模型“e5\_1\_Avoidance\_Segment.slx”的多旋翼模型替换成了非线性模型。采用与仿真1.0实验完全相同的实验步骤，仿真结束后，运行文件“e5\_plot.m”即可得到仿真2.0结果。

(2) 对比两个实验结果，效果如右上图，可以看出，两个实验的期望位置轨迹重合在了一起，这意味着利用系统辨识获得的模型进行实验，所设计的避障算法可以很好地模拟真实模型的避障情况，达到期望的效果。因此，在接下来的实验中，可以利用传递函数模型先进行实验验证算法的可行性。此外，仿真2.0可以在FlightGear中查看飞行仿真效果，如右下图所示。

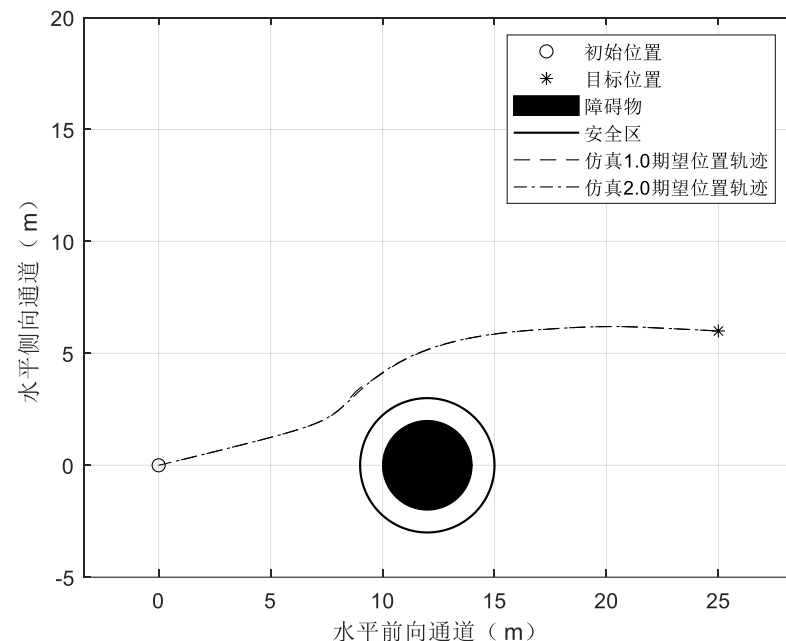


图. 基础实验仿真1.0和仿真2.0对比结果

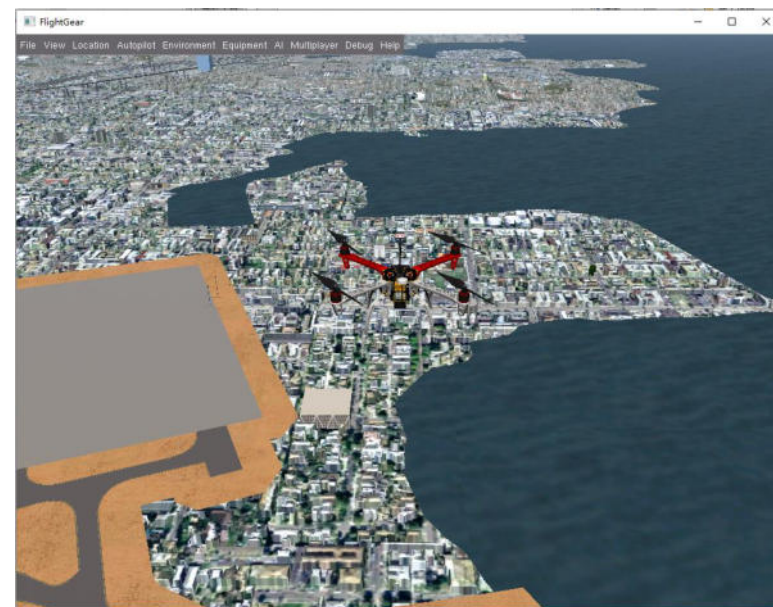


图. 分析实验仿真2.0FlightGear效果

# 第八章避障控制器设计

基础实验：仿真2.0

# 大纲



1. 基本原理
2. 基础实验
3. 分析实验
4. 设计实验
5. 实飞实验
6. 本章小结

# 3.分析实验

## □ 实验目标

### ■ 准备

- (1) 软件：MATLAB R2017b及以上版本，基于Simulink的控制器设计与仿真平台和实验指导包“e5.2”，FlightGear
- (2) 硬件：计算机

### ■ 目标

- (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。

# 3.分析实验

## □ 实验目标

### ■ 目标

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

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{k_0}\mathbf{v} - \frac{1}{k_0}\text{sat}_{\text{gd}}\left(a\tilde{\xi}_{\text{wp}} - b\tilde{\xi}_0, a_0\right) \quad \text{其中,} \quad a = k_1$$
$$b = k_2 \frac{1}{\left(\|\tilde{\xi}_0\| - r'\right)^2} \frac{1}{\|\tilde{\xi}_0\|}$$

分别修改参数  $a_0, k_1, k_2$ ，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。



# 3.分析实验

## □ 实验步骤

### ■ 仿真1.0

这里我们给出一个设计好的例子，见文件“e5\e5.2\sim1.0\e5\_2\_Avoidance\_Segment.slx”。

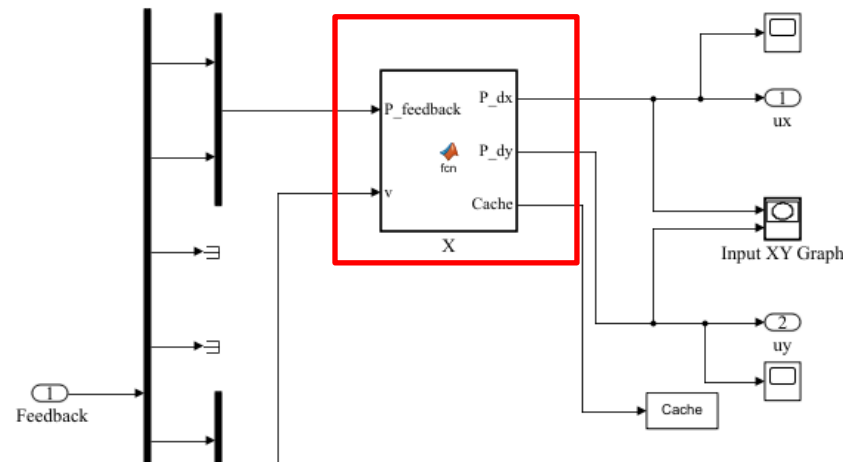
#### (1) 步骤一：参数初始化

用MATLAB打开文件夹“e5\e5.2\sim1.0”，运行“startSimulation.m”文件对参数进行初始化，然后打开“e5\_2\_Avoidance\_Segment.slx”文件。

