

多旋翼飞行器：从原理到实践

第八讲 多旋翼飞行操控与维护

李大伟，杨炯



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY



可靠飞行控制研究组
RELIABLE FLIGHT CONTROL GROUP

大纲



1. 法律法规
2. 飞前准备
3. 遥控器飞行操控
4. 地面站飞行操控
5. 常见的故障及维修
6. 本讲实践

1. 法律法规

法律、法规、规章及其他规范性文件



名称	实施年份
《中华人民共和国飞行基本规则》	2000.07
《通用航空飞行管制条例》	2003.05
《关于民用无人机管理有关问题的暂行规定》	2009.06
《低空空域使用管理规定（试行）》	2014.07
《关于无人驾驶航空器系统频率使用事宜的通知》	2015.03
《轻小型无人机运行规定（试行）》	2015.12
《民用无人驾驶航空器系统空中交通管理办法》	2016.09
《民用无人驾驶航空器实名制登记管理规定》	2017.05
《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例（征求意见稿）》	2018.01
《民用无人机驾驶员管理规定》	2018.08
《轻小型民用无人机飞行动态数据管理规定》	2020.05
《无人驾驶航空器系统标准体系 建设指南（2021年版）》	2021.09

1. 法律法规

常见飞行器分类



轻小型民用无人机分类等级标准

分类	空机重量 (千克)	起飞全重 (千克)
微型	$W < 0.25$	
轻型	$0.25 \leq W \leq 4$	$0.25 \leq W \leq 7$
小型	$4 < W \leq 15$	$7 < W \leq 25$
中型	$15 < W$	$25 < W \leq 150$
大型	$W > 150$	

在《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例（征求意见稿）》中，按照无人机重量对无人机进行了分级，其分级标准如上表所示。

