

---

# 1. 实验名称及目的

## 1.1. 实验名称

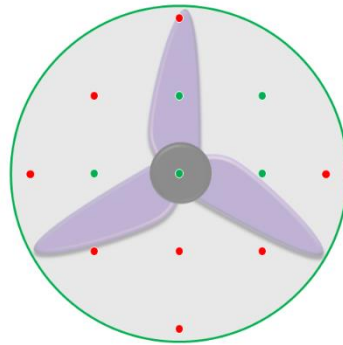
动拉力辨识实验

## 1.2. 实验目的

动拉力模型主要是考虑飞行速度较大或来流较大时电机-螺旋桨动力的变化与来流或飞行速度的关系。

## 1.3. 关键知识点

在进行动拉力测量之前，由于风洞截面的各位置风速并不均匀，采用先测量风速取平均的方法来获得每个风级的对应风速并折算至数据分析中。如图所示为螺旋桨的迎风平面（此时螺旋桨平面正对来流方向，视角为正对螺旋桨前方），取 11 个点位测量中的 5 个测量点（绿色点位）的风速值进行处理来求取风速值（由于测量 FX200 无人机时螺旋桨的受风点更接近这 5 个位置，若更改研究其他类型无人机或螺旋桨，需酌情增加点位来估计来流速度大小）



动拉力的测量结果分别需要来流速度（已在上小节求出）、动力测试台测得螺旋桨转速、拉力以及扭矩等数据；另外本应需要无人机的飞行迎角测量数据，但由于本次分析的为飞行迎角为  $90^\circ$ ，就不进行加载，对于其他迎角的数据分析需要知道飞行迎角大小，需要加载分析；

## 2. 实验效果

## 3. 文件目录

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

文件夹/文件名称	说明
FX310_Flyupward_power.mlx	动拉力数据处理及辨识脚本

Windspeed_solution.mlx	风速数据处理脚本
Windspeedin5p.mat	风速采样点测量数据
FX310.mat	FX310 动力测试数据

## 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		
3	MATLAB 2022A 及以上 <sup>③</sup>		

① : 推荐配置请见: <https://rflysim.com/>

## 5. 实验步骤

### 5.1. 必做实验：风速测量数据分析

#### Step 1: 导入需要点位的风速测量数据

通过网盘分享的文件：风洞风速测量数据.zip

链接: [https://pan.baidu.com/s/1Gn2VT7Ny-rN1nUfLIO\\_NPA?pwd=5sds](https://pan.baidu.com/s/1Gn2VT7Ny-rN1nUfLIO_NPA?pwd=5sds) 提取码: 5sds

在 MATLAB 中找到对应数据的文件夹，飞行日志已经经过转换为.csv 数据表格形式，找到“~airspeed\_0.csv”数据，双击打开数据并只需导入“true\_airspeed\_m\_s”这一列即可，如图 1 所示；

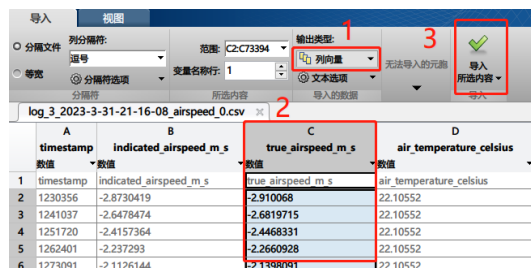


图 1 数据导入

将导入工作空间的数据重命名为具有标识性的名称；

依次导入需要的所有点位的风速数据，已经处理好的数据见 Windspeedin5p.mat

#### Step 2: 数据处理

测量出来的风速毛刺较大且不利于数据分析，而且出现了风速为负值，因此，我们首先需要对其进行非负处理，处理代码为：

```
1 m0(m0<0)=0;
2 m1(m1<0)=0;
```

```
3 r0(r0<0)=0;
4 l0(l0<0)=0;
5 l1(l1<0)=0;
```

对于数据中杂乱的毛刺显得数据的光滑性很差，因此我们对数据进行滑动平均处理，处理代码为（滑动平均的窗口大小请自行按照数据的采样频率进行调节，暂无特殊技巧）：

```
6 m0m=movmedian(m0,200);
7 m1m=movmedian(m1,200);
8 r0m=movmedian(r0,200);
9 l0m=movmedian(l0,200);
10 l1m=movmedian(l1,200);
```