#### (2) 步骤二：参数修改

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

#### (3) 步骤三：实验数据及分析



# 3.分析实验

## □ 结果及分析

### 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。

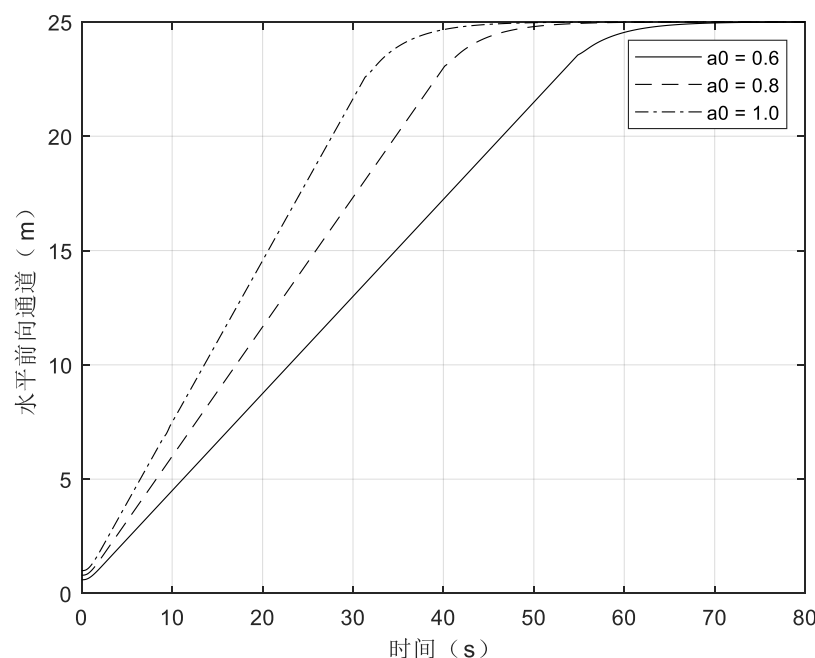


图. 不同 $a_0$ 下水平前向通道位置响应曲线

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来越快。

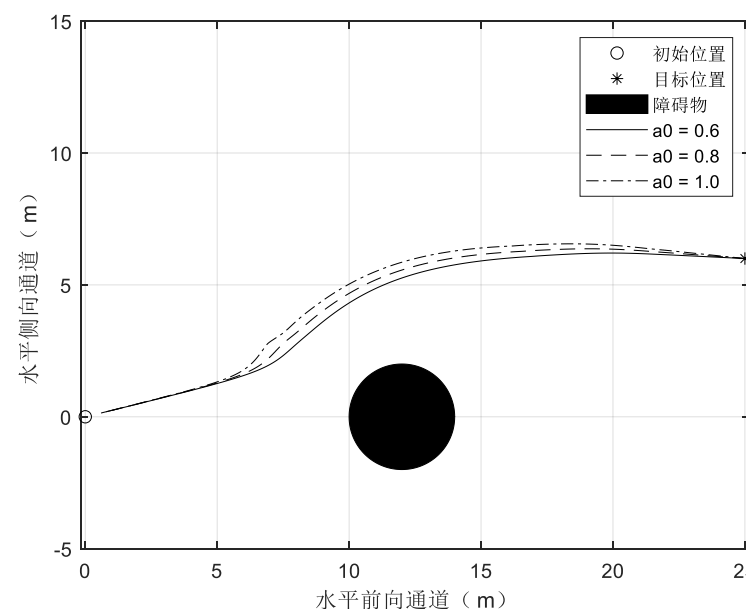


图. 不同 $a_0$ 下水平通道位置轨迹对比

# 3.分析实验

## □ 结果及分析

### 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。

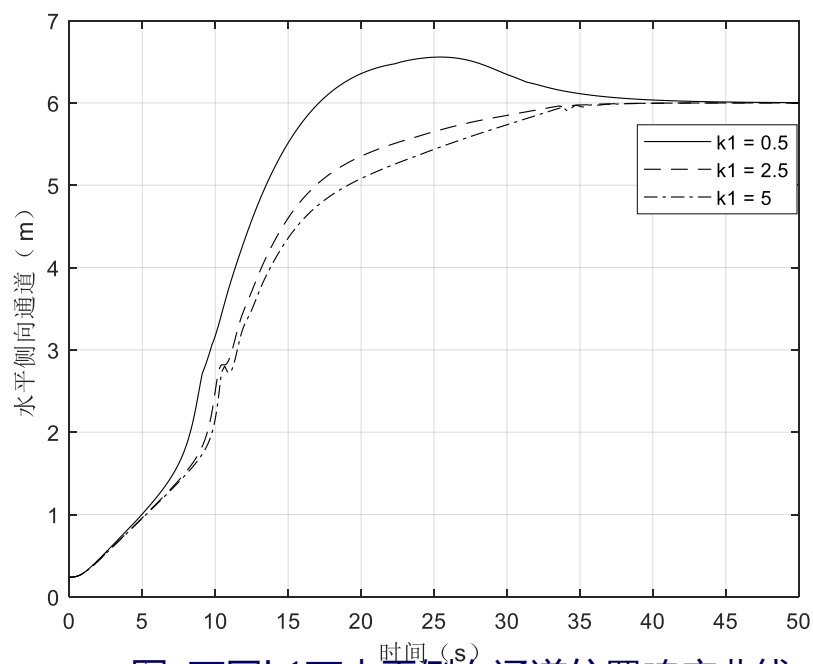


图. 不同 $k_1$ 下水平侧向通道位置响应曲线

该图也说明了这个规律：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。

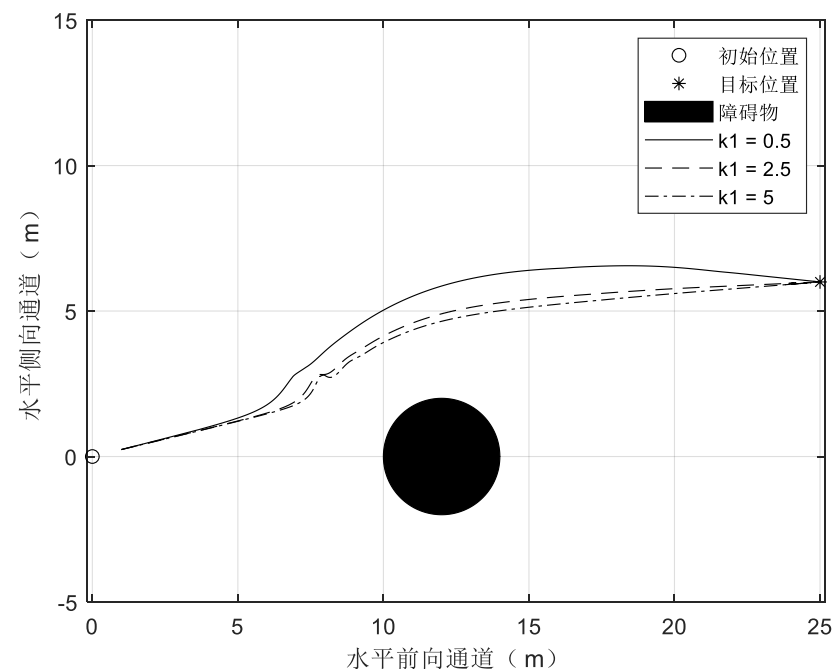


图. 不同 $k_1$ 下水平通道位置响应曲线

# 3.分析实验

## □ 结果及分析

### 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。

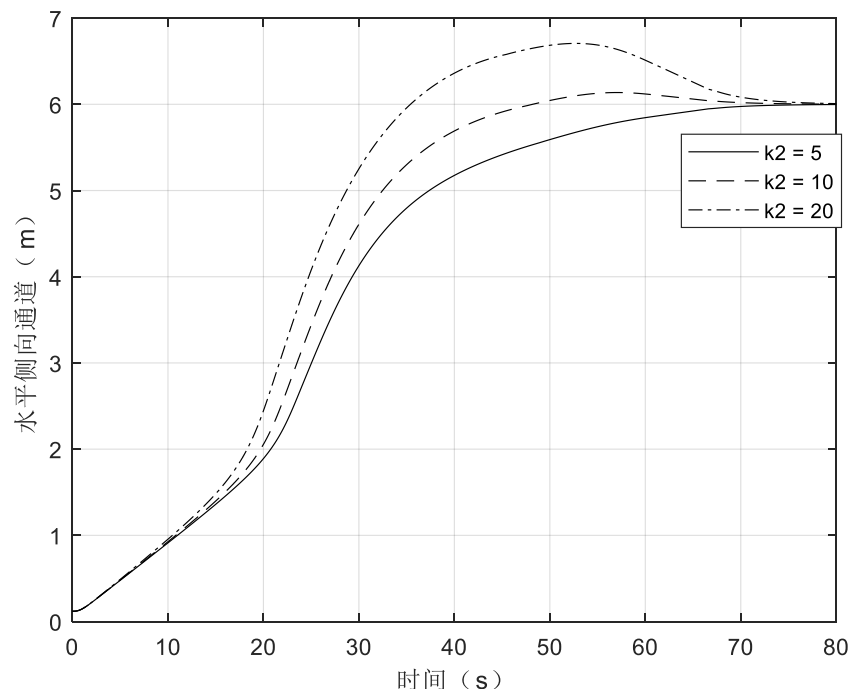


图. 不同 $k_2$ 下水平侧向通道位置响应曲线

该图也说明了这个规律：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。

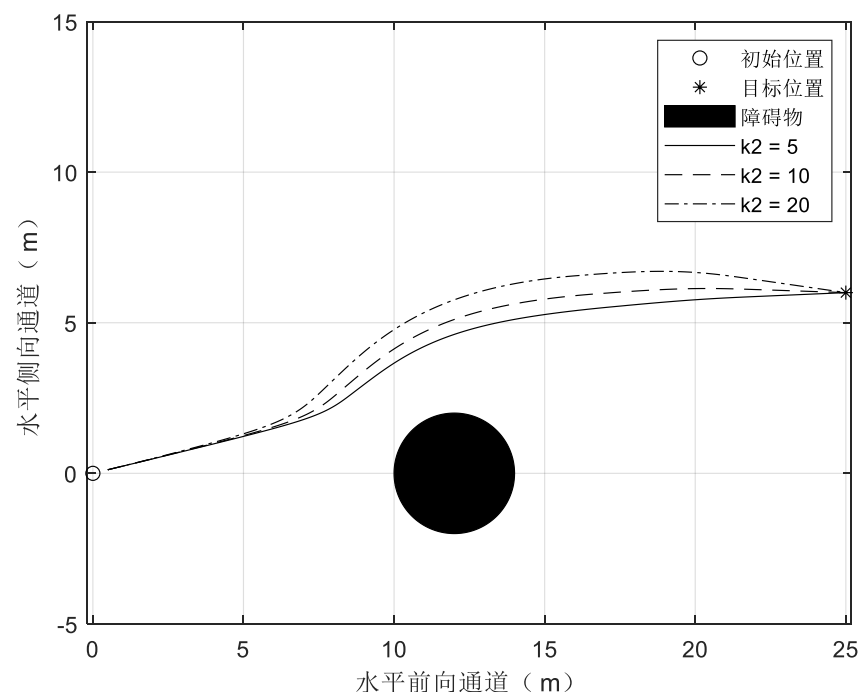


图. 不同 $k_2$ 下水平通道位置轨迹对比

# 3.分析实验

## □ 结果及分析

在保持其他两个参数值不变的情况下

(1) 饱和上限  $a_0$  值越大，多旋翼靠近目标位置的速度会越来越快，但速度也不可能无限加快。因此，只是在一定的区间内存在类似正比的关系。

(2) 参数  $k_1$  值越大，多旋翼在避障过程中更加靠近障碍物。

(3) 参数  $k_2$  值越大，多旋翼在避障过程更加远离障碍物。

(4) 从理论上分析，参数  $k_1$  是  $(\mathbf{p}-\mathbf{p}_d)$  的系数，该值越大，多旋翼就会越期望靠近目标位置；参数  $k_2$  是  $(\mathbf{p}-\mathbf{p}_o)$  的系数，该值越大，多旋翼就会越期望远离障碍物。当比值  $k_1/k_2$  越大时，多旋翼更期望以优先靠近障碍物的方式靠近目标位置；反之，当比值  $k_1/k_2$  越小时，多旋翼更期望以优先远离障碍物的方式靠近目标位置。

# 第八章避障控制器设计

分析实验：仿真1.0

# 3.分析实验

## □ 实验步骤

### ■ 仿真2.0

(1) 打开文件夹“e5\5.2\sim2.0”，其中的文件与“e5\5.2\sim1.0”基本相同，区别在于“e5\_2\_TF\_Avoidance\_Segment.slx”中的模型为非线性模型。采用与仿真1.0完全相同的实验步骤，观察获得结果。

(2) 对比两个实验结果，效果如右上图，可以看出，采用系统辨识获得的模型进行实验所获得的避障算法，能够很好地模拟不同参数情况下的真实模型的避障情况，达到期望的效果。

