

1. 实验名称及目的

1.1. 实验名称

双旋翼垂尾 PID 控制数值仿真实验

1.2. 实验目的

在 Simulink 中给定控制信号，利用示波器观察尾座式无人机的状态是否可以跟踪到给定的期望的指令，验证旋翼模式下的控制器和固定翼模式下的控制器的控制效果，同时可以通过延时模块（Signal Builder）给定过渡信号，通过判断尾座式无人机的状态和所处的模式来验证所设计的过渡策略是否可以使无人机完成旋翼模式和固定翼模式的相互切换。全部通道响应情况可参见[尾座式跟踪曲线图.pdf](#)

1.3. 关键知识点

控制器模块

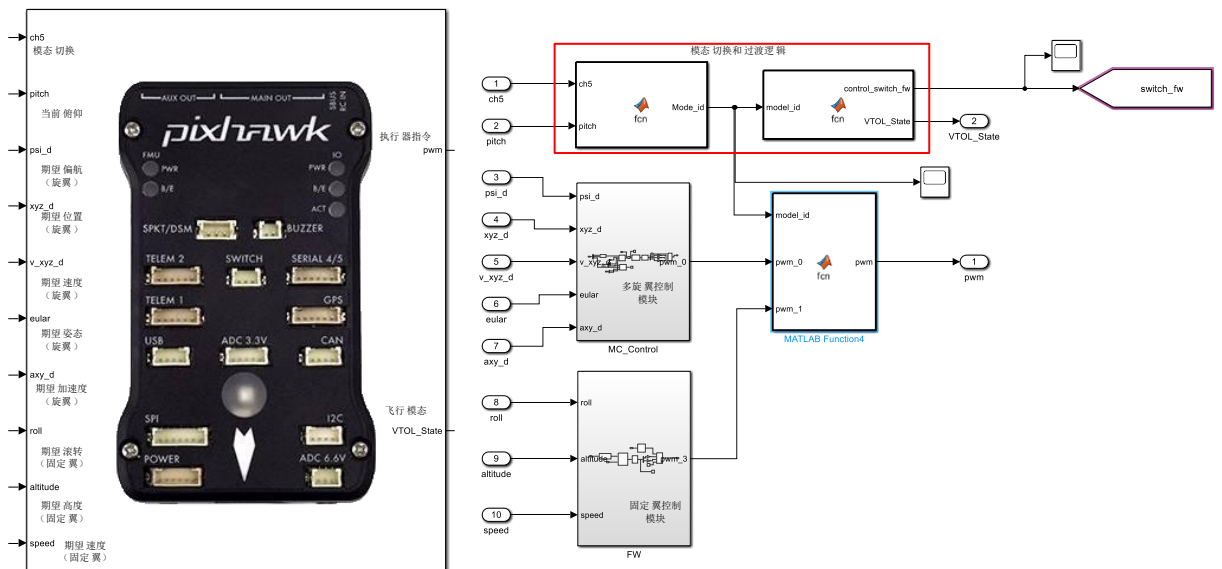


图 1 数值仿真程序控制器模块

控制器模块中包括旋翼模式控制器和固定翼模式控制器以及模式切换，详细的控制策略与控制器设计已在[./readme.pdf](#)中详细阐述，在此不再赘述。模式切换关键代码如下

```
function Mode_id = fcn(ch5,pitch)

persistent Mode_id0

if isempty(Mode_id0)
    Mode_id0 = 0;
end

Mode_id = Mode_id0;    %初始模式为 mc 模式
if (Mode_id==0) && (ch5>0.5)
```

```

Mode_id = 1; %fw 模式
Mode_id0 = 1;
elseif (Mode_id==1) && (ch5<0.5)
Mode_id = 2; %fw2mc 模式
Mode_id0 = 2;
elseif(pitch>0) && (ch5<0.5)
Mode_id = 0;
Mode_id0 = 0;
end

```

运动模型模块

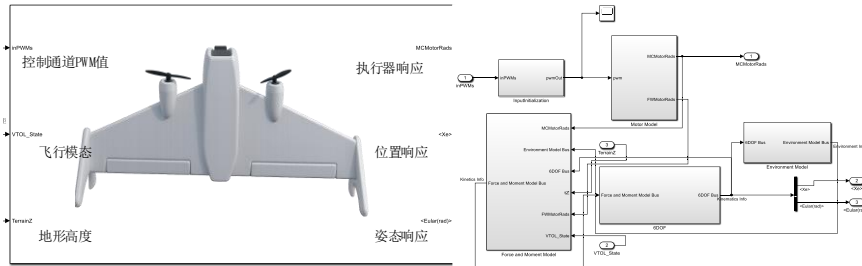


图 2 数值仿真程序模型模块

模型模块中详细的模型设计已在[./readme.pdf](#)中详细阐述，在此不再赘述。

数据显示

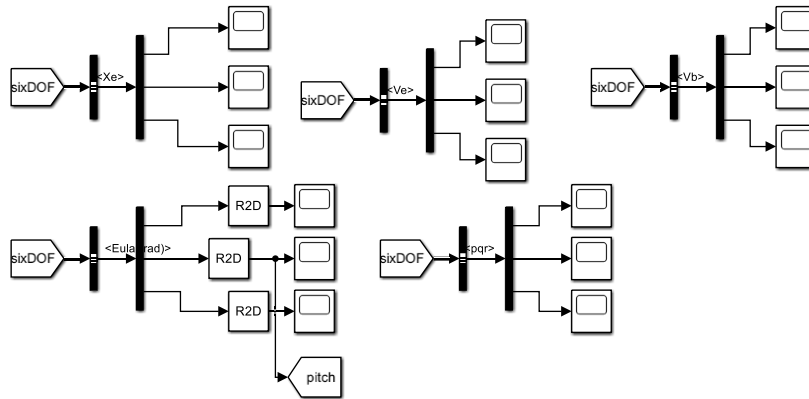


图 3 Simulink 信号示波器模块



图 4 三维显示模块

2. 实验效果

数据检查器中不同模式下各通道的响应与实际输入信号匹配，且在 RflySim3D 中能够

观测到正确的行为响应。

3. 文件目录

文件夹/文件名称	说明
MapHeightData.mat	三维场景地形数据
tailsitter_init.m	控制器及模型参数初始化文件
tailsitter.slx	模型及控制器主要程序
RflySimModelLab.slx	固定翼模块库文件
ue4.bat	RflySim3D 三维场景启动脚本
Icon image	Simulink 模块图标

