

# 1. 实验名称及目的

## 1.1 实验名称

多旋翼阻力矩系数及转动惯量测量与辨识

## 1.2 实验目的

用双线摆（测量转动惯量的方法）进行测量，通过飞控采集的数据辨识无人机的简谐振荡衰减系数（角速度的自然阻尼系数）来近似无人机的俯仰、滚转以及偏航阻力矩系数（）

## 1.3 关键知识点

### 测量装置安装

采用双线摆法（测转动惯量的方法，具体操作请参考专利（“一种测量小型飞行器转动惯量与惯性积的方法”）来测量阻力矩系数。

需要设计并搭建Simulink

MCC控制器（这里控制器并不起作用，只为了承载uORB配置以采集必要数据），同时配置好uORB（如图

1所示）；编译控制器，然后将其固件烧写进飞控中。

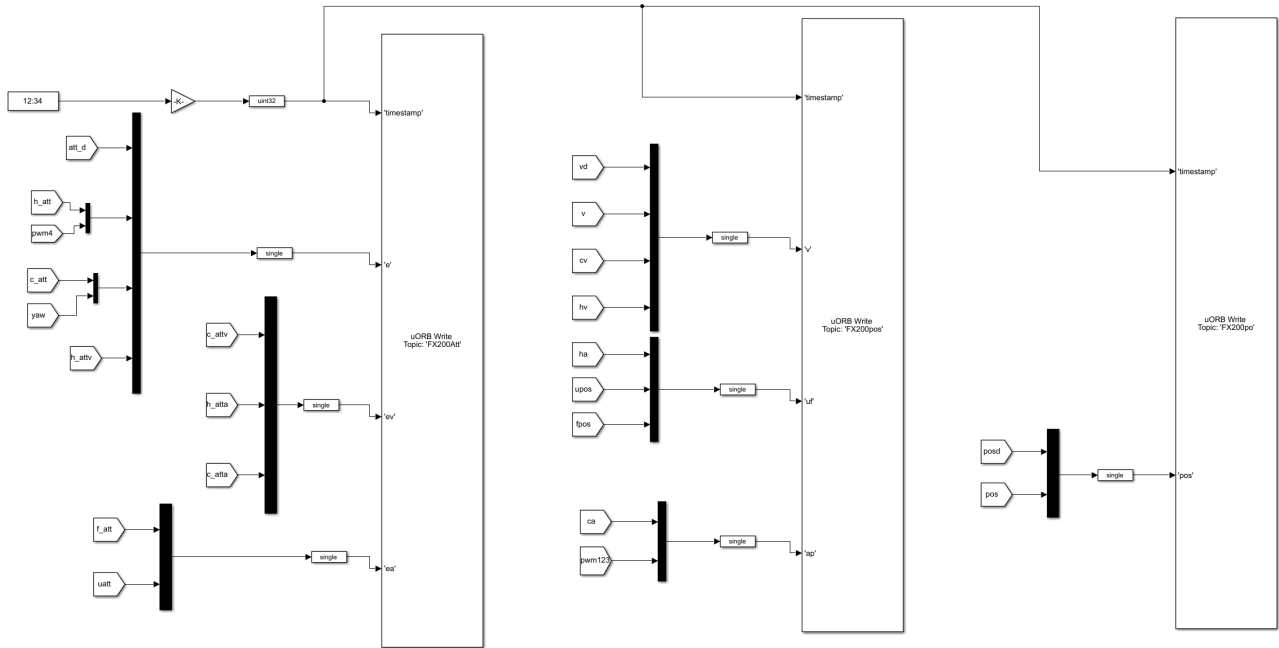


图 1 uORB消息订阅（阻力矩系数测量）

## 需要采集的数据

名称	单位
日志数据时间戳	微秒 ( $\mu\text{s}$ )
姿态角速度	弧度/秒 (rad/s)
数据采集频率	赫兹 (Hz)
绳长	米 (m)
两绳间距	米 (m)
质量	千克 (Kg)

## 转动惯量计算公式

由双线法测量转动惯量的计算公式为：

$$I = \frac{mgd^2}{16\pi^2 L} T_n^2$$

其中， $m, d, L$  均为测量得到， $T_n$  为简谐振荡周期。 $m$  取质量的测量平均值为 2.015 kg，重力加速度  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。如 FX450 各轴测量对应的两绳间距  $d$  与绳长度  $L$  的测量结果的平均值如表 1 所示。

