

微小型固定翼无人机飞行控制设计与实践

第10章 集群飞行控制实验

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

ni 北京航空航天大学

微小型固定翼无人机
飞行控制设计与实践



FIXED-WING UNMANNED
AERIAL VEHICLE

中国航空工业集团有限公司 北京航空航天大学

大纲



1. 基本原理

2. 基础实验

3. 分析实验

4. 设计实验

1.实验原理

在自然界中，许多生物都存在群体行为。这些生物的组织结构虽然非常简单，但是对于比较复杂的任务，如蜂群觅食、蚁群运输、大雁迁徙、鱼类游弋等，都可以通过彼此的交流协作来完成。集群无人机涉及大量但不复杂的智能体，它们可以通过局部交互或感知达到预期任务效果。



(a) 蚁群

(b) 蜂群



(c) 鸽群

(d) 鱼群

生物群体行为



固定翼无人机集群



1.实验原理

□ 分类

(1) 集中式控制 (Centralized Control) : 在集中式控制系统中, 所有的决策制定和信息处理都集中在一个中心控制节点或者一组中心节点上。

- 优点: 决策过程简单明确, 便于整体规划和协调。
- 缺点: 对中心节点的通信和计算能力有较高要求, 系统容易受到单点故障的影响, 可能导致系统性能下降或者故障。

(2) 分布式控制 (Decentralized Control) : 分布式控制系统中, 决策制定和信息处理分布在多个地点或节点上。

- 优点: 系统更具有鲁棒性和灵活性, 可以适应复杂和动态的环境。
- 缺点: 需要良好的协作和通信机制, 确保各个节点之间信息的同步和一致性。

1. 实验原理

□ 数学模型

面向固定翼无人机集群，采用六自由度全状态方程进行分析和控制比较困难。通常使用固定翼无人机的简化模型，即固定翼无人机制导模型来对集群控制算法进行开发。固定翼无人机的制导模型共有三个控制通道，分别为速度、航向和高度。

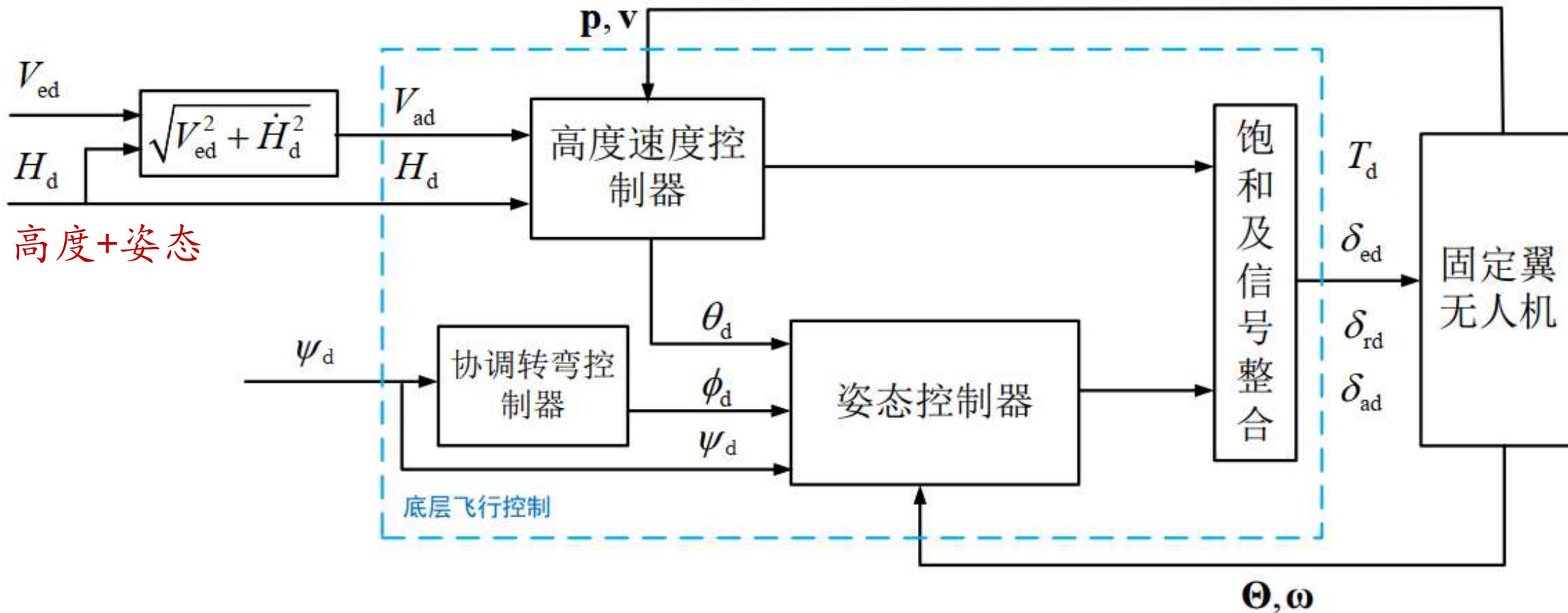
$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{p}_{x_e} = V_e \cos \psi \\ \dot{p}_{y_e} = V_e \sin \psi \\ \psi = \chi \\ V_e(s) = G_{V_e}(s) V_{ed}(s) \quad \text{速度通道} \\ \chi(s) = G_{\chi}(s) \chi_d(s) \quad \text{航向通道} \\ H(s) = G_H(s) H_d(s) \quad \text{高度通道} \end{array} \right.$$

二维平面的质点模型 $\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{u}$

期望前飞速度 $V_{ed} = \sqrt{V_{ed}^2 (\cos^2 \psi_d + \sin^2 \psi_d)} = \sqrt{v_{xd}^2 + v_{yd}^2}$

期望的偏航角为 $\psi_d = \arctan \left(\frac{v_{xd}}{v_{yd}} \right)$.

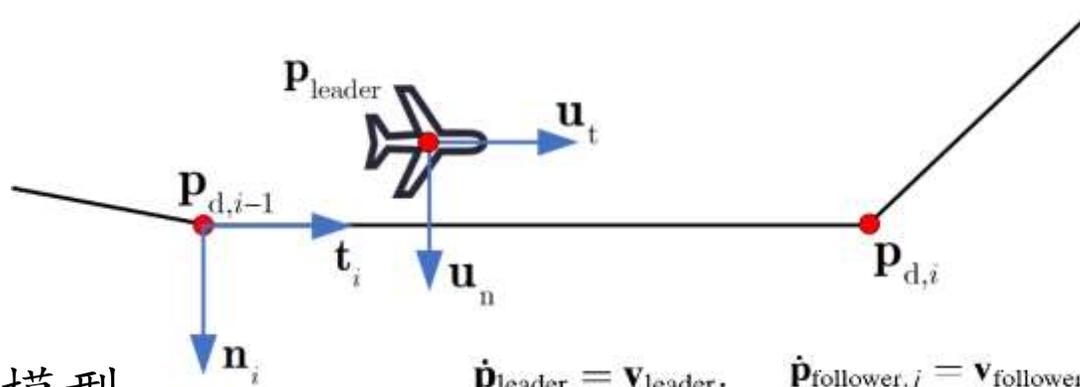
1. 实验原理



1. 实验原理



(1) 编队控制



领导者及跟随者采用质点模型

$$\dot{\mathbf{p}}_{\text{leader}} = \mathbf{v}_{\text{leader}}, \quad \dot{\mathbf{p}}_{\text{follower},j} = \mathbf{v}_{\text{follower},j}$$

第 i 段航路点侧向位置误差及其导数

$$\mathbf{e}_n = \left((\mathbf{p}_{\text{leader}} - \mathbf{p}_{d,i})^T \mathbf{t}_i \right) \mathbf{t}_i - (\mathbf{p}_{\text{leader}} - \mathbf{p}_{d,i}), \quad \dot{\mathbf{e}}_n = (\mathbf{v}_{\text{leader}}^T \mathbf{t}_i) \mathbf{t}_i - \mathbf{v}_{\text{leader}}$$

领导者的切向速度与期望速度偏差

$$\dot{\mathbf{e}}_t = \mathbf{v}_{d,i} - (\mathbf{v}_{\text{leader}}^T \mathbf{t}_i) \mathbf{t}_i$$

领导者的侧向和切向控制指令

$$\mathbf{u}_t = K_{tp} \dot{\mathbf{e}}_t + K_{ti} \int \dot{\mathbf{e}}_t$$

$$\mathbf{u}_n = K_{np} \mathbf{e}_n + K_{nd} \dot{\mathbf{e}}_n + K_{ni} \int \mathbf{e}_n$$

领导者最终控制器设计为

$$\mathbf{v}_{\text{leader}} = \mathbf{u}_t + \mathbf{u}_n$$

领导者与跟随者之间的误差

$$\mathbf{p}_{\text{leader},j} = \mathbf{p}_{\text{leader}} - \mathbf{p}_j$$

跟随者跟随领导者的控制项

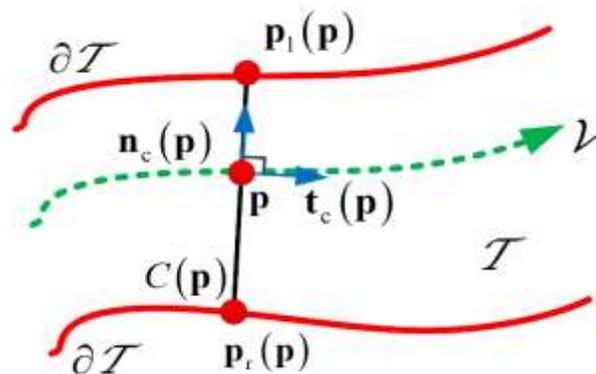
$$\mathbf{u}_f = k_p (\mathbf{d}_j - \mathbf{p}_{\text{leader},j}) + k_d \mathbf{v}_{\text{leader},j}$$

跟随者最终控制器设计为

$$\mathbf{v}_{\text{follower}} = \mathbf{u}_t + \mathbf{u}_n + \mathbf{u}_f$$

1.实验原理

(2) 基于虚拟管道的集群控制



- 曲线：曲线上的任意一点 $\mathbf{p} \in \mathcal{V}$ ，向量 $\mathbf{t}_c(\mathbf{p}) \in \mathbb{R}^2$ 为该点指向曲线前进方向的单位切向量，定义 $\mathbf{n}_c(\mathbf{p}) \in \mathbb{R}^2$ 为该点指向曲线前进正交方向的单位切向量，因此有 $\mathbf{t}_c^T(\mathbf{p}) \mathbf{n}_c(\mathbf{p}) = 0$.
- 横截线：曲线上的任意一点 $\mathbf{p} \in \mathcal{V}$ ，管道横截线的定义为

$$\mathcal{C}(\mathbf{p}) = \{\mathbf{p} + \lambda(\mathbf{p}) \mathbf{n}_c(\mathbf{p}) \in \mathbb{R}^2 \mid \lambda_l(\mathbf{p}) \leq \lambda(\mathbf{p}) \leq \lambda_r(\mathbf{p}), \lambda_l(\mathbf{p}), \lambda_r(\mathbf{p}) \in \mathbb{R}\}$$

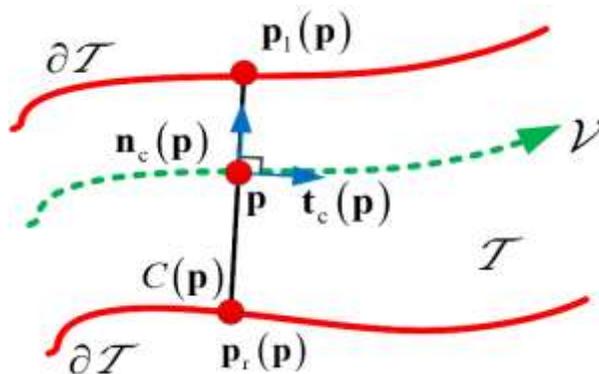
横截线的两个端点定义为

$$\mathbf{p}_l(\mathbf{p}) = \mathbf{p} + \lambda_l(\mathbf{p}) \mathbf{n}_c(\mathbf{p})$$

$$\mathbf{p}_r(\mathbf{p}) = \mathbf{p} + \lambda_r(\mathbf{p}) \mathbf{n}_c(\mathbf{p})$$

1.实验原理

(2) 基于虚拟管道的集群控制



横截线的中点 $\mathbf{p}_m \in \mathcal{C}(\mathbf{p})$ 可以表示为 $\mathbf{p}_m = m(\mathbf{p}) = \frac{1}{2}(\mathbf{p}_l(\mathbf{p}) + \mathbf{p}_r(\mathbf{p}))$ 管道的宽度为 $2r_t(\mathbf{p})$

其中

$$r_t(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} |\lambda_l(\mathbf{p}) - \lambda_r(\mathbf{p})|$$

二维管道：管道由曲线上各点的横截线组合而成 $\mathcal{T} = \cup_{\mathbf{p} \in \mathcal{V}} \mathcal{C}(\mathbf{p})$

二维曲线管道的边界 \mathcal{T} 可表示为 $\partial\mathcal{T} = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 | \mathbf{x} = \mathbf{p}_l(\mathbf{p}) \cup \mathbf{p}_r(\mathbf{p}), \mathbf{p} \in \mathcal{V}\}$

无人机的速度指令：

$$\mathbf{v}_{c,i} = \text{sat}(\mathbf{v}_{f,i} + \mathbf{v}_{m,i} + \mathbf{v}_{t,i}, v_{\max})$$

其中 $\mathbf{v}_{f,i}$ 为前飞控制项、 $\mathbf{v}_{m,i}$ 为无人机避障控制项， $\mathbf{v}_{t,i}$ 虚拟管道保持项， v_{\max} 无人机的最大飞行速度