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>

5. 实验步骤

准备三维显示模型

在进行后面的仿真流程之前双击 ue4.bat 启动 RflySim3D。

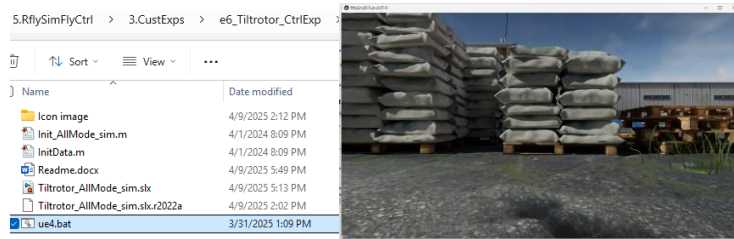
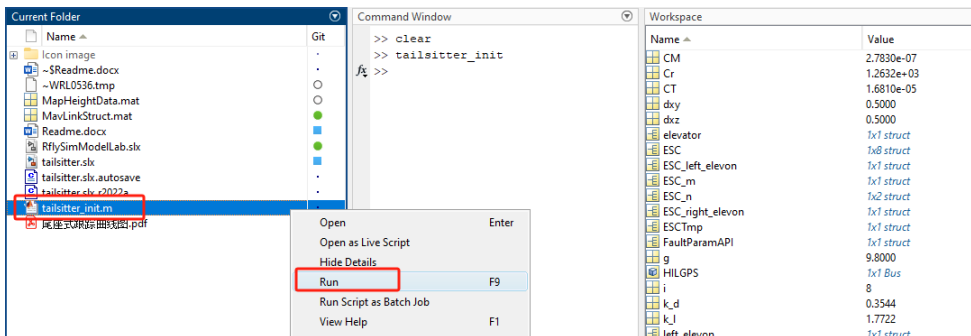


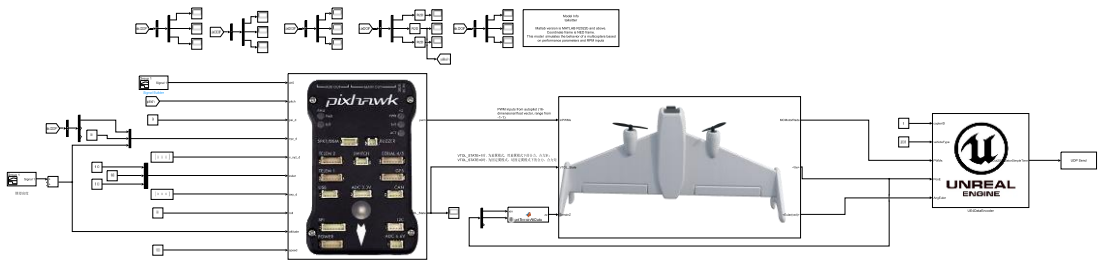
图 5 启动三维显示

初始化控制器参数和模型参数

在 MATLAB 中进入本实验目录，运行参数初始化脚本 tailsitter_init.m



然后打开 Simulink 模型 tailsitter.slx

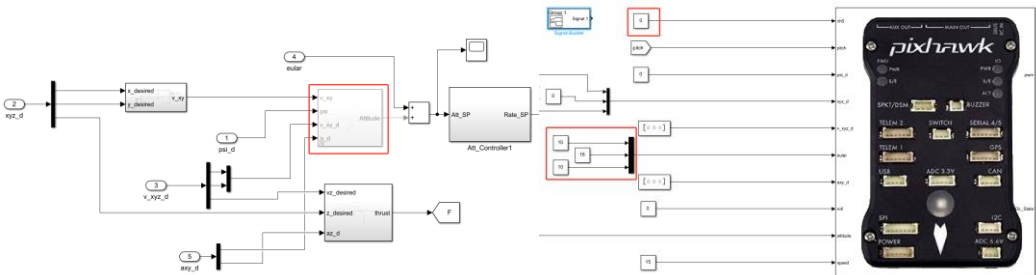


5.1 旋翼模式下跟踪响应

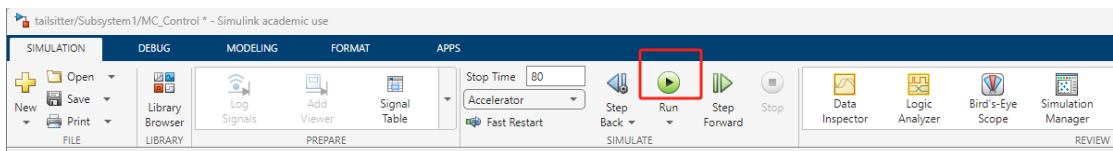
首先将 ch5 输入置为 0 (通过 constant 模块), 确保始终保持在旋翼模式

Step1: 姿态控制

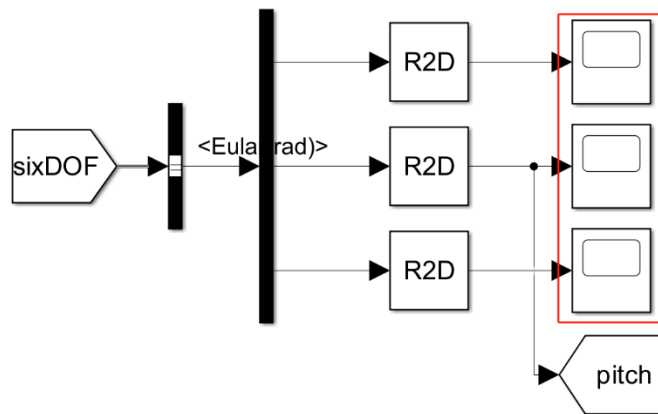
仿真给定条件设置: $\phi = 10^\circ$, $\theta = 16^\circ$, $\psi = 10^\circ$; 如下图所示, 注释掉期望位置位置控制器模块 (tailsitter/Subsystem1/MC_Control/ Subsystem9), 分别为期望滚转、俯仰、偏航赋值 10、16、10