经过两次处理后的风速数据对比如图所示。

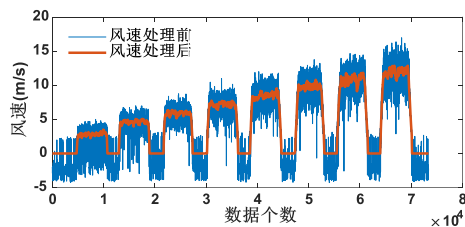


图2 风速响应

### Step 3: 求取各级平均风速

滑动平均后的风速数据已经有了比较鲜明的趋势特征，即可以各个点位求取各级风速的平均值（下面以求取一个点位的各级平均风速为例，其中各风级对应的数据段需自行判断），求取代码为：

```
11 mm1=mean(m0m(8200:8770));
12 mm2=mean(m0m(1.4e4:1.89e4));
13 mm3=mean(m0m(2.25e4:2.7e4));
14 mm4=mean(m0m(3.3e4:3.55e4));
15 mm5=mean(m0m(4e4:4.4e4));
16 mm6=mean(m0m(4.8e4:5.25e4));
17 mm7=mean(m0m(5.65e4:6.05e4));
18 mm8=mean(m0m(6.5e4:6.9e4));
```

将各个点位的各级风速取平均作为风速最终的各级平均风速。求取代码为：

```
19 as1=mean([mm1 mm11 rm1 lm1 lm11]);
20 as2=mean([mm2 mm21 rm2 lm2 lm21]);
21 as3=mean([mm3 mm31 rm3 lm3 lm31]);
22 as4=mean([mm4 mm41 rm4 lm4 lm41]);
```

```

23 as5=mean([mm5 mm51 rm5 lm5 lm51]);
24 as6=mean([mm6 mm61 rm6 lm6 lm61]);
25 as7=mean([mm7 mm71 rm7 lm7 lm71]);
26 as8=mean([mm8 mm81 rm8 lm8 lm81]);

```

将求取的各级风速保存，以备分析时用。各级风速的平均值求取如图 3 所示。

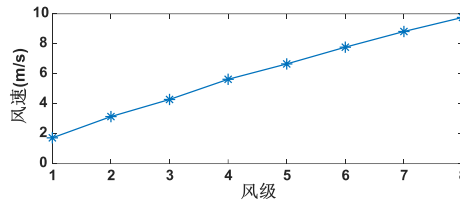


图 3 风级-风速对应图

注：风速模型无须去拟合，由于这是由风洞产生的风，并不代表风洞产生风的特性会符合拟合模型。

## 5.2. 必做实验：动拉力辨识

下面以 FX310 的动力测试实验数据为例对其动拉力的结果进行大致分析。

### Step 1: 导入数据

如图 4 所示，将原始动力测试台的测量数据用“Excel”打开并另存为后缀“.xlsx”文件并重命名为可标识名称（原始测量数据 MATLAB 打开有可能报错）；逐个打开数据文件并将所需数据导入到工作空间中。

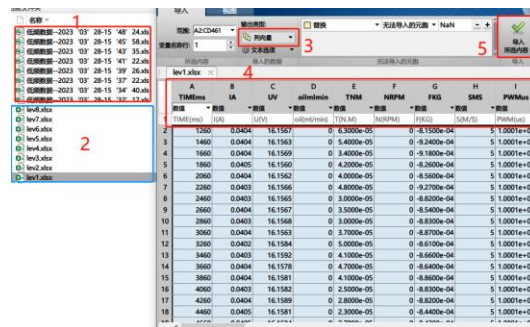


图 4 数据导入

将各个油门点位的动力数据（拉力、扭矩、转速）求平均值，以量化稳定油门下螺旋桨的动力表现。如对各油门点位拉力求平均代码为：

```

27 T11=mean(FKG(90:98)*9.8);
28 T12=mean(FKG(102:110)*9.8);
29 T13=mean(FKG(114:122)*9.8);
30 T14=mean(FKG(126:134)*9.8);
31 T15=mean(FKG(138:146)*9.8);

```

```
32 T16=mean(FKG(152:160)*9.8);
```

```
33 T17=mean(FKG(164:172)*9.8);
```

## Step 2: 动力衰减计算

动力衰减的计算流程为：

计算各个油门档位对应不同风速的动力值，以拉力计算为例：

```
34 T1=[T11 T21 T31 T41 T51 T61 T71 T81];
```

```
35 T2=[T12 T22 T32 T42 T52 T62 T72 T82];
```

```
36 T3=[T13 T23 T33 T43 T53 T63 T73 T83];
```

```
37 T4=[T14 T24 T34 T44 T54 T64 T74 T84];
```

```
38 T5=[T15 T25 T35 T45 T55 T65 T75 T85];
```

```
39 T6=[T16 T26 T36 T46 T56 T66 T76 T86];
```

```
40 T7=[T17 T27 T37 T47 T57 T67 T77 T87];
```