大纲



1. 基本原理

2. 基础实验

3. 分析实验

4. 设计实验



2.基础实验：实验目标

■ 准备

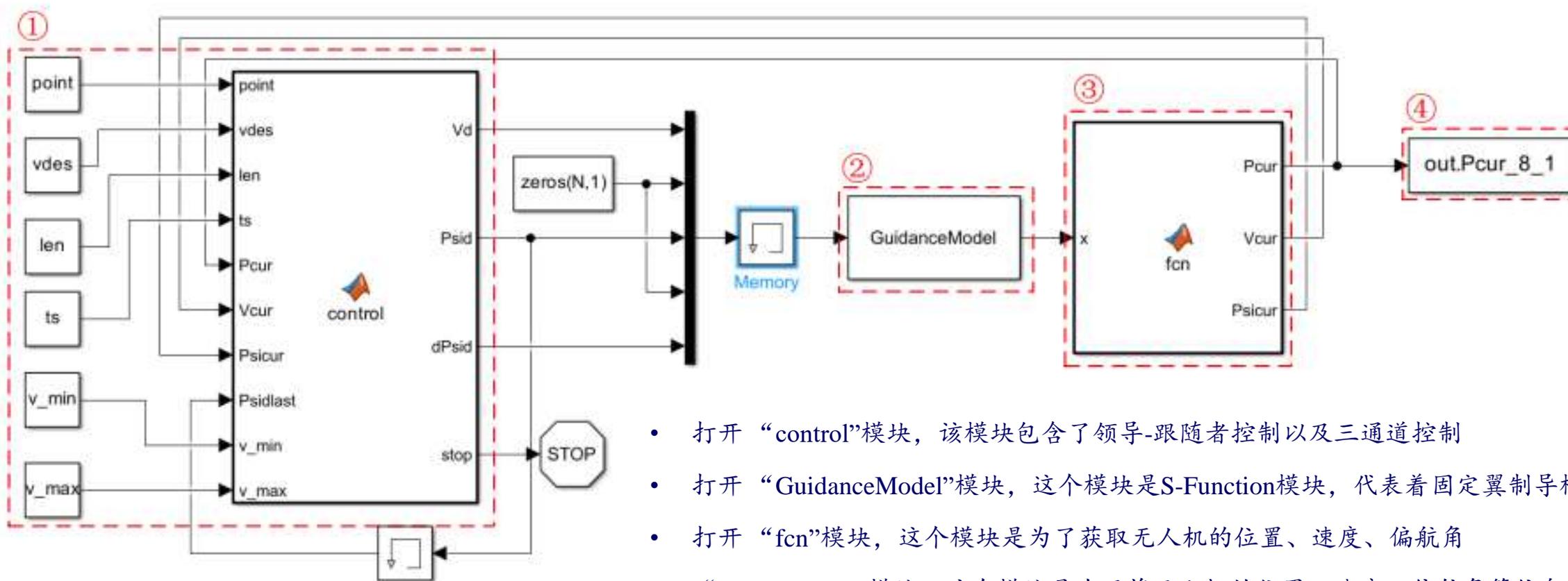
- (1) 软件：[MATLAB R2022b](#)或以上版本。
- (2) 程序：实验指导包“e8\e8-1”。实验指导包中包括固定翼无人机制导模型、固定翼无人机集群飞行基础实验示例。其中“GuidanceModel.m”为固定翼无人机制导模型，“initFormation.m”为仿真的初始化文件，“formation_9_1.slx”为固定翼集群编队飞行的仿真文件。

■ 目标

- (1) 了解固定翼无人机制导模型，掌握固定翼无人机编队飞行方法。
- (2) 设计无人机飞行路径，使用Simulink完成固定翼无人机编队飞行。

2.基础实验：实验模块介绍

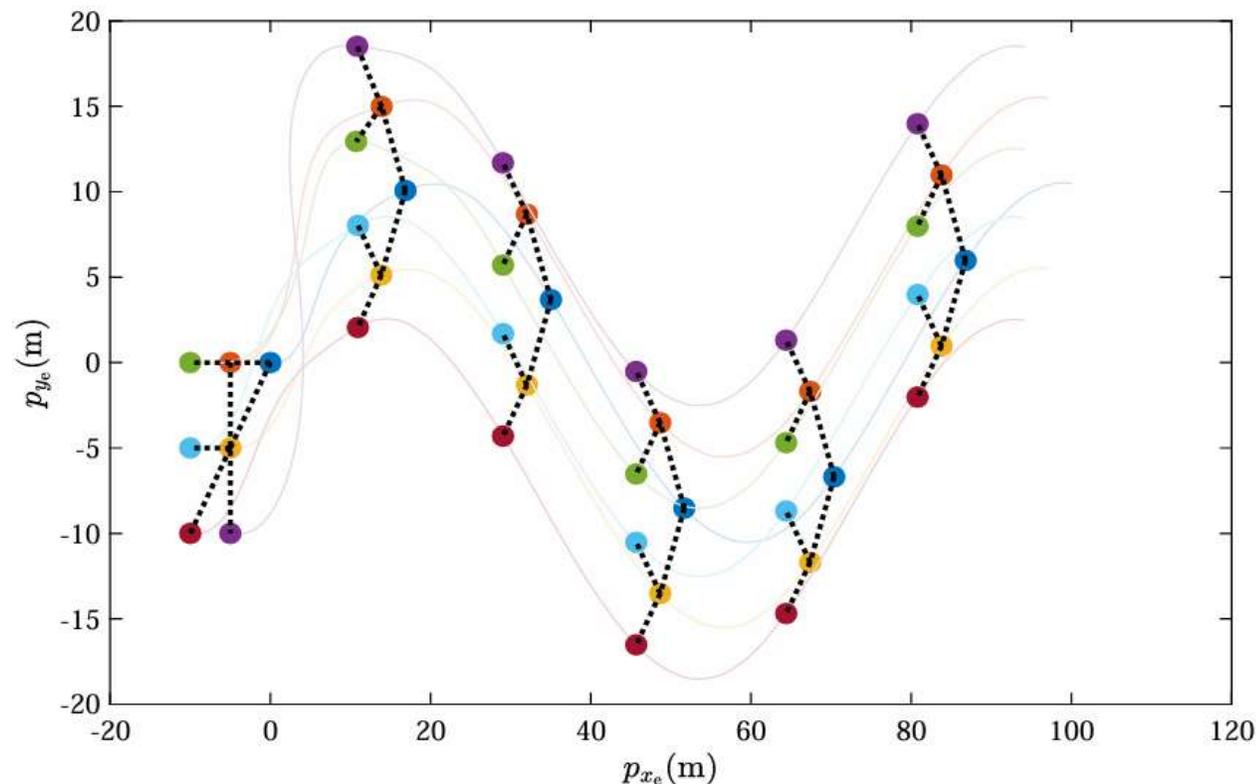
(1) 打开Simulink 文件 “e8/e8-1/formation_8_1.slx”，可以点开各个模块查看具体结构。



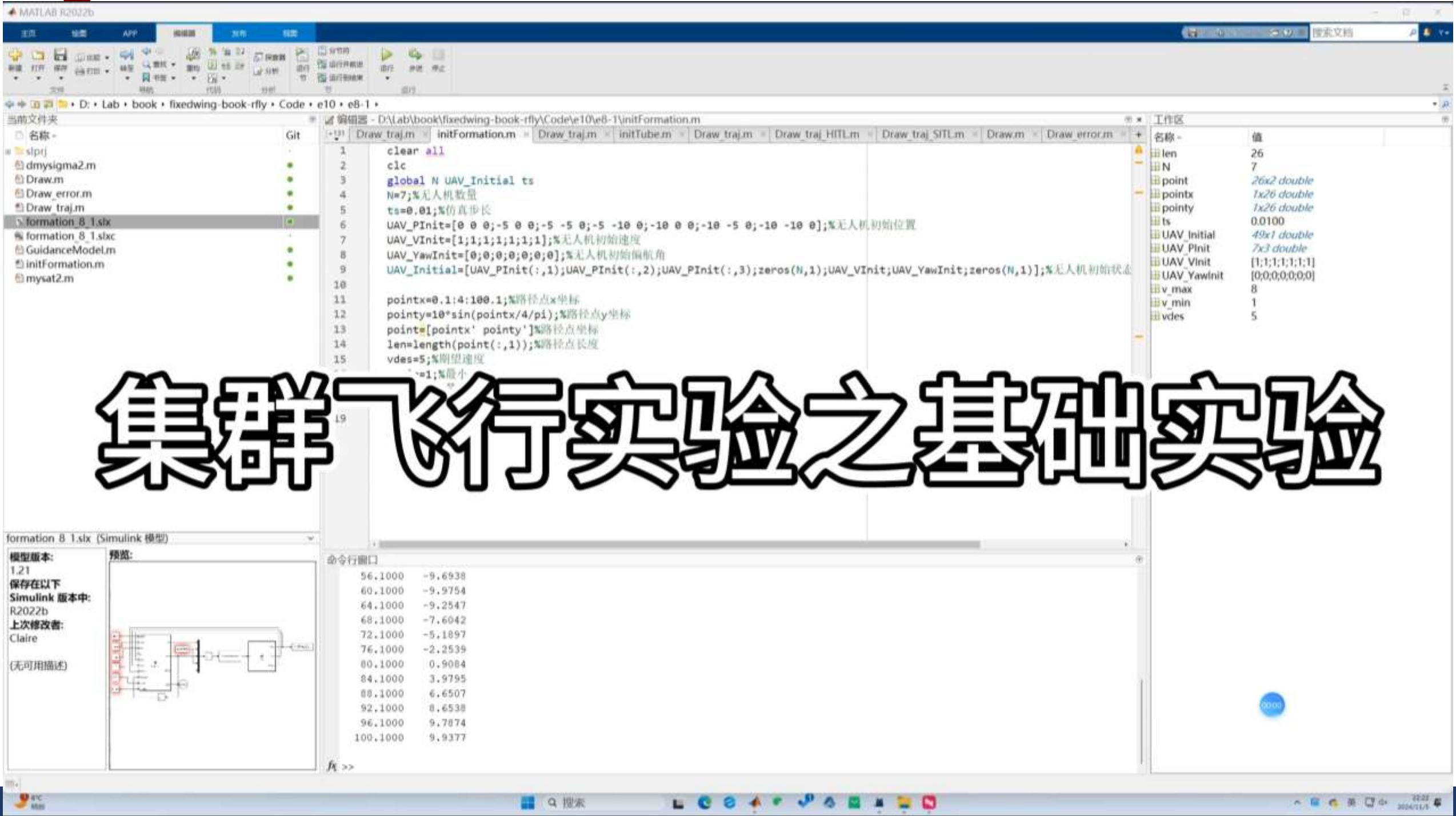
- 打开 “control”模块，该模块包含了领导-跟随者控制以及三通道控制
- 打开 “GuidanceModel”模块，这个模块是S-Function模块，代表着固定翼制导模型
- 打开 “fcn”模块，这个模块是为了获取无人机的位置、速度、偏航角
- “out.Pcur_8_1”模块，这个模块是为了将无人机的位置、速度、偏航角等信息输出到工作区便于绘图

2.基础实验：仿真

(2) 运行“e8\e8-1\initFormation.m”文件，初始化参数。运行仿真文件“e8\e8-1\formation_8_1.slx”，最后运行“e8\e8-1\Draw_traj”可以得到仿真结果，如下图所示。



实验“e8-1”中固定翼无人机编队飞行轨迹，来源于“e8/e8-1/Draw_traj.m”



集群飞行实验之基础实验

```
1 clear all
2 clc
3 global N UAV_Initial ts
4 N=7;%无人机数量
5 ts=0.01;%仿真步长
6 UAV_PInit=[0 0 0;-5 0 0;-5 -5 0;-5 -10 0;-10 0 0;-10 -5 0;-10 -10 0];%无人机初始位置
7 UAV_VInit=[1;1;1;1;1;1;1];%无人机初始速度
8 UAV_YawInit=[0;0;0;0;0;0;0];%无人机初始偏航角
9 UAV_Initial=[UAV_PInit(:,1);UAV_PInit(:,2);UAV_PInit(:,3);zeros(N,1);UAV_VInit;UAV_YawInit;zeros(N,1)];%无人机初始状态
10
11 pointx=0.1:4:100.1;%路径点x坐标
12 pointy=10*sin(pointx/4/pi);%路径点y坐标
13 point=[pointx' pointy'];%路径点坐标
14 len=length(point(:,1));%路径点长度
15 vdes=5;%期望速度
16 v_min=1;%最小
```

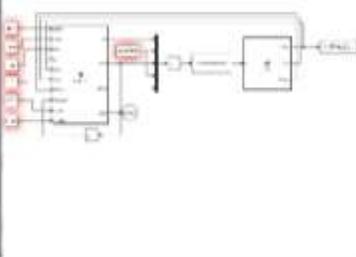
名称	值
len	26
N	7
point	26x2 double
pointx	1x26 double
pointy	1x26 double
ts	0.0100
UAV_Initial	49x1 double
UAV_PInit	7x3 double
UAV_VInit	[1;1;1;1;1;1;1]
UAV_YawInit	[0;0;0;0;0;0;0]
v_max	8
v_min	1
vdes	5

命令行窗口

96.1000	-9.6938
60.1000	-9.9754
64.1000	-9.2547
68.1000	-7.6042
72.1000	-5.1897
76.1000	-2.2539
80.1000	0.9084
84.1000	3.9795
88.1000	6.6507
92.1000	8.6538
96.1000	9.7874
100.1000	9.9377

formation_8_1.slx (Simulink 模型)

模型版本: 1.21
保存在以下 Simulink 版本中: R2022b
上次修改者: Claire
(无可用描述)



大纲



1. 基本原理

2. 基础实验

3. 分析实验

4. 设计实验



3.分析实验：实验目标

■ 准备

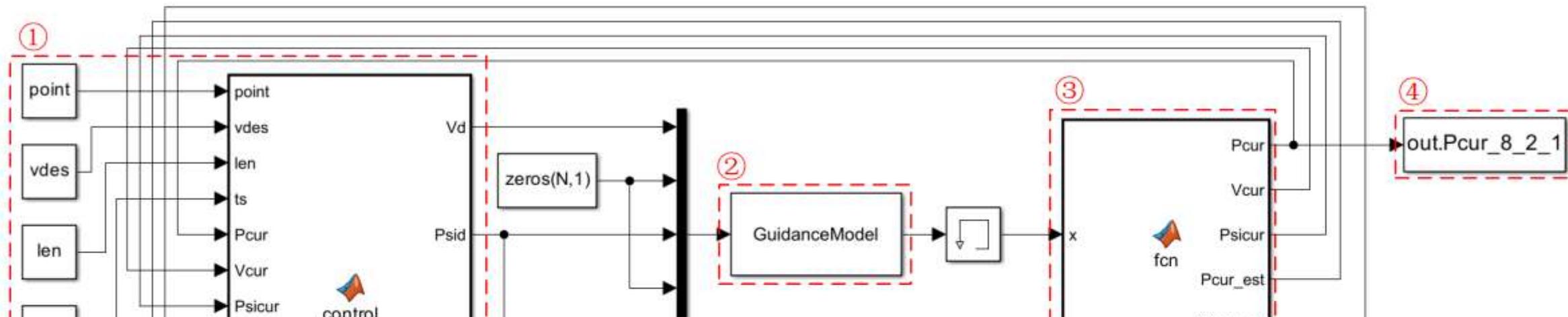
- (1) 软件：MATLAB R2022b 或以上版本。
- (2) 程序：实验指导包 “e8/e8-2”。实验指导包中包括固定翼无人机制导模型、固定翼无人机集群飞行分析实验示例。例如 “GuidanceModel.m” 为固定翼无人机制导模型，“initFormation.m” 为仿真的初始化文件，“formation_8_1.slx” 为固定翼集群编队飞行的仿真文件、“formation_8_2_1.slx” 为加入噪声情况下固定翼集群编队飞行的仿真文件、“formation_8_2_2.slx” 为加入延迟情况下固定翼集群编队飞行的仿真文件、“formation_8_2_3.slx” 为加入噪声和延迟情况下固定翼集群编队飞行的仿真文件。