运行 Simulink 程序等待仿真完成。



打开图 6 所示的 Simulink 信号示波器模块中滚转、俯仰、偏航响应通道的示波器



仿真结果如下所示:

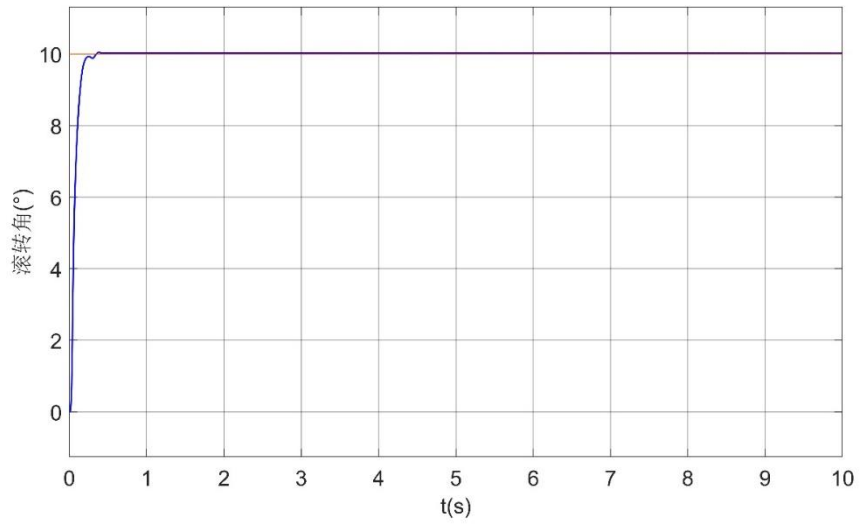


图 3-1 滚转角响应曲线

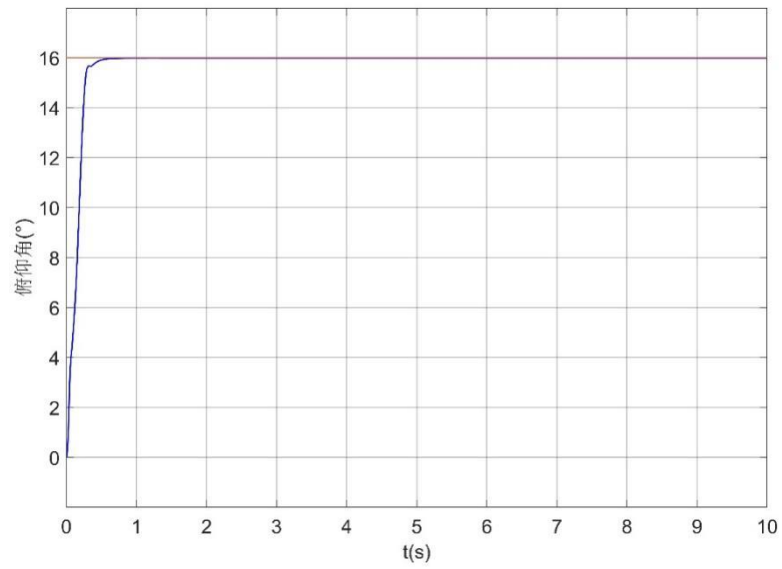


图 3-2 俯仰角响应曲线

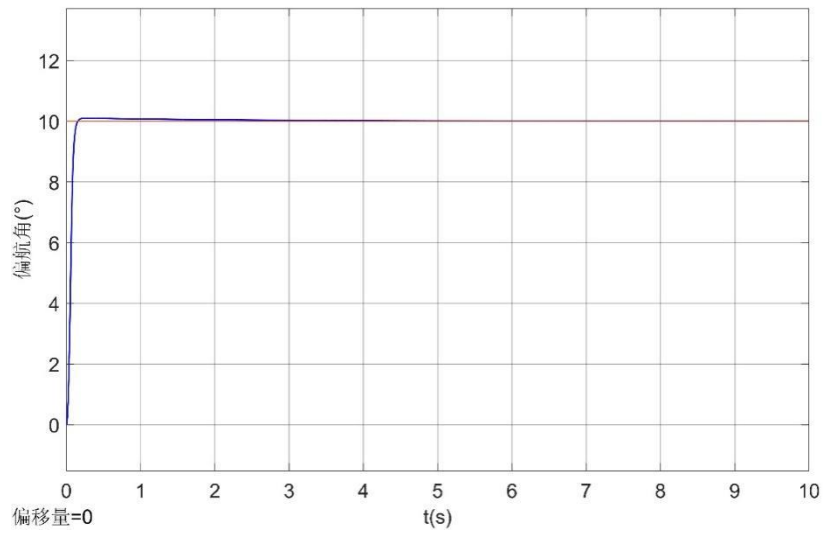


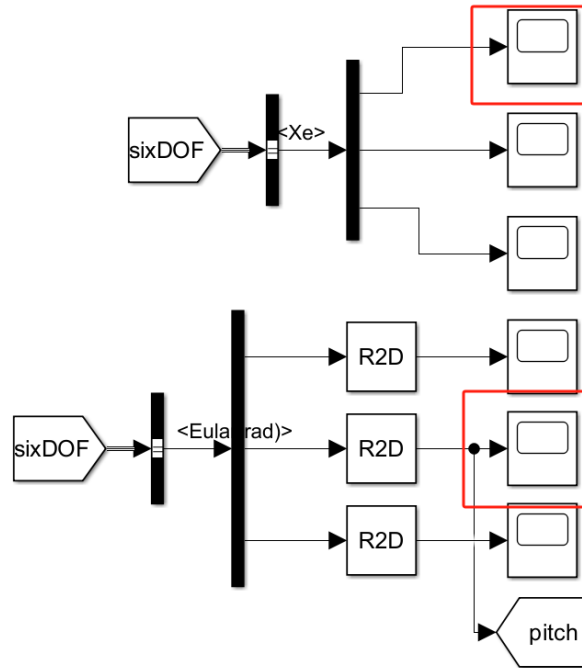
图 3-3 偏航角响应曲线

仿真结果分析：从上面的姿态角响应曲线图中可以看出，在旋翼模式下，无人机对给定的姿态信号有较好的跟踪效果，调节时间短，没有出现过大超调、稳态误差和振荡等不好的现象。这证明了所设计的旋翼模式 PID 控制器对旋翼模式下的姿态角控制的有效性。