(3) 此外，仿真2.0可以在FlightGear中查看飞行仿真效果。

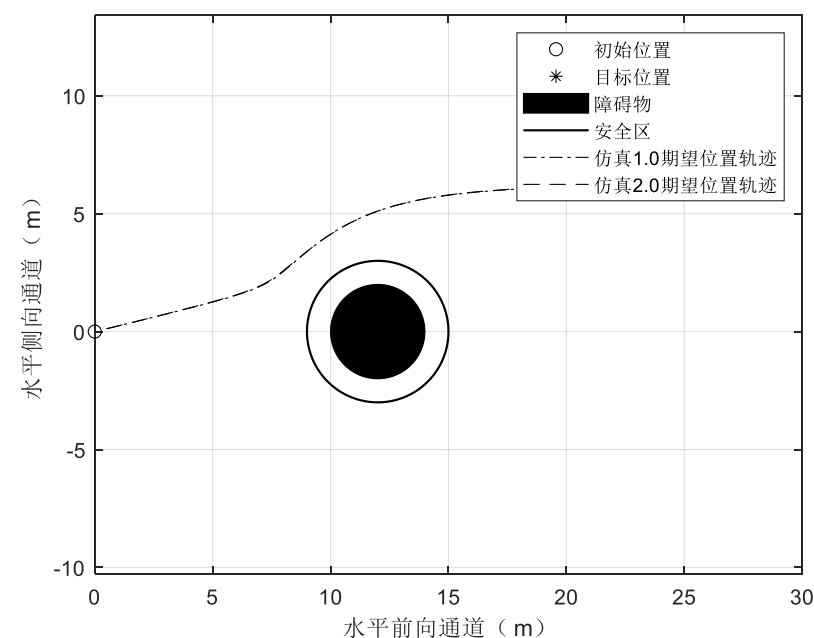


图. 分析实验仿真1.0和仿真2.0对比结果

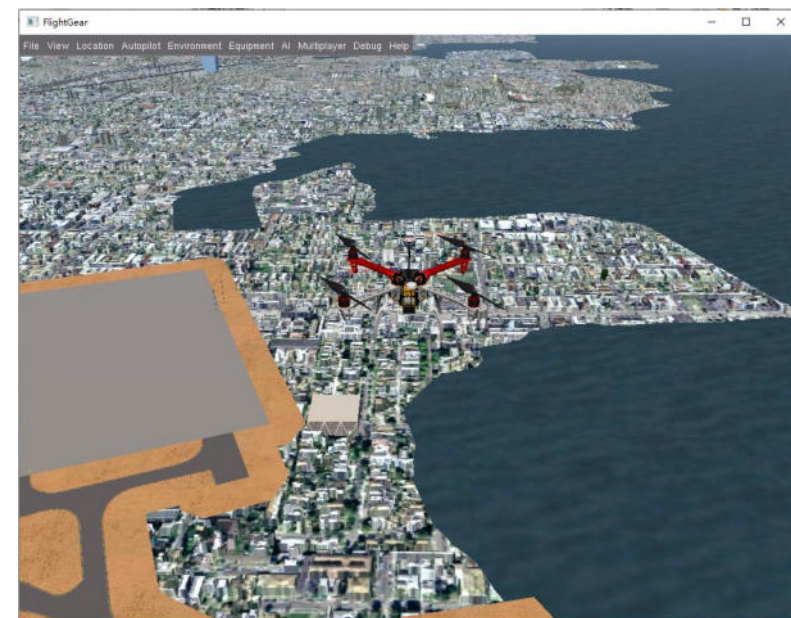


图. 分析实验仿真2.0FlightGear效果

# 第八章避障控制器设计

分析实验：仿真2.0



# 大纲



1. 基本原理
2. 基础实验
3. 分析实验
4. 设计实验
5. 实飞实验
6. 本章小结

# 4.设计实验

## □ 实验目标

### ■ 准备

- (1) 软件：MATLAB R2017b及以上版本，基于Simulink的控制器设计与仿真平台和实验指导包“e5.3”，CopterSim, RflySim3D
- (2) 硬件：计算机

### ■ 目标

- (1) 理解与熟悉人工势场法的理论与推导过程；
- (2) 实现多架多旋翼趋于对方起始位置的避障控制；
- (3) 使用相同的控制器进行仿真2.0实验，即非线性系统实验，并进行硬件在环仿真。

# 4.设计实验



## ■ 目标

设计多机合作避障算法，完成两个递进的实验：

- 实验一：给定两架多旋翼，设计控制器引导它们避免碰撞，并飞向对方初始位置。
- 实验二：给定两架多旋翼和一个障碍物，设计控制器引导多旋翼避开障碍物飞向对方初始位置。

要求：

- 两架多旋翼初始位置为(0,0)和(30,0)
- 障碍物位置随机，可定为(18,0)
- 障碍物半径为2，安全半径为3
- 偏航角始终保持为0
- 高度始终保持在1

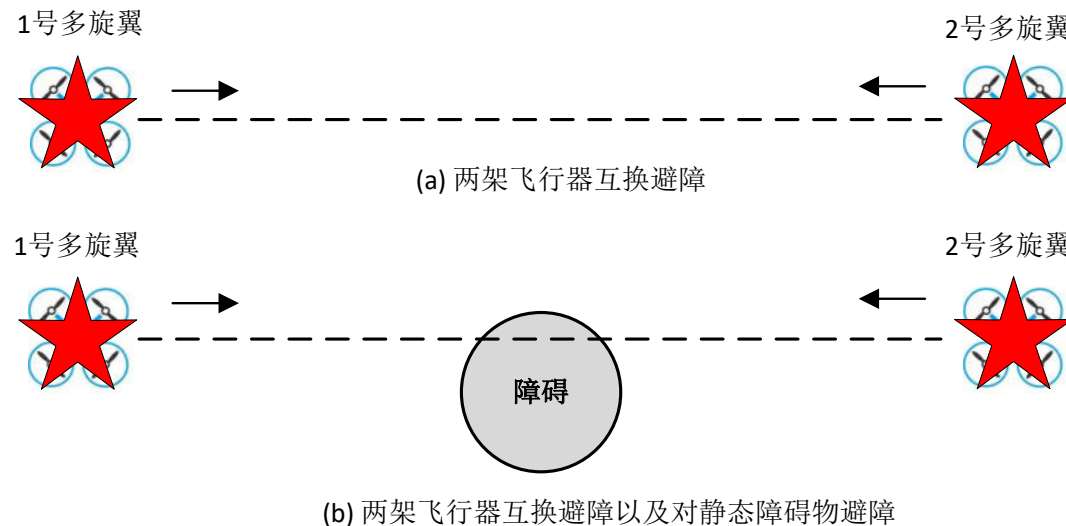


图. 设计实验目标示意图

# 4.设计实验



## □ 多机避障原理

(1) 问题描述：令  $\mathbf{p}_i \in \mathbb{R}^2$  和  $\mathbf{v}_i \in \mathbb{R}^2$  表示第*i*架多旋翼当前位置和当前速度， $\mathbf{p}_{wp,i} \in \mathbb{R}^2$ 第*i*架多旋翼的目标航路点，根据质点模型

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{p}}_i &= \mathbf{v}_i \\ \dot{\mathbf{v}}_i &= \mathbf{u}_i\end{aligned}$$

设计虚拟控制输入  $\mathbf{u}_i$ ，引导多旋翼从各自起飞点抵达目标位置  $\mathbf{p}_{wp,i}$ ，同时避开位于  $\mathbf{p}_{o,j} \in \mathbb{R}^2, j=1, \dots, m_o$ ，速度为  $\mathbf{v}_{o,j} \in \mathbb{R}^2$  且影响半径为  $r_{o,j} > 0$  的  $m_o$  个障碍物。

# 4.设计实验



## □ 多机避障原理

全局势场可通过叠加目标航路点和所有障碍物（除自身外其他多旋翼是移动的障碍物）的势场获得。根据势场的叠加结果，可将局部期望位置  $\mathbf{p}_{d,i} \in \mathbb{R}^2$  表示为

$$\mathbf{p}_{d,i} = \mathbf{p}_i + \mathbf{p}_{d,o}$$

这里

$$\mathbf{p}_{d,o} = \text{sat}_{\text{gd}} \left( k_1 (\mathbf{p}_{\text{wp},i} + k_0 \mathbf{v}_{\text{wp},i} - \mathbf{p}_i - k_0 \mathbf{v}_i) + \sum_{j=1}^{m_o} b_j (\mathbf{p}_i + k_0 \mathbf{v}_j - \mathbf{p}_{o,j} - k_0 \mathbf{v}_{o,j}), a_o \right)$$
$$b_j = k_2 \frac{1}{\left( \|\mathbf{p}_i + k_0 \mathbf{v}_i - \mathbf{p}_{o,i} - k_0 \mathbf{v}_{o,i}\| - r_{o,i} - k_0 a_o \right)^2} \frac{1}{\|\mathbf{p}_i + k_0 \mathbf{v}_i - \mathbf{p}_{o,i} - k_0 \mathbf{v}_{o,i}\|}, j = 1, \dots, m_o$$

非合作避障：Q. Quan, R. Fu and K. -Y. Cai, "**Practical Control for Multicopters to Avoid Non-Cooperative Moving Obstacles**," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, doi: 10.1109/TITS.2021.3096558.