■ 目标

考虑固定翼无人机编队飞行中存在的噪声、延迟等影响，观察固定翼无人机编队飞行情况，分析方法的不足。

3.分析实验：仿真

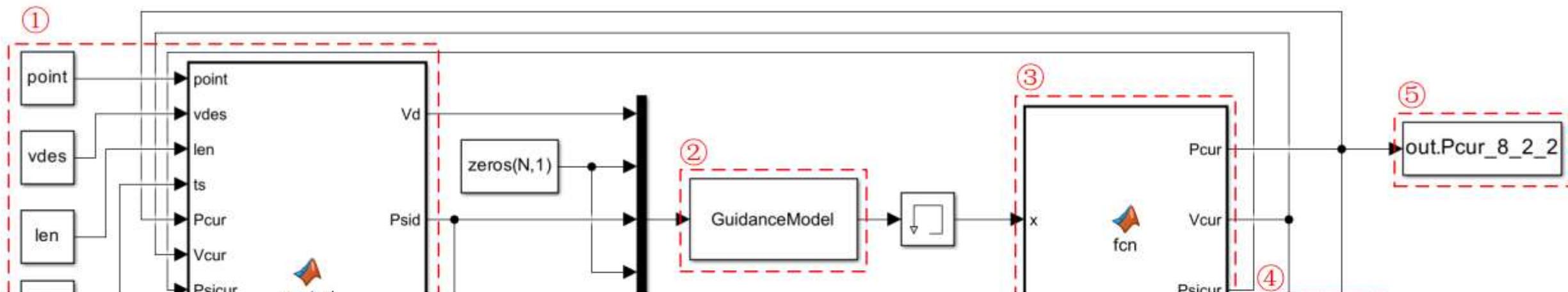
(1) 情况一：加入噪声下固定翼无人机编队飞行仿真，来源于 “e8/e8-2/formation_8_2_1.slx”



- 控制器模块虚线框①“control”用以设计控制器，实现无人机的控制；
- 固定翼仿真模型模块虚线框②“GuidanceModel”用于接收控制器输出的控制量，并输出固定翼无人机的当前状态；
- 无人机状态数据转换模块虚线框③，该模块输入为 “GuidanceModel” 制导模型传递的状态量 “x”，输出当前时刻的位置 “Pcur”、速度 “Vcur”、偏航 “Psicur”、估计位置 “Pcur_est”、速度 “Vcur_est”；
- 对位置量Pcur，使用了一个 To workspace 模块将其输出为 “out.Pcur_8_2_1”，如虚线框④所示。

3.分析实验：仿真

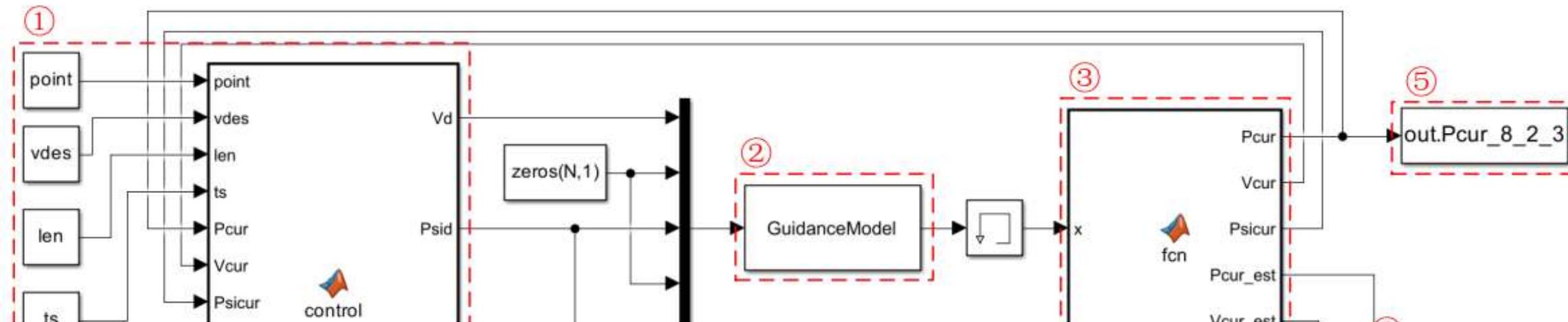
(2) 情况二：加入延迟下固定翼无人机编队飞行仿真，来源于 “e8/e8-2/formation_8_2_2.slx”



- 控制器模块虚线框①“control”用以设计控制器，实现无人机的控制；
- 固定翼仿真模型模块虚线框②“GuidanceModel”用于接收控制器输出的控制量，并输出固定翼无人机的当前状态；
- 无人机状态数据转换模块虚线框③，该模块输入为 “GuidanceModel” 制导模型传递的状态量 “x”，输出当前时刻的位置 “Pcur”、速度 “Vcur”、偏航 “Psicur”；
- 状态延迟模块虚线框④，该模块对无人机位置和速度做延迟处理，得到延迟后的位置和速度；
- 对位置量 “Pcur”，使用了一个 “To workspace” 模块将其输出为 “out.Pcur_8_2_2”，如虚线框⑤所示。

3.分析实验：仿真

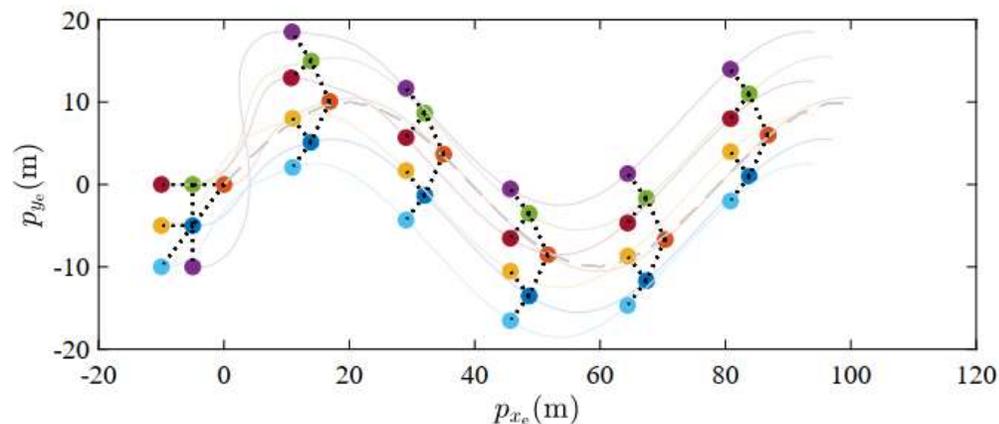
(3) 情况三：加入噪声及延迟下固定翼无人机编队飞行仿真，来源于 “e8/e8-2/formation_8_2_3.slx”



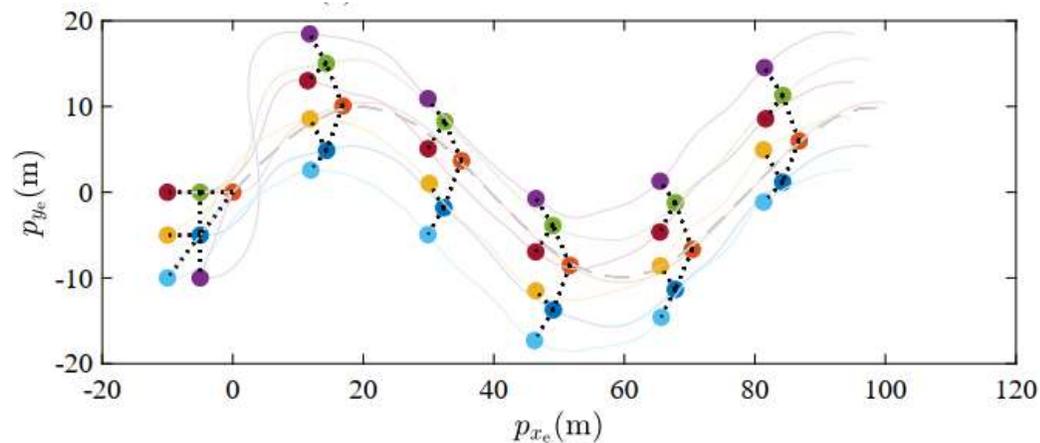
- 模块 “control”用以设计控制器，实现无人机的控制；
- 固定翼仿真模型模块虚线框 “GuidanceModel” 用于接收控制器输出的控制量，并输出固定翼无人机的当前状态；
- 无人机状态数据转换模块，该模块输入为 “GuidanceModel” 制导模型传递的状态量 “x”，输出当前时刻的位置 “Pcur”、速度 “Vcur”、偏航 “Psicur”、估计位置 “Pcur_est”、速度 “Vcur_est”；
- 状态延迟模块，该模块对无人机位置和速度做延迟处理，得到延迟后的位置和速度；
- 对位置量 “Pcur”，使用了一个 “Toworkspace” 模块将其输出为 “out.Pcur_9_2_3”。

3.分析实验：仿真

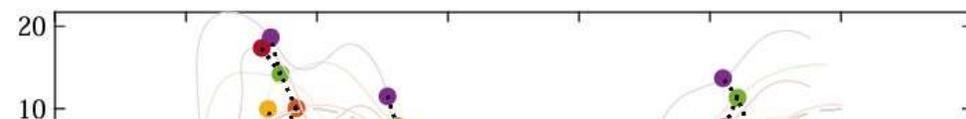
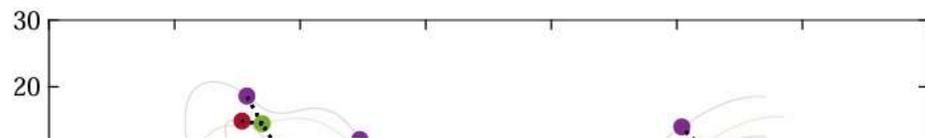
(4) 运行“e8\8-2\Draw_traj.m”文件，可以得到仿真结果，如下图所示。



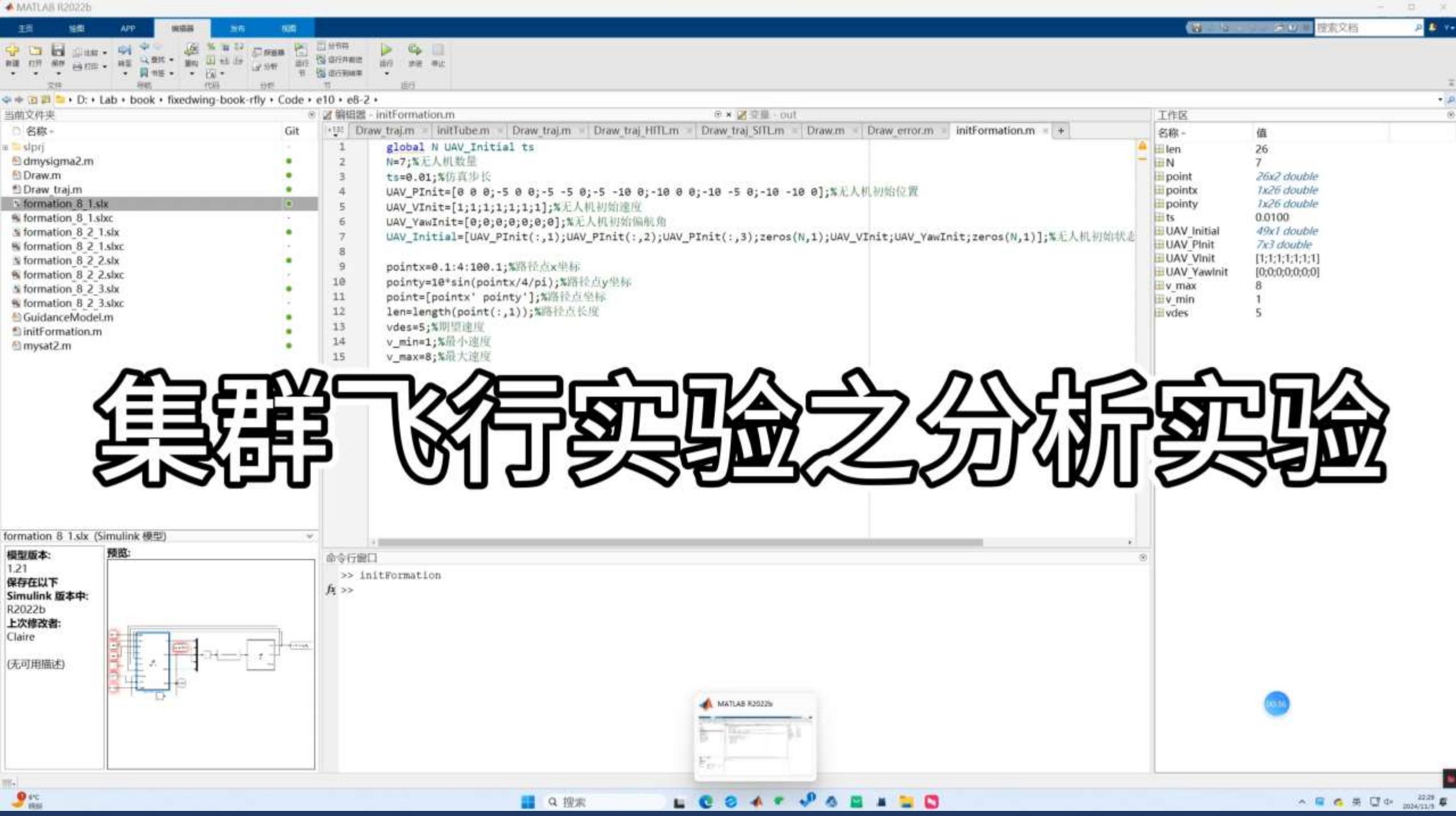
(a)无噪声无延迟下无人机编队轨迹



(b)有噪声无延迟下无人机编队轨迹



- 观察仿真结果，能够发现：加入噪声和延迟环节对于固定翼无人机编队的稳定发生了影响。这是因为由于存在噪声和延迟的因素，无人机反馈收到的位置和速度信息都存在着偏差。噪声代表着获取到的无人机位置并不准确，延迟则代表着无人机跟踪的可能是上一时刻的期望位置。这些干扰信息势必会对无人机编队所维持的结构产生影响。仿真结果也显示了无人机编队存在振荡的现象。



集群飞行实验之分析实验

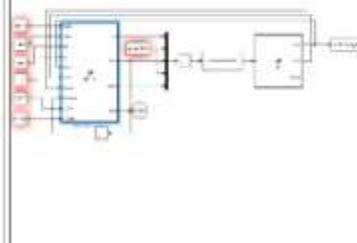
```
1 global N UAV_Initial ts
2 N=7;%无人机数量
3 ts=0.01;%仿真步长
4 UAV_PInit=[0 0 0;-5 0 0;-5 -5 0;-5 -10 0;-10 0 0;-10 -5 0;-10 -10 0];%无人机初始位置
5 UAV_VInit=[1;1;1;1;1;1;1];%无人机初始速度
6 UAV_YawInit=[0;0;0;0;0;0;0];%无人机初始偏航角
7 UAV_Initial=[UAV_PInit(:,1);UAV_PInit(:,2);UAV_PInit(:,3);zeros(N,1);UAV_VInit;UAV_YawInit;zeros(N,1)];%无人机初始状态
8
9 pointx=0.1:4:100.1;%路径点x坐标
10 pointy=10*sin(pointx/4/pi);%路径点y坐标
11 point=[pointx' pointy'];%路径点坐标
12 len=length(point(:,1));%路径点长度
13 vdes=5;%期望速度
14 v_min=1;%最小速度
15 v_max=8;%最大速度
```