Step2: 水平位置控制

仿真给定条件设置： $x = 2$ ， $y = 2$ ；

打开图 7 所示的 Simulink 信号示波器模块中水平前向位置、俯仰响应通道的示波器



仿真结果如下所示：

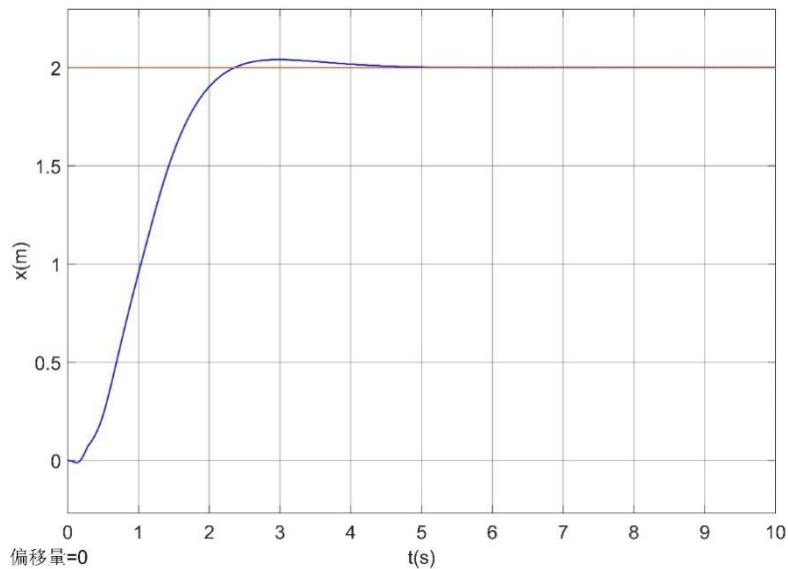


图 3-4 x 轴位置响应曲线

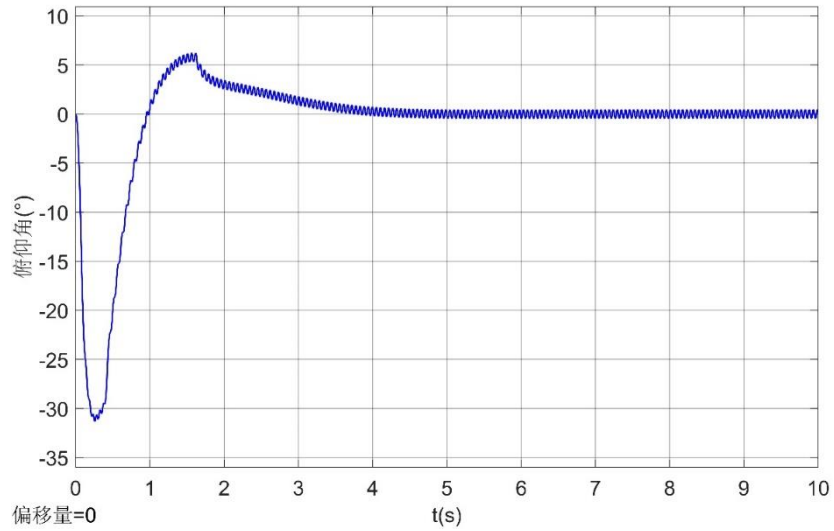
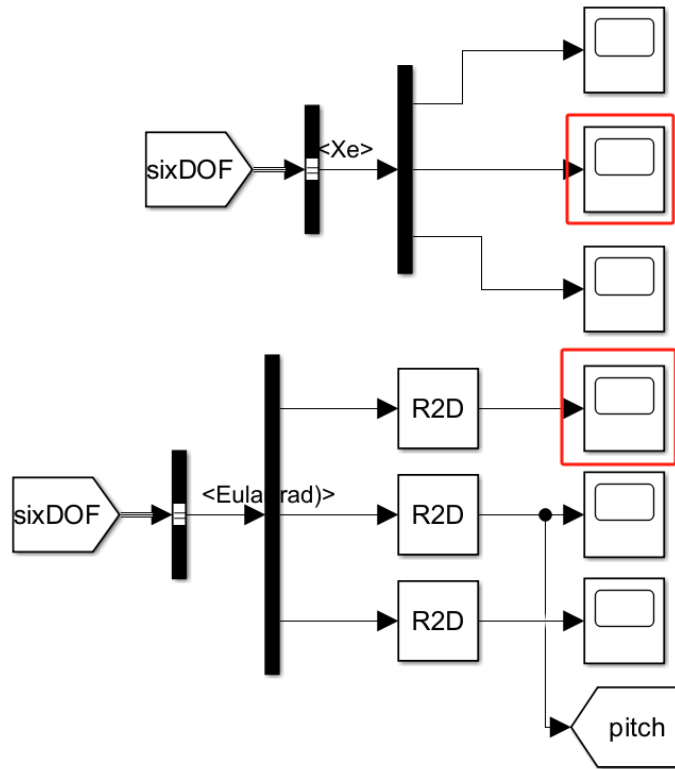


图 3-5 x 轴运动时俯仰角响应曲线

仿真结果分析：在旋翼模式下的位置控制，内环是姿态角控制，在图 3-4 和图 3-5 中，无人机在 0 秒之后的一小段时间内在 x 轴方向不发生位移，这段时间内无人机的俯仰角发生大幅度改变，之后无人机才开始向 x 轴方向运动，这是由于无人机在向 x 轴方向运动时，需要无人机产生一个俯仰角从而产生 x 轴方向的力使无人机运动，并且无人机的俯仰角和期望位置与实际位置之间的差值有关。上面两图中反映无人机对 x 轴方向的位置跟踪总体效果较好，超调量较小，调节时间较短；但稳定后有很小的误差，导致无人机的俯仰角出现小幅度振荡，这个还需后续改进。

