

1. 实验名称及目的

1.1. 实验名称

简化倾转旋翼 PID 控制硬件在环实验

1.2. 实验目的

设计简化状态（仅包括直升机和固定翼两种模式）的倾转旋翼机控制模型并在此基础上搭建自定义 PID 控制器，实现硬件在环仿真。

1.3. 关键知识点

倾转旋翼机建模总体构造及工作原理

倾转旋翼无人机总体 Simulink 仿真模型构造如下图 1 所示：

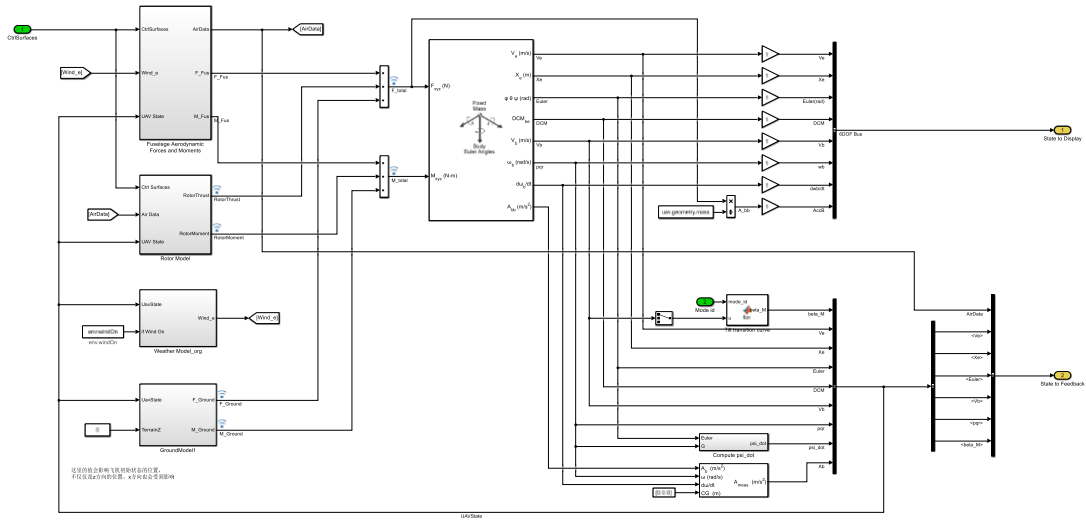


图 1 倾转旋翼无人机 Simulink 仿真模型

总体仿真模型包括 Fuselage Aerodynamic Forces and Moments 模块（对应于固定翼部分的气动力与力矩）、Rotor Model 模块（对应于旋翼建模）、Weather Model_org 模块、Ground Model 模块、6DOF (Euler Angles) 模块（对应于总体数学模型）和 Tilt Transition Curve 模块（对应于倾转走廊设计）。