名称	值
len	26
N	7
point	26x2 double
pointx	1x26 double
pointy	1x26 double
ts	0.0100
UAV_Initial	49x1 double
UAV_PInit	7x3 double
UAV_VInit	[1;1;1;1;1;1;1]
UAV_YawInit	[0;0;0;0;0;0;0]
v_max	8
v_min	1
vdes	5

```
>> initFormation
[] >>
```

formation_8_1.slx (Simulink 模型)

模型版本: 1.21
保存在以下 Simulink 版本中: R2022b
上次修改者: Claire
(无可用描述)



大纲



1. 基本原理

2. 基础实验

3. 分析实验

4. 设计实验



4.设计实验：实验目标

■ 准备

(1) 软件：MATLAB R2022b 或以上版本，RflySim 工具链。RflySim 工具链提供了微小无人机固定翼无人机硬件在环仿真环境。

(2) 程序：实验指导包“e8/e8-3”。实验指导包中包括固定翼无人机制导模型、固定翼无人机集群飞行设计实验示例。例如“GuidanceModel.m”为固定翼无人机制导模型，“initTube.m”为仿真的初始化文件，“Tube.slx”为基于虚拟管道的固定翼集群飞行的仿真文件，“Tube_noise.slx”为加入噪声情况下基于虚拟管道的固定翼集群飞行的仿真文件，“Tube_delay.slx”为加入延迟情况下基于虚拟管道的固定翼集群飞行的仿真文件，“Tube_noise_delay.slx”为加入噪声和延迟情况下基于虚拟管道的固定翼集群飞行的仿真文件。“SmallFixedWingUAVnoctrlHIL.dll”为固定翼无人机的模型文件，“Tube_HITL_identification.slx”为对无人机模型进行参数辨识的仿真文件，“init_Tube_SITL.m”为软件仿真的初始化文件，“Tube_SITL.slx”为软件仿真文件，“init_Tube_HITL.m”为硬件在环的初始化文件，“Tube_HITL.slx”为硬件在环的仿真文件。

(3) 硬件：CubePilot/Pixhawk 自驾仪四个，遥控器及接收机。

■ 目标

(1) 进行基于虚拟管道的飞行控制器设计，从而完成集群飞行任务。

(2) 分别加入噪声和延迟，观察并分析固定翼集群的飞行效果，与章节3中固定翼集群编队飞行进行对比。



4.设计实验：实验设计

□ 分布式控制器设计：基于虚拟管道的飞行控制器

(1) 引导集群沿虚拟管道向前飞行

在无人机集群中，第*i*架无人机沿虚拟管道向前飞行的控制分量为

$$\mathbf{v}_{f,i} = v_{f,i} \mathbf{t}_c(\mathbf{p}_i)$$

其中 $v_{f,i}$ 为沿虚拟管道飞行控制分量的大小，即期望的前飞速度， $\mathbf{t}_c(\mathbf{p}_i)$ 为当前第*i*架无人机对应曲线上点的前进方向单位切向量。

4.设计实验：实验设计

(2) 无人机之间防碰撞

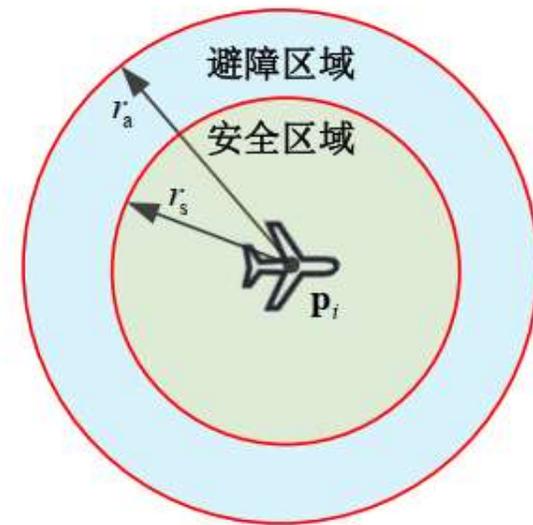
定义 $\tilde{\mathbf{p}}_{ij} = \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j$ ，其中 \mathbf{p}_i 和 \mathbf{p}_j 分别为第*i*架和第*j*架的无人机位置

第*i*架无人机的安全区域定义为 $\mathcal{S}_i = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 \mid \|\mathbf{x} - \mathbf{p}_i\| \leq r_s\}$ ，其中 r_s 为第*i*架无人机的安全半径

对于集群中的无人机，任意两架无人机不发生碰撞可表示为 $\mathcal{S}_i \cap \mathcal{S}_j = \emptyset$

第*i*架无人机避障区域表示为 $\mathcal{A}_i = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 \mid \|\mathbf{x} - \mathbf{p}_i\| \leq r_a\}$ ，其中 r_a 为第*i*架无人机的避障半径

如果存在 $\mathcal{A}_i \cap \mathcal{S}_j \neq \emptyset$ 即 $\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\| \leq r_s + r_a$ ，第*j*架无人机应该躲避第*i*架无人机



4.设计实验：实验设计

对于第 i 架和第 j 架无人机防碰撞，这里构造了一个屏障函数

$$V_{m,ij} = \frac{k_2 \sigma_m (\|\tilde{\mathbf{p}}_{ij}\|)}{(1 + \varepsilon_m) \|\tilde{\mathbf{p}}_{ij}\| - 2r_s s\left(\frac{\|\tilde{\mathbf{p}}_{ij}\|}{2r_s}, \varepsilon_s\right)}$$

其中， $\sigma_m(x) = \sigma(x, 2r_s, r_a + r_s)$

光滑冲击函数为

近似光滑饱和函数

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

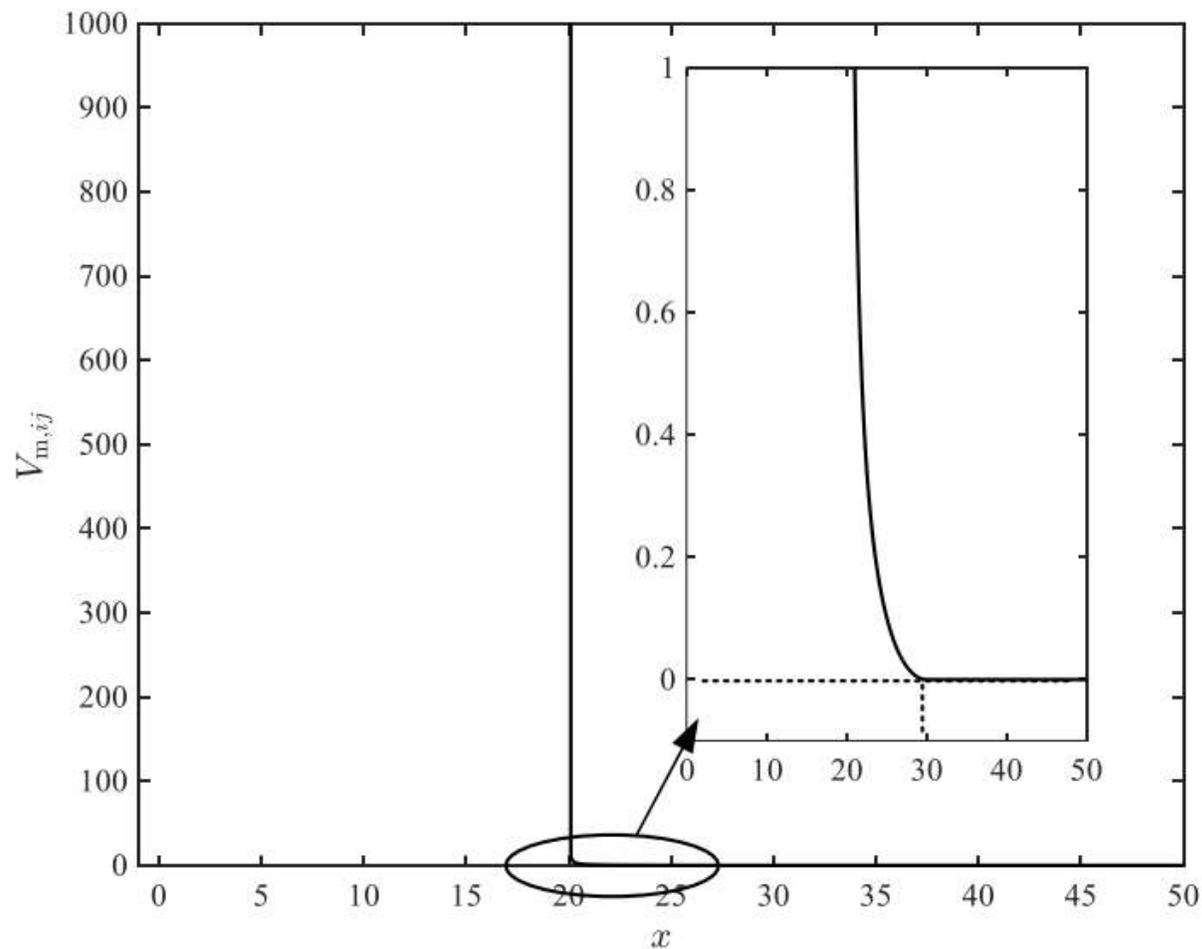
$$s(x, \varepsilon_s) = \begin{cases} x & 0 \leq x \leq x_1 \\ (1 - \varepsilon_s) + \sqrt{\varepsilon_s^2 - (x - x_2)^2} & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 1 & x_2 \leq x \end{cases}$$

其中， $A = -2/(d_1 - d_2)^3$, $B = 3(d_1 + d_2)/(d_1 - d_2)^3$, $C = -6d_1d_2/(d_1 - d_2)^3$, $D = d_2^2(3d_1 - d_2)/(d_1 - d_2)^3$

$$x_2 = 1 + \varepsilon_s / \tan 67.5^\circ, \quad x_1 = x_2 - \sin 45^\circ \varepsilon_s$$

4.设计实验：实验设计

$$r_s = 10, r_a = 20, \varepsilon_m = 10^{-6}, k_2 = 1$$



4.设计实验：实验设计

屏障函数具有以下特征：

$\partial V_{m,ij}/\partial \|\tilde{\mathbf{p}}_{ij}\| \leq 0$ ， $V_{m,ij}$ 是一个关于 $\|\tilde{\mathbf{p}}_{ij}\|$ 的非增函数；

如果 $\|\tilde{\mathbf{p}}_{ij}\| > r_a + r_s$ ，意味着 $\mathcal{A}_i \cap \mathcal{S}_j = \emptyset$ 和 $\mathcal{A}_j \cap \mathcal{S}_i = \emptyset$ ，此时 $V_{m,ij} = 0$ 且有 $\partial V_{m,ij}/\partial \|\tilde{\mathbf{p}}_{ij}\| \leq 0$ ， $V_{m,ij} = 0$

如果 $V_{m,ij} = 0$ ，有 $\|\tilde{\mathbf{p}}_{ij}\| > r_a + r_s > 2r_s$ ；

如果 $0 < \|\tilde{\mathbf{p}}_{ij}\| < 2r_s$ ，说明 $\mathcal{S}_j \cap \mathcal{S}_i \neq \emptyset$ （在实际中可能不会发生冲突），那么存在一个足够小的 $\varepsilon_s > 0$ 使得

$$V_{m,ij} = \frac{k_2}{\varepsilon_m \|\tilde{\mathbf{p}}_{ij}\|} \geq \frac{k_2}{2\varepsilon_m r_s}$$

对于第 i 架无人机，其防碰撞控制分量为

$$\mathbf{v}_{m,i} = \sum_{j \in N_{m,i}} \frac{\partial V_{m,ij}}{\partial \|\tilde{\mathbf{p}}_{ij}\|} \frac{\tilde{\mathbf{p}}_{ij}}{\|\tilde{\mathbf{p}}_{ij}\|}$$

4.设计实验：实验设计

(3) 限制集群飞行在曲线虚拟管道之内

对于第*i*架无人机，为了限制其飞行在曲线虚拟管道之内，这里构造了一个屏障函数

$$V_{t,i} = \frac{k_3 \sigma_t(r_t(\mathbf{p}_i) - \|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\|)}{(r_t(\mathbf{p}_i) - r_s) - \|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\| s\left(\frac{r_t(\mathbf{p}_i) - r_s}{\|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\| + \varepsilon_t}, \varepsilon_s\right)} \quad \sigma_t(x) = \sigma(x, r_s, r_a)$$

其中 ε_t 为任意微小常数， $\|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\|$ 为无人机位置距管道中心线的距离， r_t 为当前位置对应管道横截线的一半宽度。函数具有以下特征：

$\partial V_{t,i} / \partial \|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\| \geq 0$ ， $V_{t,i}$ 是关于 $\|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\|$ 的非减函数；

如果 $r_t - \|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\| \geq r_a$ ，即虚拟管道的边缘不在第*i*架无人机的避障区域， $\sigma_t(r_t(\mathbf{p}_i) - \|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\|) = 0$ 因此 $V_{t,i} = 0$ 并且 $\partial V_{t,i} / \partial \|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\| = 0$ ；

如果 $r_t - \|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\| < r_s$ ，即虚拟管道的边缘进入第*i*架无人机的安全区域，有

$$\sigma_t(r_t(\mathbf{p}_i) - \|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\|) = 1$$

4.设计实验：实验设计

并且存在一个足够小的 $\varepsilon_s > 0$ 使得

$$s \left(\frac{r_t(\mathbf{p}_i) - r_s}{\|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\| + \varepsilon_t}, \varepsilon_s \right) = \frac{r_t(\mathbf{p}_i) - r_s}{\|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\| + \varepsilon_t} < 1$$

由以上可知，当 ε_s 非常小时 $V_{t,i} = \frac{k_3 (\|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\| + \varepsilon_t)}{\varepsilon_t (r_t(\mathbf{p}_i) - r_s)}$ 将变得非常大。

