

# 四旋翼综合模型——姿态+油门控制例程说明

## 1. 实验目的

在四旋翼综合模型（MulticopterN0px4）的基础上，通过 Python 外部控制接口

`sendDllAtt` 直接下发期望**姿态角 + 油门**指令，绕过模型内部的位置/速度控制环，实现对四旋翼的底层姿态控制。通过本实验，可以理解四旋翼在不同控制层级下的指令含义，掌握从位置控制切换到“姿态直通控制”的基本方法，并观察姿态角、油门值与飞行轨迹之间的对应关系。

完成实验后，应能够：

- 正确启动 `MulticopterN0px4` 软件在环仿真环境。
- 使用 Python 脚本调用 `sendDllTakeoff`、`sendDllAtt` 和 `sendDllPosNedNoYaw`。
- 解释滚转角、俯仰角、偏航角和归一化油门对四旋翼运动的影响。
- 根据俯仰/滚转角估算油门补偿量，避免前飞或侧飞时明显掉高。

本例程演示如下飞行流程：

1. 使用位置控制模式 `sendDllTakeoff` 起飞至 10 m 高度。
2. 切换至姿态 + 油门模式 `sendDllAtt`，以固定俯仰角前飞。
3. 切回位置控制模式 `sendDllPosNedNoYaw`，刹车并悬停归位。

## 2. 实验要求

- 软件要求：Windows 10 及以上版本；RflySim 工具链 [\[1\]](#)；Python 3.8+。
- 硬件要求：笔记本/台式电脑 1 台。

## 3. 实验地址

例程目录：

[安装目录]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\2.AdvExps\e2\_MultiModelCtrl\16.MultiNoPX4AttThrustPy

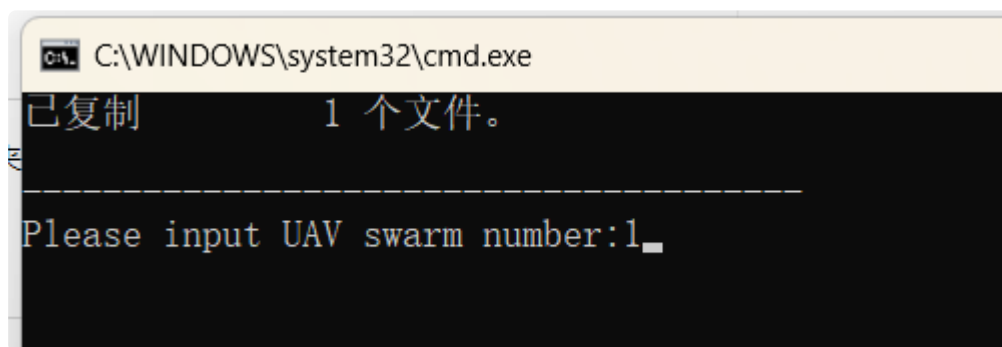
主要文件：

- [demo\\_att\\_simple.py](#)：姿态 + 油门控制例程脚本。
- [MulticopterNOpx4.bat](#)：综合模型启动脚本。
- [MulticopterNOpx4.dll](#)：综合模型动态链接库。
- [Init.m](#)：旋翼模型参数。
- [Init\\_control.m](#)：控制器参数，包含悬停油门 `THR_HOVER=0.609`。

## 4. 实验内容或步骤

### 4.1 步骤 1：启动仿真

双击运行 [MulticopterNOpx4.bat](#) 文件，在弹出得对话框中输入 `1`。等待仿真环境初始化完成。脚本将会启动 1 个 QGC 地面站，1 个 CopterSim、1 个 RflySim3D 软件，等待 CopterSim 软件下侧日志栏必须打印出 `GPS 3D fixed & EKF initialization finished` 字样代表初始化完成。如下图所示：





CopterSim 窗口和 RflySim3D 窗口正常启动，RflySim3D 中出现待控制的四旋翼模型。



## 4.2 步骤 2：运行控制脚本

双击运行 Python38Run.bat 脚本，在弹出的对话框中输入：

```
1 | python demo_att_simple.py
```

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe X + v
Python3.8 environment has been set with openCV+pymavlink+numpy+pyulog etc.
You can use pip or pip3 command to install other libraries
Put Python38Run.bat into your code folder
Use the command: 'python XXX.py' to run the script with Python

D:\RflySim\RflySimAPIs\4.RflySimModel\3.CustExps\e11.MultiNoPX4AttThrustPy>python demo_att_simple.py|
```

脚本将自动执行：起飞 → 俯仰前飞 → 位置控制归位。

姿态控制简化测试

俯仰：-5.0° (-0.0873 rad)

油门：0.63