打开图 8 所示的 Simulink 信号示波器模块中水平侧向位置、滚转响应通道的示波器



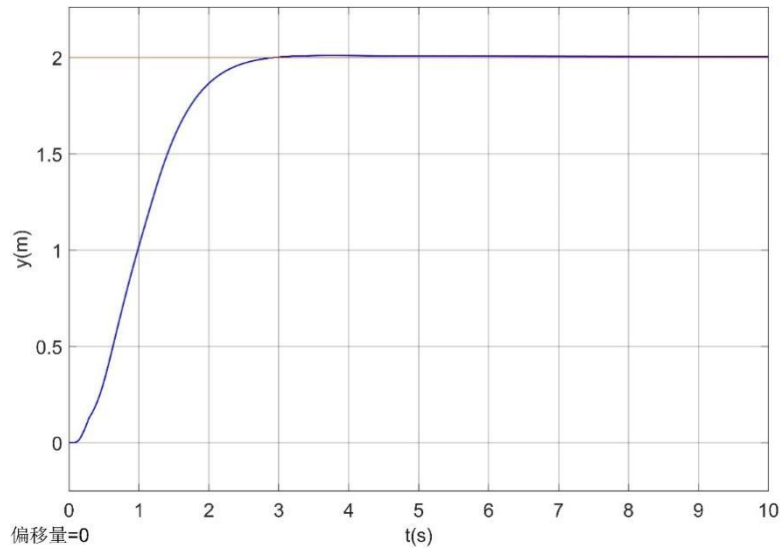


图 3-6 y 轴位置响应曲线

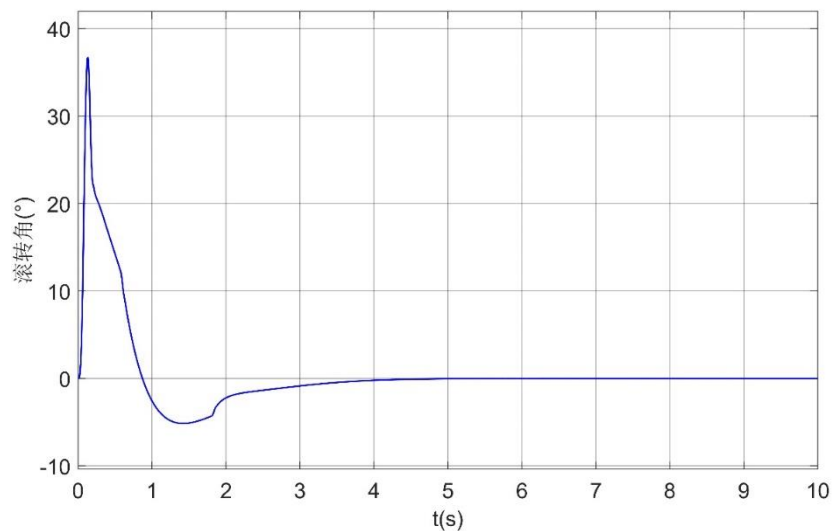


图 3-7 y 轴运动时滚转角响应曲线

仿真结果分析：在图 3-6 和图 3-7 中，无人机在 0 秒之后的一小段时间内在 y 轴方向不发生位移，这段时间内无人机的滚转角发生大幅度改变，之后无人机才开始向 y 轴方向运动，这是由于无人机在向 y 轴方向运动时，需要无人机产生一个滚转角从而产生 y 轴方向的力使无人机运动，并且无人机的俯仰角和期望位置与实际位置之间的差值有关。上面两图中反映无人机对 y 轴方向的位置跟踪总体效果较好，超调量较小，调节时间较短，不出现振荡现象且无稳态误差。

Step3: 高度控制

仿真给定条件设置： $z = -2$ ，运行完成后参照 Step1 打开对应的示波器

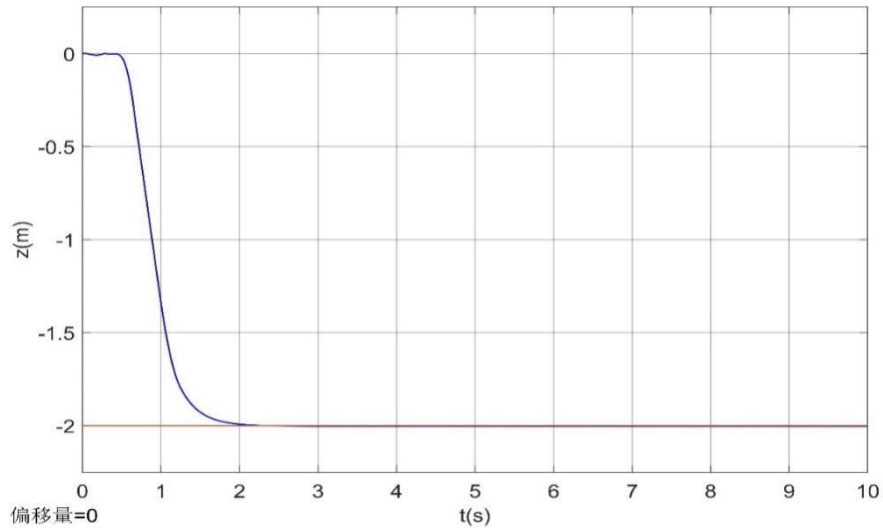


图 3-8 z 轴位置响应曲线

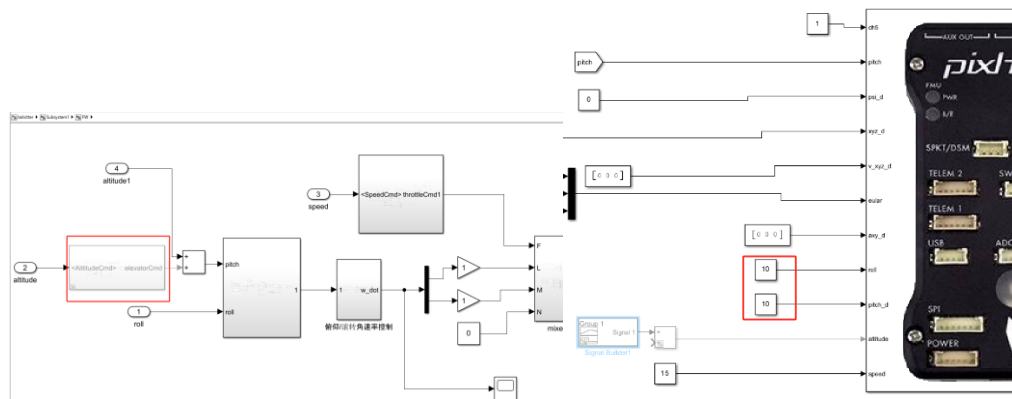
结果分析：从上面的高度响应曲线图中可以看出，在旋翼模式下，无人机对给定的高度有较好的跟踪效果且调节时间短，没有出现过大超调、稳态误差和振荡等现象。这证明了所设计的旋翼模式 PID 控制器的有效性。