表 1

	绳间距平均值	绳长度平均值
X (m)	0.385	1.02
Y (m)	0.390	1.02
Z (m)	0.565	1.02

## 2. 实验效果

## 3. 文件目录

例程目录：

[安装目录]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\2.AdvExps\e12\_ModelTempId\2.InteriaModelId

文件夹/文件名称	说明
Ref	风洞相关资料

## 4. 运行环境

### 4.1 软件要求

Windows 10及以上版本；RflySim工具链；MATLAB 2017B及以上<sup>③</sup>。

①：若使用Pixhawk 6X飞控，平台安装时的编译命令为：px4\_fmu-v6x\_default，推荐PX4固件版本为：1.12.3。其他配套飞控及编译命令请见：

<https://rflysim.com/doc/zh/1/Hardware.html>

### 4.2 硬件要求

笔记本/台式电脑<sup>①</sup> 1台；FX系列无人机（需要支持自稳模式）若干台；无弹性细绳（细绳应尽可能长至少大约3m，绳长约为无人机轴距的3-5倍） 2台；较高的房梁（将细绳系在高度约为3~5m的悬梁上，要求悬梁刚性较大且固定，不会产生转动或者较大幅度振动） 1台；动力电池 若干台；米尺、剪刀、弹簧秤等工具 若干台。

①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

## 5. 实验步骤

### 选做实验：测量装置连接与安装

#### Step 1：飞控固件烧录及遥控器连接

自行设计控制器用于uORB消息订阅（参见图

1），并将生成的固件烧录至无人机飞控中，连接QGC地面站检查日志记录参数是否设置为上电记录日志；

将遥控器与无人机对码，对码遥控器不需任何操作，始终处于初始位置即可；

#### Step 2：飞行器的安装与平衡调整

下悬挂点配置：指悬线的下端点，它们直接固定于飞行器上，调整两点在飞行器上位置，保证两点等高，均匀分布在质心两侧。上悬挂点配置：指悬线的上端点保证两点高度相同，且两点间距离与下悬挂点两点间距离相等。细绳配置：让细绳连接上下悬挂点，细绳应该保持竖直（上下悬挂点间距相等），且两侧绳子长度相等。测量三轴转动惯量需进行三次不同安装，无人机三种安装方法的示意图如图