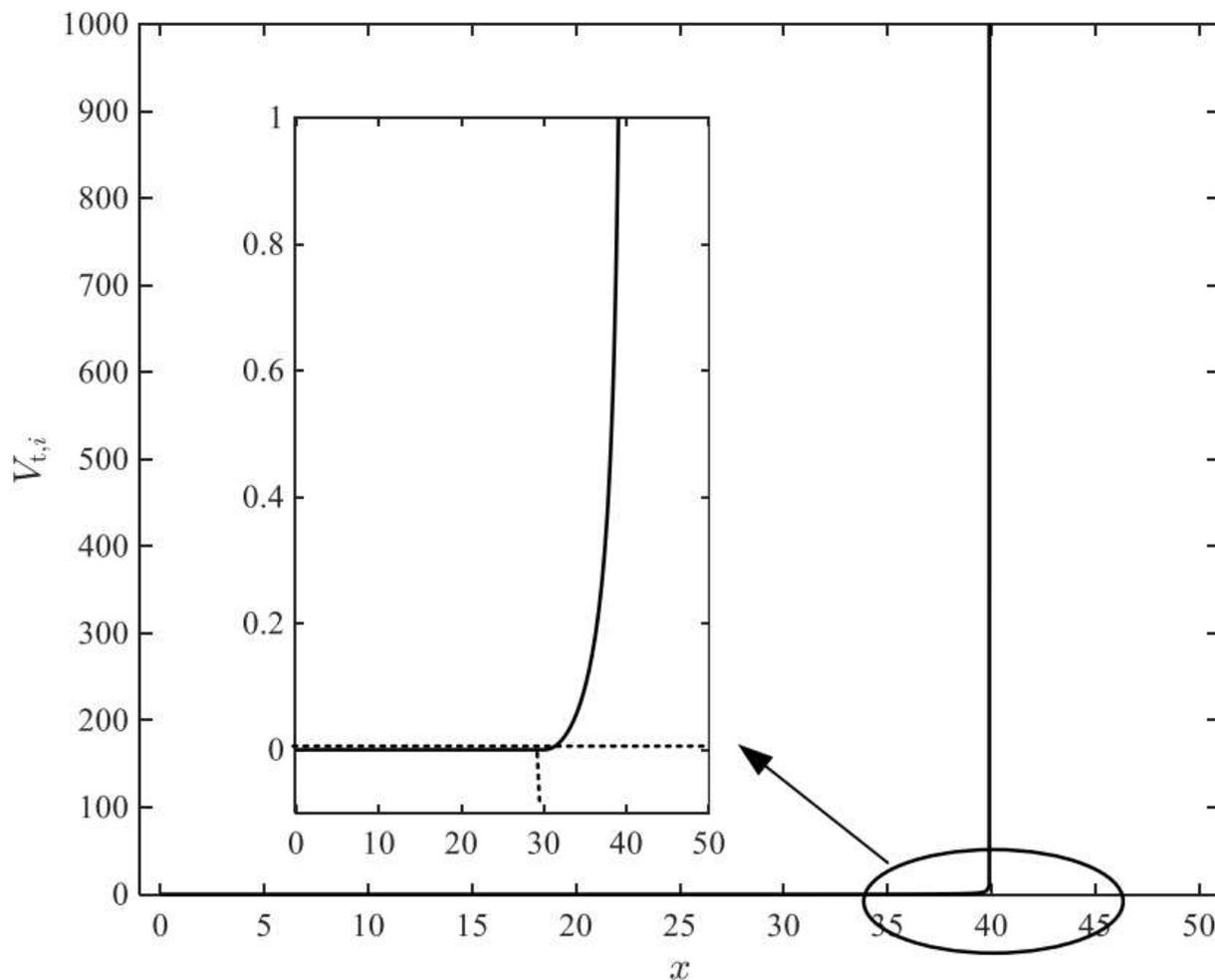
速度指令的设计目标是使 $V_{t,i}$ 为0，这意味着 $r_t - \|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\| \geq r_a$ ，从而第*i*架无人机将保持在虚拟管道内。

第*i*架无人机限制飞行在曲线管道之内的控制分量为

$$\mathbf{v}_{t,i} = \left(\mathbf{I}_3 - \frac{\partial \mathbf{m}(\mathbf{p}_i)}{\partial \mathbf{p}_i} \right)^T \left(\frac{\partial V_{t,i}}{\partial \|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\|} \frac{\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}}{\|\tilde{\mathbf{p}}_{t,i}\|} + \frac{\partial V_{t,i}}{\partial r_t(\mathbf{p}_i)} \left(\frac{\partial r_t(\mathbf{p}_i)}{\partial \mathbf{p}_i} \right)^T \right)$$

4.设计实验：实验设计

$$r_t = 50, r_s = 10, r_a = 20, \varepsilon_t = 10^{-6}, k_3 = 1$$





4.设计实验：实验设计

(4) 限制集群飞行在曲线虚拟管道之内

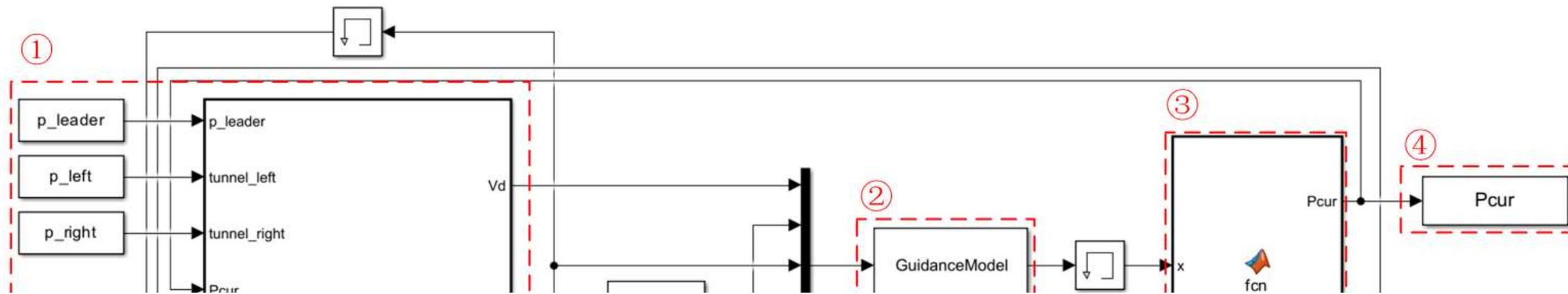
根据上面三部分，在得到了三个控制分量后，可以组合出最终的分布式集群控制器。对于第*i*架无人机，其速度指令为

$$\mathbf{v}_{c,i} = \text{sat}(\mathbf{v}_{f,i} + \mathbf{v}_{m,i} + \mathbf{v}_{t,i}, v_{\max})$$

其中 v_{\max} 为无人机的最大飞行速度。在设计出集群的速度控制器后，可以将其映射至固定翼无人机的制导模型

4.设计实验：仿真

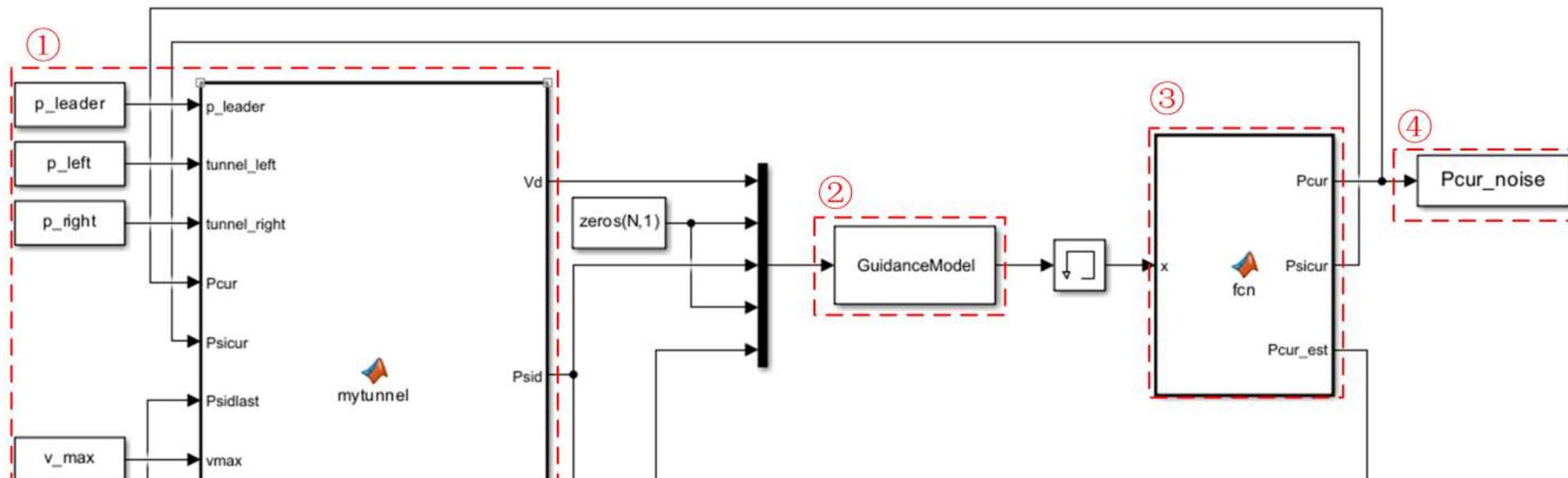
(1) 情况一：基于虚拟管道的固定翼集群飞行仿真，来源于“e8/e8-3/Tube.slx”



- 虚线框①——“mytunnel”为固定翼无人机基于虚拟管道的控制器。该模块对前飞分量、防碰撞控制分量和管道边界限制分量三个速度分量进行计算并合成为速度指令，最终映射到制导模型的控制输入，实现无人机的控制；
- 虚线框②——“GuidanceModel”为制导模型，用于接收控制器输出的控制量，并输出固定翼无人机的当前状态；
- 虚线框③——无人机状态数据转换模块，该模块输入为“GuidanceModel”制导模型传递的状态量“x”，输出当前时刻的位置“Pcur”、偏航“Psicur”；
- 对位置量“Pcur”，使用了一个“To workspace”模块将其输出，如虚线框④所示。

4.设计实验：仿真

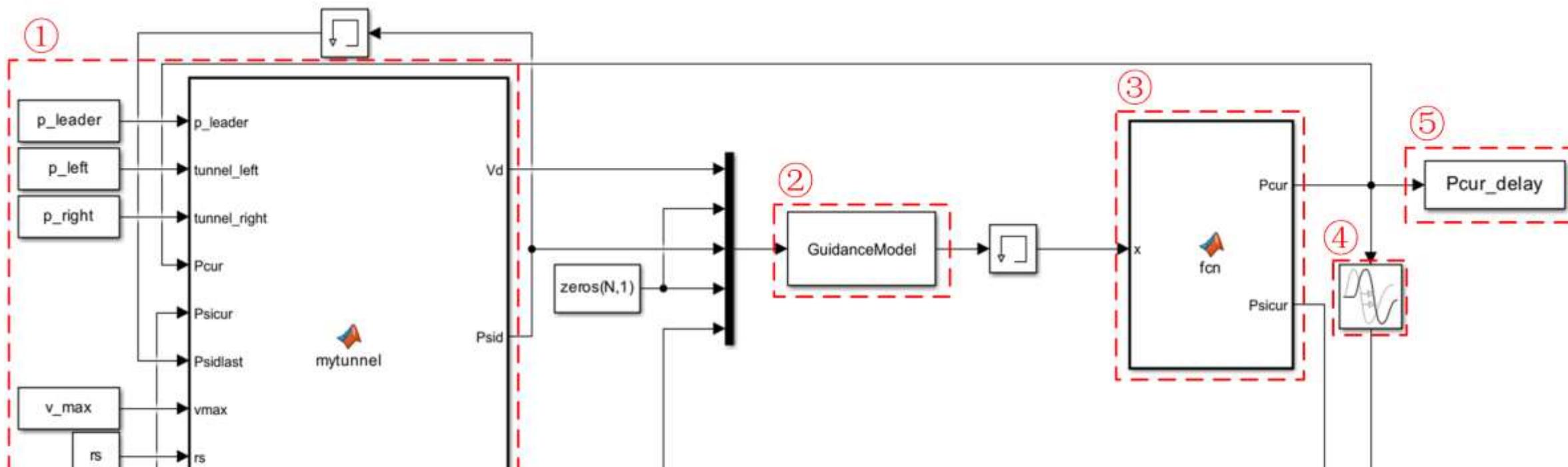
(2) 情况二：加入噪声时基于虚拟管道的固定翼集群飞行仿真，来源于“e8/e8-3/Tube_noise.slx”



- 加入噪声时基于虚拟管道的固定翼集群飞行仿真包含四个大模块，前两个模块与前者解释相同。
- 虚线框③——无人机状态数据转换模块，该模块输入为“GuidanceModel”制导模型传递的状态量“x”，输出当前时刻的位置“Pcur”、偏航“Psicur”、估计位置“Pcur_est”；
- 对位置量“Pcur”，使用了一个“To workspace”模块将其输出为“Pcur_noise”，如虚线框④所示。

4.设计实验：仿真

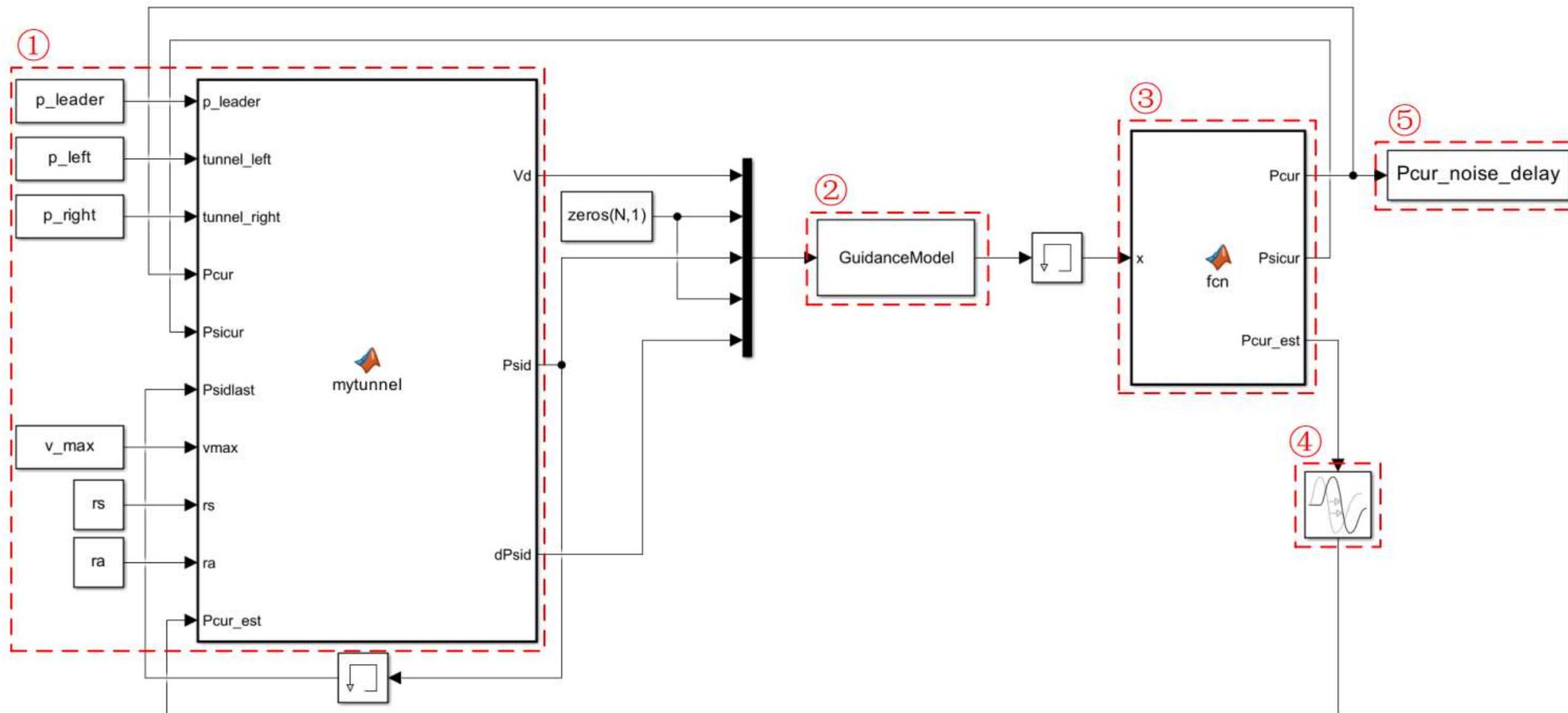
(3) 情况三：加入延迟时基于虚拟管道的固定翼集群飞行仿真，来源于“e8/e8-3/Tube_delay.slx”



