

三旋翼垂起无人机动力学模型构建及 SITL/HITL 实验（仅限完整版及以上版本）

1. 实验目的

本例程以三旋翼垂起无人机为对象，提供从参数初始化、Simulink 动力学模型检查、模型代码编译和 DLL 生成，到软件在环（SITL）与硬件在环（HITL）验证的完整流程。通过实验可理解三旋翼垂起构型的参数来源、执行器模型、力和力矩合成、六自由度运动以及控制通道映射。

2. 实验要求

- 软件要求：Windows 10 及以上版本；RflySim5.00或更高版本，**安装时PX4固件版本必须为1.13.2**，PX4固件编译器：1-WinWSL；MATLAB/Simulink；用于模型代码生成的 Simulink Coder/Embedded Coder 和受支持编译环境；已配置的 `RflySim-20.04` WSL 环境 [\[1\]](#)。
- SITL 硬件要求：笔记本或台式电脑 1 台。
- HITL 硬件要求：笔记本或台式电脑 1 台、Pixhawk 6X mini 飞控 1 台、USB 数据线 1 根。

HITL 涉及飞控固件烧录。烧录和参数加载期间不得断开 USB 连接；确认飞控型号与 `px4_fmu-v6x_default.px4` 的目标硬件一致后再继续。

3. 实验地址与文件说明

例程目录：

[\[安装目录\]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\3.CustExps\e3_VTOLModelCtrl\5.TriRotorVTOL](#)

文件或目录	作用
TriRotorVTOL.slx	三旋翼垂起无人机 Simulink 动力学模型。
TriRotorVTOL_init.m	加载初始状态、机体、推进、气动、环境和噪声参数。
CodeBuild.m	模型代码构建辅助脚本。
GenerateModelDLLFile.p	将模型代码封装为 CopterSim 可加载 DLL 的加密工具。
MulticopterModel.zip	课程配套模型资料。
222.csv	课程提供的参数/测试数据文件。
TriRotorVTOL.dll	课程权威动力学模型 DLL，供 SITL/HITL 共同加载。
TriRotorVTOL_SITL.bat	启动 PX4 SITL、QGroundControl、CopterSim 和 RflySim3D。
SITL.params	SITL 使用的 PX4 参数。
TriRotorVTOL_HITL.bat	检测飞控串口并启动 HITL。
HITL.params	HITL 使用的 PX4 参数。
px4_fmu-v6x_default.px4	Pixhawk 6X mini 使用的实验固件。
ServoIdentification	<code>eve2.mat</code> 、 <code>rightfuyi2.mat</code> 、 <code>ru3.mat</code> 三份舵机/舵面测试数据。
PropellerCoefficients	记录原始数据可用性，并指向本 Readme 中的辨识方法。

4. 实验内容或步骤

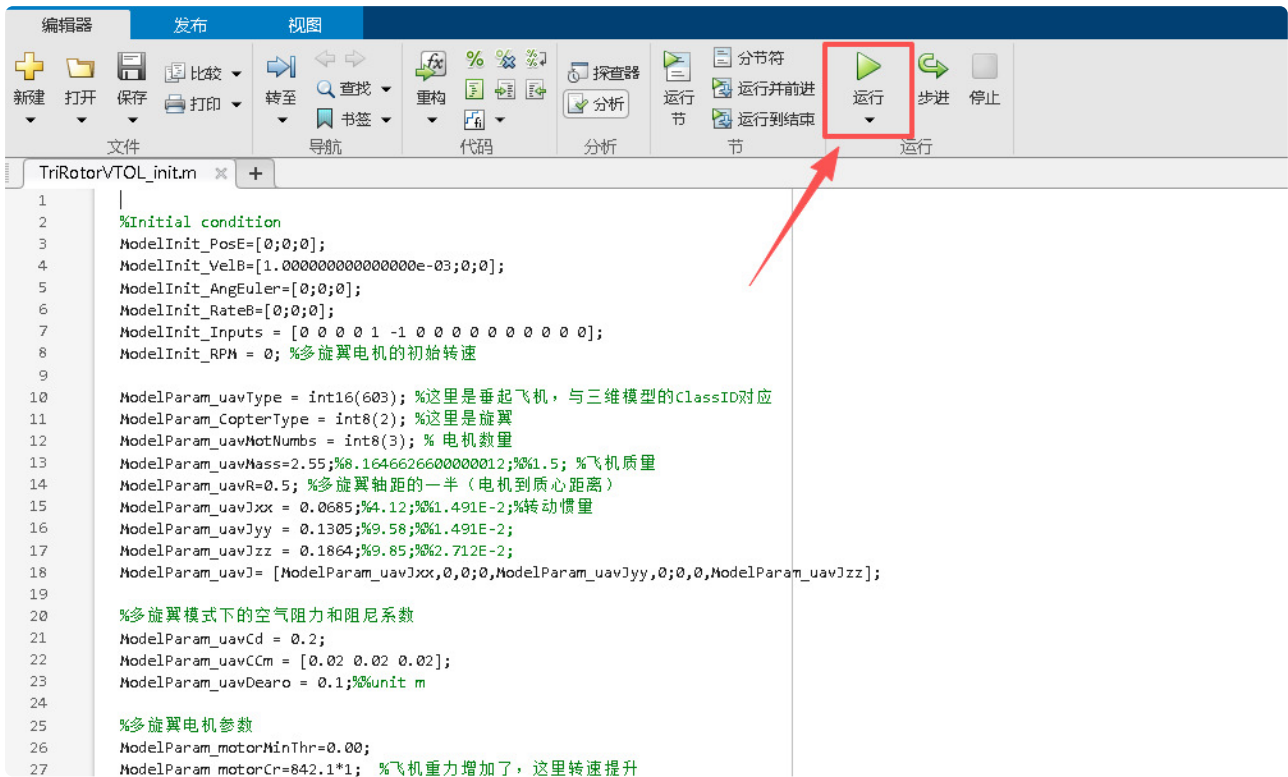
4.1 初始化 MATLAB 工作区 (MATLAB_SIMULINK)