2所示；



图 2 无人机安装示意图

## | 选做实验：双线摆测量

### | Step 1：测量x轴转动惯量

将无人机按照图 2 (a) 图固定好后，接通无人机动力电源；

保持无人机处于静止且竖直状态（无人干预），人为的将无人机绕着重心的铅垂线旋转一定角度（大致 $40^\circ$ 左右）后释放无人机；

无人机将会处于自由摆动状态，等待无人机完全静止停摆。

继续重复上述操作1~5次，尽量每次转过角度有一定差值；

### | Step 2：下载x轴的测量结果

对于轴转动惯量的2~6次测试完成后，即可将无人机断开动力电源，解开细绳的下端点，下载日志；

### | Step 3：更换测量轴

更换测量绕轴和轴的转动惯量，测试方法同上。

## | 必做实验：辨识飞机的转动惯量

### | Step 1：加载数据

将飞行日志中的角速度数据加载至MATLAB工作空间，流程请参考图 3；

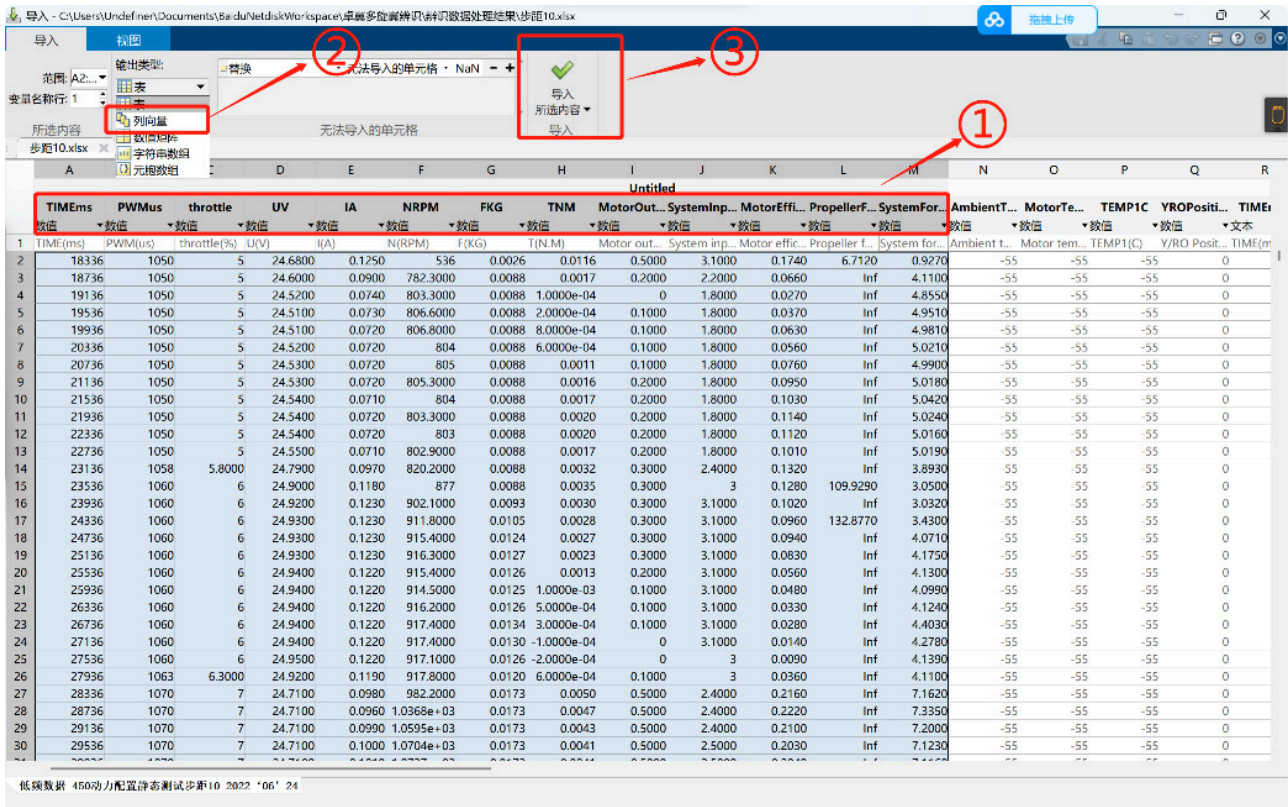


图 3 数据导入

## Step 2: 数据处理

由于姿态数据较为光滑清晰，且我们采用的是角速度数据进行计算，所以在计算之前无须对数据进行滤波等预处理，并认为数据无趋势偏差。

## Step 3: 简谐振荡周期的计算

利用MATLAB中的fft函数与fftshif函数求取横滚角速度的振荡频率与周期：

1.  $\text{fft\_p}=\text{fft}(p)$ ; % p为横滚角速度数据
2.  $n=\text{length}(p)$ ; % n为p的数据长度
3.  $\text{fsx}=20$ ; % fs为p的数据采集频率
4.  $\text{fftshift\_p}=\text{fftshift}(\text{fft\_p})$ ;
5.  $f=\text{linspace}(-\text{fsx}/2,\text{fsx}/2,n)$ ;
6. %---幅值最大值对应的频率近似为p的简谐振荡频率---
7.  $\text{fnx}=\text{max}(f((\text{abs}(\text{fftshift\_p})==\text{max}(\text{abs}(\text{fftshift\_p}))))$ );
8.  $\text{Txn}=1/\text{fnx}$ ; % p的近似简谐振荡周期

同理，通过求取俯仰、偏航角速度可求得的其余两个转动方向的简谐振荡周期。求得的三轴简谐振荡周期如表2所示。

表 2

	$T_{nx}$	$T_{ny}$	$T_{nz}$
简谐振荡周期 (s)	0.9873	1.0209	0.8879

## Step 4: 根据公式计算转动惯量

将测量值与简谐振荡周期分别带入公式求解转动惯量，如FX450无人机的三轴转动惯量如表3所示。

表 3

	$I_{xx}$	$I_{yy}$	$I_{zz}$
转动惯量 ( )	0.01850	0.02030	0.03223

## 必做实验：辨识飞机的阻力矩系数

经过严格测量，在假设无人机重心不偏心与偏心不严重的前提下，我们可以由以下步骤对阻尼力矩进行辨识。

### Step 1: 数据导入

选择阻尼力矩系数测量实验数据路径，打开对应的飞行日志，选择导入“时间戳 (Timestamp)”、“角速度 (Vehicle angular velocity)”，如图 4所示；