```
=====

[0.0s] 起飞至 10m ...
[8.0s] 起飞完成

[8.0s] 俯仰前飞: pitch=-5.0°, thrust=0.63
[9.0s] 前飞中 ...
[10.0s] 前飞中 ...
[11.0s] 前飞中 ...
[12.0s] 前飞中 ...
[13.0s] 前飞中 ...
[13.0s] 前飞结束

[13.0s] 切回位置控制, 悬停刹车 ...
[14.0s] 位置控制减速/归位中 ...
[15.0s] 位置控制减速/归位中 ...
[16.0s] 位置控制减速/归位中 ...
[17.0s] 位置控制减速/归位中 ...
[18.0s] 位置控制减速/归位中 ...
[18.0s] 测试完成! 飞机应已回到起点上方悬停
```

预期变化：命令行无异常报错，四旋翼按脚本设定完成起飞、前飞和归位动作。

## 4.3 步骤 3：观察飞行效果

在 RflySim3D 中观察四旋翼的飞行轨迹：

1. **起飞阶段**（约 0~8 s）：垂直爬升至 10 m 高度。



2. RflySim3D UE4 Free v4.12-0



3. 前飞阶段 (约 8~13 s): 机头下压约  $5^\circ$ , 向前加速飞行。



4. 归位阶段 (约 13~18 s): 切回位置控制, 自动减速并返回起点上方。



## 5. 关键知识点

### 5.1 sendDllAtt 接口说明

`sendDllAtt` 用于下发期望滚转角、俯仰角、偏航角和油门值：

```
1 | dll.sendDllAtt(roll, pitch, yaw, thrust)
```

该接口通过设置 `inSILInts` 和 `inSILFloats`，使能姿态直通控制模式。

| 参数                  | 存储位置                         | 单位        | 说明                    |
|---------------------|------------------------------|-----------|-----------------------|
| <code>roll</code>   | <code>inSILFloats[9]</code>  | 弧度 (rad)  | 期望滚转角。正值表示右滚，对应向右侧飞。  |
| <code>pitch</code>  | <code>inSILFloats[10]</code> | 弧度 (rad)  | 期望俯仰角。负值表示机头下压，对应向前飞。 |
| <code>yaw</code>    | <code>inSILFloats[11]</code> | 弧度 (rad)  | 期望偏航角。                |
| <code>thrust</code> | <code>inSILFloats[15]</code> | 归一化 (0~1) | 油门值。悬停值约为 0.609。      |

## ⚠️ 特别注意：角度单位是弧度，不是度！

模型内部的位置控制器通过 `phi = acceleration / g` 计算期望姿态角，输出单位为**弧度**，限幅为 0.61 rad（约 35°）。`sendDllAtt` 的姿态值会直接替换该输出，因此必须使用弧度。

```
1 import math
2
3 # ✅ 正确写法：使用 math.radians() 将角度转换为弧度
4 dll.sendDllAtt(roll=0, pitch=math.radians(-5), yaw=0, thrust=0.63)
5
6 # ❌ 错误写法：传入度值 → 被当作弧度 → 炸机
7 dll.sendDllAtt(roll=0, pitch=-8, yaw=0, thrust=0.609)
```

## 5.2 协议位域映射

`sendDllAtt` 内部设置的协议为：

```
1 inSILInts[0] = CmdBase(3) + CmdArmed(4) + CmdOffboard_Att(1 << 17) = 131079
2 inSILInts[1] = HasAtt(1 << 8) + HasThrust(1 << 11) = 2304
```

在 Simulink 模型中的对应关系：

| 协议标志                   | 位掩码                                  | Simulink 内部变量                     | 控制作用               |
|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| <code>CmdArmed</code>  | <code>inSILInts[0] &amp; 4</code>    | <code>DataTypeConversion13</code> | PID 积分器重置 + 电机输出门控 |
| <code>CmdSIL</code>    | <code>inSILInts[0] &amp; 2</code>    | <code>DataTypeConversion4</code>  | 选择内部控制器或外部 PWM     |
| <code>HasAtt</code>    | <code>inSILInts[1] &amp; 256</code>  | <code>DataTypeConversion22</code> | Switch 选择外部姿态角输入   |
| <code>HasThrust</code> | <code>inSILInts[1] &amp; 2048</code> | <code>DataTypeConversion23</code> | Switch 选择外部油门输入    |

## 5.3 油门值说明

| 状态    | 推荐油门值     | 说明                                                         |
|-------|-----------|------------------------------------------------------------|
| 悬停    | 0.609     | 来自 <code>Init_control.m</code> 中的 <code>THR_HOVER</code> 。 |
| 前飞/侧飞 | 0.62~0.65 | 倾斜时升力垂直分量减小，需适当加油门补偿。                                      |
| 缓慢下降  | 0.55~0.59 | 低于悬停油门。                                                    |
| 最大油门  | 0.9       | <code>MAX_MAN_THR</code> 上限。                               |
| 最小油门  | 0.05      | <code>MIN_MAN_THR</code> 下限。                               |

补偿公式：倾斜角为  $\theta$  时，需要油门 =  $\text{THR\_HOVER} / \cos(\theta)$  才能保持高度不变。例如  $5^\circ$  俯仰时， $0.609 / \cos(5^\circ) \approx 0.612$ 。

## 5.4 模式切换注意事项

**重要：** `sendDllAtt` 是姿态直通模式，**没有位置/速度反馈**。飞机在该模式下不会自动维持位置，也不会自动刹车。

当需要从姿态控制切回悬停时，**必须切换到位置控制模式**，例如 `sendDllPosNedNoYaw` 或 `sendDllTakeoff`，由位置控制器负责减速和定位：