1. 打开 MATLAB，将当前工作目录切换到本例程目录。

2. 运行 `TriRotorVTOL_init.m`。

3. 等待脚本执行结束，确认命令窗口没有红色错误。

4. 在 Workspace 中检查 `ModelInit_`、`ModelParam_`、`uav`、`env` 等模型变量已经创建。



完成判据：初始化脚本无报错，模型打开时不提示缺少基础参数。

4.2 打开并检查 Simulink 模型

1. 双击打开 `TriRotorVTOL.slx`，等待模型加载和更新结束。

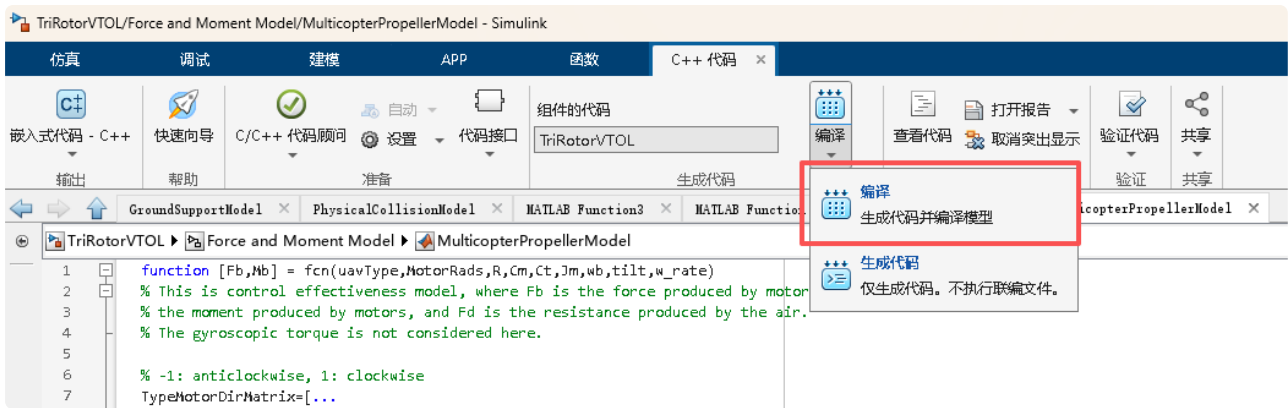
2. 检查模型输入/输出接口、执行器、气动力、力矩合成和六自由度模块没有断链。

3. 若仅查看模型，不需要执行构建或覆盖现有 DLL。

4. 如需生成代码，在 MATLAB 2019a 及以前版本使用工具栏 `Build`；在 MATLAB 2019b 及以后版本进入 `APPS -> CODE GENERATION -> Embedded Coder` 后执行 `Build`。