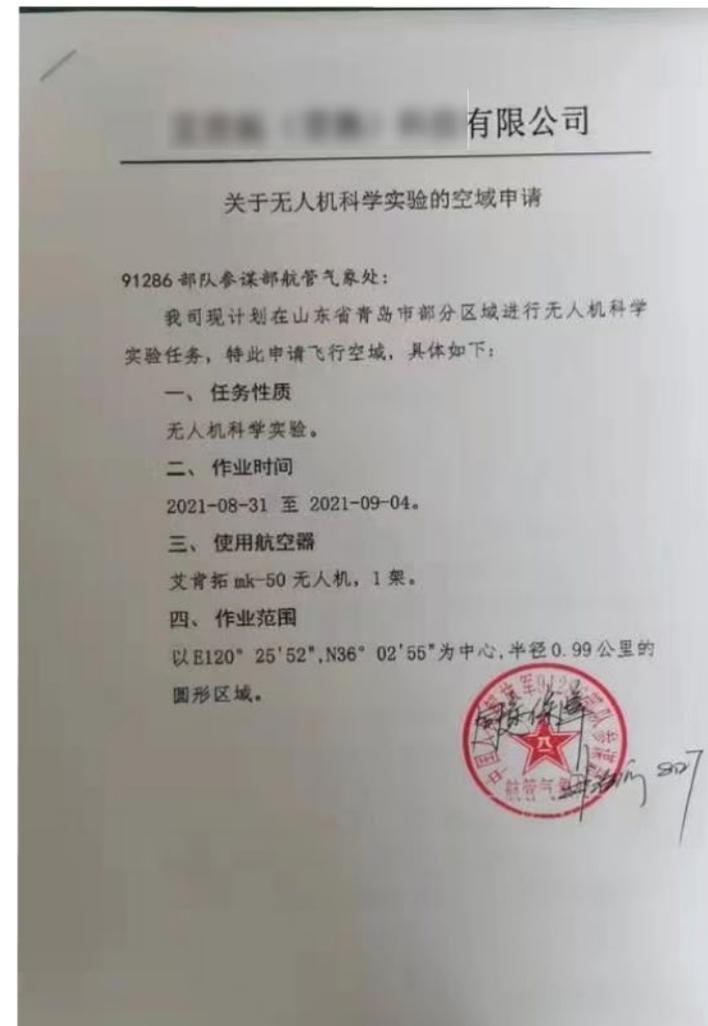
1. 法律法规

空域申请



进行空域申请时通常需要如下材料：

- 飞行计划申请书。
- 飞行资质证明。
- 飞行人员资质证书。
- 飞行任务委托合同。
- 任务单位情况。
- 空域申请书。
- 飞行执行单位情况。



2. 飞前准备

飞行环境评估



飞行场地的天气、建筑分布情况、面积以及人员情况等都是在飞行前需要进行飞行环境评估的重要因素，在进行充分的评估时，通常考虑如下四个方面：

- 环境风速不能过大。
- 空气能见度要良好。
- 周围没有建筑等障碍物遮挡。
- 要远离人群，确保人员安全。



飞场环境（图片场地由北方天途航空技术发展（北京）有限公司提供）

2. 飞前准备

多旋翼系统硬件检查

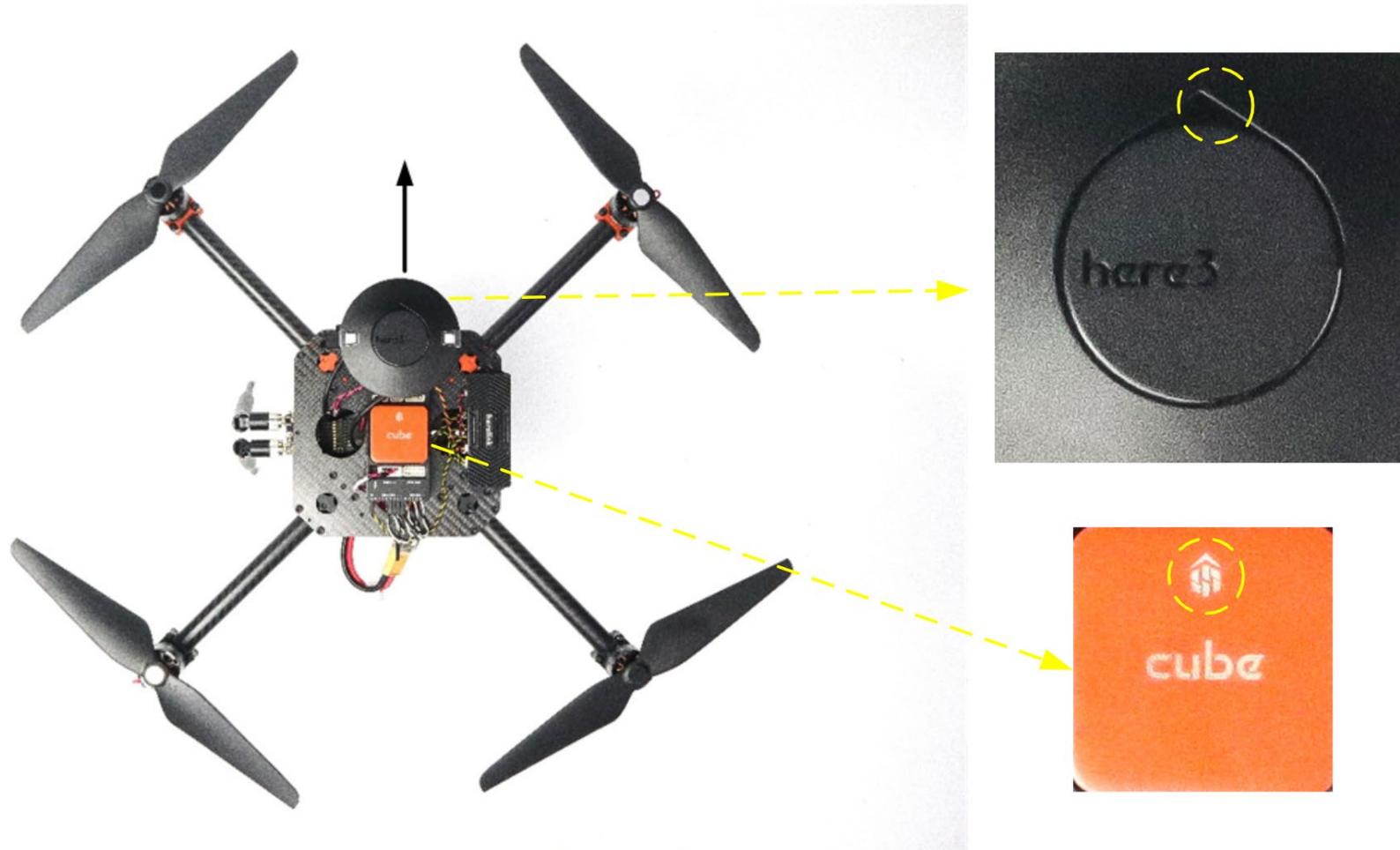


