

# 1. 实验名称及目的

## 1.1. 实验名称

风洞风阻测量与辨识（选做实验）

## 1.2. 实验目的

辨识多旋翼固定姿态飞行过程中的气动阻力系数（风阻/风速），假设风速已知（测量方法见[..\..\e11\\_PowerSysIdModel\4.DynThrTest\Readme.pdf](#)），通过测量固定飞行姿态（固定迎风面积）时对应的无人机的动风阻

## 1.3. 关键知识点

### 测量装置安装

风洞主要由风机、扩张段、风洞管、无人机/测试台固定架及滑轨组成。风机主要是通过旋转的螺旋桨来提供不同风力的近似均值风；扩张段与风洞框为风道；滑轨可以使得无人机/测试台在风道的不同位置进行测试。

测试台固定架主要是由半圆形底座、手拧螺母以及 4080 钢材组成。半圆形底座与手拧螺母的配合可实现测试台/桨叶以不同迎角面对来流，从而模拟无人机螺旋桨在不同飞行速度或姿态时的来流情况，以此测量出桨叶在不同迎角或来流情况下的动力变化。

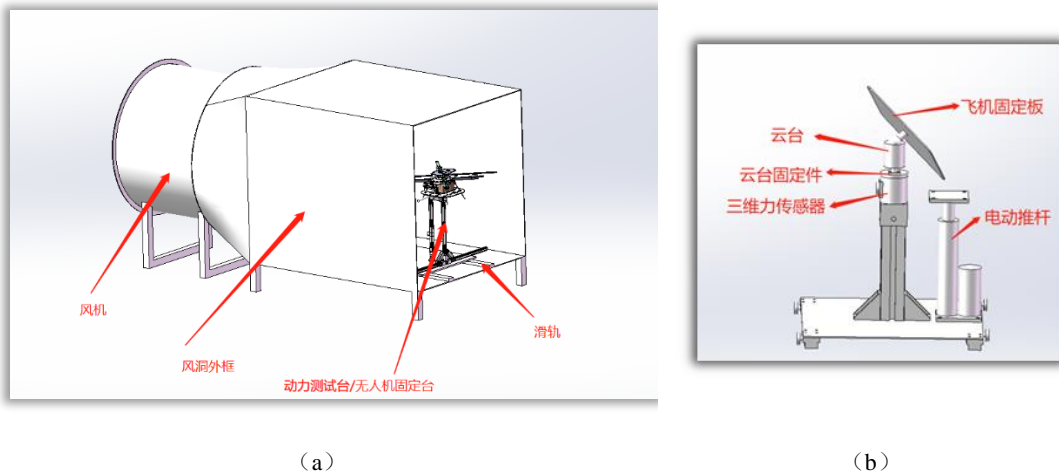


图 1 风洞示意图

我们将风洞产生的风看作前向来流，利用三轴力传感器与无人机相连接，在无人机作某些固定姿态的飞行动作时，我们可以测得无人机在固定姿态下的风阻大小，即认为迎风面积一定时，得出其动风阻与风速的关系。

飞机固定板负载与无人机底部相连接，这需要定制的无人机底板；云台与万向球相连接（万向球可实现无人机在约束角以下的任意控制角度的旋转），底下与三维力传感器相连接；电动推杆的作用是推动飞机固定板使得无人机在起飞阶段达到稳定姿态。因此，无人机固定架与风洞以及测量系统的配合可以模拟无人机在不同飞行迎角时不同速度来流情况

下的飞行情况，以及测量出固定飞行姿态（固定迎风面积）时对应的无人机的动风阻。

## 测量固定姿态飞行时的风阻

假设风速大小已经测得，测量方法参考 [..\..\e11\\_PowerSysIdModel\4.DynThrTest\Readme.pdf](#)

为使得无人机在风洞中以固定姿态飞行，我们给飞控中烧入 MCC 的姿态控制程序。利用 MCC 的抗干扰能力，一方面是为了尽可能不用升降杆可以让飞机自动稳定姿态，另一方面是为了在面对来流时，更稳定地控制飞行姿态。但为了在同一姿态下能测得真实的风阻大小，我们需要在无人机自动控制住姿态后将其连接的万向球拧紧，使得无人机只能以这种固定姿态面向来流（即使在来流较大时由于姿态变化不大螺旋桨的转速变化不会很大），可以模拟出前飞的螺旋桨状态使得力传感器直接测量出前飞或侧飞时的风阻大小。