与 Simulink 仿真模型对应的硬件在环模型如下图 2。

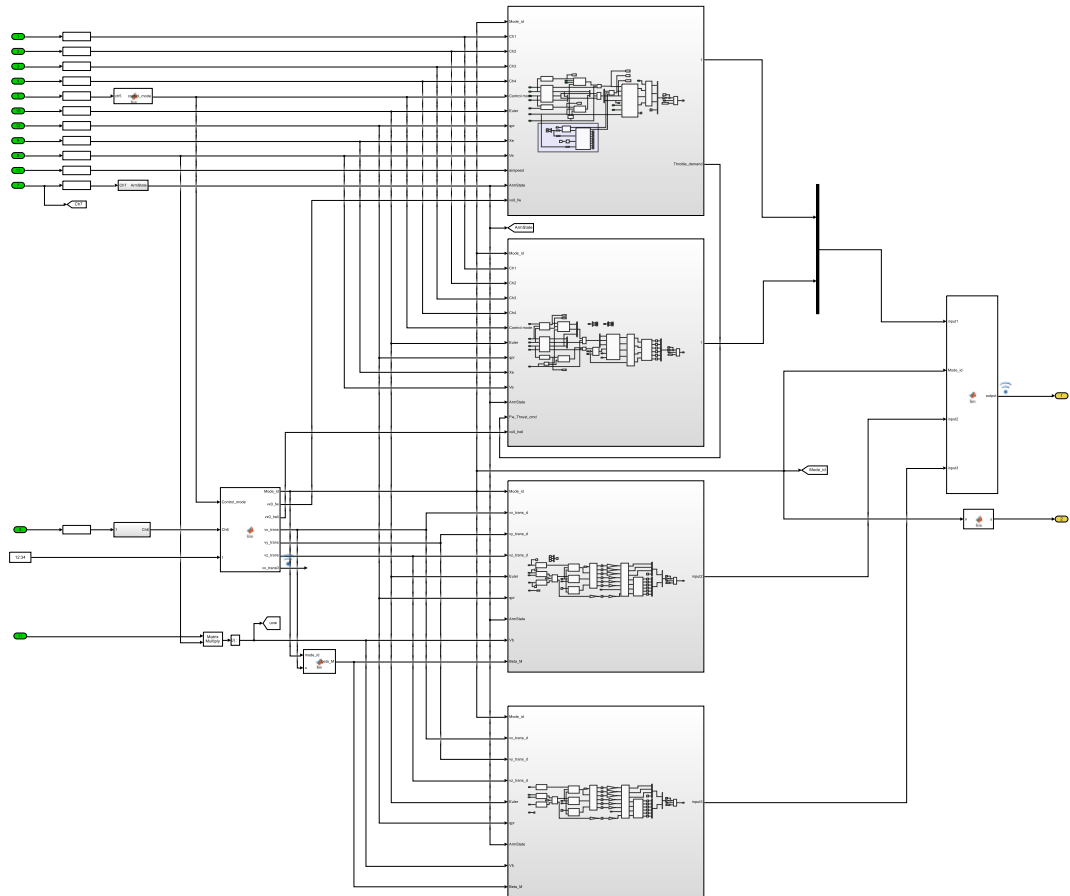


图 3 倾转旋翼无人机控制策略总体构造

鉴于倾转旋翼无人机的模型比较复杂，控制量输入在模型中很难被分离出来，所以控制方法采用完全不依赖被控对象模型的 PID 控制，另外在过渡模态的控制中加入通道切换分配模块和冗余舵面分配模块解决过渡模态下控制操纵面的冗余与切换。本项目倾转旋翼无人机控制策略的思路是首先通过模态切换逻辑模块为直升机模态、固定翼模态、加速过渡模态和减速过渡模态赋模态 ID，再分别为四个模态设计四套 PID 控制策略。其中直升机模态控制策略中提供自稳、定高、定点控制模式；固定翼模态控制策略提供自稳、定高、定速控制模式，以及固定翼航迹跟踪控制；加、减速过渡模态控制的介入是在直升机定点模式和固定翼定速模式之间，过渡模态控制由通道切换分配和冗余舵面分配将控制器得到的控制量合理的分配到所需舵面上。最终根据模态 ID 将对应的控制量传到模型中。

倾转旋翼机控制算法开发系统调试指导说明

本项目倾转旋翼无人机控制器采用完全不依赖模型的 PID 控制，直升机模态、固定翼模态和过渡模态均采用内外环串级 PID 控制，过渡模态控制将过渡过程分割为 6 段。PID 控制简单实用，易工程实现，但其参数调节需要经验支撑，尤其是本项目倾转旋翼控制中需要调试的控制参数众多，本部分给出 PID 控制参数调试说明供参考。

比例（P）控制：是一种最简单的控制方式。其控制器的输出与输入误差信号成比例关系。当仅有比例控制时系统输出存在稳态误差。

比例积分 (PI) 控制：积分 (I) 控制中，控制器的输出与输入误差信号的积分成正比关系。对于一个自动控制系统，如果在进入稳态后存在稳态误差，则称这个控制系统是有稳态误差的或简称有差系统。为了消除稳态误差，在控制器中必须引入“积分项”。积分项对误差取决于时间的积分，随着时间的增加，积分项会增大。这样，即便误差很小，积分项也会随着时间的增加而加大，它推动控制器的输出增大使稳态误差进一步减小，直到等于零。因此，比例+积分 (PI) 控制器，可以使系统在进入稳态后无稳态误差。