完成飞行环境评估后需要进行**多旋翼系统的硬件检查**，包含如下**五个方面**：

- 多旋翼的机械结构是否牢固
- 传感器安装方向是否正确。
- 多旋翼和遥控器电池电量是否足。
- 初次使用时需要进行遥控器校准和电调(ECS)行程校验。
- 长时间未使用或者飞行场地变化较大时需要进行磁罗盘和加速度计的校准。

2. 飞前准备

多旋翼系统硬件检查



GNSS朝向应该与机头朝向一致

2. 飞前准备

多旋翼地面站监控信息检查



第三个飞前准备操作是多旋翼**地面站监控信息检查**，也称为**软件检查**，主要检查

四个方面：

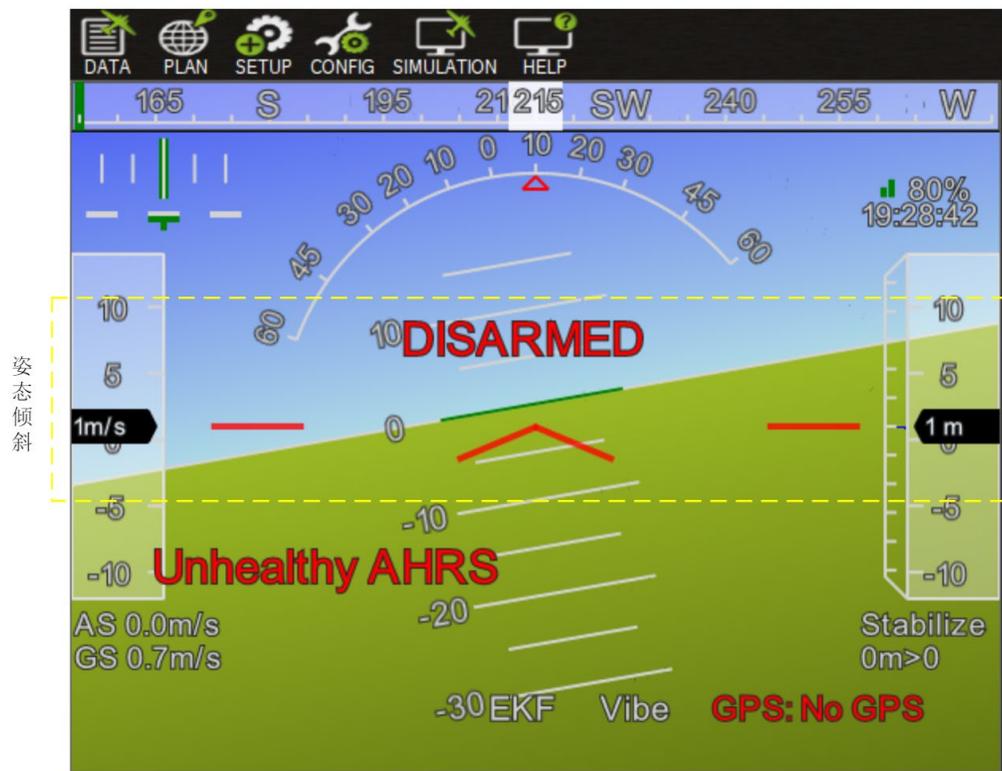
- 地面站读取和显示的多旋翼姿态信息是否正常。
- 地面站显示的多旋翼高度和速度以及朝向是否正常。
- 地面站有无报警信息。
- 地面站显示的多旋翼GPS信号、定位信息以及卫星数量是否正常。