## 风洞需要采集的数据

名称	单位
飞行日志时间戳	毫秒 (ms)
固定的姿态角	弧度 (rad)
三轴力	牛 (N)

注：由于风洞尺寸的限制，可用此方法来测量的无人机仅限于 FX350 及其以下型号。

## 2. 实验效果

## 3. 文件目录

例题目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\2.AdvExps\e2\\_MultiModelCtrl\1.MultiModelCtrl\](#)

文件夹/文件名称	说明
Ref	风洞相关资料

## 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 <sup>①</sup>	1
2	RflySim 工具链	小型风洞及其风力控制系统（风源）	1
3	MATLAB 2022B 及以上 <sup>③</sup>	无人机固定台架	1
4	三维力传感器配套测量软件	三轴力传感器（整机力数据收集）	1
5		FX 系列无人机	若干
6		无人机配套动力电池	若干

---

① : 推荐配置请见: <https://rflysim.com/>

## 5. 实验步骤

### 5.1. 选做实验：风阻测量装置连接与安装

#### Step 1: 无人机台架与风洞的连接

如图 2 所示为无人机台架的核心部件的连接，主要由钢材、三轴力传感器与一个万向云台组成，其中万向云台上的手拧螺丝可以使得万向云台固定不能再任意旋转，放松时可任意非约束角内旋转；



图 2 三轴力传感器

#### Step 2: 飞控固件还原及遥控器、传感器校准

在实验前，打开计算机与 MATLAB，将设计好的 MCC 姿态控制器程序进行“编译”，之后通过数据线下载至飞控当中，打开遥控器，将无人机飞控与计算机用数据线进行连接供电，正确地将无人机与对应的遥控器对码，对码成功后，拔掉数据线，遥控器各个拨杆保持默认位置；在无人机的安装之前，控制器烧写成功之后应先校准传感器及电调，检查桨叶安装正反顺序等涉及实验安全的事项。

一个设计好的 MCC 姿态控制器例子参见: [..\..\..\5.RflySimFlyCtrl\3.CustExps\3\\_MCC-CtrlExp\1.AttitudeCtrl-MCC\Readme.pdf](..\..\..\5.RflySimFlyCtrl\3.CustExps\3_MCC-CtrlExp\1.AttitudeCtrl-MCC\Readme.pdf)

#### Step 3: 无人机与台架的连接

如图 3 (a) 所示，无人机台架底端与滑轨钢板底座用螺丝连接固定，其上端通过螺丝与无人机固定板相连接，然后再与无人机通过无人机底板的立柱相连接，从而固定住无人机，对于不同无人机，可能需要更换如图 3 (b) 所示的碳纤维底板；