比例微分 (PD) 控制：微分控制 (D) 中，控制器的输出与输入误差信号的微分（即误差的变化率）成正比关系。自动控制系统在克服误差的调节过程中可能会出现振荡甚至失稳。其原因是由于存在有较大惯性组件（环节）或有滞后(delay)组件，具有抑制误差的作用，其变化总是落后于误差的变化。解决的办法是使抑制误差的作用的变化“超前”，即在误差接近零时，抑制误差的作用就应该是零。这就是说，在控制器中仅引入“比例”项往往是不够的，比例项的作用仅是放大误差的幅值，而目前需要增加的是“微分项”，它能预测误差变化的趋势，这样，具有比例+微分的控制器，就能够提前使抑制误差的控制作用等于零，甚至为负值，从而避免了被控量的严重超调。所以对有较大惯性或滞后的被控对象，比例+微分(PD)控制器能改善系统在调节过程中的动态特性。

在 PID 参数进行整定时如果能够有理论的方法确定 PID 参数当然是最理想的方法，但是在实际的应用中，更多的是通过凑试法来确定 PID 的参数。

增大比例系数 P 一般将加快系统的响应，在有静差的情况下有利于减小静差，但是过大的比例系数会使系统有比较大的超调，并产生振荡，使稳定性变坏。

增大积分时间 I 有利于减小超调，减小振荡，使系统的稳定性增加，但是系统静差消除时间变长。

增大微分时间 D 有利于加快系统的响应速度，使系统超调量减小，稳定性增加，但系统对扰动的抑制能力减弱。

在试凑时，可参考以上参数对系统控制过程的影响趋势，对参数调整实行先比例、后积分，再微分的整定步骤。

2. 实验效果

遥控器能够正确切换模态及控制模式，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 |
|------------|--------------------|--------------|
| Model | TiltrotorModel.dll | 动力学模型 DLL 文件 |
| | HITLRun.bat | 硬件在环仿真脚本 |
| Controller | Init_AllMode_HIL.m | 控制器参数初始化文件 |

| | | |
|--|---------------------------|------------------|
| | Tiltrotor_AllMode_HIL.slx | Simulink 控制器模型文件 |
| | 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，本实验需保证安装平台时选择屏蔽官方固件 | Pixhawk 6X 飞控 ^② | 1 |
| 3 | MATLAB 2022B 及以上版本 | 遥控器 ^③ | 1 |
| | | 遥控器接收器 | 1 |

①：推荐配置请见：<https://rflysim.com>

②：以本实验中所使用的飞控 Pixhawk 6C mini 为例，对应的编译命令为：px4_fmuv6x_default，固件版本推荐 1.13.2。其他配套飞控及配置请见：<http://rflysim.com>。

③：本实验演示所使用的遥控器为：天地飞 ET10、配套接收器为：WFLY RF209S。遥控器相关配置见：<https://rflysim.com/doc/zh/B/3.1ET10.html>

5. 实验步骤

首先将命名为“QZXY”和“倾转旋翼.xml”的文件复制到 RflySim3D 路径下，详细路径如图 4 所示。



图 4 显示文件

至此，硬件在环模型生成完成。

5.2 遥控器配置

遥控器各拨杆初始位置如下图所示，仿真开始前确保各拨杆位置保持初始状态。



图 5 遥控器拨杆初始状态

Step 1: 机型选择

打开遥控器电源，点击显示界面的“WFLY”图标进入设置界面，依次选择“系统设置”，“机型选择”，“固定翼&滑翔机”，“确定”，操作步骤如下图所示。



图 6 遥控器机型选择

Step 2: 通道设定

遥控器通道包括 Channel 1 至 Channel 7。Channel 1 至 Channel 4 按出厂设置，无需更改。Channel 5（起落架）设定为遥控器的 SB 通道，Channel 6（襟翼）设定为遥控器的 SA 通道，Channel 7 设定为遥控器的 SC 通道。依次点击“WFLY”，“通用功能”，“辅助通道”，将各通道设定如下图所示（d）所示，具体设定步骤如下图所示。