- 加入延迟时基于虚拟管道的固定翼集群飞行仿真包含五个大模块，前三个模块与前者解释相同。
- 虚线框④——状态延迟模块，该模块对无人机位置和速度做延迟处理，得到延迟后的位置；
- 对位置量“Pcur”使用“To workspace”模块，将其输出为“Pcur_delay”，如虚线框⑤所示。

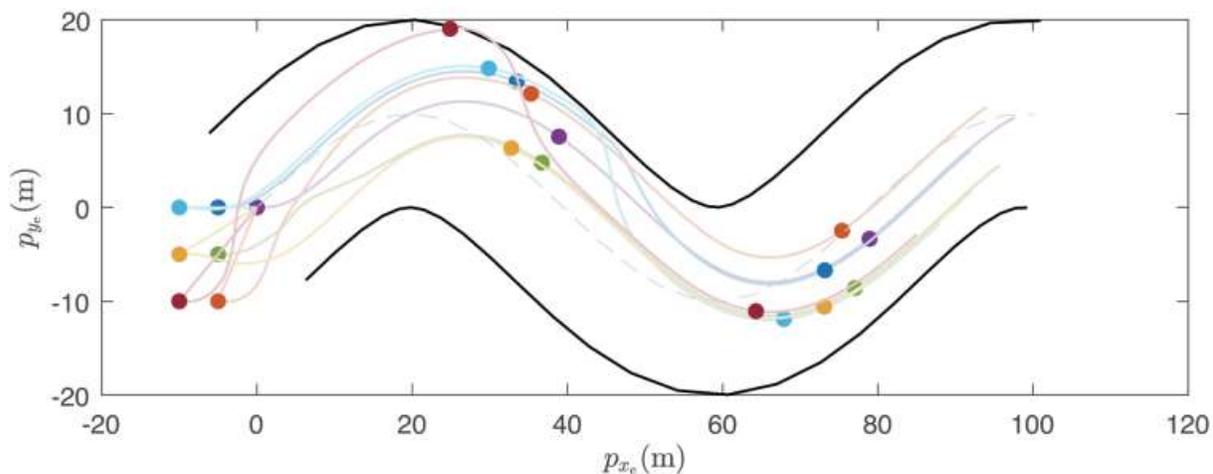
4.设计实验：仿真

(4) 情况四：加入噪声及延迟时基于虚拟管道的固定翼集群飞行仿真，来源于“e8/e8-3/Tube_noise_delay.slx”

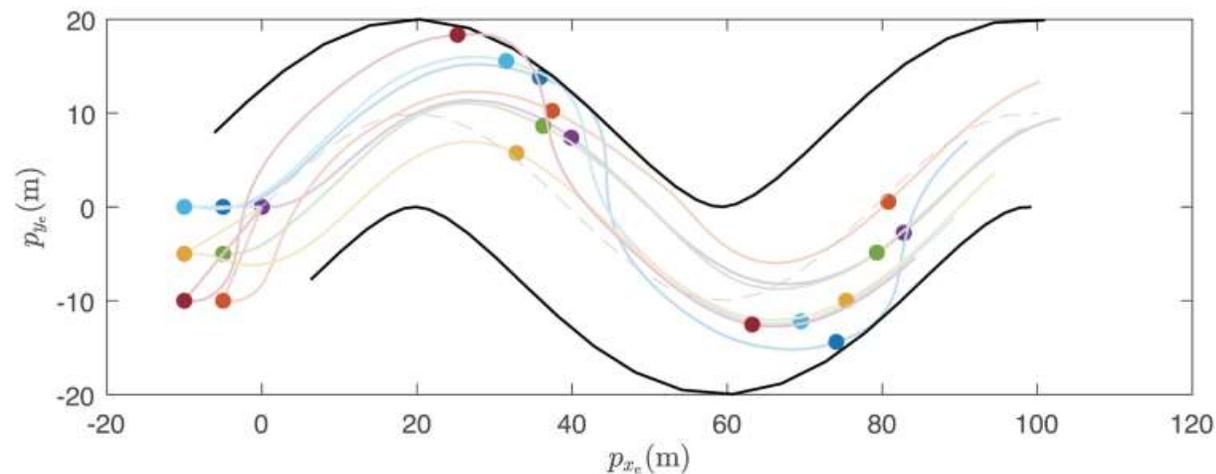


4.设计实验：仿真结果

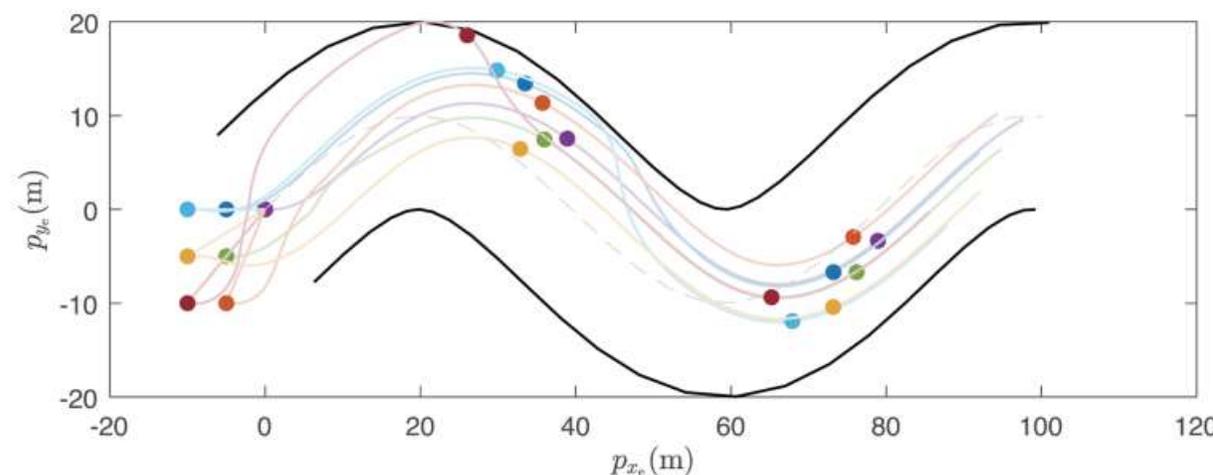
运行“e8\8-3\Draw_traj.m”得到如下的结果。



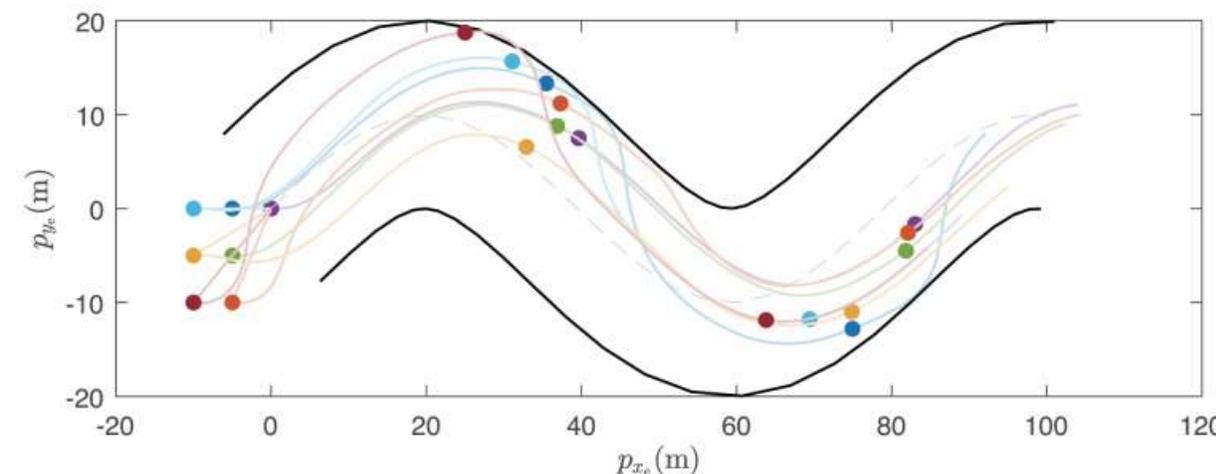
(a)无噪声无延迟下管道飞行轨迹



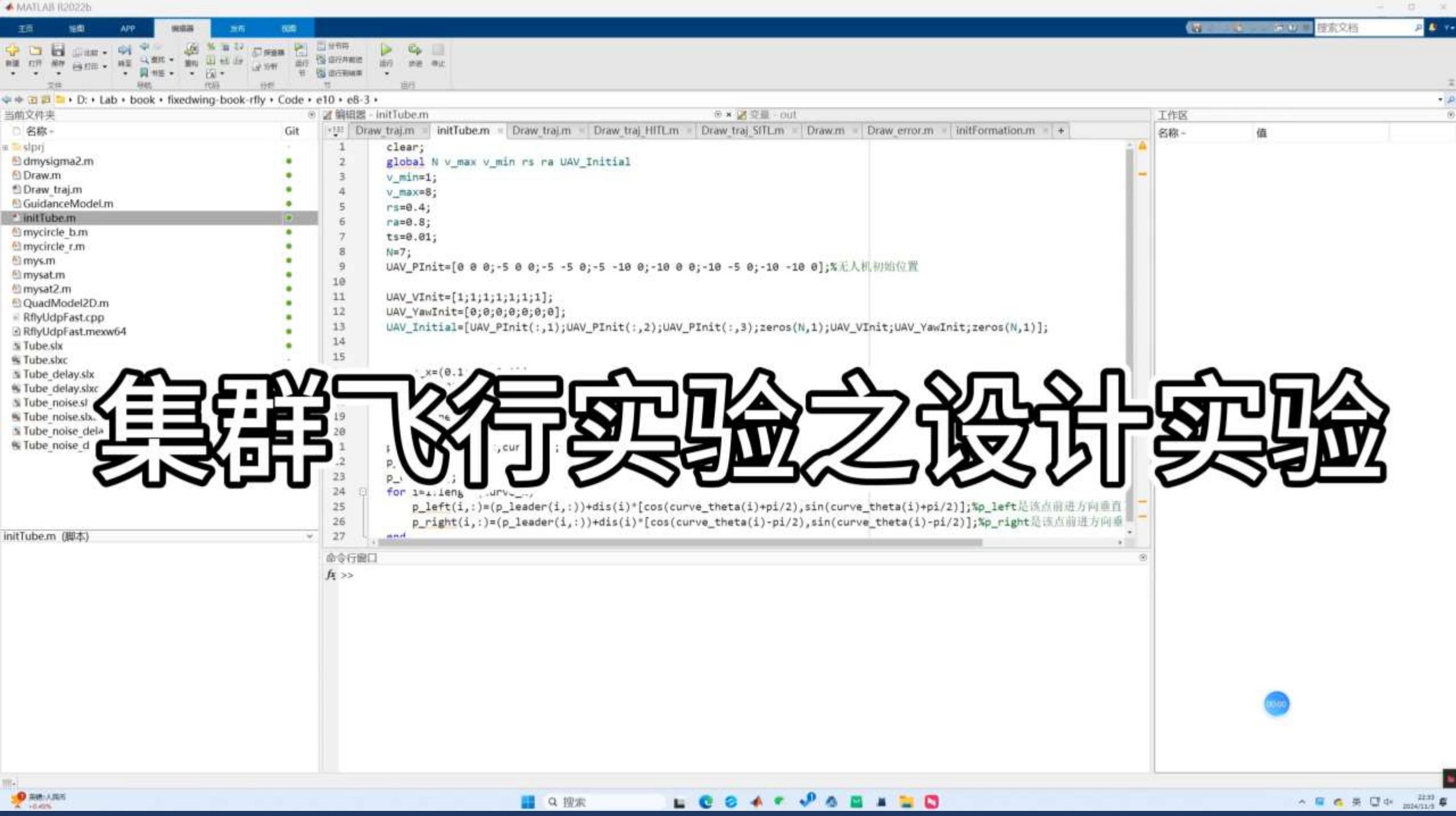
(b)有噪声无延迟下管道飞行轨迹



(c)无噪声有延迟下管道飞行轨迹



(d)有噪声有延迟下管道飞行轨迹



集群飞行实验之设计实验

```
1 clear;
2 global N v_max v_min rs ra UAV_Initial
3 v_min=1;
4 v_max=8;
5 rs=0.4;
6 ra=0.8;
7 ts=0.01;
8 N=7;
9 UAV_PInit=[0 0 0;-5 0 0;-5 -5 0;-5 -10 0;-10 0 0;-10 -5 0;-10 -10 0];%无人机初始位置
10
11 UAV_VInit=[1;1;1;1;1;1;1];
12 UAV_YawInit=[0;0;0;0;0;0;0];
13 UAV_Initial=[UAV_PInit(:,1);UAV_PInit(:,2);UAV_PInit(:,3);zeros(N,1);UAV_VInit;UAV_YawInit;zeros(N,1)];
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24 for i=1:1eng
25     p_left(i,:)=(p_leader(i,:))+dis(i)*[cos(curve_theta(i)+pi/2),sin(curve_theta(i)+pi/2)];%p_left是该点前进方向垂直
26     p_right(i,:)=(p_leader(i,:))+dis(i)*[cos(curve_theta(i)-pi/2),sin(curve_theta(i)-pi/2)];%p_right是该点前进方向垂
27 end
```