# 4.设计实验

## □ 实验设计

### ■ 期望输入模块

整体模型分成两部分，对应1号多旋翼和2号多旋翼模型。每个部分都包括控制输入模块、控制器模块和多旋翼模型模块。因为两架多旋翼的算法设计几乎一致，因此只考虑其中的1号多旋翼。依次打开右图所示模块。

与基础实验不同，这里引入了2号多旋翼的位置和速度反馈。打开图中的“X1”模块，关键代码上图所示。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。

```
temp1 = satgd(-a*ksi_wp+b*ksi_0,a0);
P_d1 = P_feedback1+ temp1; %局部期望位置
P_dx1=P_d1(1);
P_dy1=P_d1(2);
```

图. 核心代码

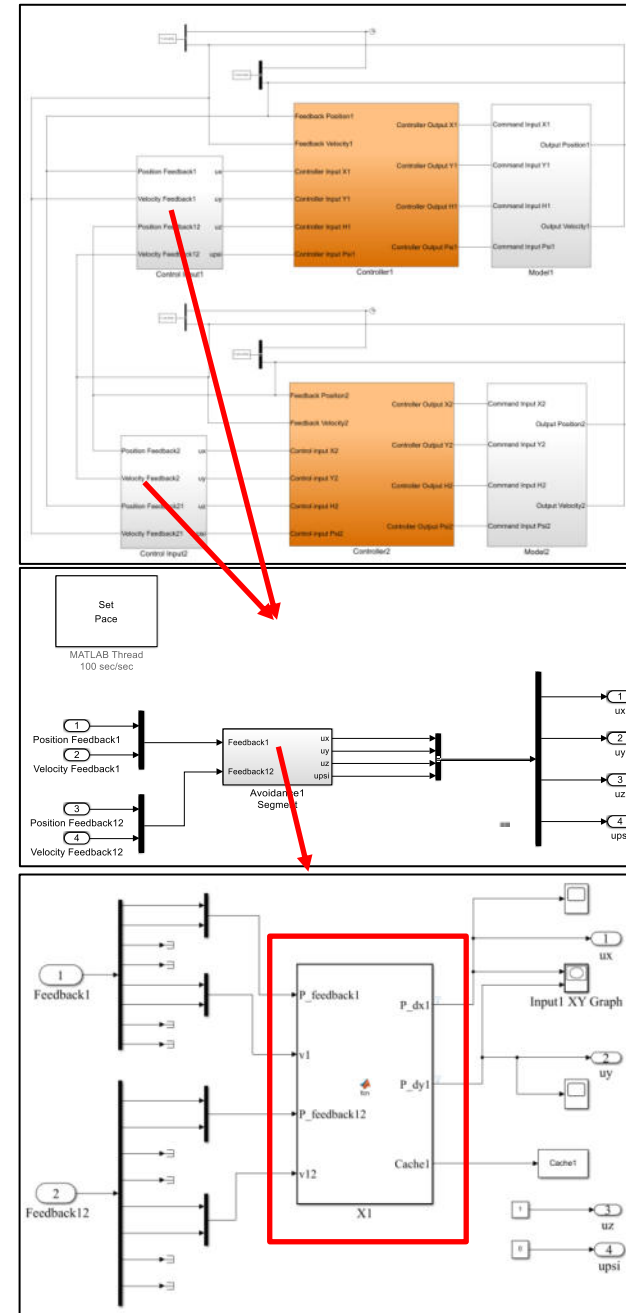


图. 设置期望输入模块

# 4.设计实验

## □ 实验设计

### ■ 控制器模块

这部分与基础实验一样，不再赘述。  
读者可根据需要，适当修改参数进行优化。

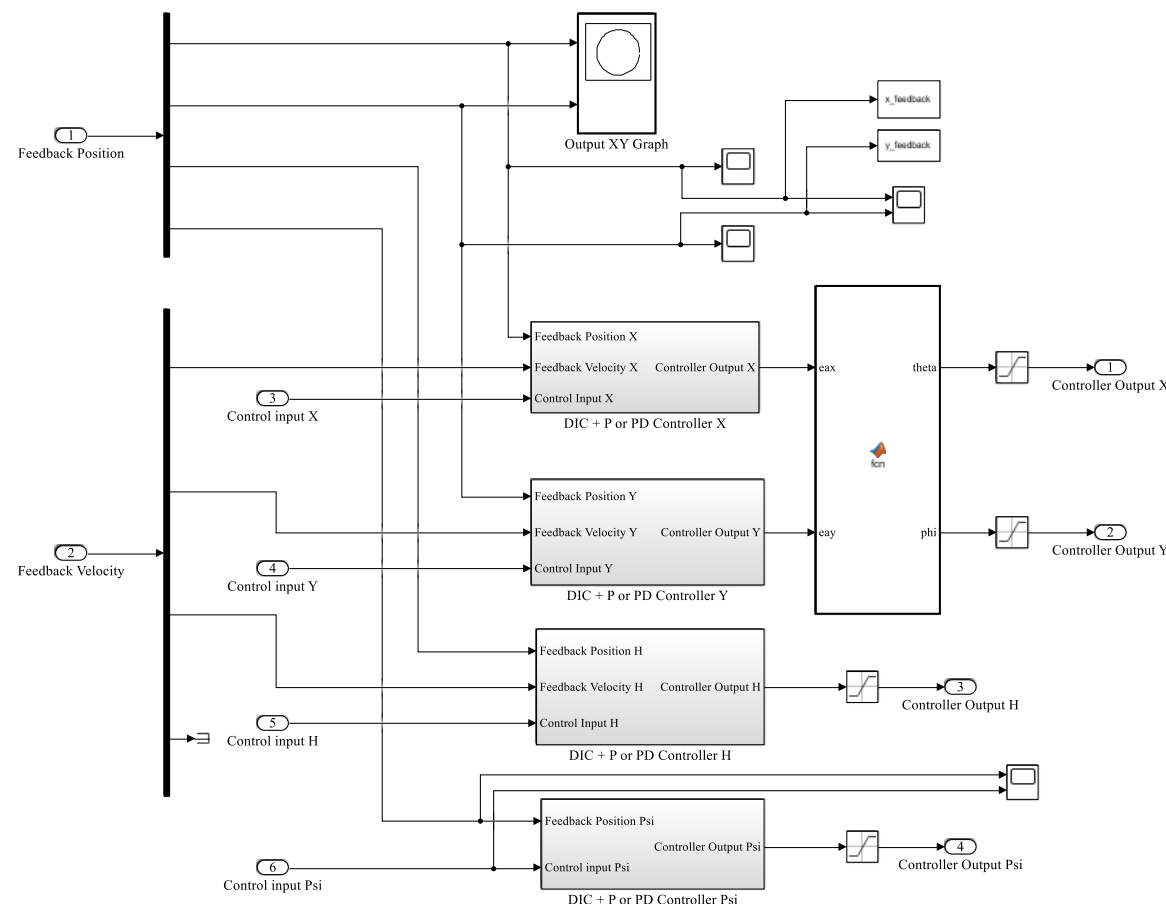


图. 控制器内部

# 4.设计实验

## □ 实验步骤-仿真1.0

### ■ 实验一

这里我们给出一个设计好的例子，见文件“e5\e5.3\sim1.0\e5\_3\_Avoidance\_Segment.slx”。

#### (1) 步骤一：参数初始化

用MATLAB打开文件夹“e5\e5.3\sim1.0”，运行“startSimulation.m”文件对参数进行初始化，然后打开“e5\_1\_Avoidance\_Segment.slx”文件，按照要求设定目标位置、障碍物位置及半径。

注意，在多旋翼相遇之前，对于每架多旋翼，都与目标位置以及另一架多旋翼处于同一条直线上，理论上存在“死锁”问题（稳定到速度为零状态，但未能到达目标点）。但实际上，多旋翼不会严格在同一条直线上飞行，尤其是在三维测度上，“死锁”问题不可能存在或者说概率为0。本实验考虑的是二维测度仿真，针对“死锁”情况，将起点位置设置为（0，-0.1）和（30，0.1），目标位置设置为（30，-0.1）和（0，0.1）。这样两架多旋翼在两条十分接近的平行线上进行对飞避障。



# 4.设计实验

## □ 实验步骤-仿真1.0

### ■ 实验一

#### (2) 步骤二：查看结果

修改参数值，获得不同的结果，保存避障效果较好的结果。仿真结束后，通过“e5\_plot.m”文件绘制两架多旋翼的轨迹，结果如图所示。该图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构成二维平面图形。图中包含起点位置1、起点位置2、两架多旋翼的期望位置轨迹与实际位置轨迹。可以看出，从初始位置开始，多旋翼的期望位置轨迹与实际位置轨迹十分吻合，并且成功地进行了相互避障到达目标位置，可以认为该避障算法是可行的。