5. 也可按课程流程使用 `CodeBuild.m` 辅助检查和构建模型。

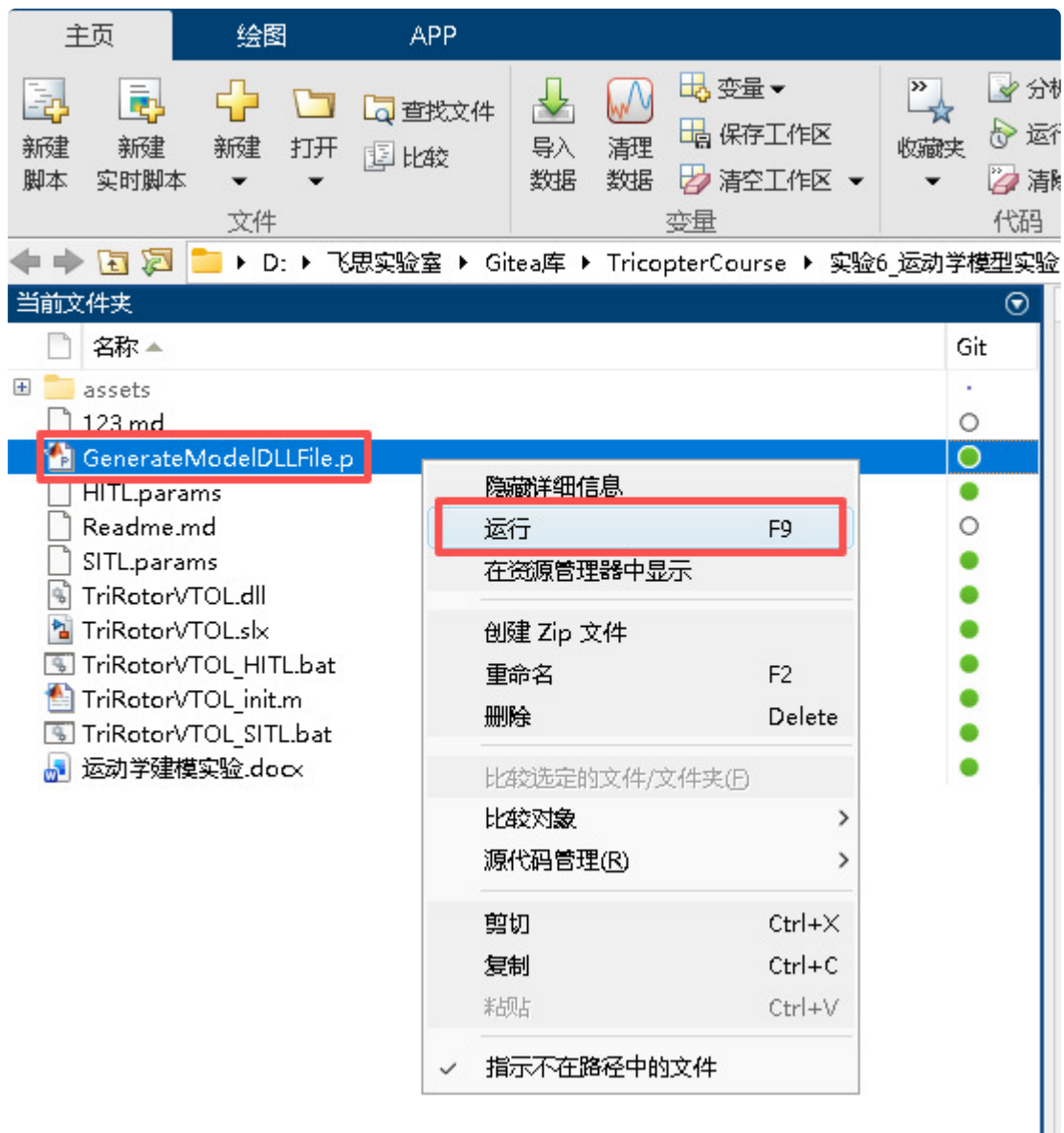




完成判据：模型能够加载；需要构建时，代码生成正常结束并产生相应生成目录，MATLAB 无红色错误。

4.3 生成 DLL（选做）

1. 确认 4.2 节的模型代码构建已经成功。
2. 备份课程权威 `TriRotorVTOL.dll`。
3. 在 MATLAB 当前目录中运行 `GenerateModelDLLFile.p`。