将各档位拉力组成矩阵：

```
41 TT=[T1;T2;T3;T4;T5;T6;T7];
```

拉力值进行求差得出动力衰减大小：

```
42 for i=1:7
```

```
43 for j=2:8
```

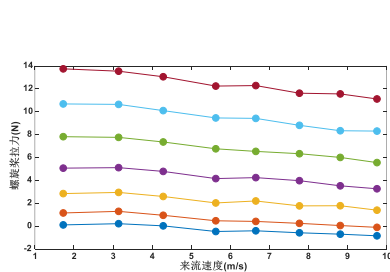
```
44 Tdw(i,j-1)=(TT(i,j)-TT(i,1));
```

```
45 end
```

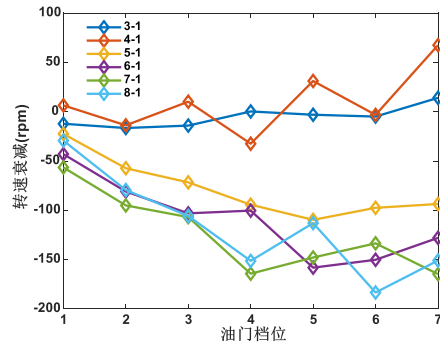
```
46 end
```

如图 5 (a) 所示，明显地，在电机具有相同的 PWM 输入时，由于来流的影响，在不同的 PWM 档位（1~7 档分别对应 1100~1700us 的 PWM）上，螺旋桨的拉力都有所衰减，其程度各不一样。

如图 5 (b) 所示，转速的衰减主要集中在 5 级风及以上风力档位。且对于 3 级风与 4 级风，转速虽然略有增加，但是其拉力竟然有不同程度的衰减。



(a)



(b)

图 5 拉力与转速响应

扭力矩虽然也是衰减，但是其衰减的形式明显与拉力不同，显得更加复杂一些。对于来流带来的影响，我们可以这样做出判断：动力的衰减可以理解成来流对螺旋桨产生阻力与阻力矩，其大小如图 6 所示，当来流速度增加时，拉力与反扭力矩的衰减皆有明显的增加趋势。

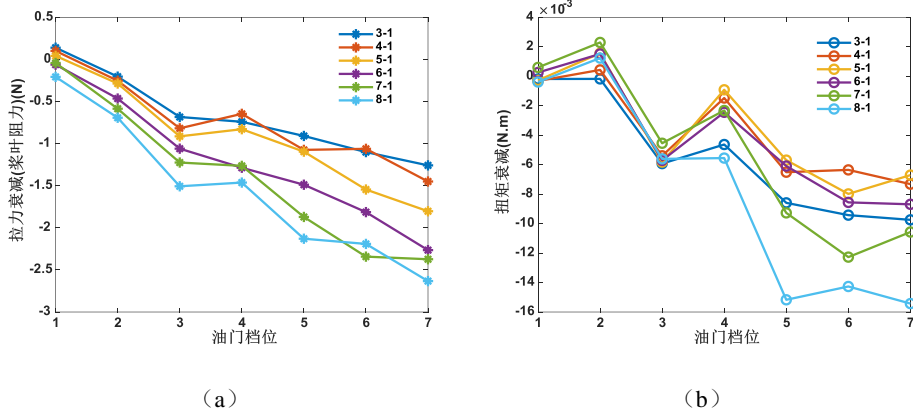


图 6 阻力与扭矩响应

### Step 3: 不同拉力模型与扭矩模型的拟合

研究来流下的动力情况主要是为辨识出来流与动力系数的关系。为此，我们对不同来流速度下的转速  $\rightarrow$  拉力与转速  $\rightarrow$  扭矩模型进行拟合，以辨识出来流的影响。拟合流程为：

提取出不同风速下的转速、拉力与扭矩，比如要提取 5 级风的转速、拉力与扭矩的实现代码为：

```
47 www=ww(:,5);
48 TTT=TT(:,5);
49 QQQ=QQ(:,5);
```

此处采用以下代码一次将多个曲线进行拟合并输出拟合结果，待拟合模型为

“ $T_i = C_{T_0} \omega_i^2 + C_{T_1} \omega$ ”，拟合代码为（以转速  $\rightarrow$  拉力拟合为例）：

```
50 for i=1:8
51 www(:,i)=ww(:,i);
52 TTT(:,i)=TT(:,i);
53 QQQ(:,i)=QQ(:,i);
54 x=www(:,i);
55 y=TTT(:,i);
56 f=@(c,x) c(1).*x.^2 + c(2).*x;
57 c0=[0 0];
58 [ct, fval]=lsqcurvefit(f, c0, x, y);
59 ctt(i,:)=ct;
```

```
60 xx=2000:1:14000;
61 yy=f(ctt(i,:), xx);
62 box on
63 hold on
64 plot(x, y, '!', xx, yy, '-');
65 end
66 disp(ctt);
```