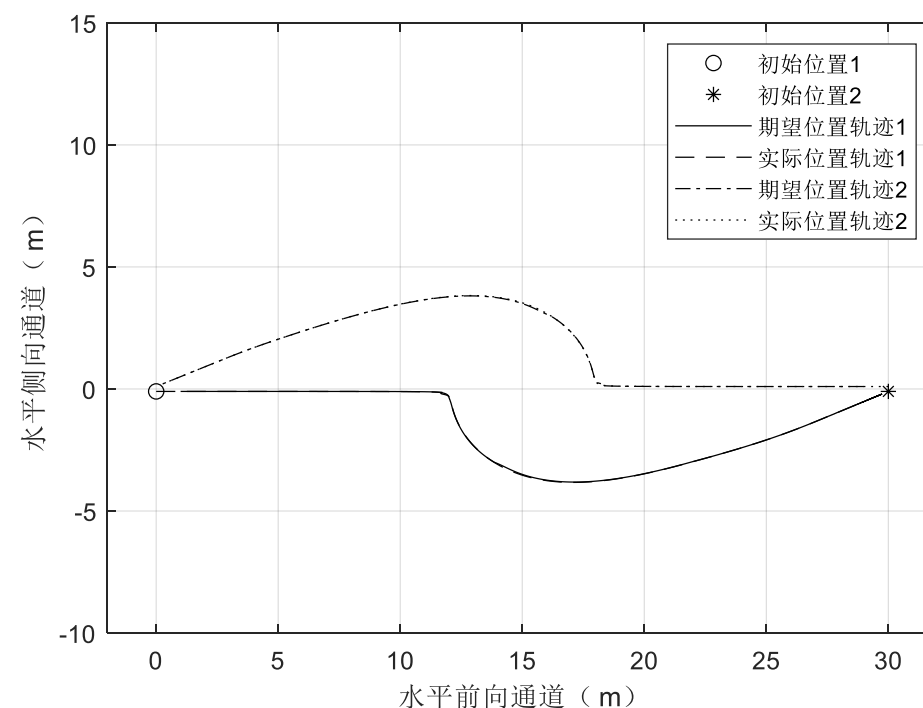
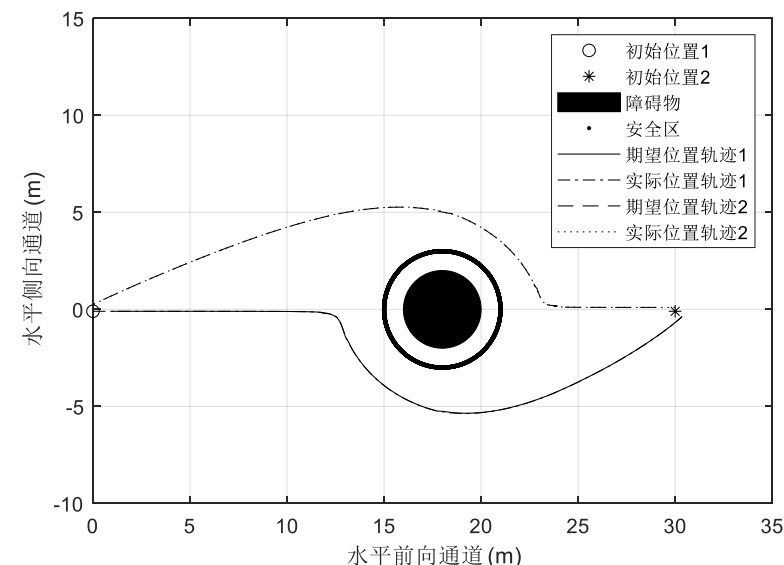


图. 实验一仿真1.0结果

# 4.设计实验

## □ 实验步骤-仿真1.0

### ■ 实验二



这里我们给出一个设计好的例子，见文件“e5\e5.3\sim1.1\e5\_3\_Avoidance\_Segment.slx”。图. 实验二仿真1.0结果

#### (1) 步骤一：参数初始化

用MATLAB打开文件夹“e5\e5.3\sim1.1”，运行“startSimulation.m”文件对参数进行初始化，然后打开“e5\_1\_Avoidance\_Segment.slx”文件，按照要求设定目标位置、障碍物位置及半径。

#### (2) 步骤二：查看结果

在调试后，选取参数合适的参数进行实验，。仿真结束后，通过运行“e5\_plot.m”文件绘制两架多旋翼的轨迹，结果如图所示。可以看出，从初始位置开始，多旋翼的期望位置轨迹与实际位置轨迹十分吻合，并且成功地进行了相互避障，绕开静态障碍物到达目标位置，可以认为该避障算法是可行的。

# 第八章避障控制器设计

设计实验：仿真1.0

# 4.设计实验

## □ 实验步骤-仿真2.0

### ■ 实验一

打开文件夹“e5\e5.3\sim2.0”，其中的文件与“e5\e5.3\sim1.0”基本相同，区别在于这里替换多旋翼模型为非线性模型。注意，与仿真1.0不同，这里需要在初始文件“startSimulation.m”中修改两架多旋翼的初始位置。相关代码见下图。采用与仿真1.0完全相同的步骤进行实验，最后运行文件“e5\_plot.m”获得如右图所示结果。

```
%飞行器初始状态
```

```
ModelInit.PosE1=[0,-0.1,0]; %1号多旋翼初始位置 (单位: m)
```

```
ModelInit.PosE2=[30,0.1,0]; %2号多旋翼初始位置 (单位: m)
```

图. 修改两架多旋翼位置

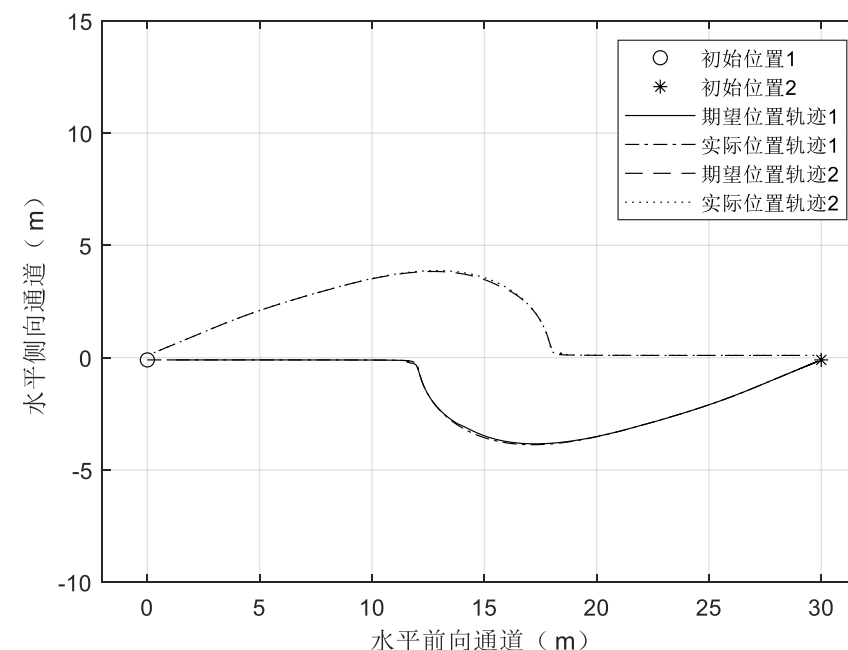


图. 实验一仿真2.0结果

# 4.设计实验

## □ 实验步骤-仿真2.0

### ■ 实验二

打开 “e5\e5.3\sim2.1”，其中的文件与 “e5\e5.3\sim1.1”基本相同，区别在于这里替换多旋翼模型为非线性模型。两架多旋翼的初始位置同样需要在初始文件 “startSimulation.m”中进行修改。采用与仿真1.1完全相同的实验步骤，运行文件 “e5\_plot.m”获得结果如图所示。

可以看出，实际位置轨迹跟踪期望位置轨迹，不仅避开了障碍物和另一架多旋翼，也完美地到达了目标位置。

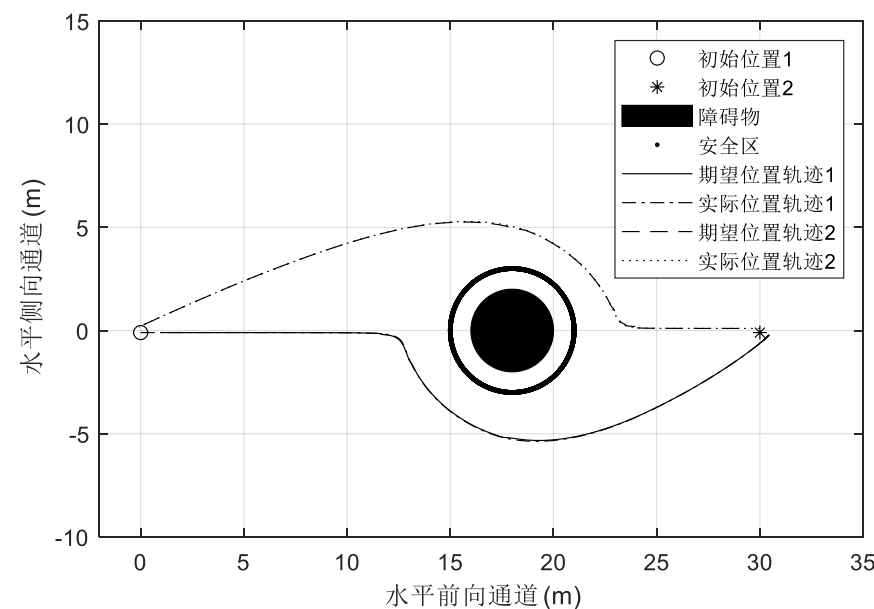


图. 实验二仿真2.0结果

# 第八章避障控制器设计

设计实验：仿真2.0

# 4.设计实验

## □实验步骤-仿真2.0

### ■ 实验二

若要进行对比，保存数据后运行文件“sim1.1\_vs\_sim2.1\e5\_compare\_plot.m”文件即可，对比效果如图所示。可以看出，两个实验的轨迹对应地重合在一起。这意味着采用系统辨识获得的模型进行实验时，所设计的避障算法可以很好地模拟真实模型的避障情况，并且达到期望的效果。

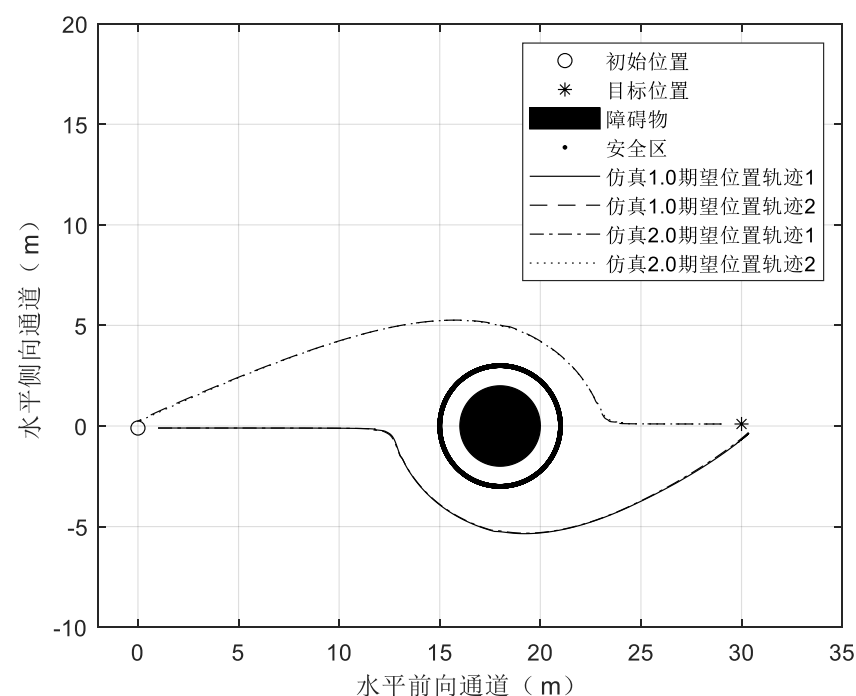


图. 实验二仿真1.0和仿真2.0对比结果

# 4.设计实验

## □ 实验步骤

### ■ 硬件在环仿真

准备好两个自驾仪并打开RflySim平台。注意，此处是多机仿真，因此要打开名称为“HITLRunUdpFull.bat”的文件，在双击打开之前需要修改多旋翼的位置。右键该文件选择编辑，此时该文件将由记事本打开。找到设置多旋翼间距的地方，如图所示，将多旋翼间距从2米修改为30米。

```
% 设置多旋翼间距  
REM Set the interval between two vehicle, unit:m  
SET /a VEHICLE_INTERVAL=2
```