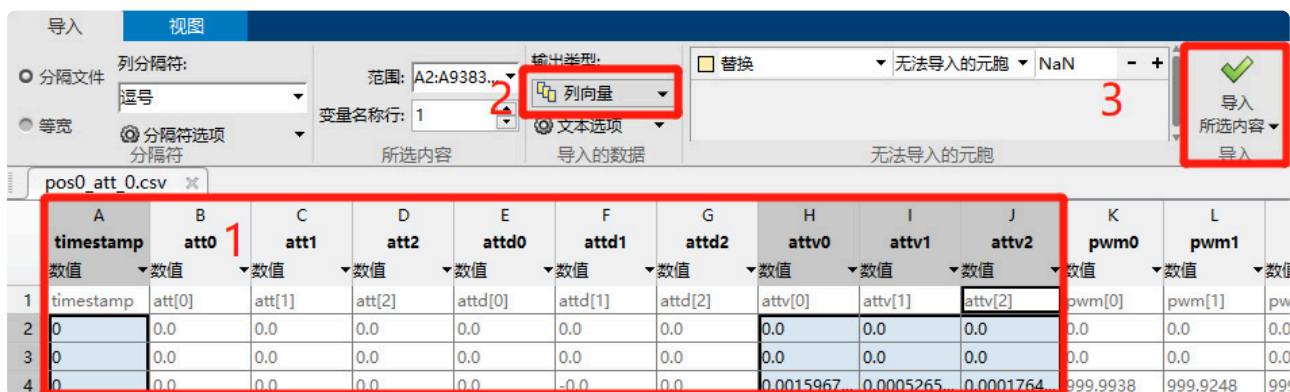


图 4 角速度导入

## Step 2: 数据预处理

由于数据的采样时间在logger设置中被我们设定为20Hz，此次的数据我们不进行滤波处理，且由于角速度数据没有偏移量，因此无需其他数据处理操作；

## Step 3: 提取滚转角速度包络线

以滚转角速度为例，在空气的自然阻尼条件下，多次双线摆实验的滚转角速度如图 5 (a) 蓝色实线所示。首先需要提取角速度的上包络线来得到衰减曲线，通过MATLAB的hilbert函数（或者findpeaks函数）可以实现：

```
1. p_m=abs(hilbert(p)); % 提取滚转角速度包络线
```