4. 检查新 DLL 已生成，并记录文件时间和 SHA-256。
5. 先在隔离测试目录中验证新 DLL；不要在未验证时替换交付版 DLL。



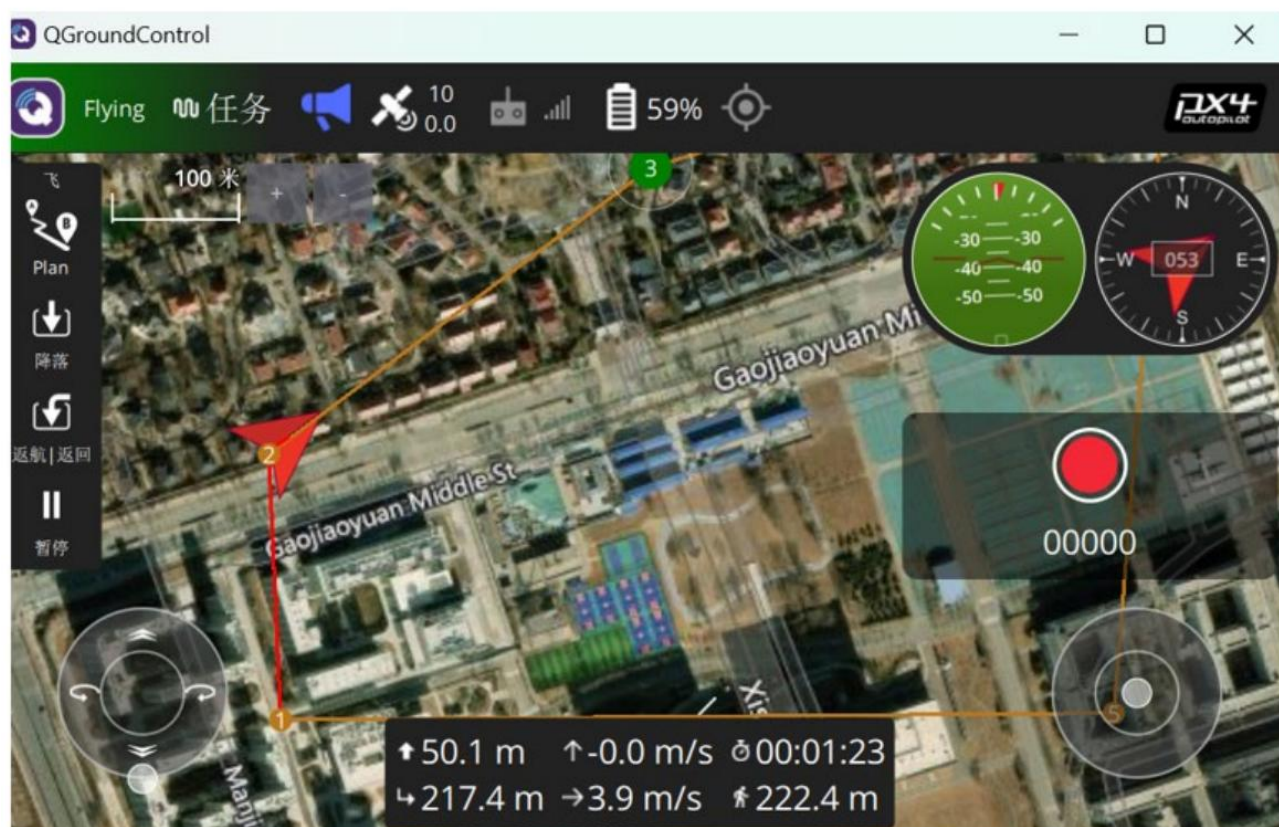
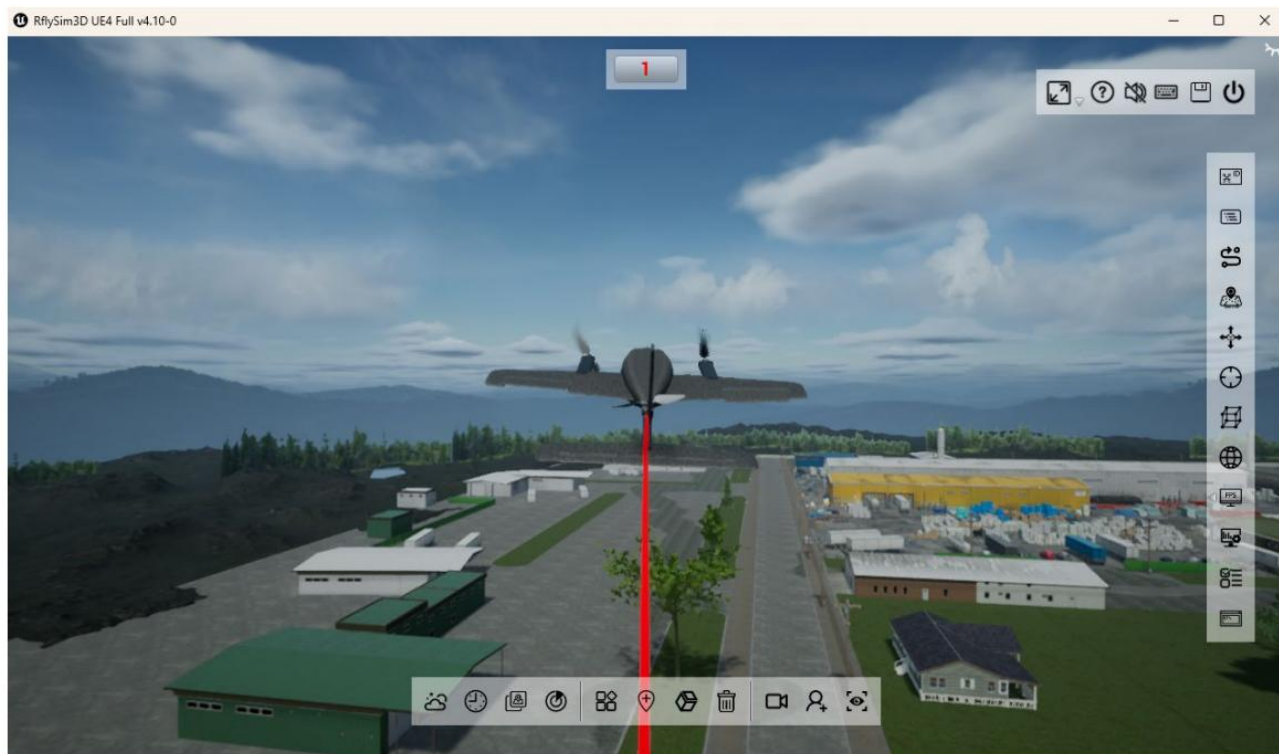
完成判据：工具执行无报错，生成的 DLL 可以被 CopterSim 加载。若本实验仅验证课程交付模型，可跳过本节并继续使用权威 DLL。