图. 修改多旋翼间距



# 4.设计实验



## □ 实验步骤

### ■ 硬件在环仿真

修改完成之后双击打开该文件。运行“startSimulation.m”初始化参数并运行 Simulink 模型文件“e5\_3\_Avoidance\_Segment\_HTIL\_2017b.slx”开始仿真。此时，可以在RflySim3D软件中看到硬件在环仿真的效果，如图所示。实验数据保存至工作区中，点击运行“e5\_plot.m”文件可以得到如图所示的结果。图中可以看出，两架多旋翼在互相躲避的同时完成了对于静态障碍物的避障，实现了预期目标，验证了人工势场法的正确性和可行性。



图. 硬件在环仿真效果图

# 第八章避碰控制器设计

## 硬件在环仿真实验

# 大纲



1. 基本原理
2. 基础实验
3. 分析实验
4. 设计实验
5. 实飞实验
6. 本章小结

# 5.实飞实验



## □ 实验目标

### ■ 准备

- (1) 软件：MATLAB R2017b及以上版本，基于Simulink的控制器设计与仿真平台和实验指导包“e5.4”
- (2) 硬件：计算机，室内定位系统，带半自主飞控的多旋翼飞行器

### ■ 目标

- (1) 进一步理解和熟悉人工势场法的理论与推导过程以及在实际飞行中的具体应用；
- (2) 将设计的控制器及多机避障算法应用于实际飞行实验。

# 5.实飞实验



## ■ 目标

考虑到实飞场地大小有限，实现双机避障的实飞实验。将两架多旋翼的起始位置设置为 $(-1.5, -0.1)$ 和 $(1.5, 0.1)$ ，目标位置分别设置为 $(1.5, -0.1)$ 和 $(-1.5, 0.1)$ 。多旋翼模型模块替换成第四章实飞实验的位置/角度-位置/角度的四通道传递函数模型，设计控制器引导两架多旋翼相互避障，飞向对方初始位置，最后记录多旋翼避障轨迹。

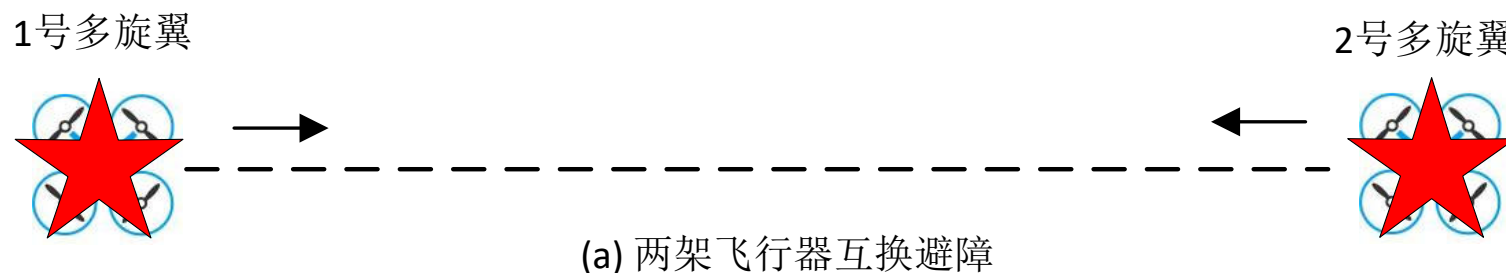


图. 实飞实验目标示意图

# 5.实飞实验



## □ 实验步骤-仿真1.0

这里我们给出一个设计好的例子，见文件“e5\e5.4\sim1.0\e5\_4\_Avoidance\_Segment.slx”

### (1) 步骤一：参数初始化

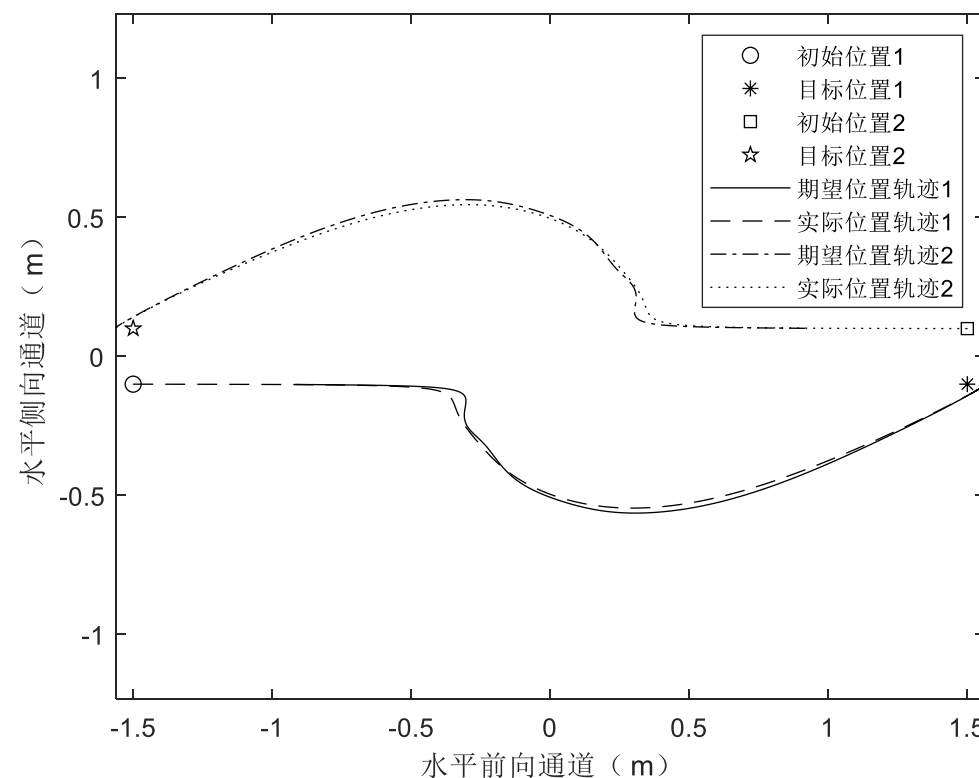
在完成了参数设计之后，可以开始仿真。打开文件夹“e5\e5.4\sim1.0”，运行“startSimulation.m”文件初始化参数，其中包含实验所需要的控制器参数以及多旋翼起始位置等信息，可以根据需要自行设置。点击Simulink的仿真按钮，获得仿真结果。

# 5.实飞实验

## □ 实验步骤-仿真1.0

### (2) 步骤二：查看结果

在调试后，选取参数 $a_0=1, k_1=0.2, k_2=0.11$ 进行实验。仿真结束后通过运行“e5\_plot.m”文件轨迹绘制结果。从图中可以看出，从初始位置开始，**多旋翼期望位置轨迹与实际位置轨迹基本吻合**，并且成功进行避障到达目标位置。可以认为，**设计的避障算法对于使用真实的多旋翼进行辨识得到的模型是可行的**。因此，可以根据实际情况微调一些参数，将算法用于实飞实验。