图 7 辅助通道设置

Step 3: 通道正反设置

通道正反设置步骤如下图所示，依次点击“WFLY”，“通用功能”，“正反设置”，将各通道的设置为图（d）所示即可。



图 8 正反设置

5.3 飞控固件生成及烧录

Step 1: 编译模型

打开 Matlab 软件，并进入硬件在环控制程序文件夹下（TiltrotorUAV_demo\Tiltrotor_HIL\Controller），打开“Tiltrotor_AllMode_HIL.slx”，运行仿真，仿真未报错即可进行自动代码生成。自动代码生成方法如下图所示，首先选择“HARDWARE”，弹出工具栏后，点击“Build”图标，此时，Matlab 进入代码编译过程。

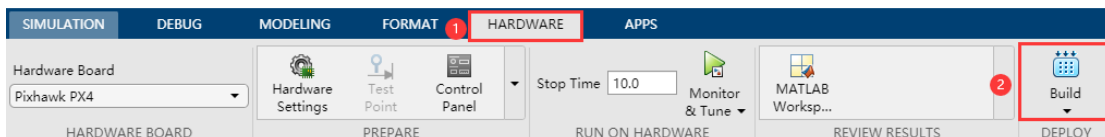


图 9 控制程序代码生成

若程序编译成功，则可弹出生成报告且无报错，检查是否成功可打开诊断，并可看到如下图中的成功提示。

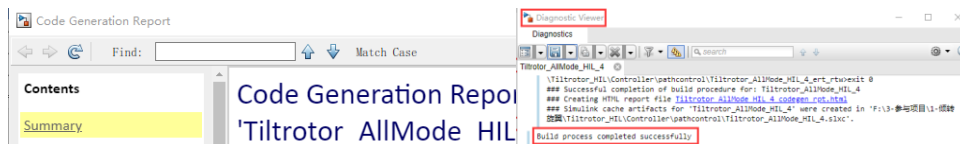


图 10 生成报告

Step 2: 代码烧录

将上述生成的控制代码烧录至飞控中，点击“Code”，将弹出命令提示框，此时使用数据线将飞控与计算机连接，开始烧录。烧录完成如下图所示，三栏进度条均为 100%。

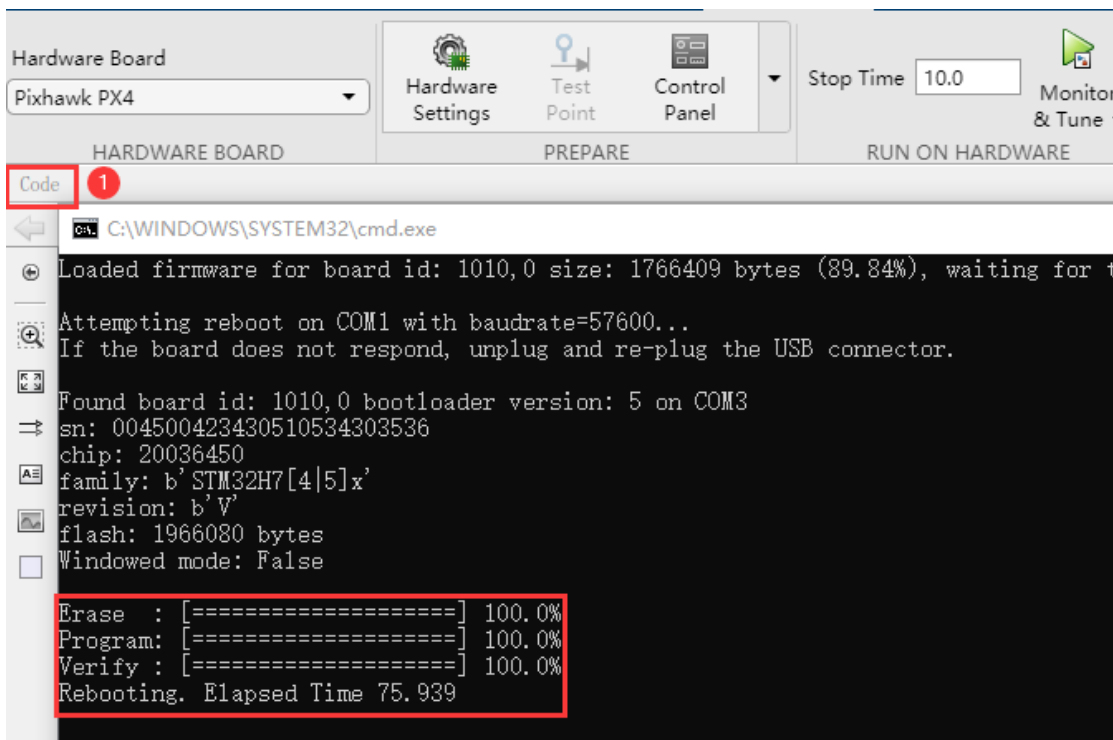


图 11 代码烧录

5.4 飞控内部参数修改。

使用“QGroundControl”软件修改飞控内部参数，主要包括日志记录，机架选取，飞行模式设定，硬件在环仿真开启等。使用数据线将飞控与计算机连接。打开“QGroundControl”软件，软件显示如下图所示。