5.2 固定翼模态下跟踪响应

首先将 ch5 输入置为 1（通过 constant 模块），确保始终保持在固定翼模态

Step1: 姿态控制

仿真给定条件设置： $\phi = 10^\circ$ ， $\theta = 10^\circ$ ；如下图所示，注释掉高度控制器模块（tailsitter/Subsystem1/FW/ Subsystem2），为期望滚转和俯仰赋值 10、10，如下图所示



仿真结果如下所示：

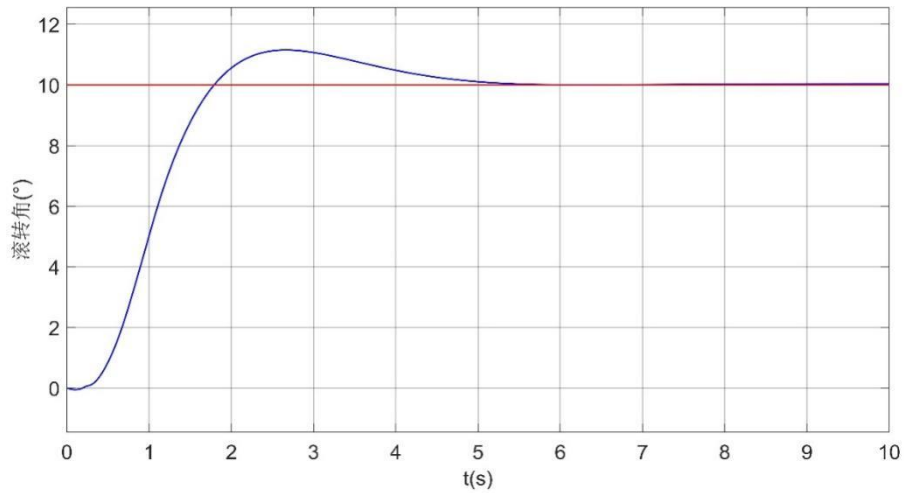


图 3-9 滚转角响应曲线

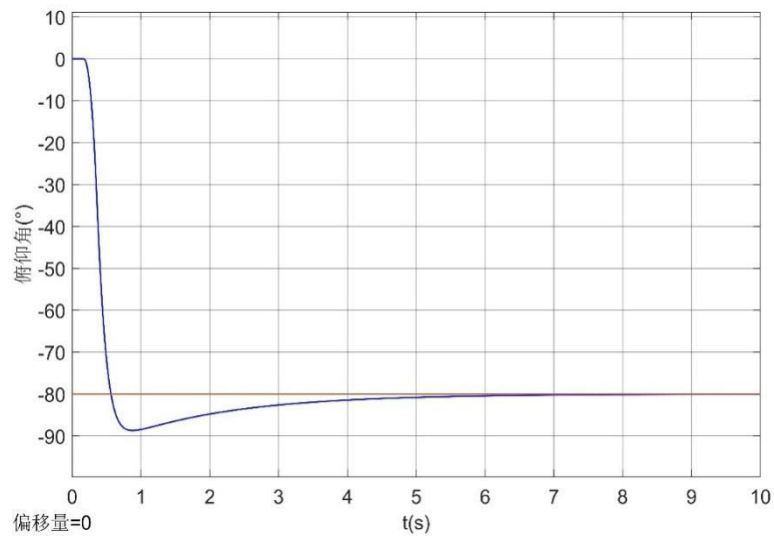


图 3-10 俯仰角响应曲线

仿真结果分析：在图 3-10 中，默认旋翼模式下起始的俯仰角为 0° ，故固定翼模式下起始的俯仰角为 -90° ，图中俯仰信号为 -80° ，也就是固定翼模式下无人机向上俯仰 10° 。从上面两图可以看出，在固定翼模式下，无人机对姿态信号的跟踪效果一般，总的来说能跟踪上给定的姿态信号，但调节时间长，超调量大，后续还需改进 PID 参数使跟踪效果更好。

Step2: 高度控制

仿真给定条件设置： $h = -10$ ；取消注释高度控制器模块（tailsitter/Subsystem1/FW/ Subsystem2），将期望滚转和俯仰置为 0

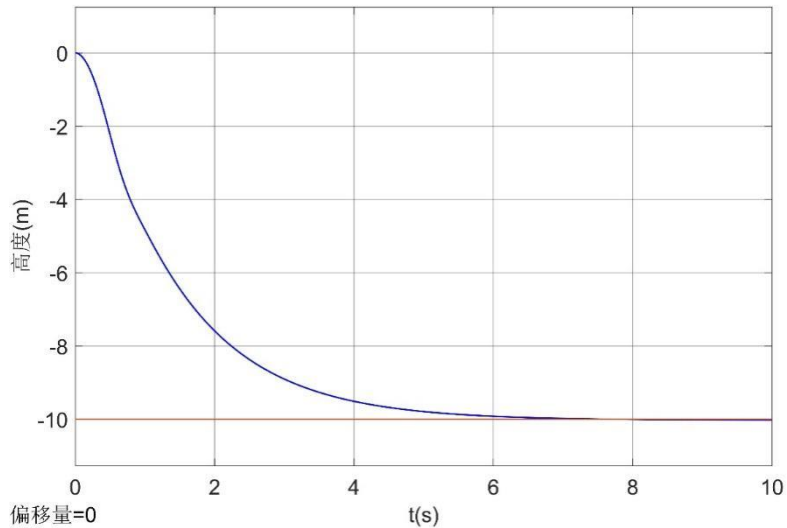


图 3-11 高度响应曲线

仿真结果分析：在固定翼模式下，无人机的高度控制实质是通过给定的高度信号与实际高度的差值解算出所需的俯仰角，从图 3-11 可以看出，无人机对高度信号跟踪无稳态误差，但调节时间长，这是由于在 z 轴方向有限速导致。