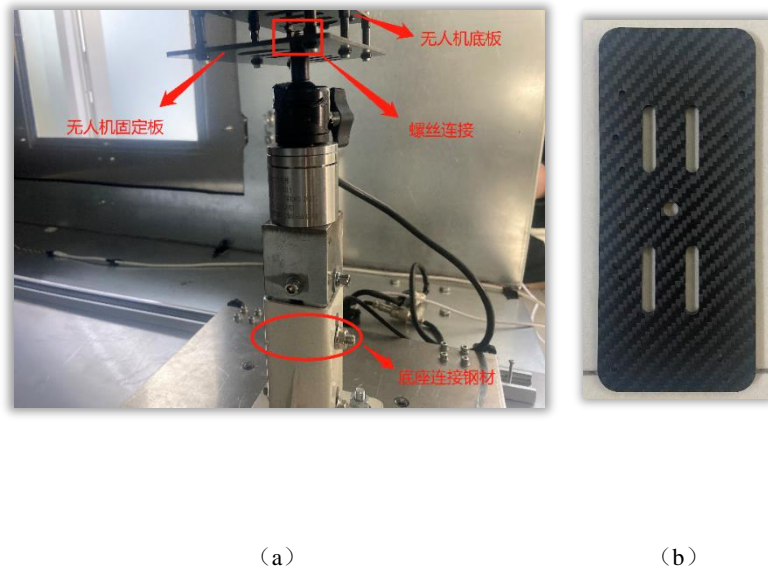


图3 底座与三轴力传感器的连接

连接安装好后的FX200无人机风阻测试效果如图4（由于采用MCC控制器，实际实验中并未采用电动推杆就可以使得飞机平稳姿态，因此此处不介绍电动推杆的连接与用法）。

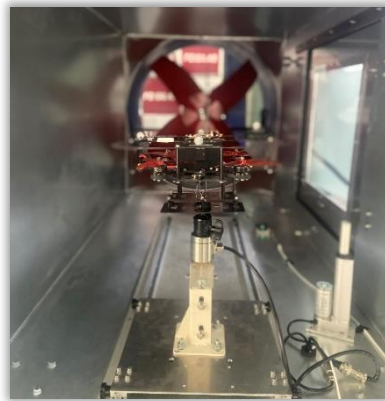


图4 风阻测试示意图

#### Step 4: 配置力传感器通信采集软件

按装力传感器的配套数字变送器通信软件（仔细阅读相关厂商提供的说明书）

## 5.2. 选做实验：测量固定姿态飞行时的风阻

### Step 1: 安全检查

测试开始前，仔细检查风洞观察窗是否关紧以及检查各个部件螺丝是否存在松动问题，以及电力开关是否是关闭状态。

确认遥控器拨杆处于安全位置后，将动力电池安装至无人机中，并与无人机进行连接；

## Step 2: 无人机在台架的自稳飞行

确认万向云台手拧螺丝为松动状态，待无人机自检通过之后，以MCC控制器方式解锁无人机，电机进入怠速状态；缓慢推动油门杆至中位以下大致2格位置，待无人机自动抬头，姿态稳定在台架上后拨动CH7（根据MCC控制器中设置的通道）的拨杆使得无人机进入给定姿态角，并可以保持；

## Step 3: 固定姿态角（危险!!!）

如图5所示，为了最大化地保持姿态角不变，待无人机姿态控制住之后，我们调整偏航角使得桨叶平面正对来流方向，然后手缓慢拧动万向云台的螺丝使得无人机姿态被严格约束在控制角度。

注1：此操作较为危险，请对控制器与无人机实验理解不深刻的人员不要轻易尝试；

注2：若要尝试此实验，请做好相关防护措施；

注3：如果固定之后明显听见电机有加速的声音应该立即用遥控器将无人机停机，此时由于固定角度时出现了较大偏差，电机在加速补偿该偏差，然后拆下无人机动力电池，用手背面轻触电机表面感受温度是否异常，若出现烫手、电机有烧焦味道等异常情况应立即拆卸下无人机进行安全与功能检查，在一切都检查无误后重新安装按照操作步骤开始实验。

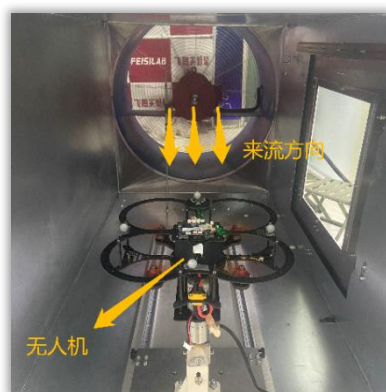


图5 固定姿态飞行

## Step 4: 力传感器的连接、数据去皮与采集；

待无人机姿态角固定正常且无异常之后，将风洞控制柜中的力传感器的USB连接线与计算机连接（图6）；



图 6 三轴力传感器连接线

接着打开“数字变送器通信软件”（图 7），先不要开始记录数据；点击“设置”选项，在“校准设置”选项卡下勾选“全体机位执行”，然后点击“零点校准”即实现了对力传感器的去皮操作；