```
1 | # ❌ 错误：用 sendDllAtt 悬停，飞机可能持续漂移
2 | dll.sendDllAtt(roll=0, pitch=0, yaw=0, thrust=0.609)
3 |
4 | # ✅ 正确：切回位置控制，自动刹车并锁定位置
5 | dll.sendDllPosNedNoYaw(x=0, y=0, z=-10)
```

## 5.5 参数修改建议

可以从以下参数入手进行扩展实验：

| 参数                         | 默认值                           | 修改效果                        |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| <code>PITCH_FWD_RAD</code> | <code>math.radians(-5)</code> | 绝对值越大，前飞加速度越明显，但掉高和姿态风险也越大。 |



| 参数        | 默认值   | 修改效果                       |
|-----------|-------|----------------------------|
| THR_FWD   | 0.63  | 越大越容易保持高度或爬升，过大可能导致明显上升。   |
| 前飞持续时间    | 5 s   | 时间越长，水平位移越大，归位阶段需要更长刹车距离。  |
| CTRL_FREQ | 30 Hz | 频率过低会导致指令不连续，过高则增加脚本和通信负担。 |

建议每次只修改一个参数，并记录飞行现象。这样更容易判断某个参数对姿态、速度和高度的具体影响。

## 6. 参考资料

1. [RflySim 官方文档](#)
2. [四旋翼综合模型设计及仿真实验](#)
3. [RflySimAPIs/4.RflySimModel/API.pdf](#)
4. [RflySimSDK/ctrl/DllSimCtrlAPI.py](#)

## 7. 常见问题

### Q1: 运行脚本后飞机立刻翻转炸机

A1: 检查 `sendDllAtt` 的角度参数是否使用了弧度。最常见的错误是传入度值，例如 `-8`，该值会被模型当作 `-8 rad = -458°`，导致瞬间翻转。请使用 `math.radians()` 转换。

### Q2: 前飞后切到零姿态悬停，但飞机一直漂移

A2: `sendDllAtt(roll=0, pitch=0, thrust=0.609)` 只是零姿态 + 悬停油门，没有位置反馈，无法消除水平速度。需要切换到位置控制模式 `sendDllPosNedNoYaw`，让位置环帮助刹车。

### Q3: 前飞时飞机掉高度

A3: 飞机倾斜后, 升力的垂直分量减小。需要适当增加油门值, 补偿量为

$\text{THR\_HOVER} / \cos(\text{pitch}) - \text{THR\_HOVER}$ 。例如  $5^\circ$  倾斜时约需增加 0.003,  $10^\circ$  倾斜时约需增加 0.01。

#### Q4: 如何同时控制滚转和俯仰?

A4: 直接在 `sendDllAtt` 中同时设置 `roll` 和 `pitch`, 注意复合倾斜时油门需要更多补偿:

```
1 | dll.sendDllAtt(  
2 |     roll=math.radians(5),      # 右滚 5°  
3 |     pitch=math.radians(-5),    # 前倾 5°  
4 |     yaw=0,  
5 |     thrust=0.63                # 复合倾斜需要更多油门补偿  
6 | )
```

#### Q5: 脚本运行正常, 但飞机没有明显响应姿态指令怎么办?

A5: 先确认 CopterSim 和 RflySim3D 已经正常启动, 且脚本中的 `CopterID=1` 与仿真中启动的飞机编号一致。然后检查是否先执行了起飞阶段, 飞机必须处于已解锁、可控状态后, `sendDllAtt` 的姿态和油门指令才会产生明显效果。如果仍无响应, 可重点排查 `DllSimCtrlAPI` 路径是否指向当前安装的 RflySimSDK, 以及 `sendDllAtt` 内部是否正确设置了 `HasAtt` 和 `HasThrust` 标志位。

- 
1. <https://rflysim.com/> ↩