2. 飞前准备



多旋翼地面站监控信息检查

- 地面站读取和显示的多旋翼姿态信息是否正常
- 地面站显示的多旋翼高度和速度以及朝向是否正常



多旋翼水平放置时地面站显示姿态倾斜



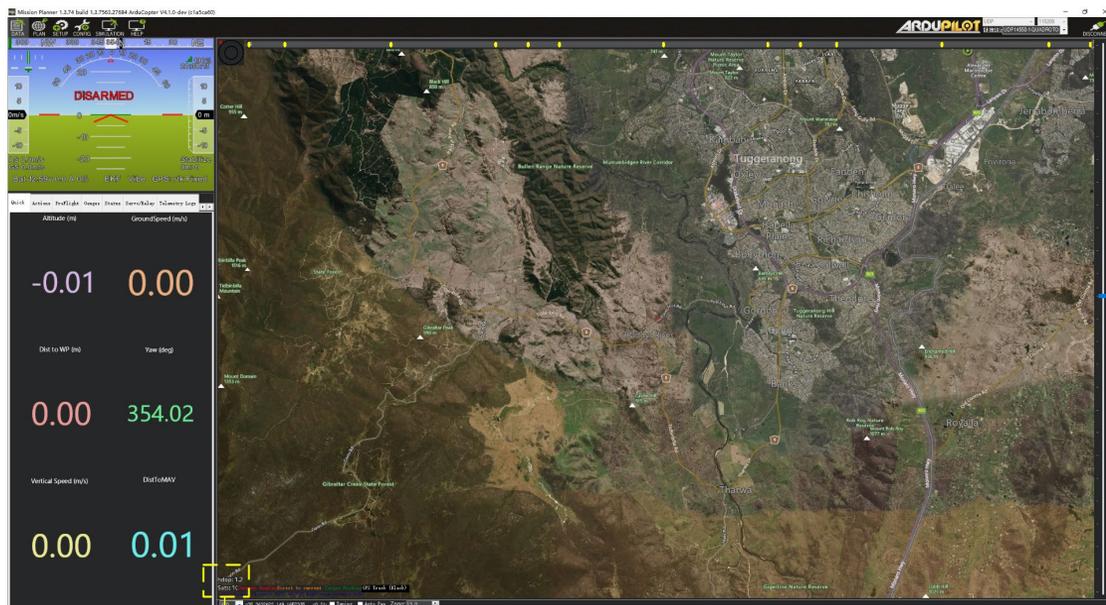
检查地面站多旋翼姿态窗口的方向指向

2. 飞前准备



多旋翼地面站监控信息检查

- 地面站显示的多旋翼GPS信号、定位信息以及卫星数量是否正常



Hdop: 1.2
Sats: 10

检查地面站GPS信息是否正常

- 地面站有无报警信息



检查地面站报警信息

2. 飞前准备

通讯链路检查



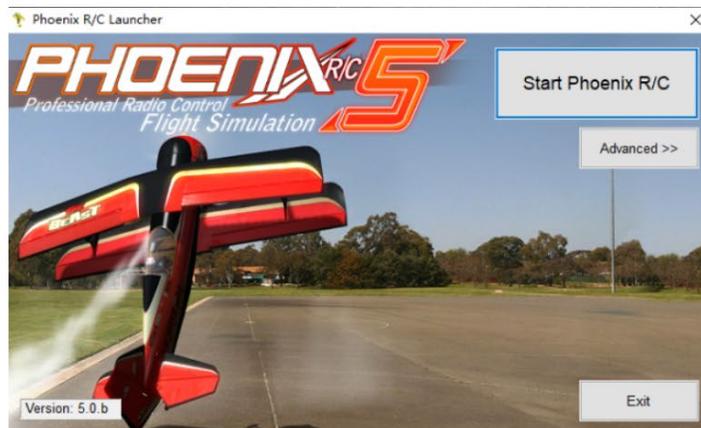
完成地面站信息检查后，还必须进行**通讯链路检查**，需要检查如下**三个**

方面：

- 图传接收端是否能够接收到清晰的记载摄像头发射的画面