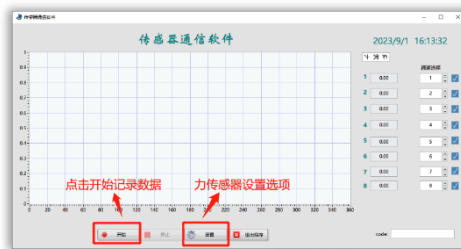


图 7 数字变送器主界面

点击软件界面“开始”按钮开始采集力传感数据。



图 8 校准设置

### Step 5: 吹风测试

连接风洞电源，逐级开启 1~8 档风对无人机进行吹风测试（在无人机角度较小时，风速无须开至 8 级），每个风级需要大致吹风 30s 左右（图 9）；



图 9 风力控制台

### Step 6: 下载保存测试结果

待一组测试完成之后，将飞行日志下载保存，三维风力数据会自动保持在设置的路径；

### Step 7: 切换固定角度或迎风面测试

在完成一个姿态角测试后，视情况是否需要更换固定的姿态角或迎风方向来进行吹风测试，一般来说对称型的无人机测一个迎风方位的风阻就足够了。若需要切换，将MCC控制器中的给定姿态角进行变更或转动偏航角来实现，测量步骤需要重复 Step1~6

## 5.3. 必做实验：辨识飞机的阻力系数

此风阻测量是辨识风阻的一种方法，我们在此仅用FX200的俯仰控制角度为0.1rad、0.2rad以及0.3rad的测量结果来说明风阻的辨识过程。数据处理和模型辨识由 [FX200\\_xwind\\_drag.mlx](#) 实现

### Step 1: 导入数据到 MATLAB 工作空间

通过风洞实验辨识无人机的风阻主要用到的数据为测量的风速（来流速度），无人机的姿态控制角，三轴力测量数据，请参考文件路径将相关数据进行导入即可（风速的求取请参考“02.2.2.3 动拉力辨识结果-A. 风速测量结果”）；

### Step 2: 数据处理

数据导入之后，由于三轴力数据也存在波动式的尖峰，为了便于分析，我们需要对三轴力中的 Y 轴力数据（对应无人机控制方向）进行非负操作、单位处理与滑动平均处理。处理代码为：

```
1 % 非负
2 v1(v1<0)=0;
3 v2(v2<0)=0;
4 v3(v3<0)=0;
5 % 化单位为 N
6 v10=v1/100*9.8;
7 v20=v2/100*9.8;
8 v30=v3/100*9.8;
9 % 滑动平均
```

```
10 v1m=movmedian(v10,100);
11 v2m=movmedian(v20,100);
12 v3m=movmedian(v30,100);
```

### Step 3: 对各风级的风阻（Y 轴力）取平均

处理代码为（以 0.1rad 的控制角度为例）：

```
1 v1m1=mean(v1m(800:2400));
2 v1m2=mean(v1m(4000:5500));
3 v1m3=mean(v1m(7200:8800));
4 v1m4=mean(v1m(1.05e4:1.2e4));
5 v1m5=mean(v1m(1.35e4:1.5e4));
6 v1m6=mean(v1m(1.7e4:1.85e4));
7 v1m7=mean(v1m(2.08e4:2.2e4));
8 v1m8=mean(v1m(2.48e4:2.57e4));
```

### Step 4: 辨识无人机各控制角度对应的风阻系数

当控制角度为 0.1rad 时，测得的风速与风阻相图如图 10（a）（红色）所示。明显的是各个风速与风阻的对应关系近似为线性，因此可通过线性拟合出其阻力系数  $C_{d_x}$  为 0.2187（图 10（b））；