4.4 软件在环实验（BAT_SITL）

1. 双击 `TriRotorVTOL_SITL.bat`，脚本请求时同意管理员权限。
2. 在 `Please input UAV swarm number:` 后输入 `1`。
3. 等待 QGroundControl、CopterSim、RflySim3D 和 PX4 SITL 启动。脚本使用 `SimMode=2` 和 `convergence_sitl_rfly` 机架。
4. 在 QGroundControl 的参数页面加载 `SITL.params`，然后重启 QGroundControl。
5. 在 `Plan` 页面创建起飞、航点和返航任务；建议任务速度约为 `15 m/s`。
6. 上传任务并在 `Fly` 页面执行，观察垂直起飞、模式转换、航线飞行和返航。

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
已复制 1 个文件。

-----
Please input UAV swarm number:1
Start QGroundControl
Kill all CopterSims
Starting PX4 Build
[0/861] git submodule src/drivers/gps/devices
[7/861] git submodule src/modules/mavlink/mavlink
[14/861] Generating Mavlink development: src/modules/mavlink/mavlink/message_definitions/v1.0/development.xml
Validating /mnt/d/PX4PSP/Firmware/src/modules/mavlink/mavlink/message_definitions/v1.0/development.xml
Parsing /mnt/d/PX4PSP/Firmware/src/modules/mavlink/mavlink/message_definitions/v1.0/development.xml
Validating /mnt/d/PX4PSP/Firmware/src/modules/mavlink/mavlink/message_definitions/v1.0/standard.xml
Parsing /mnt/d/PX4PSP/Firmware/src/modules/mavlink/mavlink/message_definitions/v1.0/standard.xml
Validating /mnt/d/PX4PSP/Firmware/src/modules/mavlink/mavlink/message_definitions/v1.0/common.xml