# 第八章避障控制器设计

实飞实验：仿真1.0



# 5.实飞实验

## □ 实验步骤-实飞

这里我们给出一个设计好的例子，见文件“e5\e5.4\Rfly\e5\_4\_Avoidance\_two.slx”。

### (1) 步骤一：设计MATLAB控制模型

运行“start\_tello\_two.m”文件，  
启动 MATLAB 控制模型  
“e5\_4\_Avoidance\_two.slx”。

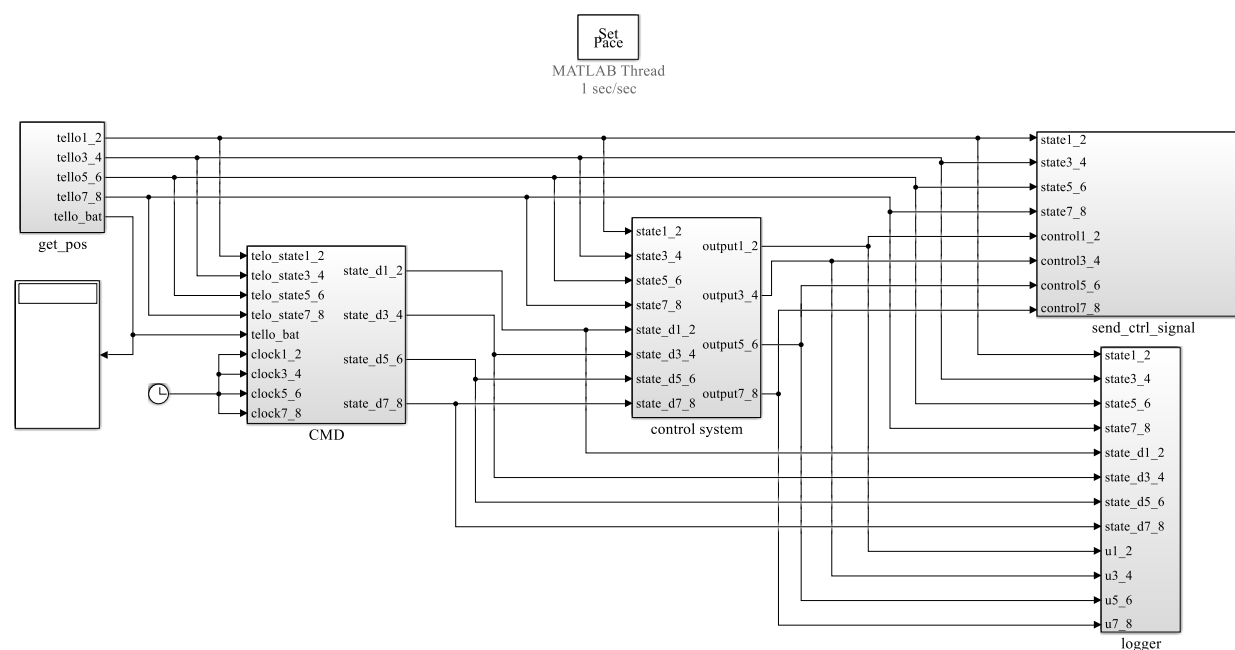


图. 实飞实验整体模型

# 5.实飞实验

## □ 实验步骤-实飞

### (2) 步骤二：增加多旋翼的数量

本实验与其他的实飞实验不同，需要使用多架多旋翼进行实验。具体操作为：选择图中的两个多旋翼期望输入模块，例如3号和4号多旋翼。点开虚线框3。根据实验原理，避障实验的跟随器需要引入自身的速度和位置反馈以及其他多旋翼（4号）的速度和位置反馈，如虚线框1所示。点开虚线框2中的函数模块，可以看到双机避障的控制算法

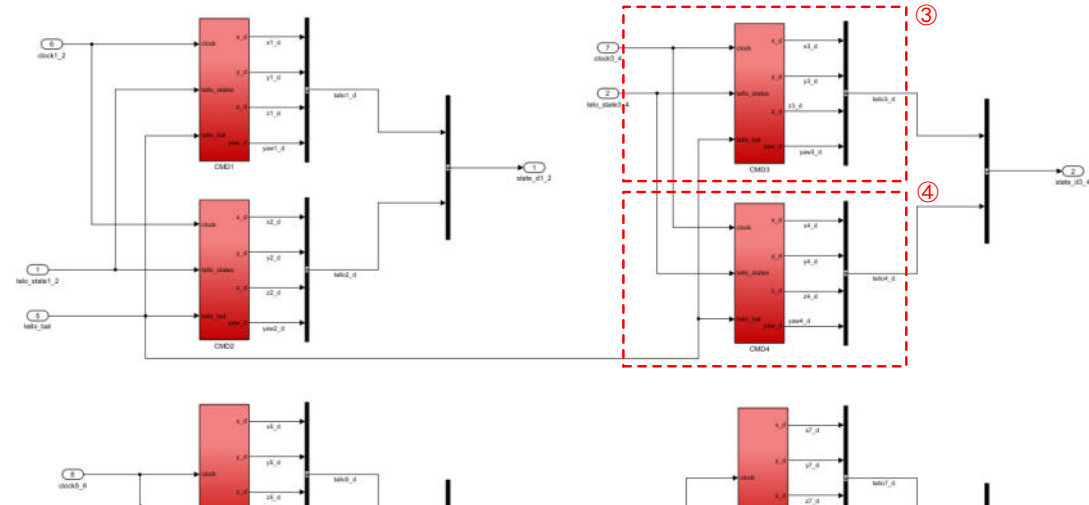


图. 使用多架多旋翼

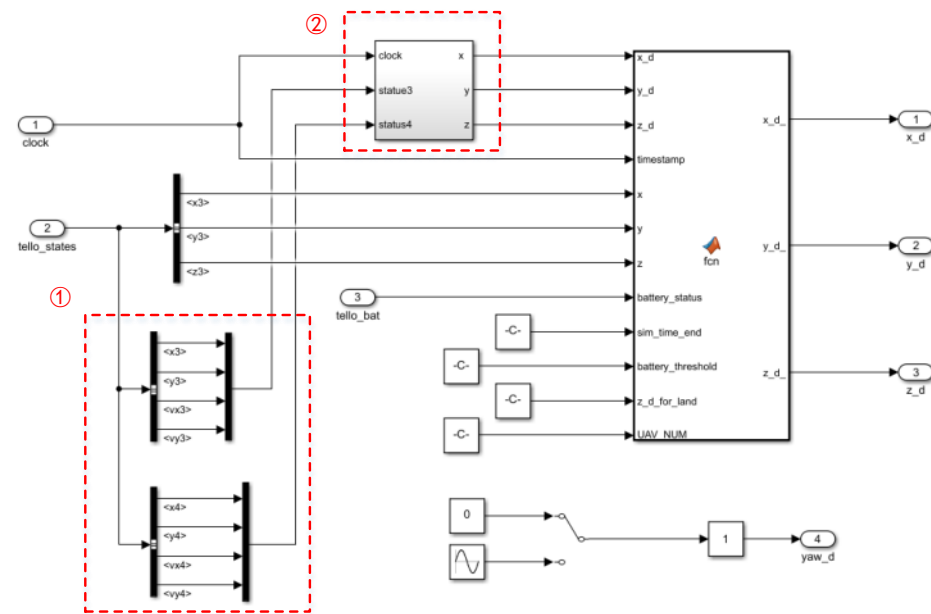


图. 引入位置和速度反馈

# 5.实飞实验



## □ 实验步骤-实飞

### (3) 步骤三：系统启动流程

#### ➤ 启动OptiTrack

打开一个新终端，运行命令 “roslaunch mocap\_optitrack multi\_rigidbody8.launch”;

#### ➤ 启动tello\_driver

打开一个新终端，运行命令 “roslaunch tello\_driver tello\_node.launch”;

#### ➤ 起飞无人机

打开一个新终端，运行命令 “roslaunch tello Tello\_takeoff\_all”，可以看到两架多旋翼起飞并保持悬停在正上方高度1米位置；

#### ➤ 运行MATLAB控制程序

点击运行 “e5\_4\_Avoidance\_two.slx”文件，可以看到两架多旋翼趋向目标位置，在此过程中相遇于中间某个位置，然后进行避障，最后到达各自的目标位置。