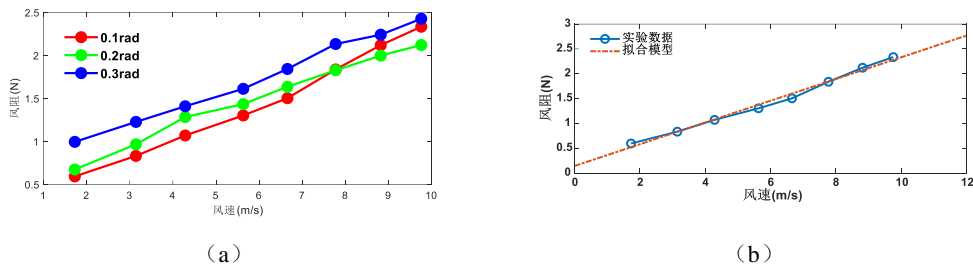


图 10 风速-风阻拟合模型

当控制角度为 0.2rad 时，测得的风速与风阻相图如图 10（a）（绿色）所示。拟合出其阻力系数  $C_{d_x}$  为 0.1787；

当控制角度为 0.3rad 时，测得的风速与风阻相图如图 10（a）（蓝色）所示。拟合出其阻力系数  $C_{d_x}$  为 0.1816。

**结论：由风洞测量数据辨识所得的前飞阻力系数  $C_{d_x}$  相差不多，证明其测量结果相对可靠。但由于来流并不均匀，该结果只能作为定性分析时用，不可作为精度分析时用。**

## 6. 参考资料

[1].

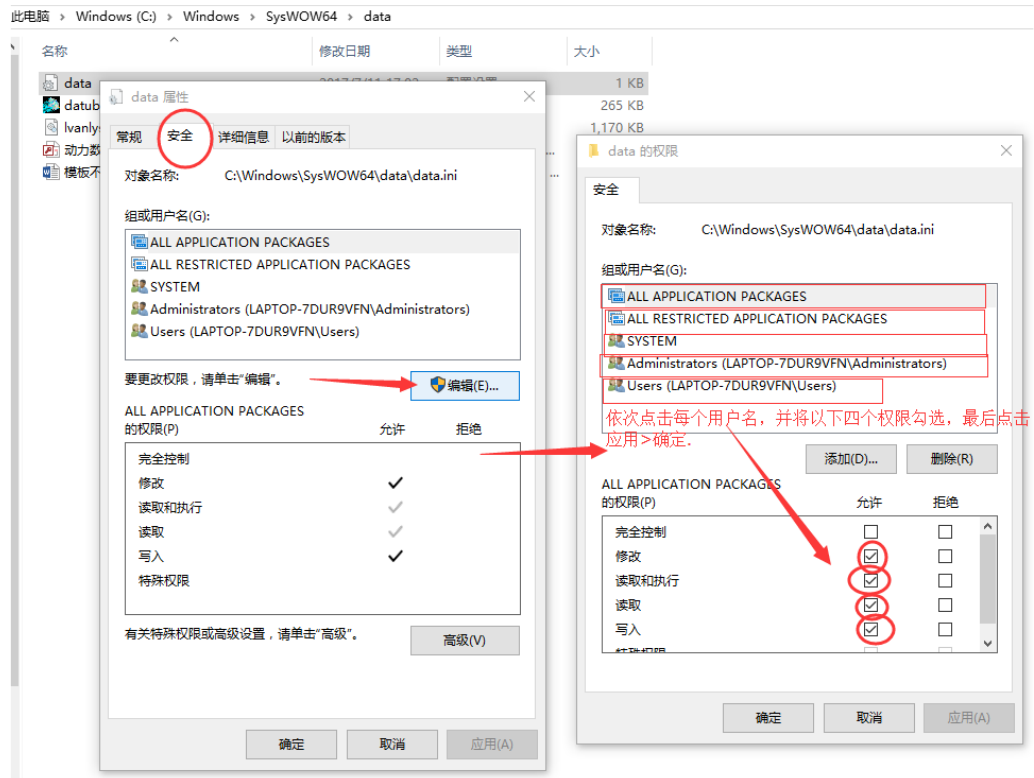
## 7. 常见问题

Q1: 安装螺旋桨时如何在弯轴上进行平衡校准

A1: 参见[..\1.PowerTestBench\ref\桨平衡器的正确使用方法.pdf](#)

Q2: 测试台配套软件不能保存数据

A2: 因为系统更改了 UAS-TEST-G10 文件夹的权限，导致设置无法保存，可以按照以下步骤修改权限：



右键点击文件夹（UAS-TEST-G10）或文件（如 data.ini），选择“属性”。

在属性窗口中，切换到“安全”选项卡。

点击“编辑”按钮，进入权限修改界面。

选择每个用户组（例如 Administrators、SYSTEM、Users）。

对于每个选中的用户组，勾选“完全控制”、“修改”、“读取和执行”和“读取”这四个权限。

点击“应用”然后“确定”保存更改。

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