转速  $\rightarrow$  拉力的拟合效果如图 7 所示。

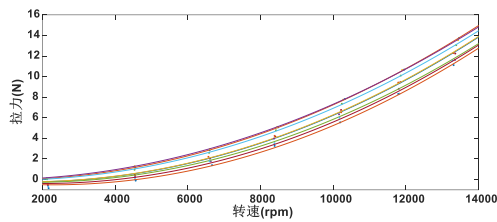


图 7 转速-拉力拟合效果

拟合得到的各级风速下的转速  $\rightarrow$  拉力模型参数为：

$$\begin{aligned} C_{T_0} &= [8.568, 8.196, 8.510, 9.123, 9.110, 8.957, 9.372, 9.689]e^{-8} \\ C_{T_1} &= [-1.299, -0.8750, -1.582, -2.877, -2.818, -3.100, -3.779, -4.437]e^{-4} \end{aligned} \quad (1)$$

转速  $\rightarrow$  反扭矩的动拉力模型的辨识过程类似。

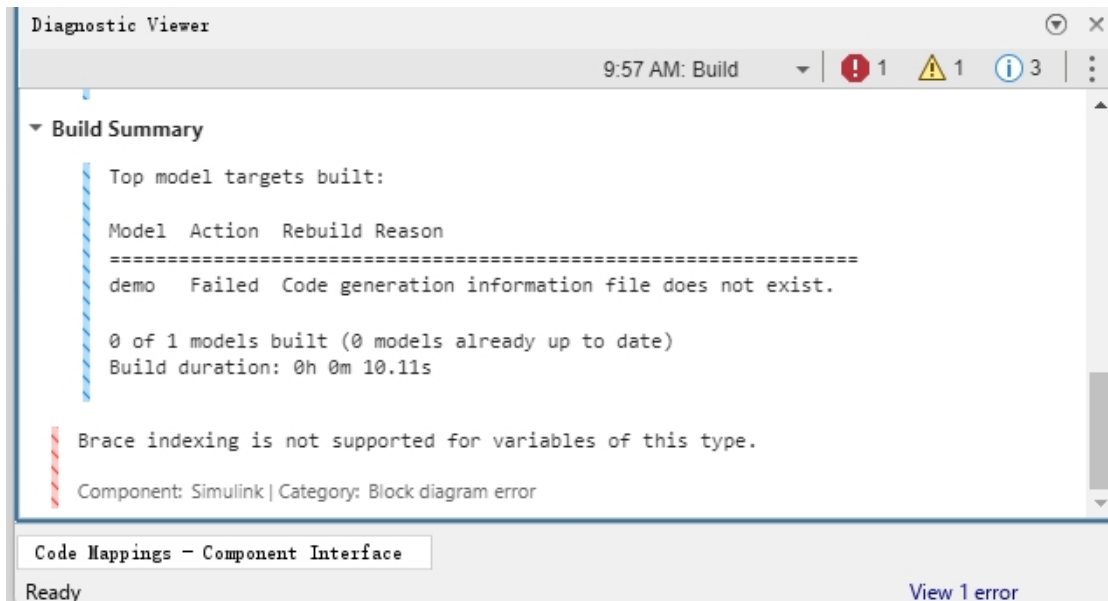
注：以上辨识过程为辨识的是各个风速点位上的两个参数值，闭环的模型需要将两个参数的变化与来流速度相关联作分析，但是由于来流理论模型分析与辨识结果并不是很相符，且本项目着重给出辨识方法，就不对理论模型推导展开讨论，参数的关联性分析也暂无依据。

## 6. 参考资料

[1].

## 7. 常见问题

Q1: 未正确安装 visual studio c++编译环境并配置 mex，导致 Simulink 文件编译失败



A1: 首先将低于当前 MATLAB 版本的 Visual Studio C++编译环境安装到 VS 默认安装目录，然后在 MATLAB 的命令行窗口中输入指令“mex -setup”，一般来说会自动识别并安装上支持的编译器，命令行显示“MEX 配置使用 ‘Microsoft Visual C++ 2017 (C)’ 以进行编译”的字样说明安装正确。详细环境配置参考” [RflySim 平台安装目



录]RflySimAPIs\4.RflySimModel\API.pdf “中的环境配置

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

