

1. 实验名称及目的

1.1. 实验名称

多旋翼动力系统动拉力测量（选做实验）

1.2. 实验目的

了解如何测试并记录辨识多旋翼动力系统动拉力模型所需的各种数据（主要是输入 PWM——输出螺旋桨产生的拉力和力矩），本实验非必须，推荐从动力系统套件的生产厂商处直接获取所需数据

1.3. 关键知识点

风洞主要构成示意图

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。

无人机固定台在测风阻时使用，本实验仅使用动力系统拉力测试架

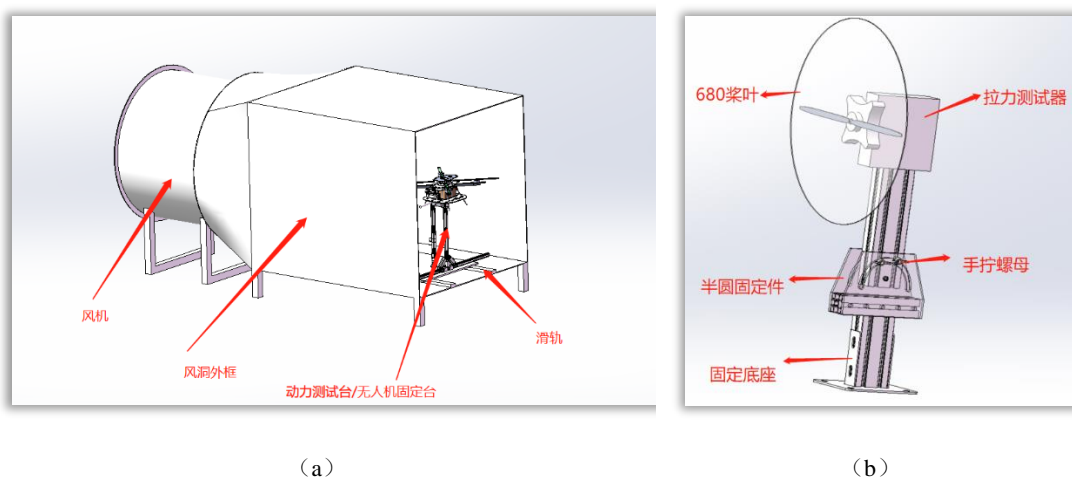


图 1 风洞示意图

风洞需要采集的数据

名称	单位
测试台数据时间戳	毫秒 (ms)
电池输出电压	伏特 (V)
电池输出电流	电流 (I)
PWM 值	-
电机/螺旋桨转速	转每分 (rpm)
螺旋桨拉力	牛 (N)
螺旋桨扭矩	牛·米 (N·m)
系统输入功率	-
电机输出功率	-
电机效率	-
螺旋桨力效率	-
动力系统力效	-
测试台迎角	弧度 (rad)
来流速度	米/秒 (m/s)

DET G10/L10-30KGF 技术指标

分类	项目	指标
储存	存储温度	-40 ~ +70 °C
	保存湿度	< 90%
	使用温度	-10 ~ +50 °C
	使用湿度	< 80%
设备	净重	10 ± 0.5 kg
	毛重	12 ± 0.5 kg
	尺寸	680 x 540 x 550 mm
	测试电机最大直径	100 mm
拉力传感器	测试动力系统最大质量	30 kg
	测试螺旋桨最大直径	32 英寸
	采样频率	10000 (G10) / 200 (L10) Hz
	量程	10 Kg
温度传感器	传感器精度	0.1% ± 10 g
	环境温度量程	-40 ~ +125 °C
	电机温度量程	-40 ~ +350 °C
	环境温度精度	±1.0 °C ± 1.5
电压电流传感器	电机温度精度	±1.5 °C ± 1.5
	电压量程	11 ~ 100 V
	电压精度	±0.1% ± 0.1 V
	电流量程	2.0 ~ 80 A
转速传感器	电流精度	±0.4% ± 0.3 A
	量程 (两极电机)	1500 ~ 300000 rpm

扭矩传感器	精度	0.5% ± 20
	量程	6 N·M
	传感器精度	±0.2% ± 0.01 N·M
来流速度传感器	量程	5 ~ 50 m/s
	精度	3% ~ 8%

风速采样点

在进行动拉力测量之前，在风洞内来流均匀且稳定的情况下，我们可以直接实时测量来流的速度。但是风洞截面的各位置风速并不均匀，因此我们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 2 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），以螺旋桨的半径画圆，我们拟测量图中标注红点位置的风速，然后对各个点位的风速和取平均作为最终的来流速度。其中拟测量 13 个点位的的风速，实际测量了 11 个点位的的风速。点位的选取以 FX450 桨叶的半径画圆大致选取。