Parsing /mnt/d/PX4PSP/Firmware/src/modules/mavlink/mavlink/message_definitions/v1.0/common.xml
Validating /mnt/d/PX4PSP/Firmware/src/modules/mavlink/mavlink/message_definitions/v1.0/minimal.xml
Parsing /mnt/d/PX4PSP/Firmware/src/modules/mavlink/mavlink/message_definitions/v1.0/minimal.xml
Merged enum MAV_CMD
Merged enum MAV_CMD
Found 229 MAVLink message types in 4 XML files
Generating C implementation in directory /mnt/d/PX4PSP/Firmware/build/px4_sitl_default/mavlink/development
Generating C implementation in directory /mnt/d/PX4PSP/Firmware/build/px4_sitl_default/mavlink/standard
Generating C implementation in directory /mnt/d/PX4PSP/Firmware/build/px4_sitl_default/mavlink/common
Generating C implementation in directory /mnt/d/PX4PSP/Firmware/build/px4_sitl_default/mavlink/minimal
Copying fixed headers for protocol 2.0 to /mnt/d/PX4PSP/Firmware/build/px4_sitl_default/mavlink
[861/861] Linking CXX shared library src/examples/dyn_hello/examples_dyn_hello.px4mod
Using Airframe File: 1111_convergence_sitl
starting instance 1 in /mnt/d/PX4PSP/Firmware/build/px4_sitl_default/instance_1
Copying rcS files
PX4 instances start finished
Press any key to exit