#### ➤ 5) 降落Tello

打开一个新终端，运行命令 “roslaunch tello Tello\_land\_all”，在两架多旋翼降落后，结束所有终端。

# 第八章避障控制器设计

## 实飞实验

# 5.实飞实验

## □ 实飞结果

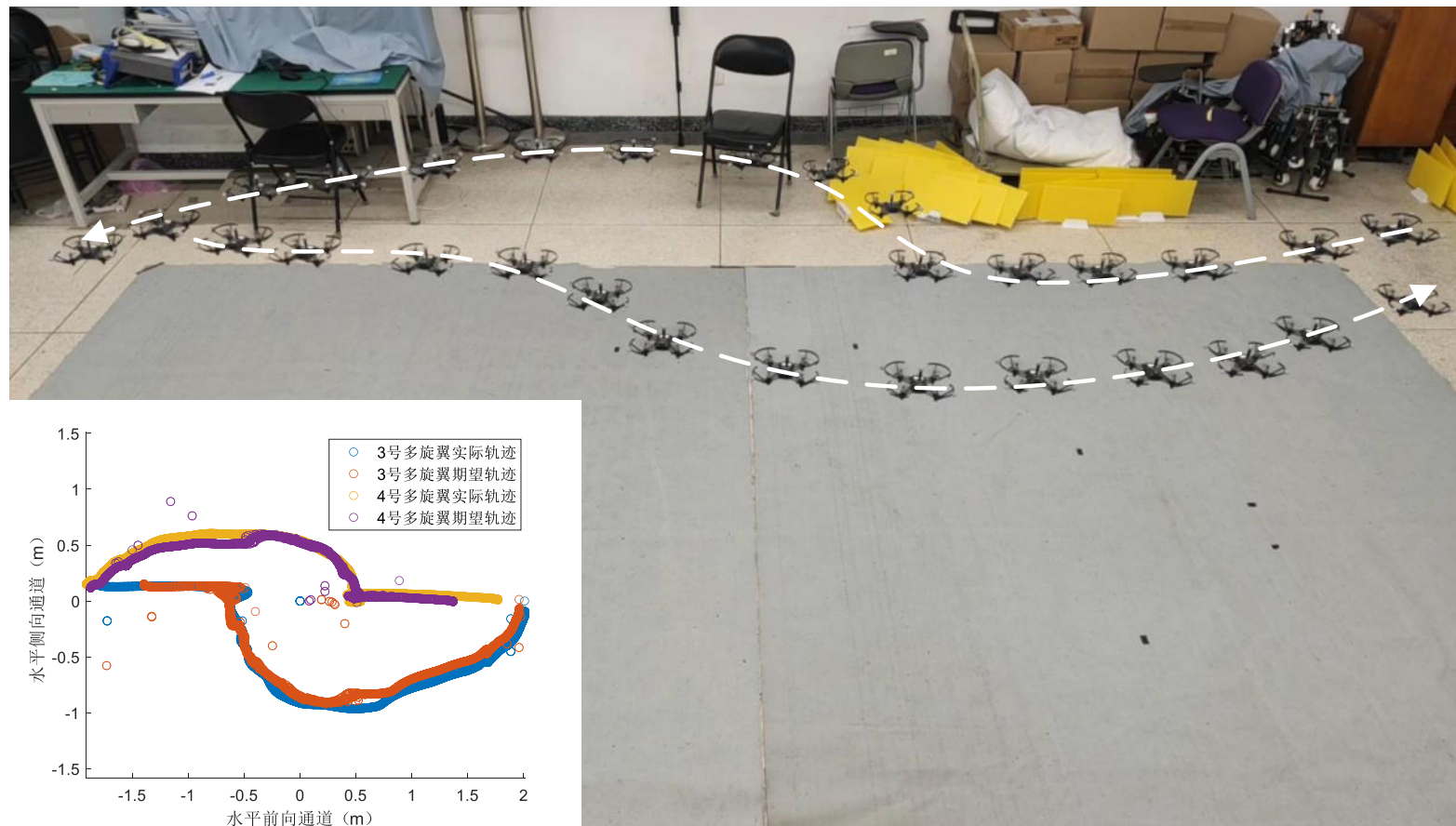


图. 实飞结果

# 5.实飞实验

## □ 补充：路径跟随+避障

全局势场可以通过叠加期望路径、目标航路点和障碍物的势场获得。

根据势场叠加的结果，将局部期望位置表示为

$$\mathbf{p}_d = \mathbf{p} + \mathbf{p}_{d, \text{ waypoint, path}} + \mathbf{p}_{d, \text{ waypoint, obstacle}}$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{p}_{d, \text{ waypoint, path}} = \text{sat}_{\text{gd}}(k_1(\mathbf{p}_{\text{wp}} - \mathbf{p}) + k_2(\mathbf{p}_{\text{wp, perp}} - \mathbf{p}), a_0) \\ \mathbf{p}_{\text{wp, perp}} = \mathbf{p}_{\text{wp}} + (\mathbf{p}_{\text{wp, last}} - \mathbf{p}_{\text{wp}}) \frac{(\mathbf{p} - \mathbf{p}_{\text{wp}})^T (\mathbf{p}_{\text{wp, last}} - \mathbf{p}_{\text{wp}})}{\|\mathbf{p}_{\text{wp}} - \mathbf{p}_{\text{wp, last}}\|^2} \\ \mathbf{p}_{d, \text{ waypoint, obstacle}} = \text{sat}_{\text{gd}}(k_3(\mathbf{p}_{\text{wp}} - \mathbf{p} - k_0 \mathbf{v}) + \sum_{i=1}^{m_o} b_i (\mathbf{p} - \mathbf{p}_{o,i} + k_0 \mathbf{v}), a_0) \\ b_i = k_4 \frac{1}{(\|\mathbf{p} - \mathbf{p}_{o,i} + k_0 \mathbf{v}\| - r_{o,i} - k_0 a_0)^2} \frac{1}{\|\mathbf{p} - \mathbf{p}_{o,i} + k_0 \mathbf{v}\|}, \quad i = 1, \dots, m_o \end{cases}$$

对于偏航角，可以规定机头始终指向下一个航路点，定义

$$\mathbf{e}_p \triangleq \mathbf{p} - \mathbf{p}_d$$

那么

$$\psi_d = \text{atan2}(-e_{p,1}, -e_{p,2})$$

其中， $e_{p,i}$  是  $e_p$  的第  $i$  个元素。

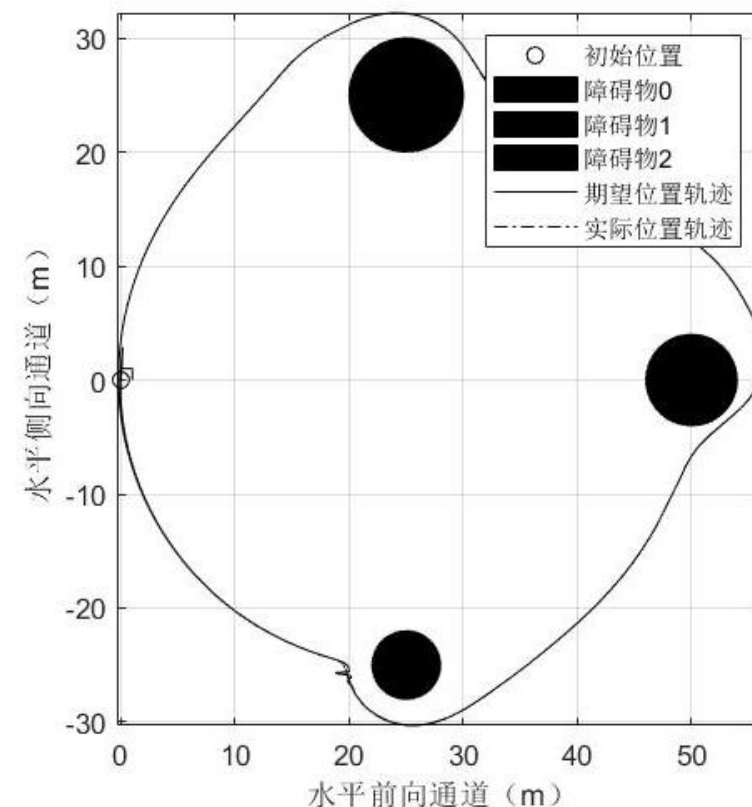


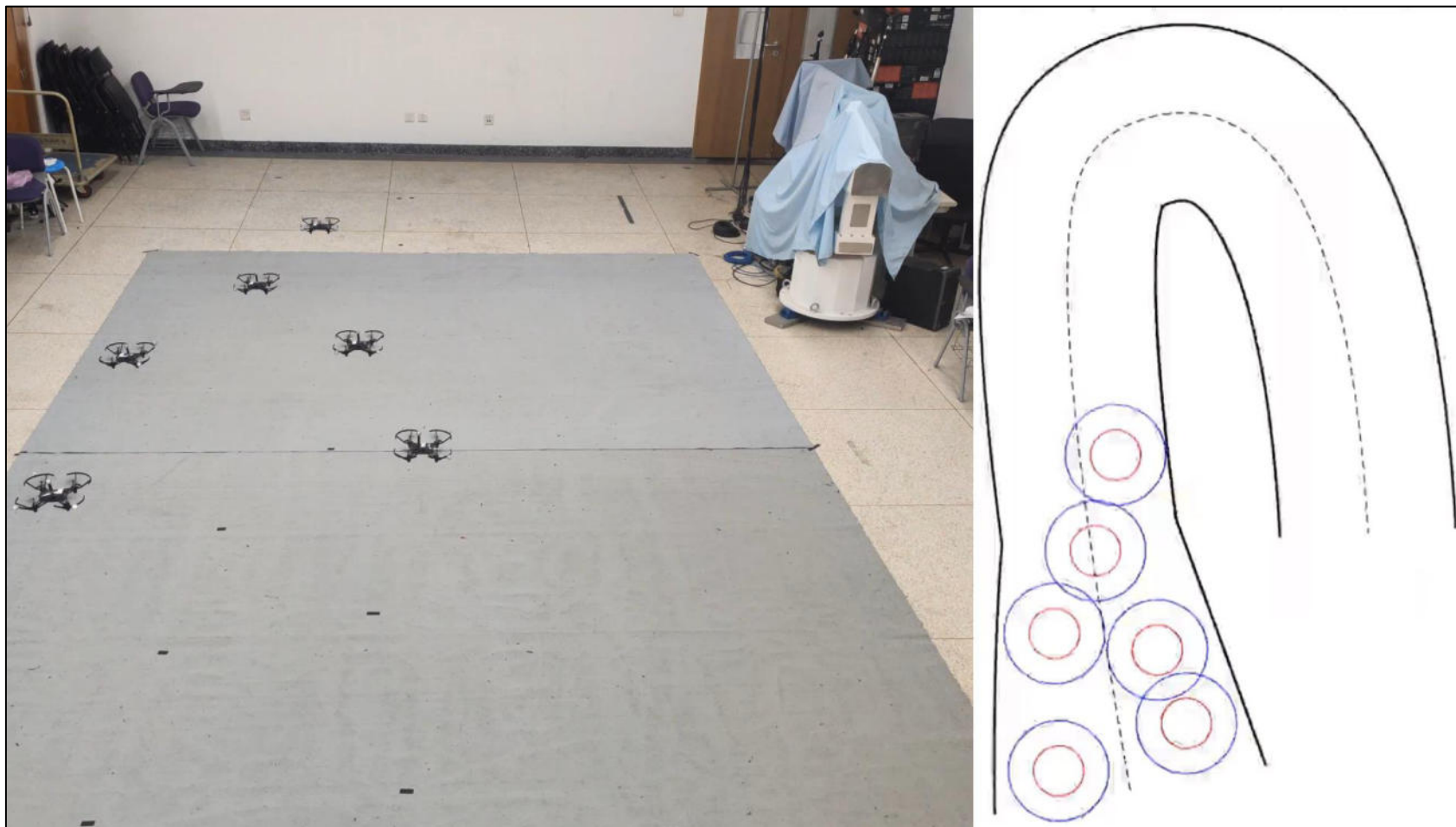
图. 路径跟随和避障仿真结果



# 5.实飞实验



□ 补充：管道+避碰



# 大纲



1. 基本原理
2. 基础实验
3. 分析实验
4. 设计实验
5. 实飞实验
6. 本章小结



# 6.本章小结



- (1) 通过复现基础实验，了解避障控制的模块组成与实现方法，熟悉单机避障期望路径求解原理。
- (2) 通过分析实验，了解避障算法中各参数改变对避障结果的影响，进而可以用来调节多旋翼收敛到目标航路点和避开障碍物的快慢。
- (3) 在设计实验中，通过设计多机避障实验，进一步掌握人工势场法用于动态避障，理解局部势场叠加成全局势场的原理。
- (4) 通过实飞实验，自主设计双机避障实验进一步掌握设计方法，并对通过实飞数据辨识的模型的正确性加以验证。

如有疑问，请到 <https://rflysim.com/course> 查询更多信息。

# 致谢



感谢可靠飞行控制研究组同学



杨兰江



毛鹏达

为本节课程准备做出的贡献

# 谢谢！

全 权

qq\_buaa@buaa.edu.cn

可靠飞行控制研究组



<http://rfly.buaa.edu.cn>