命令行窗口
在 >>



4.设计实验：硬件在环仿真

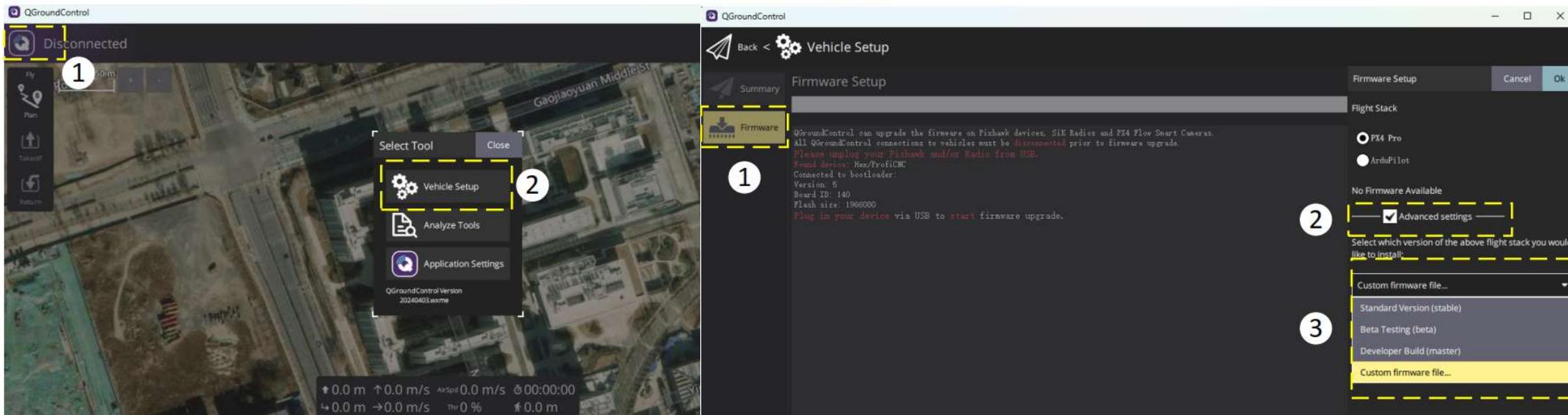
□ 步骤一：硬件配置

- 本书进行的硬件在环仿真实验采用 CubePilot/Pixhawk，参考第二章集群 Simulink 控制实验流程第三步及第四步内容。
- 将固定翼无人机的模型文件“SmallFixedWingUAVnoctrlHIL.dll”放至路径“_PX4PSP_Coptersim_external_model”下。

4.设计实验：硬件在环仿真

如左图所示，打开 QGC，点击左上角软件图标，选择“Vehicle Setup”。

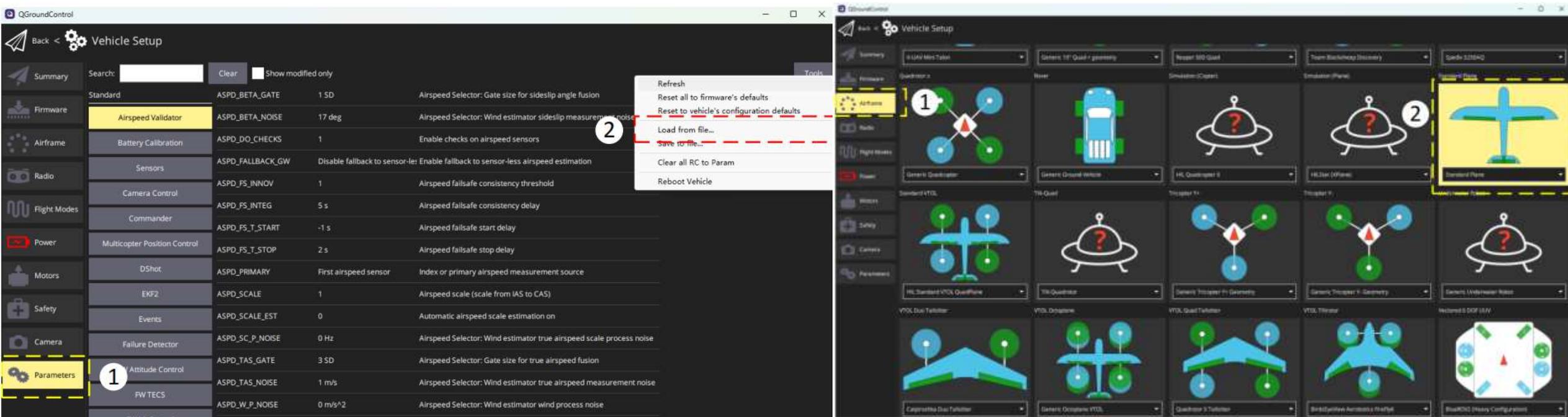
如右图所示，点击左侧列表中“Firmware”。根据提示重新插拔飞控，在弹出界面选择标号 2 处“Advanced Settings”，选择下拉菜单中标号 3 处“Custom firmware file”，将文件“cubepilot_cubeorange_default.px4”导入即可。



4.设计实验：硬件在环仿真

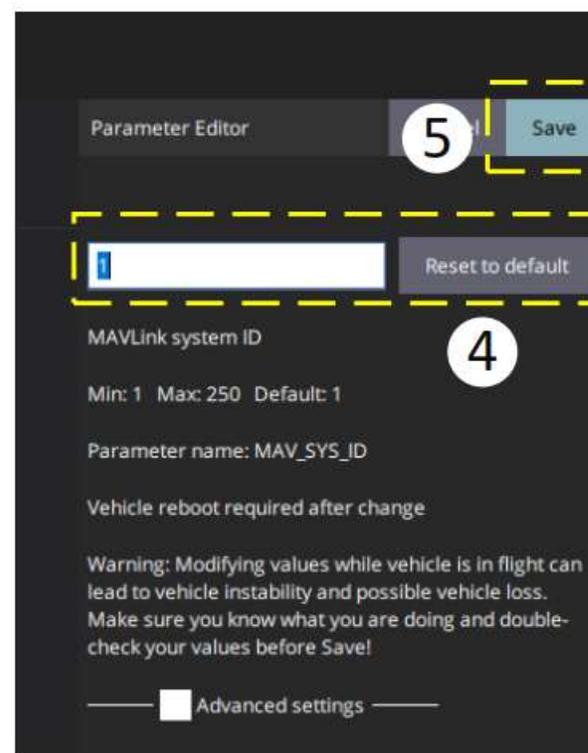
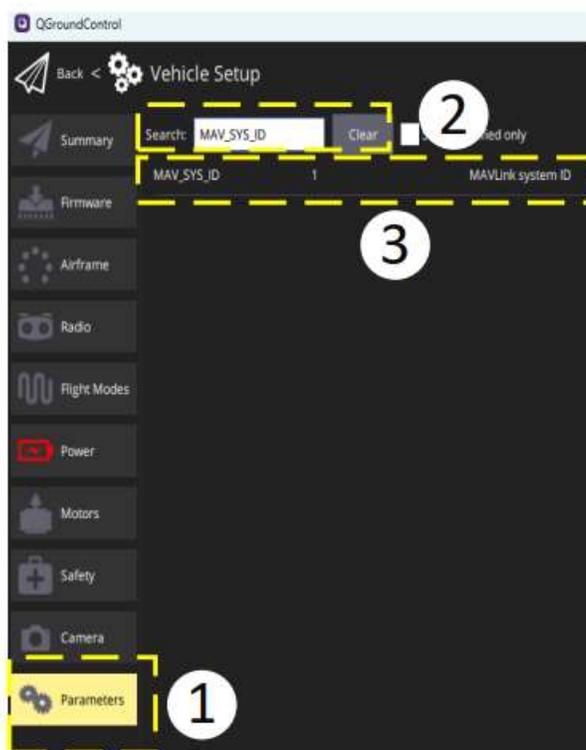
如左图所示，选择左侧列表中标号 1 所示 “Parameters”，再点击右上角 “Tool”，选择标号 2 所示 “Load from file”，导入预先配置好的参数文件 “pixhawk.params”。

如右图所示，检查机架是否为固定翼机架。



4.设计实验：硬件在环仿真

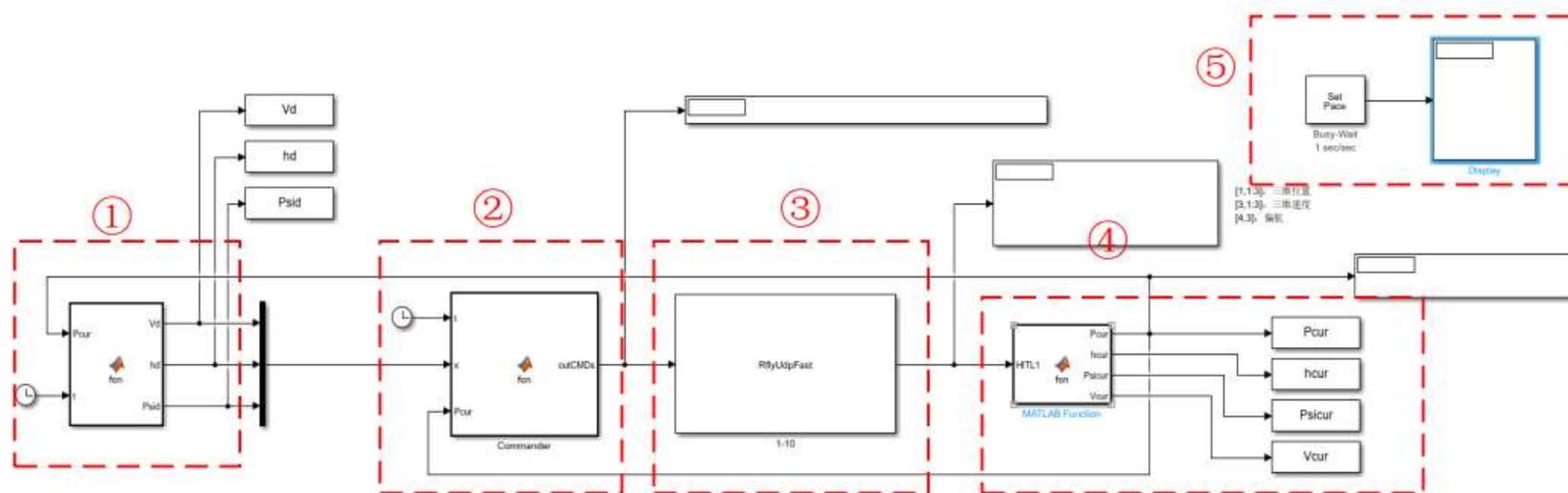
对每一个飞控，需要更改“MAV_SYS_ID”，如图所示，选择“Parameters”，在“Search”中搜索“MAV_SYS_ID”，按照飞控数量依次设定为1、2、3...，至此，所有对飞控硬件的设置已完成。



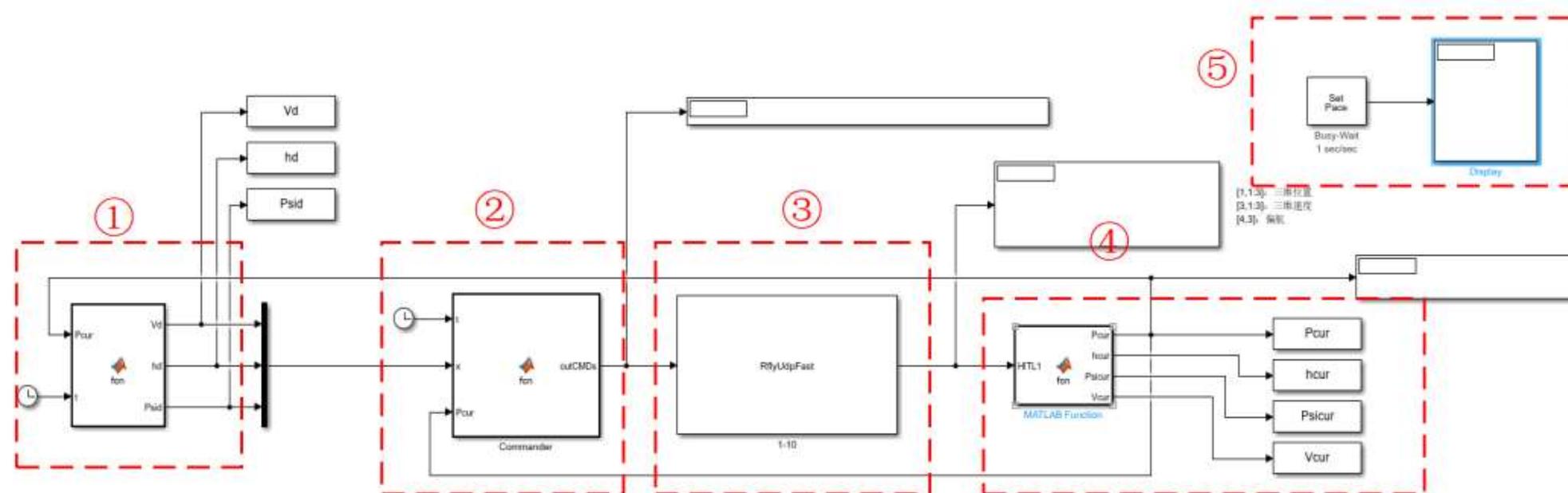
4. 设计实验：硬件在环仿真

□ 步骤二：参数辨识

- 接入一个飞控硬件，对其进行参数辨识以获得其制导模型。设计三种飞行方式，分别对高度、偏航、速度三个通道进行数据采集。对某个通道进行辨识时，其它两个通道保持不变，以免引起干扰。
- 打开仿真“Tube_HITL_identification.slx”，如图所示，设计期望速度“Vd”、期望高度“hd”、期望偏航“Psid”作为输入进入“Commander”。