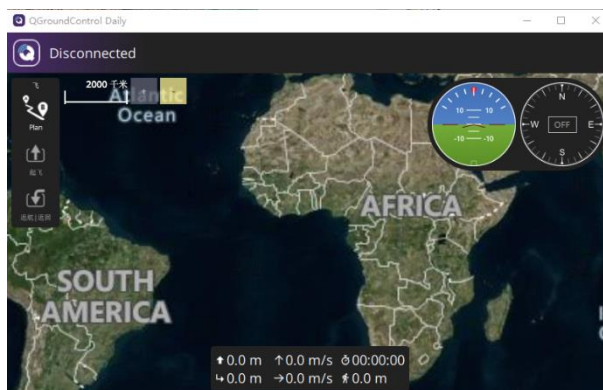


图 12 QGroundControl 软件主界面

依次点击下图中的第 1, 2 步。进入设置界面，即可完成各项参数设定。

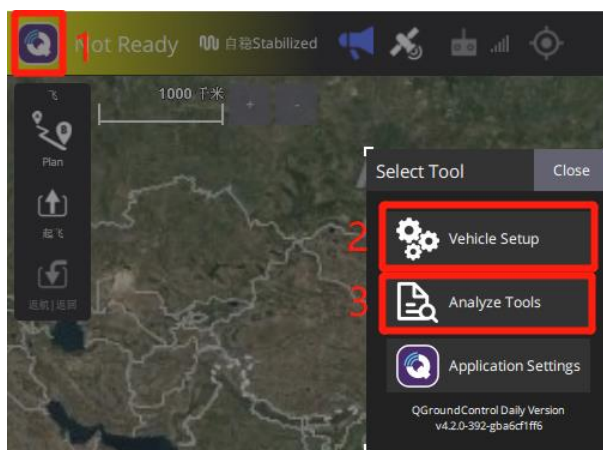


图 13 设置界面

Step 1: 机架修改。

点击“机架”，并选取“Standard Plane”，如下图所示。选取后点击界面右上角的“应用并重启”，机架设置完成。

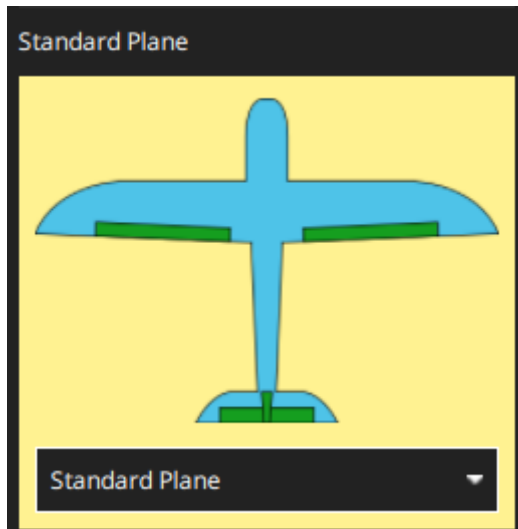


图 14 机架选取

Step 2: 启用硬件在环

点击“安全”，找到最下方的“硬件在环”，选择“HITL enabled”，如下图所示。



图 15 硬件在环仿真启动

Step 3: 飞行模式设定。

为避免与 PX4 逻辑冲突，我们需要将飞行模式进行如下图所示设置。

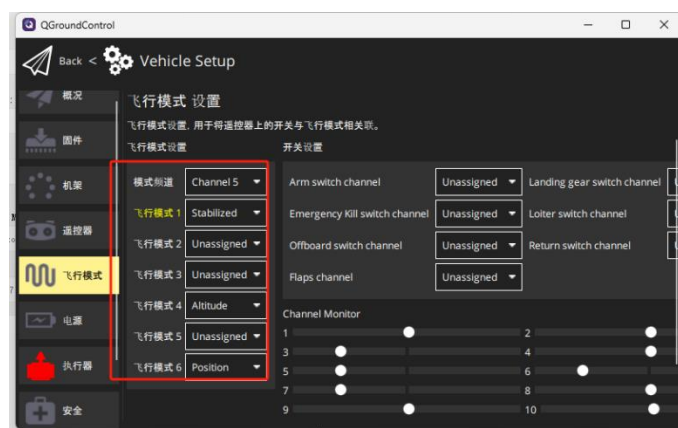


图 16 飞行模式设定

Step 4: 遥控器校准。

具体操作步骤见 <https://docs.px4.io/main/zh/config/radio.html>.

Step 5: 飞行日志记录。