Step3: 速度控制

仿真给定条件设置 $speed = 10$;

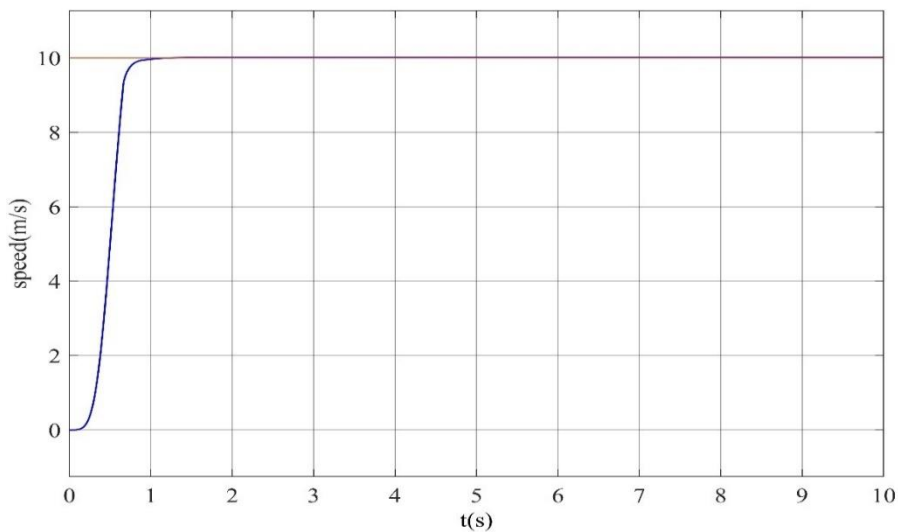
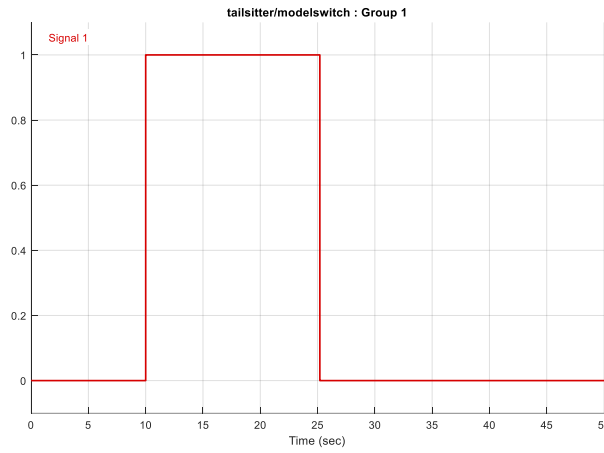


图 3-12 速度响应曲线

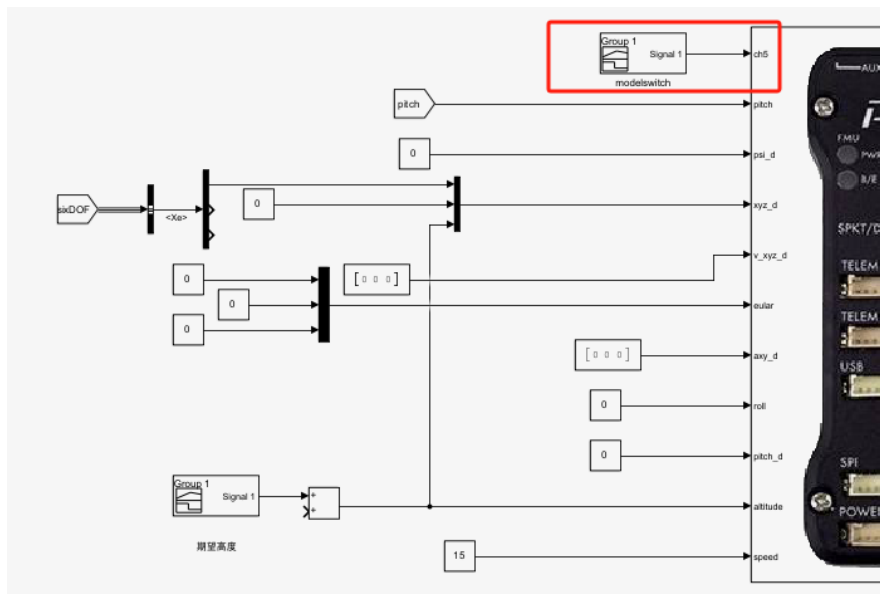
结果分析：从上面的仿真结果可以看出，尾座式无人机在固定翼模式下，速度有较好的跟踪效果，调节时间短，没有稳态误差，无超调和振荡现象，总体跟踪效果较好。

5.3 过渡过程仿真实验及结果分析

首先设计如下图所示的 Signal Builder 模块，接入 ch5 输入，使飞机在仿真第 10s 由旋翼切为固定翼，在第 25s 由固定翼切为旋翼。

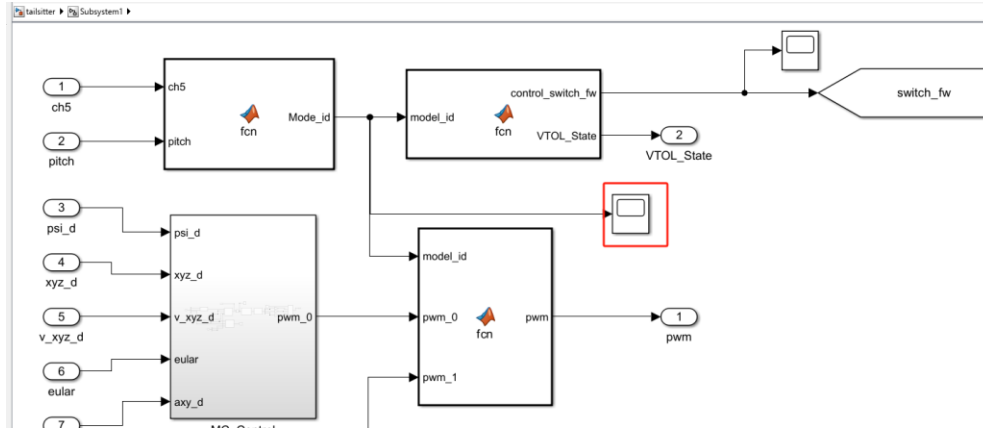


整体连接如下图，运行 simulink 程序



Step1: 观察模态切换结果

打开控制器模块中的 Mode_id 信号示波器 (tailsitter/Subsystem1/ Scope9)