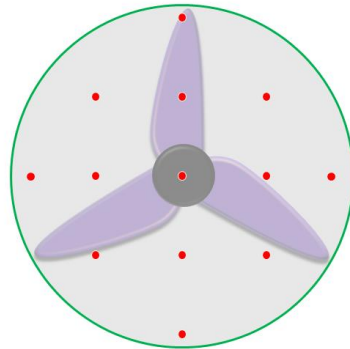


图 2 螺旋桨迎风平面图

下面结果以测量 FX200 的螺旋桨的动拉力为例，如图 3 所示，我们取 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）。

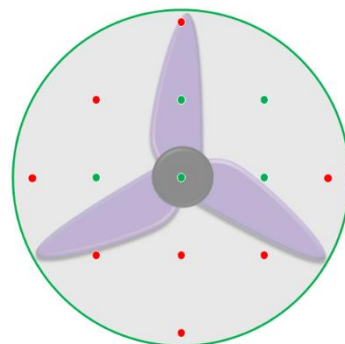


图 3 风速采样点

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
Ref	测试台相关资料

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 ^①	1
2	RflySim 工具链	小型风洞及其风力控制系统（风源）	1
3	MATLAB 2017B 及以上 ^③	动力测试台固定台架（分别固定测试台与无人机）	2
4		动力系统综合测试台（动拉力测量设备）	1
5		无人机配套动力电池	若干
6		无人机配套电机	若干
7		桨叶	若干
8		电机配套电调	若干
9		香蕉头、电烙铁等配套工具	若干
10		PX4 皮托管+空速计（测量风速）	1
11		飞控（实时分别测量测试台姿态与风速）	2

①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

5. 实验步骤

5.1. 选做实验：风速测量

Step 1: QGC 地面站设置（飞控还原并校准传感器）

将飞控与电脑通过 USB 转接 Type C 线连接，然后打开 QGC 地面站；将在工具栏选择齿轮图标（Vehicle setup），然后在侧边栏选择机架设置（Airframe），选择机架类型为“Generic Quadplane VTOL Tiltrotor”；

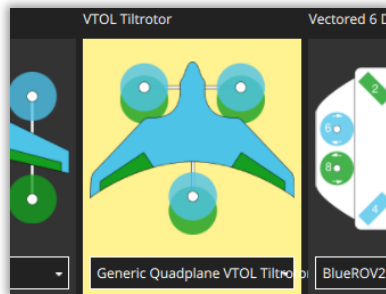


图 4 空速计飞控设置

QGC 地面站设置飞控的数据记录格式为上电就记录（from boot until shutdown），并且保存如图 5 所示的数据记录选择，然后重启飞控；



图 5 日志记录设置

校准空速计，请参考：“<http://docs.px4.io/v1.12/zh/config/airspeed.html>”（空速校准 | PX 4 自动驾驶用户指南）；

Step 2: 测量风洞同一位置的各级风速

保证飞控与计算机的正常连接和供电，以及检查各个部件是否工作正常，主要是检查皮托管是否垂直于来流方向；

用黑色胶带或标记纸在细杆上标记平行于螺旋桨平面的上、中、下三个位置的点，如图 6 所示（参见 <..\0.Preparation\2.WindTunnel\Readme.pdf> 中空速管与空速计的连接）；