```

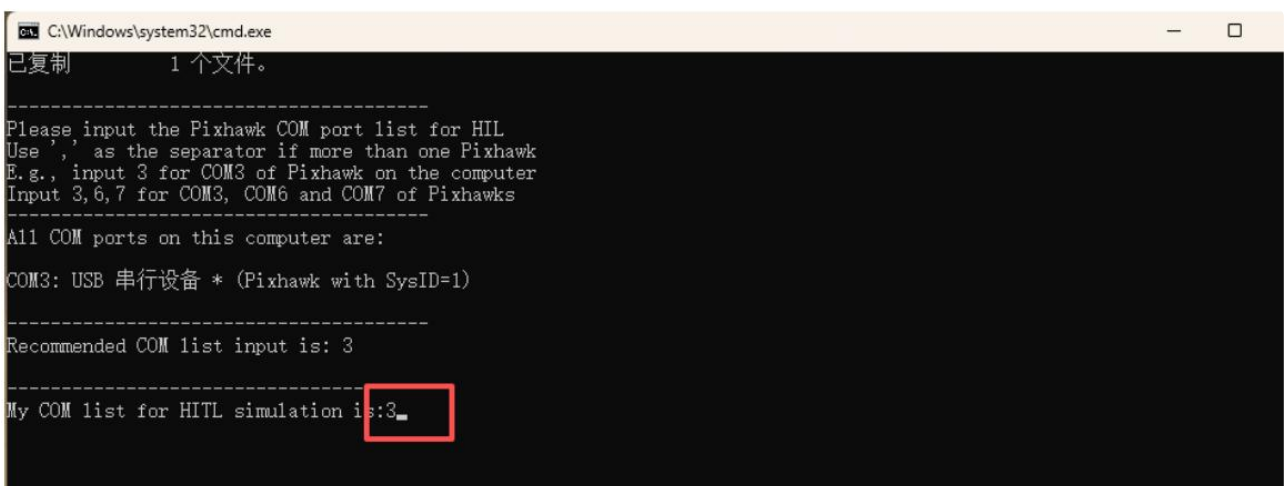
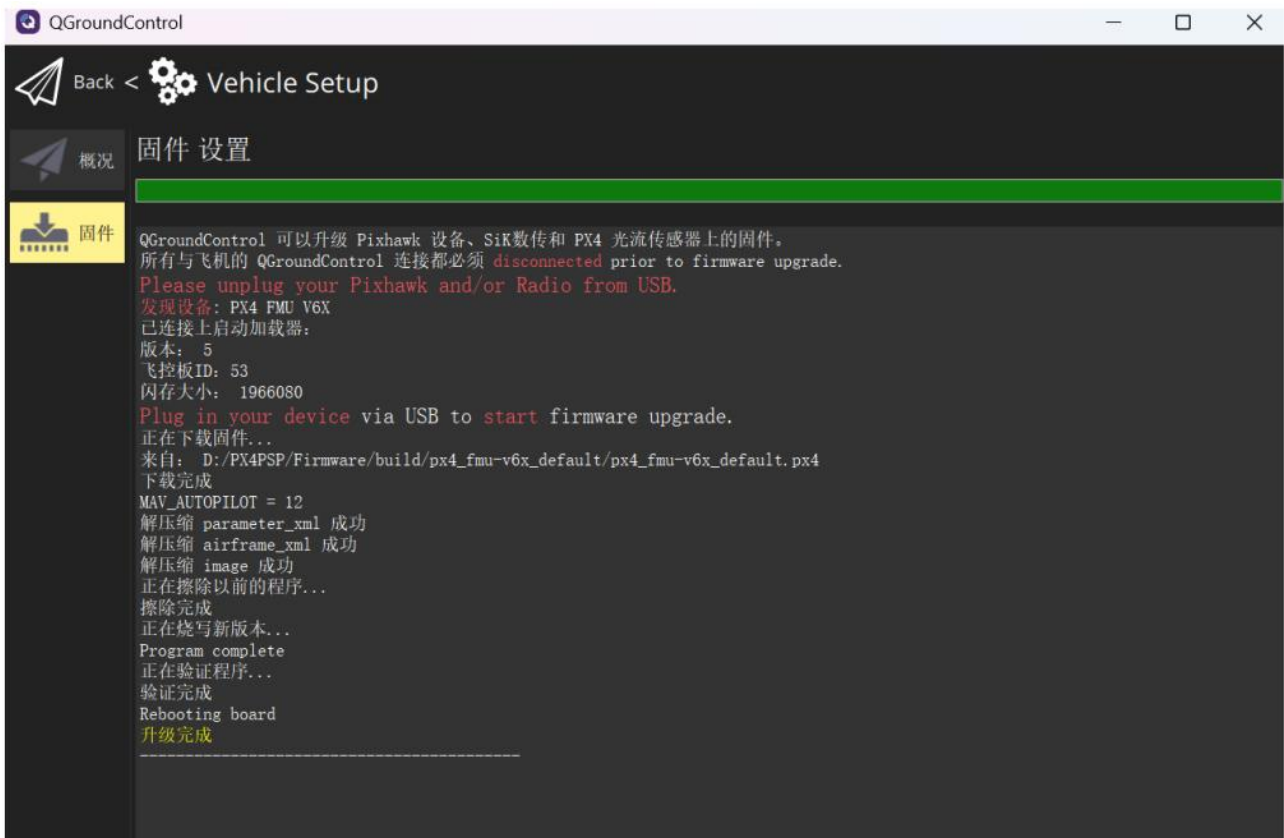


完成判据：CopterSim 成功加载 `TriRotorVTOL.dll`，载具正常起飞并按航线飞行，PX4 终端无持续错误。

4.5 硬件在环实验 (HITL_HIL_REAL)

1. 使用 USB 数据线连接 Pixhawk 6X mini。

2. 在 QGroundControl 固件页面选择自定义固件，烧录 `px4_fmu-v6x_default.px4`。
3. 在参数页面加载 `HITL.params`，确认后重启 QGroundControl。
4. 双击 `TriRotorVTOL_HITL.bat`。脚本列出串口后，输入 Pixhawk 对应的 COM 端口号。
5. 等待 RflySim3D、CopterSim 和 QGroundControl 就绪。脚本使用 `SimMode=0` 和 `921600` 波特率。
6. 按 SITL 相同方式创建和上传航线，确认遥测、仿真位置姿态和飞控状态一致后执行任务。



完成判据：CopterSim 打开指定串口并加载 DLL，QGroundControl 持续收到飞控遥测，载具能够执行上传航线。

4.6 结束实验

在 BAT 终端中按提示结束流程，确认本实验启动的进程均已退出。HITL 结束后再断开飞控 USB。若 MATLAB 打开了模型，先保存有意修改的内容，再关闭 `TriRotorVTOL.slx`。

5. 关键知识点

5.1 参数辨识与动力学建模

三旋翼垂起无人机同时经历多旋翼悬停、固定翼前飞和过渡状态。模型需要统一描述旋翼、舵面、机翼、机体惯量和外部环境，不能只使用单一飞行模式的参数。

5.1.1 转动惯量与舵机数据

`Jxx`、`Jyy`、`Jzz` 决定相同力矩下的角加速度。课程采用摆动实验提取周期，再结合质量和悬挂几何参数反算惯量。`ServoIdentification` 目录中的三份 MAT 文件保留了不同舵面/舵机通道的测试数据，可用于检查执行器响应和参数来源。

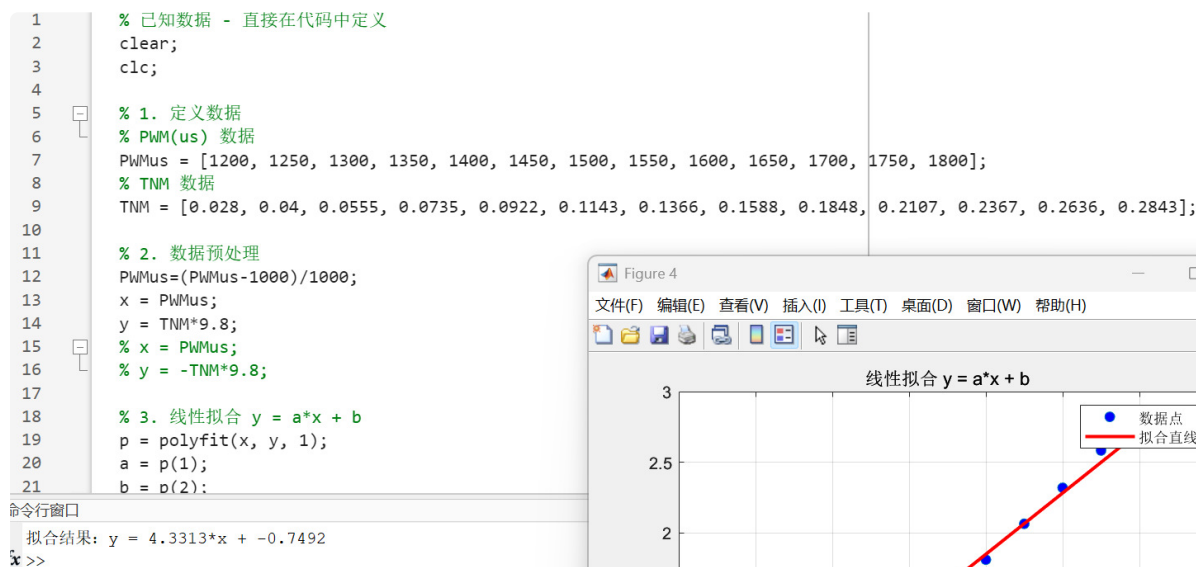
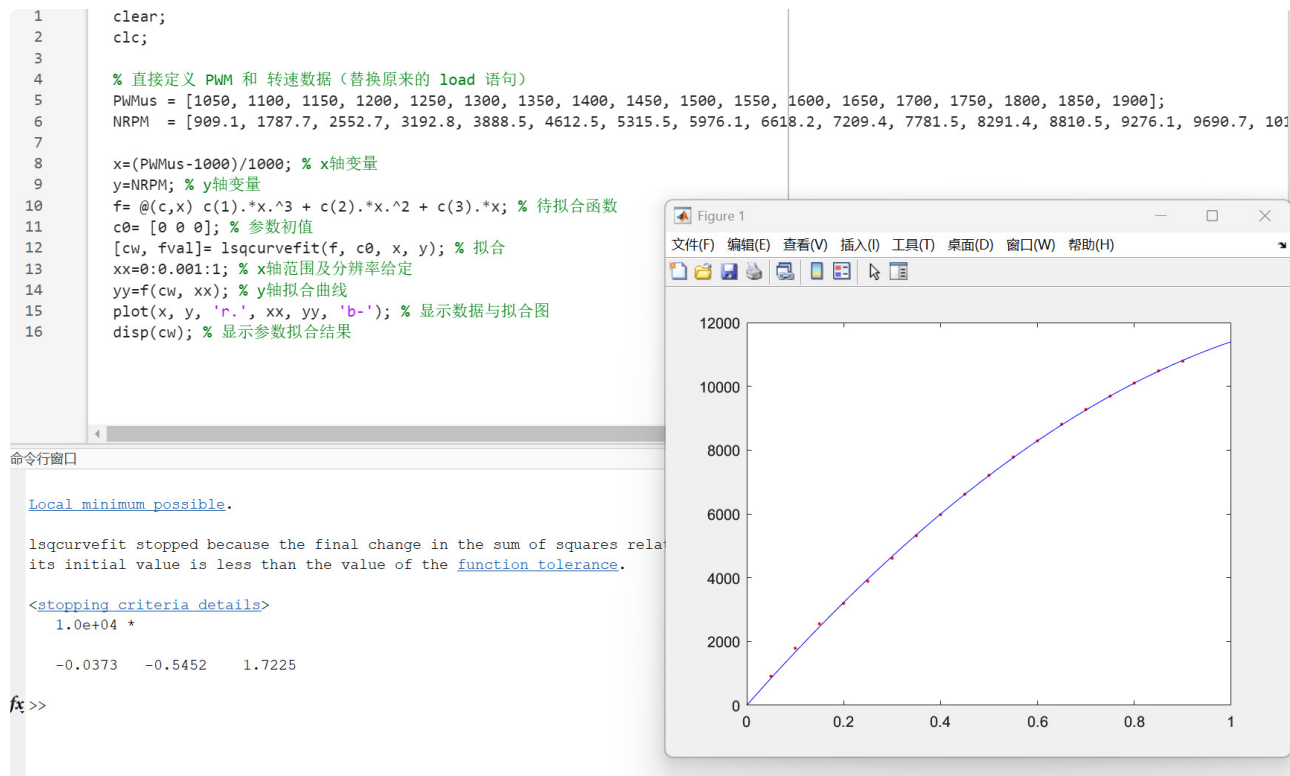
惯量参数最终写入 `TriRotorVTOL_init.m`，并进入六自由度刚体运动方程。惯量偏大时姿态响应偏慢，偏小时响应偏快。

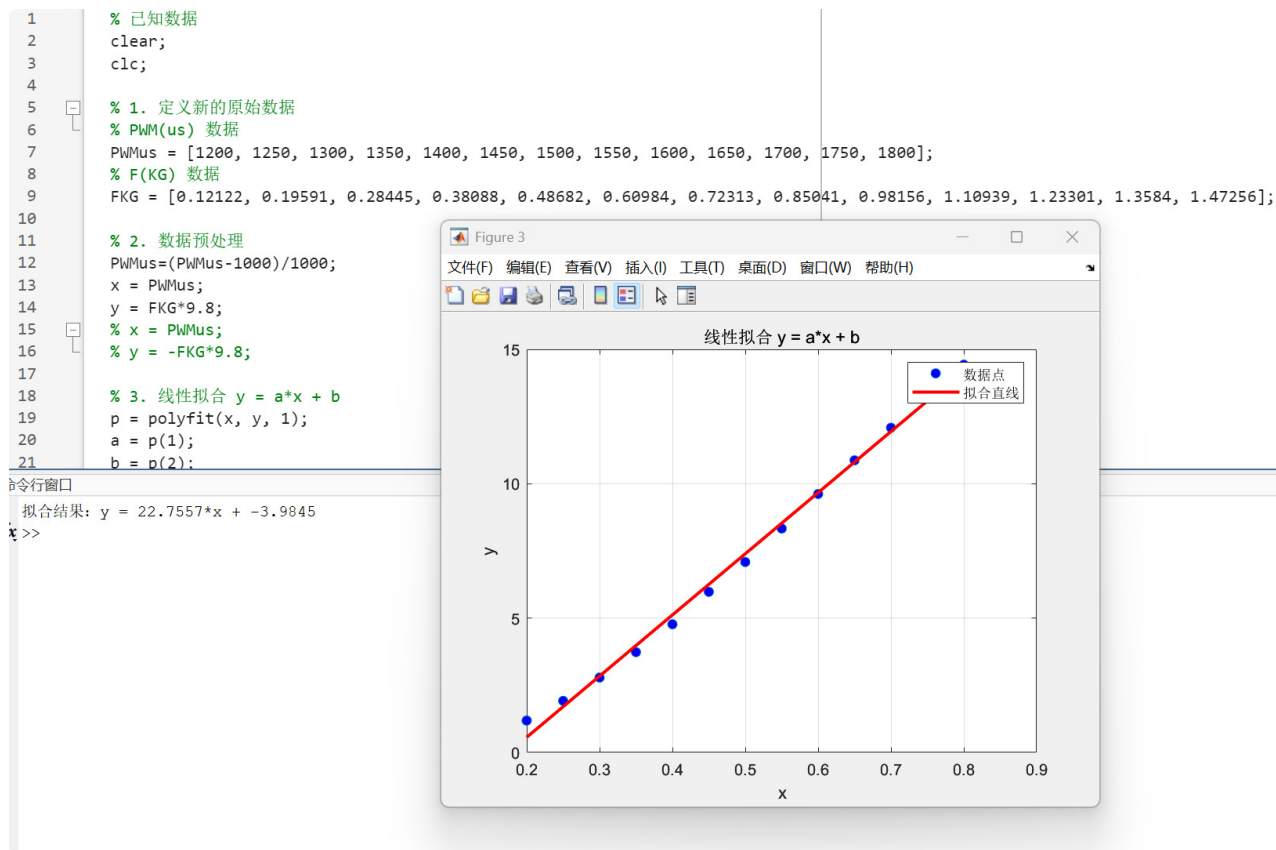
5.1.2 PWM、转速、推力和反扭矩

控制器输出 PWM，动力学模型需要的是转速、推力和反扭矩，因此执行器模型建立以下参数链：