仿真结果如下

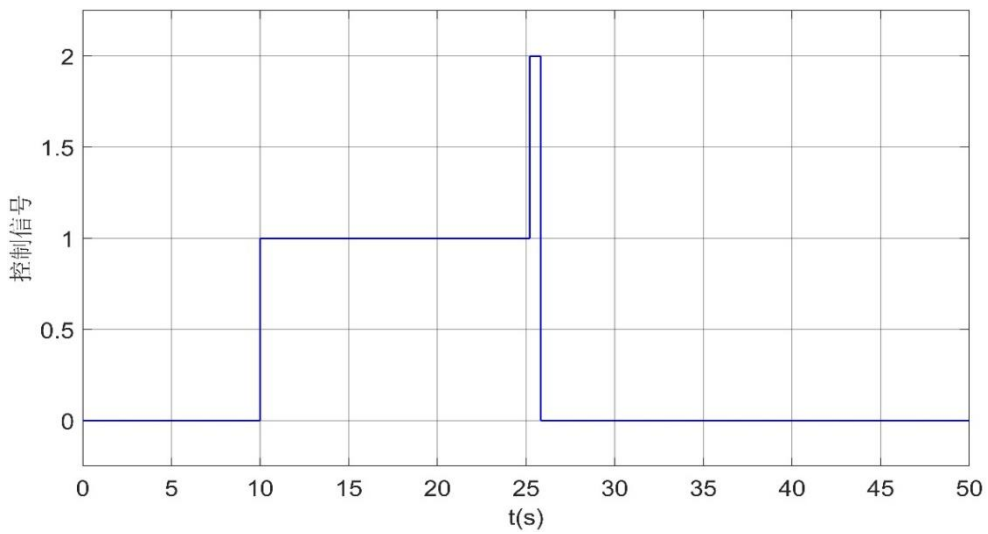
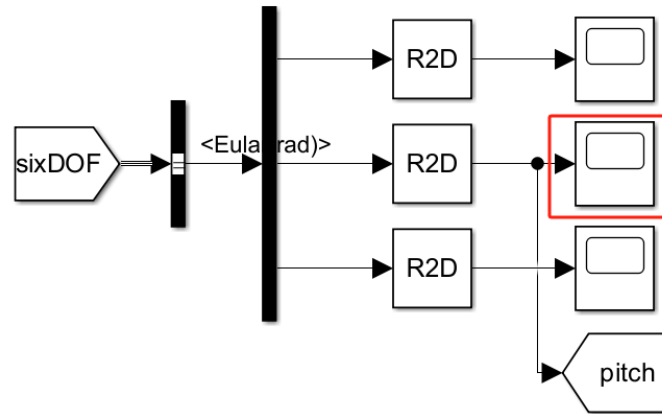


图 3-13 控制信号响应曲线

图 3-13 中的状态 0 是指控制无人机在旋翼模式，状态 1 是指控制无人机处在固定翼模式，状态 2 是指减速过渡过程中使无人机先在固定翼模式下拉升，当满足一定条件后在切回状态 0，即旋翼模式，再在旋翼模式下进行降落。在 10 秒时模拟拨动开关，控制器发出加速过渡信号，无人机开始从旋翼模式切换到固定翼模式，在 25 秒时模拟拨动开关，控制器发出减速过渡信号，无人机开始从固定翼模式切换回旋翼模式。

Step2: 观察姿态控制结果

打开图 9 所示的 Simulink 信号示波器模块中俯仰响应通道的示波器



仿真结果如下

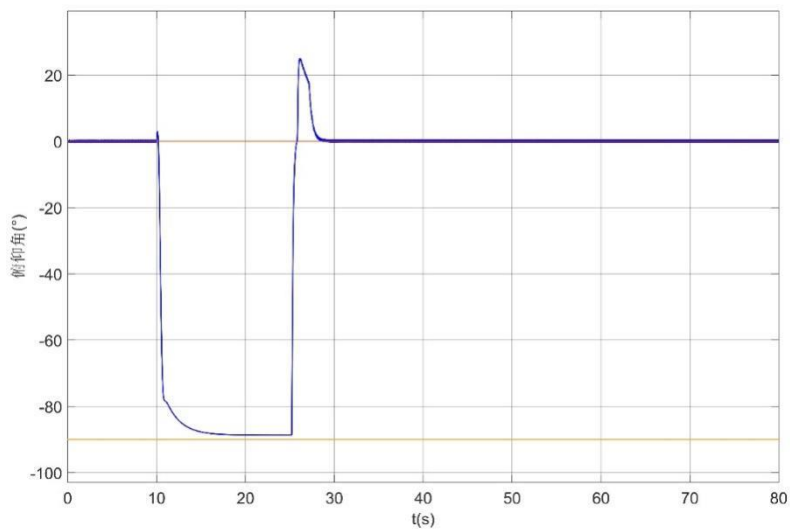


图 3-14 过渡过程响应曲线

图 3-14 为过渡过程中无人机的俯仰角变化，从图中可以看出开始 10 秒之前，俯仰角为 0° ，无人机处在旋翼模式，10 秒时，控制信号切到状态 1，无人机开始加速过渡切到固定翼模式，此时无人机俯仰角为 -90° ，显示无人机已经切换到固定翼模式，25 秒时，控制信号切到状态 2，开始减速过渡过程，此时无人机处在固定翼模式向上拉升，当满足一定条件后切回状态 0，无人机回到旋翼模式，30 秒后，无人机俯仰角为 0° ，显示无人机已经回到旋翼模式。

6. 参考资料

[1].

7. 常见问题

Q1: ***

A1: ***