提取到的包络线如图 5 (a) 红色点线所示。

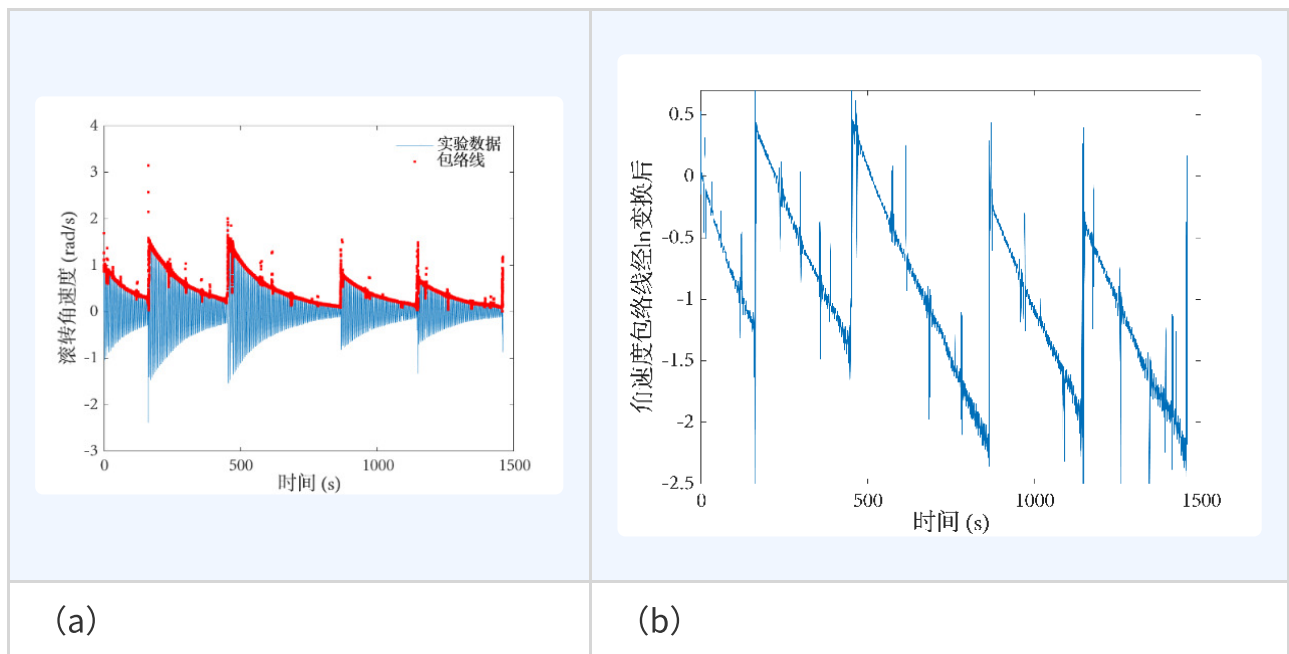


图 5 包络线拟合

## Step 4: 求取滚转阻力矩系数

假设衰减包络线  $p_m$  为： $p_m = a_p e^{-C_{d_p}(t-t_i)}$ ，要求取衰减系数  $C_{d_p}$ （自然阻力矩系数），再对  $p_m$  进行  $\ln$  变换：

```
1. p_mln=log(p_m);
```

$\ln$  变换后，由图 5 (b) 可知  $p_{mln}$  各个实验段有良好的线性趋势，且斜率近乎一致。对  $p_{mln}$  各实验段进行求导即可得到各段线性阻尼系数  $C_{d_p}$ （也可以使用 MATLAB “Curve Fitting” 工具箱来拟合各段线性函数得到斜率即为  $C_{d_p}$ ），即：

```
1. C_dp=diff(p_mln)*fs_p;
```

其中， $f_{s_p}$  为滚转角速度数据的采集频率。取各段阻尼系数的平均值，如FX150的各段阻尼系数的平均值如表 4所示。

表 4

实验组别	1	2	3	4	5
$C_{d_p}$ 平均值	-0.0074	-0.0065	-0.0062	-0.0062	-0.0058

## Step 5: 求三通道各实验组的阻力矩系数平均值

由step3~4同理可得到其他两个通道各实验组的阻力矩系数平均值。取各组实验阻力矩系数的平均值为辨识所得的最终阻力矩系数 $C_{d_p}$ ，因此，FX150无人机的滚转、俯仰及偏航的阻力矩系数可以辨识得到如表 5所示。

表 5

方向	滚转	俯仰	偏航
$C_{d_p}$	0.0064	0.0128	0.0120

结论：在一般飞行任务中，姿态变化并不迅速且无须机动性动作，因此，在仿真模型中，我们也可以将阻力矩系数直接设定为0。只是为了物理意义的涵盖，以上给出了一类近似求解粘性阻力矩系数的方法。

## 6.参考资料

- 1.

## 7.常见问题

Q1:

Q2: 编译报错，无法加载库文件



A2: 这可能是由于安装平台时PX4PSP工具箱未更新到最新版，更新RflySim安装包后按照如下配置重新安装平台即可

Toolbox one-key installation script: RflySimA... — □ ×

(1) Software package installation directory  
C:\PX4PSP

(2) PX4 firmware compiling command: firmware versions <= PX4-1.8 use format px4fmu-v3\_default; >= PX4-1.9 use format px4\_fmu-v3\_default  
px4\_fmu-v6c\_default

(3) PX4 firmware version (1: PX4-1.7.3, ..., 6: PX4-1.12.3, 7: PX4-1.13.2, 8: PX4-1.14.4, 9: PX4-1.15.0)  
9

(4) PX4 firmware compiling toolchain (1: WinWSL[suitable for all versions], 2: Msys2[suitable for <= PX4-1.8], 3: Cygwin[for >=PX4-1.8])  
1

(5) Whether to reinstall PSP toolbox (yes to reinstall and no to remain current installation)  
yes

(6) Whether to reinstall the dependent software packages (CopterSim, QGroundControl, CopterSim, etc. About 5 minites)  
no

(7) Whether to reinstall the selected compiling toolchain (yes to reinstall and no to remain unchanged, about 5 minites)  
no

(8) Whether to reinstall the selected PX4 firmware source code (yes to reinstall and no to remain unchanged, about 5 minites)  
no

(9) Whether to pre-compile the selected firmware with the selected command (yes to compile and no to remain unchanged, about 5 minites)  
no

(10) Whether to block the actuator outputs in the PX4 firmware code ("yes" to use Simulink controller, "no" to use PX4 official controller)  
no

OK Cancel