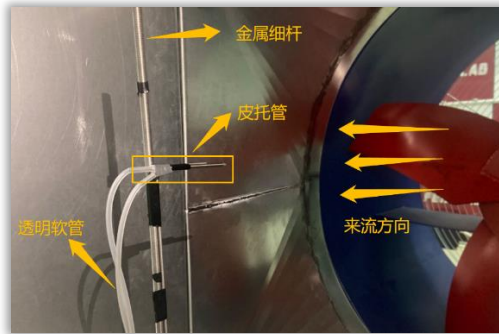


图 6 皮托管的安装

打开 QGC 地面站检查空速是否有数值且正常，可以在“Analyze Tools”→“MAVLink 检测”中查看；

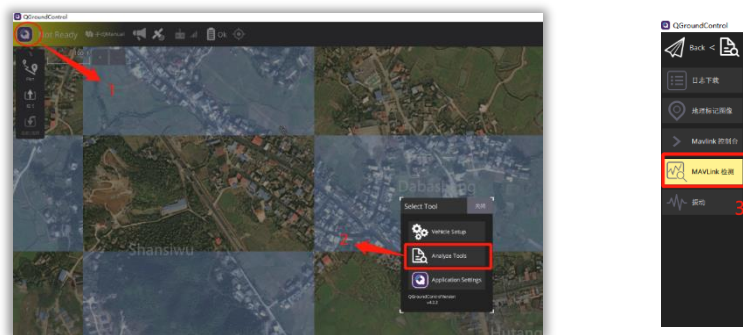


图 7 MAVLink 数据查看

将飞控保持供电，同时将风洞及其控制系统连接电源，将风洞控制台空开电闸推上给控制台供电（如图 8 所示）；



图 8 电源开关

按下“准备”按钮，由于不用使用升降杆，因此“升降停”开关无须操作；逐次开启 1~8 级风，如：按下“一级风”按钮后，然后将“停/启”按钮旋至启动位置，让风洞吹风大致 20s，接着将“停/启”按钮旋至停止位置，待风机停转之后，将前次风力等级按钮弹

起，指示灯熄灭，按下新的风力等级按钮，相应按钮指示灯亮起，再将“停/启”按钮置于启动，风机按照新的风力等级选择。上述操作如图 9 所示；



图 9 风力控制台

测完 8 个档位风后，将“停/启”按钮置于停止位置，且把风洞电源断开；

Step 3: 在 QGC 地面站上下载对应飞行日志

按照图 10 所示，依次点击 1, 3；

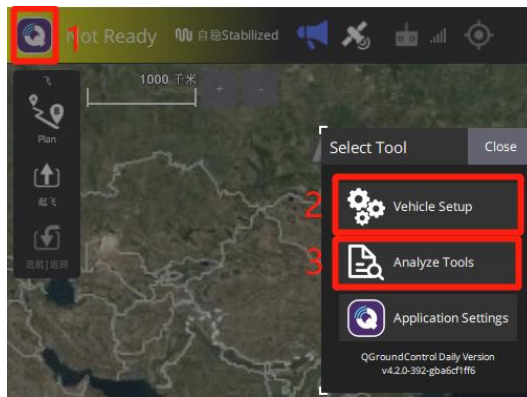


图 10 进入日志下载

接下来依次点击“日志下载”和“刷新”，此时将显示多条不同的数据（包含 ID、日期和大小），找到对应日志，鼠标左键进行选中，点击 4 “下载”，在弹出的框内分别进行 1 自定义路径，定义路径完成后，点击 2 选择文件夹，即可完成日志下载。上述操作如图 11 所示；



(a)



(b)

图 11 下载

另外，为了更加方便地查找日志，可在每次飞行前将当前日志清除，清除方法为依次

点击 1 “日志下载”、2 “刷新” 和 5 “擦除全部”，如图 12 所示。



图 12 日志清除

Step 4: 测量风洞不同位置的各级风速

将风洞内细杆分别切换固定至第 2、3、4、5 个细孔，然后重复 [Step 2: 测量风洞不同位置的各级风速](#) 中的以上步骤。

5.2. 选做实验：动拉力测量

由于风洞内风速不均，因此我们并不采用实时测量风速来测量来流速度，而是用前面风速测量的平均值来估算各档位风的风速大小。

Step 1: 调节测试台姿态

给飞控上电，并打开连接 QGC 地面站，查看测试台的姿态数据（如图 13 所示），调节手拧螺母与半圆形底座，使得测试台底座迎角为 0° （桨叶平面与来流方向平行），即测试无人机垂直上飞螺旋桨动拉力情况；

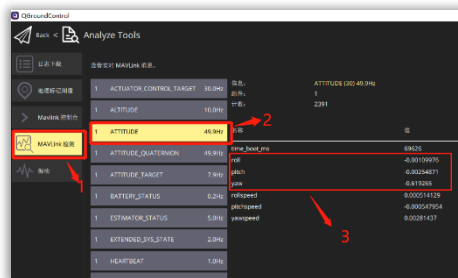


图 13 姿态数据查看

Step 2: 动力测试台初始化

给动力测试台上电，打开动力测试台数据采集软件调试确定桨叶和电机旋转方向正确（与前面静拉力测量中的步骤一致），并进行参数清零（电压千万不要清零）；

Step 3: 实验初始化

动力测试台油门设置采用手动油门，设置电机 PWM 点位并首先固定为 1000，电机静止不转，同时给风洞风机上电；

Step 4: 油门设置

依次设置“油门模式”为“等距油门”，“初始 PWM 值”为“1100”，“结束 PWM 值”为“1700”，“步距”为“100”，“单步时间”为“30 秒”；

注：动力测试台中数据采集采用精简数据采集，可以设置采样频率大概为 10Hz。

Step 5: 切换风速

分别按照风洞操作（参考“[小型风洞操作说明](#)”）切换 8 个档位分别进行 Step4 的测试，测试完之后将风洞停机休息 10 分钟；

Step 6: 下载数据

按照 [Step 3: 在 QGC 地面站上下载对应飞行日志记录并下载试验数据](#)