选择“参数”，在搜索栏中输入“log”，将日志记录方式设定为上电记录，且记录文件编号为 19。具体设置分别如下图所示。

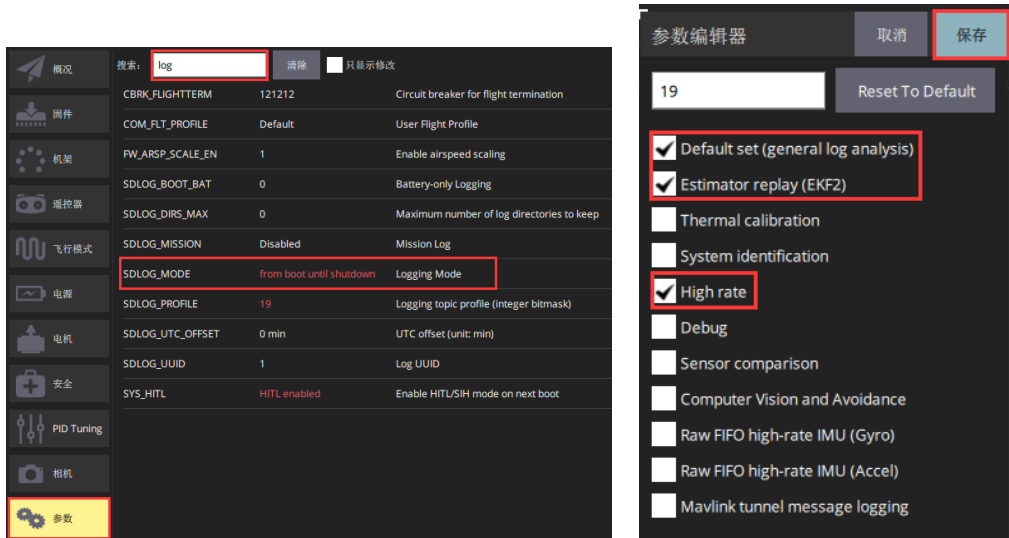


图 17 日志记录设置

Step 6: 飞行日志下载。

如图 13 的设置界面，选择“Analyze Tools”，进入日志下载界面，此时“日志下载”界面没有任何数据，点击“刷新”弹出所有数据，选择对应数据，点击下载。



图 18 日志下载

Step 7: 飞行日志查看。

使用“PX4 飞行日志分析”或“PlotJuggler”软件查看，详见 https://docs.px4.io/main/zh/log/light_log_analysis.html。

5.5 仿真流程

Step 1: 启动仿真

依次打开“RflySim3D”，“CopterSim”软件，CopterSim 软件界面如下图所示，设定“使用 DLL 模型文件”为生成的倾转旋翼模型，“飞控选择”选择飞控插入时对应的 Com 口（非 Com1）。其他设置保持默认即可，点击“开始仿真”。此时可打开“QGroundControl”软件，查看实时数据。如下图所示，“CopterSim”软件提示框弹出“PX4: GPS 3D fixed & EKF initia