```
1 | Motor_rads    = w1 * u^2 + w2 * u + w3
2 | Thrust_vector = aT * u + bT
3 | Torque_vector = aM * u + bM
```

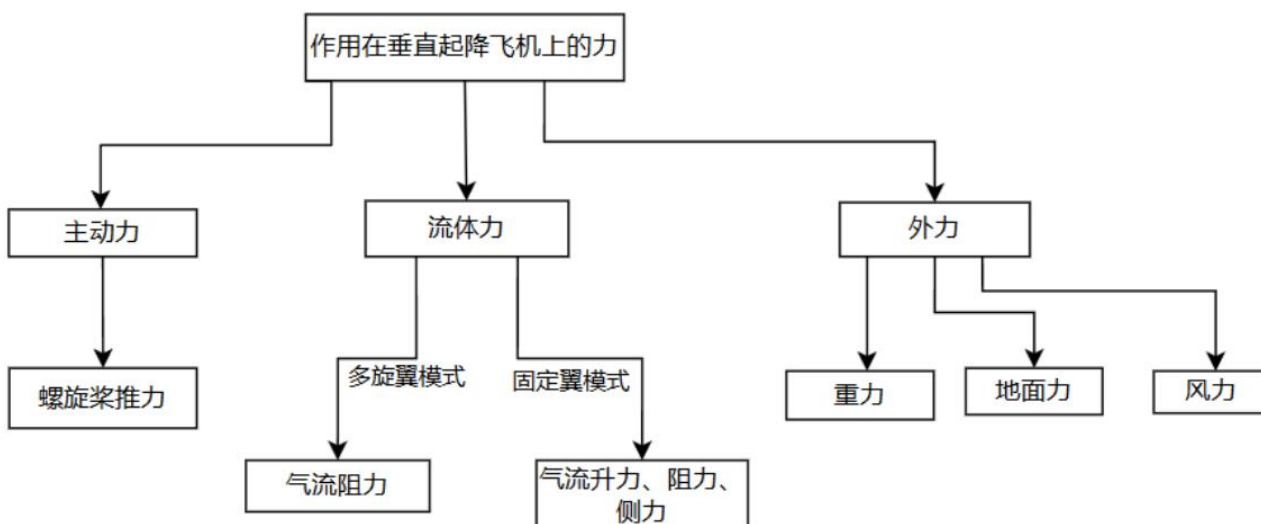
其中 `u` 为归一化 PWM；`w1`、`w2`、`w3` 描述转速拟合；`aT`、`bT` 描述推力；`aM`、`bM` 描述反扭矩。课程源未提供可迁移的螺旋桨原始数据，辨识过程和拟合结果保留在本文及图片资源中。





5.2 力和力矩合成

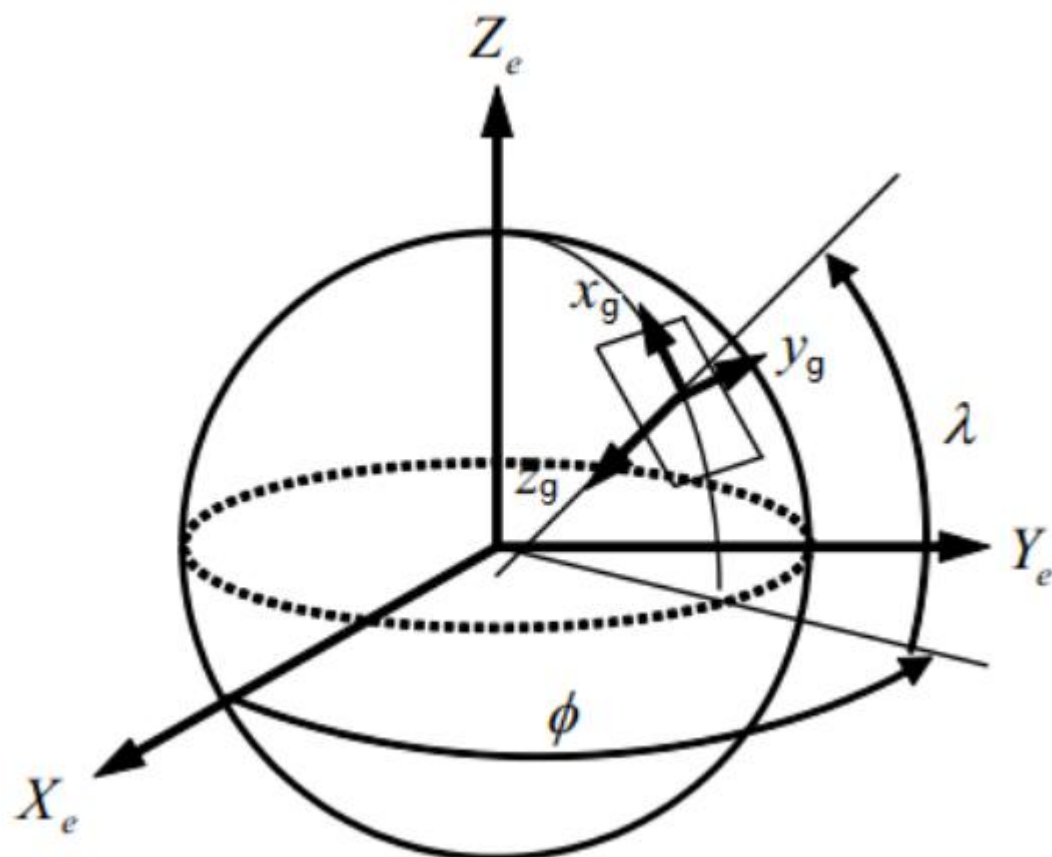
模型把螺旋桨推力、气动力、重力、风力和地面作用力合成为机体系总力；把旋翼反扭矩、推力力臂和舵面气动力合成为总力矩。总力决定平动加速度，总力矩决定滚转、俯仰和偏航角加速度。



5.3 六自由度运动

六自由度模块根据牛顿-欧拉方程计算线加速度和角加速度，再积分得到速度、位置、角速度和姿态。机体系适合表达推进、舵面和气动力，地球坐标系适合表达高度、位置和航迹，

两者通过姿态旋转矩阵转换。



5.4 控制通道映射

控制器给出总推力及滚转、俯仰、偏航力矩目标，混控模块将其分配到三个旋翼和舵面。多旋翼模式主要依赖旋翼推力差，固定翼模式更多依赖气动舵面，过渡状态需要两类执行器联合分配。参数文件中的动态混控设置必须与模型中的执行器方向、顺序和量纲一致。

6. 参考资料

1. [RflySim 官方文档](#)
2. [RflySim 安装说明](#)
3. [垂直起降飞机模型设计及验证](#)
4. [免费版 DLL 运行例程](#)
5. 本目录中的 [模型初始化脚本](#)、[SITL 参数](#) 和 [HITL 参数](#)

7. 常见问题

Q1: 打开模型后提示参数未定义怎么办?

确认 MATLAB 当前目录为本例程目录，并先运行 `TriRotorVTOL_init.m`。检查命令窗口最早出现的错误，避免在初始化未完成时直接构建模型。

Q2: 找不到 Simulink 的 Build 按钮怎么办?

MATLAB 2019a 及以前版本可直接使用工具栏 `Build`；2019b 及以后版本先进入 `APPS -> CODE GENERATION -> Embedded Coder`。若仍无入口，检查 Simulink Coder/Embedded Coder 和编译环境是否安装。

Q3: DLL 没有生成或无法加载怎么办?

先确认模型代码构建成功，再运行 `GenerateModelDLLFile.p`。不要移动模型、生成目录或 `.p` 文件。生成后先在隔离目录验证，若 CopterSim 无法加载则恢复权威 DLL。

Q4: SITL 可以运行但载具无法起飞怎么办?

重新加载 `SITL.params`，检查 PX4 机架为 `convergence_sitl_rfly`，并核对动态混控、模式切换和航线速度。

Q5: HITL 无法连接飞控怎么办?

检查固件、USB 驱动、设备管理器 COM 口和 `921600` 波特率；关闭占用串口的程序后重新插拔飞控，再运行 `TriRotorVTOL_HITL.bat`。

Q6: 为什么不直接重新生成并提交 DLL?

模型构建结果会受 MATLAB、代码生成器和编译器版本影响。本例程已统一使用课程实验7的权威 DLL；除非任务明确要求重建并完成回归验证，否则应保持该二进制不变。

1. 安装、编译器和 MATLAB 配置见 <https://rflysim.com/doc/zh/HowToInstall.pdf>。↩