Step 7: 测试不同姿态下的动拉力

分别依次调节动力测试台仰角（图 14）为 50° ， 55° ， 60° ， 65° ， 70° ， 75° ， 80° ， 85° ， 90° （操作除调节角度值外与 Step1 一致），每个角度重复 Step2~6。

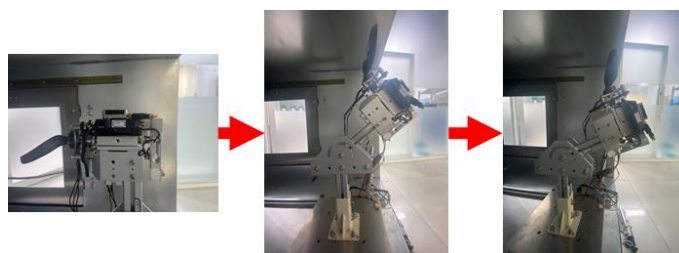


图 14 角度调节

6. 参考资料

- [1]. 【第三期：载具运动建模与仿真（下）】https://www.bilibili.com/video/BV1oE4m1X79t?vd_source=0380b6479dcd6152badff9c466134c51

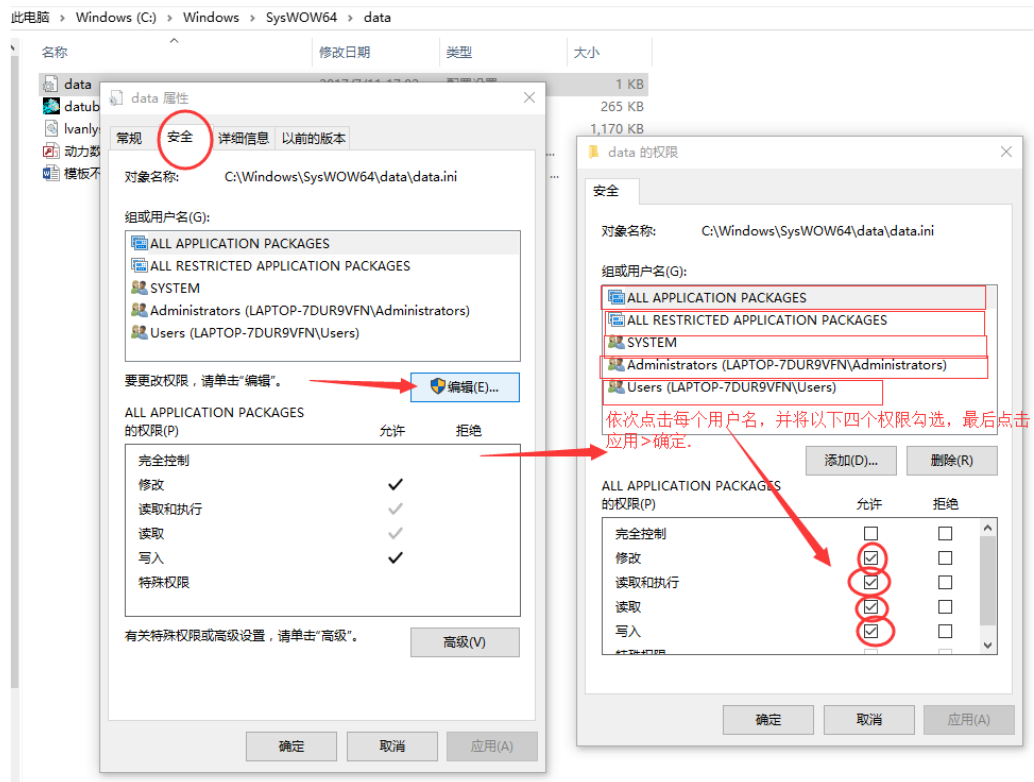
7. 常见问题

Q1: 安装螺旋桨时如何在弯轴上进行平衡校准

A1: 参见 [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：



右键单击文件夹（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

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