lization finished”，即为初始化完成。初始化完成后，可开始使用遥控器控制倾转旋翼动作。

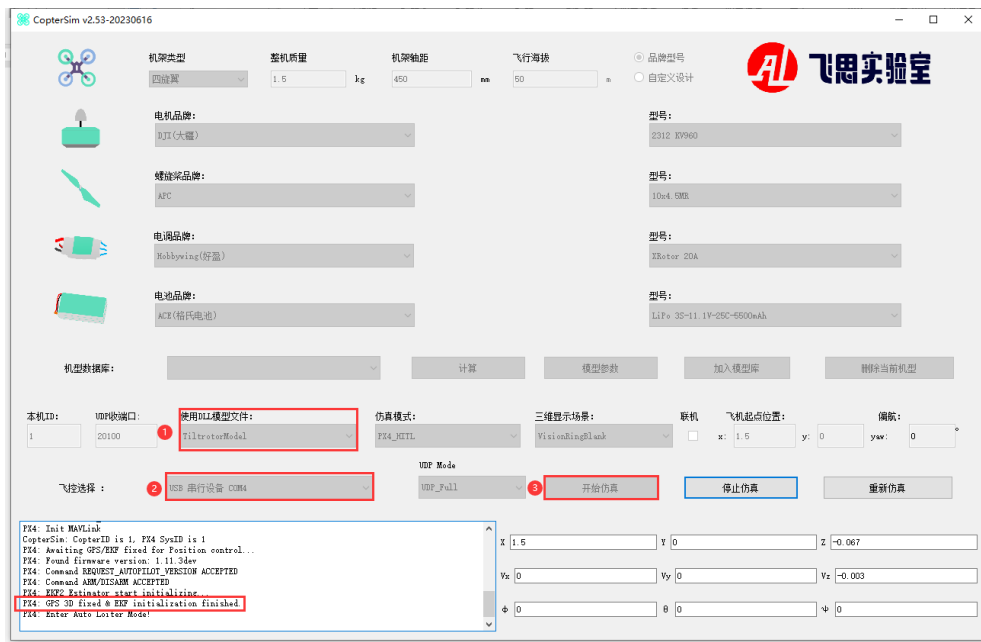


图 19 CopterSim 设置

Step 2: 倾转旋翼的控制过程

a) 辅助通道在控制程序中的功能

Channel 5 (CH5) 控制直升机模式下的自稳，定高和定点（固定翼模式下的自稳，定高和定速，下面以直升机模式叙述）。CH5 处于高位时，直升机处于自稳模式；CH5 处于中位时，直升机处于定高模式；CH5 处于低位时，直升机处于定点模式。

Channel 6 (CH6) 控制直升机模式和固定翼模式的切换。CH6 处于低位时，当前为直升机模式，将 CH6 拨至高位，将从直升机模式向固定翼模式过渡（自主完成），过渡完成后进入固定翼模式；再将 CH6 拨至低位，将从固定翼模式向直升机模式过渡（自主完成），过渡完成后进入直升机模式。

Channel 7 (CH7) 控制无人机的解锁和航迹跟踪。CH7 处于高位时，无人机处于上锁状态；CH7 处于中位时，无人机解锁；CH7 处于低位时，无人机进入轨迹跟踪。

b) 控制流程

将 SC 开关拨至中位，此时无人机解锁，可使用遥控器在自稳模式下起飞（当前为直升机模式），并可自由控制其动作。

若要实现定高飞行，可将 SB 开关拨至中位。为保持高度稳定悬停，可将油门杆拨至中位再进行各姿态动作。

若要实现定点飞行，可将 SB 开关拨至低位。为保持高度稳定悬停，可将油门杆拨至中位再进行各平移动作。

若要转换控制模式即将直升机模式转换至固定翼模式，则仅需将 SA 开关拨至高位，开始进行过渡过程，该过程中完全由系统自主完成，无需人为干预（加速过渡模式仅在直升

机模式下的定点模式响应)。待过渡完成后, 固定翼将进入定速飞行模式。

若要实现固定翼模式下的定高和自稳控制模式, 仍通过 **SB** 开关控制 (中位定高, 高位自稳)。若欲实现固定翼模式下的轨迹跟踪, 则需将 **SC** 拨至低位, 无人机将根据程序设定轨迹进行自动寻迹。待寻迹完成后, 固定翼再次进入定速飞行模式 (寻迹仅在固定翼模式下的定速模式才能切换)。

6. 参考资料

[1].

7. 常见问题

Q1: ***

A1: ***