4.设计实验：硬件在环仿真



系统辨识仿真包含五个大模块，分别为：

虚线框①：期望速度、期望高度、期望偏航产生；

虚线框②：固定翼无人机控制指令产生；

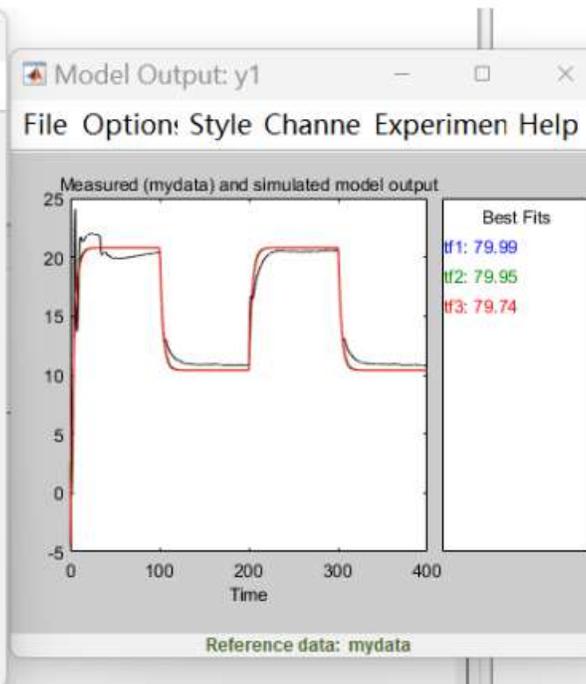
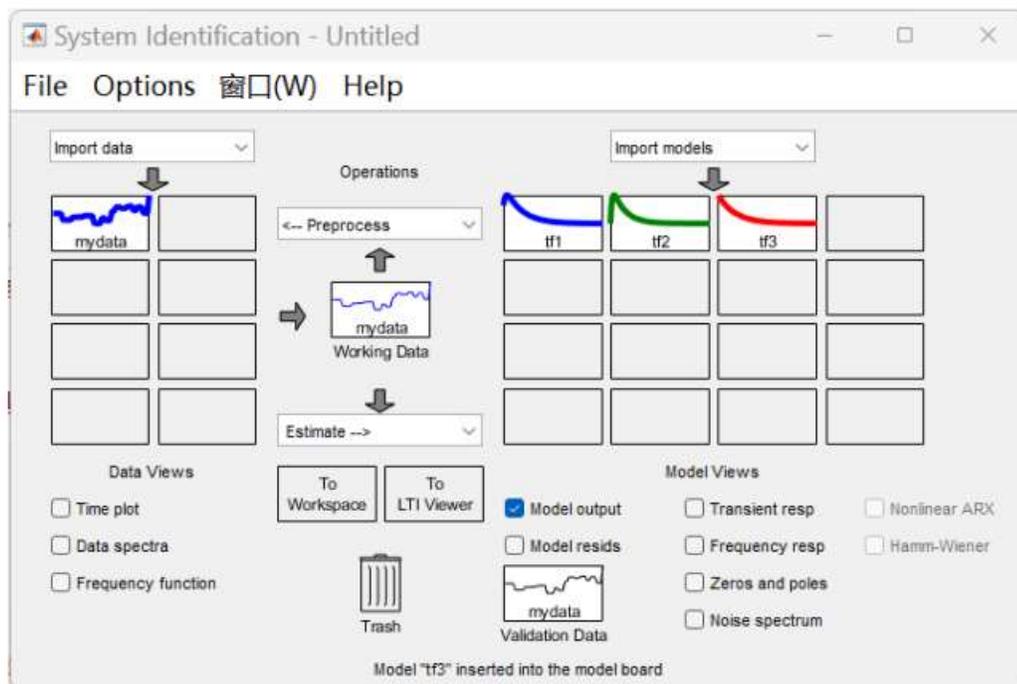
虚线框③：“RflyUdpFast”为UDP通信模块，该模块向外发送控制指令，接收固定翼的飞行状态数据；

虚线框④：记录无人机状态数据。在Simulink中使用“To workspace”模块对期望输入和飞控返回的实际输出进行记录；

虚线框⑤：“Set Pace”模块，使仿真能以1 sec/sec的步长运行，保证仿真的实时性。

4.设计实验：硬件在环仿真

- 将一个飞控接入电脑，运行一键启动脚本“SmallFixedWingUAVnoctrlHITLRun.bat”，根据提示输入飞控端口号。稍作等待，当 Coptersim 左下角窗口显示“PX4: GPS 3D fixed & EKF initialization finished.”及“PX4: Enter Auto Loiter Mode!”，说明飞控启动成功。
- 运行 Simulink 仿真，待结束后按照第五章参数辨识实验中 System Identification 工具箱的使用说明，对飞控进行参数辨识。



4.设计实验：硬件在环仿真

对速度、高度、偏航三个通道分别进行辨识，整理得到固定翼无人机的制导模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{p}_{x_e} = V_e \cos \psi \\ \dot{p}_{y_e} = V_e \sin \psi \\ \psi = \chi \\ V_e(s) = \frac{0.2708}{s + 0.2603} V_{ed}(s) \\ \chi(s) = \frac{0.03404s + 0.1109}{s^2 + 0.4581s + 0.111} \chi_d(s) \\ H(s) = \frac{0.0851 + 0.007894s}{s^2 + 0.148s + 0.007868} H_d(s) \end{array} \right.$$

4.设计实验：硬件在环仿真

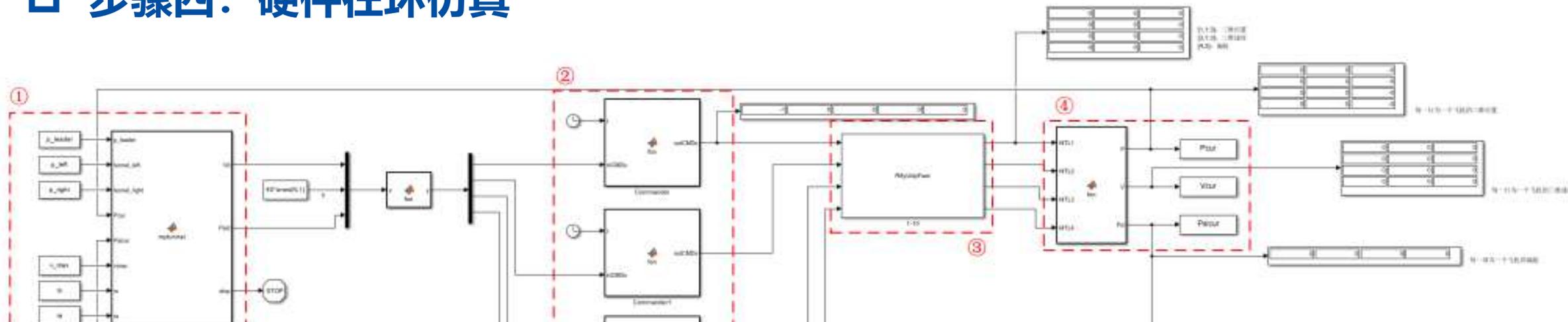
□ 步骤三：软件仿真

- 仿照设计实验中设计步骤，对该固定翼集群进行控制器设计，其 Simulink 仿真结构和“e8/e8-3/Tube.slx”相似，对固定翼无人机的 S-function 进行重新编写即可。其初始条件设计为四架固定翼无人机，初始位置为“UAV_PInit=[0 0 0;0 10 0;10 0 0;10 10 0]+[-250,-119,0]”。为了配合三维视景地图的坐标，管道参数设计如代码段所示。对控制器进行调试，当其仿真效果达到预期时，可以进行最终的硬件在环仿真实验。

```
1 curve_x=(0:4:400)';
2 curve_y=10*sin(curve_x/10/pi+pi/2);
3 curve_theta=atan(10/10/pi*cos(curve_x/10/pi+pi/2));
4
5 curve_x1=(-10:4:150)';
6 curve_y1=zeros(length(curve_x1),1);
7 curve_theta1=zeros(length(curve_x1),1);
8
9 curve_x=[curve_x1;curve_x+curve_x1(end)-curve_x(1)];
10 curve_y=[curve_y1;curve_y+curve_y1(end)-curve_y(1)];
11 curve_theta=[curve_theta1;curve_theta];
12 dis=20*ones(length(curve_x),1);
13 p_leader=[curve_x,curve_y]+[-250,-119+5];
```

4.设计实验：硬件在环仿真

□ 步骤四：硬件在环仿真



硬件在环仿真的 Simulink 文件包含五个大模块，分别为：

- 虚线框①期望速度、期望高度、期望偏航产生；
- 虚线框②固定翼无人机控制指令产生，对每一个飞控，单独采用一个控制模块 Commander 发送命令给 RflyUdpFast，将“vehicle Number”设定为 4；
- 虚线框③“RflyUdpFast”为 UDP通信模块，该模块向外发送控制指令，接收固定翼的飞行状态数据；
- 虚线框④记录无人机状态数据。在 Simulink 中使用“To workspace”模块对期望输入和飞控返回的实际输出进行记录；
- 虚线框⑤“Set Pace”模块，使仿真能以 1 sec/sec 的步长运行，保证仿真的实时性。

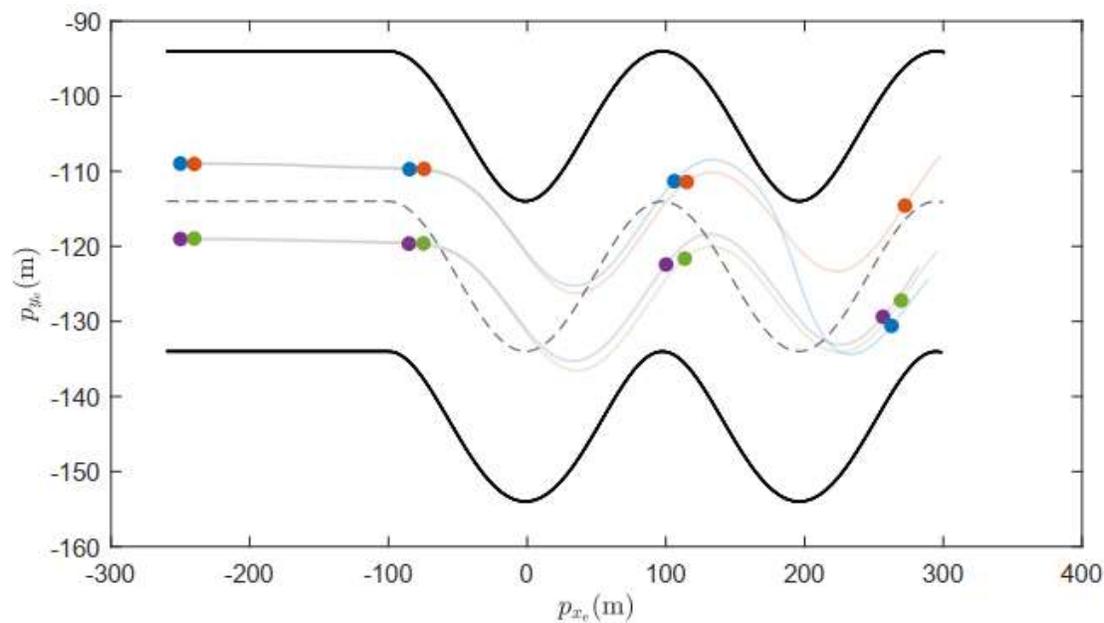
4.设计实验：硬件在环仿真

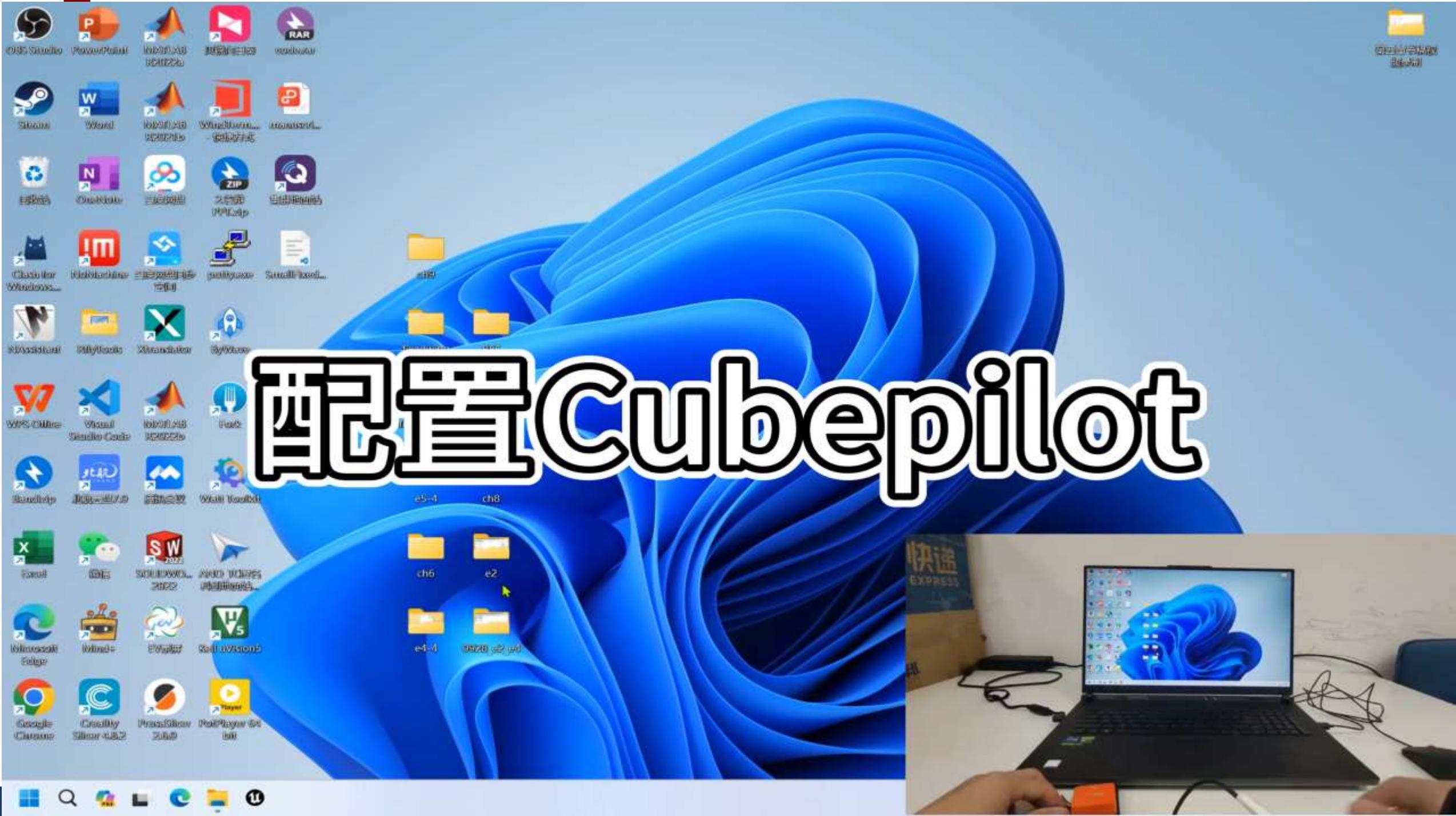
- 将四个飞控接入电脑。运行一键启动脚本 “SmallFixedWingUAVnoctrlHITLRun.bat”，根据提示输入飞控端口号。稍作等待，飞控启动成功后运行初始化文件 “init_Tube.m” 和 Simulink 仿真文件，可以观察到固定翼集群顺利起飞，并且完成管道飞行。



4.设计实验：硬件在环仿真

- 在硬件在环仿真结束后，可以绘制出相应的轨迹图。如图所示，四条线分别代表了集群中四架固定翼无人机的轨迹，实心圆圈则代表某时刻下无人机的位置。当时间分别为 0、12、24、36 秒时，集群中各无人机的位置被展示在图中。两侧边界的实线为虚拟管道的管道壁，中心的虚线为虚拟管道中心线。观察仿真结果，发现固定翼无人机能够在虚拟管道的帮助下，完成集群的飞行。对于固定翼无人机来说，其状态存在一定的滞后，并不能对控制量做到及时的跟随，因此可能出现短暂飞出虚拟管道边界的情况。





配置Cubepilot



致谢



□ 感谢李悦、陈庆鹏为本讲PPT
准备做出的贡献

□ 更多信息请访问公众号和网站



可靠飞行控制研究组
RELIABLE FLIGHT CONTROL GROUP

R fly 官网 研究组公众号 视频号

B 站官方账号 优酷账号

rfly.buaa.edu.cn