- 地面站是否能够通过无线数传与飞控进行连接
- 通过地面站检查遥控器操作是否有效

3. 遥控器飞行操作

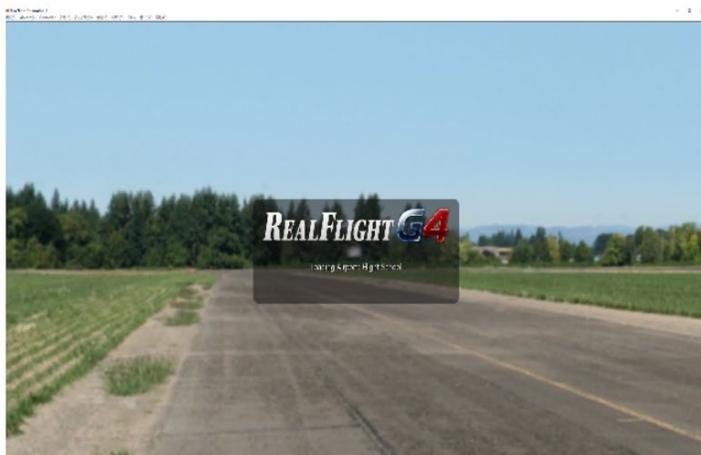
常见的飞行模拟软件



(a)PhoenixRC



(b)AeroFly



(c)RealFlight G4



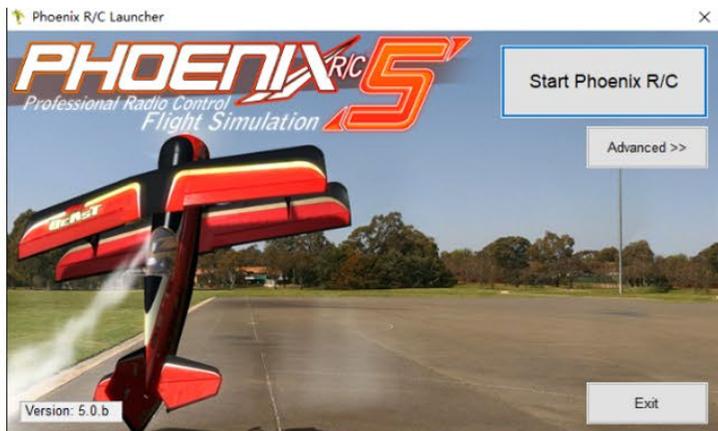
(d)Reflex XTR

遥控器模拟飞行操作
对于新手积累飞行经验帮助极大!

常见的飞行模拟软件

3. 遥控器飞行操作

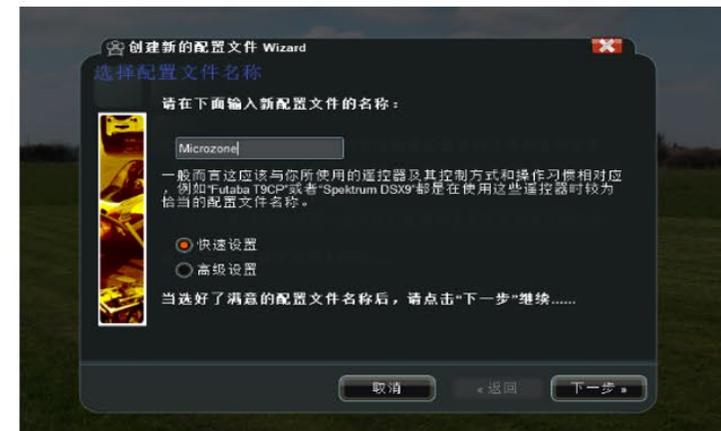
PhoenixRC模拟器配置



(a) 凤凰模拟器启动界面



(b) 遥控器通道



(c) 新遥控器配置命名



(d) 遥控器通道反转设置



(e) 选择多旋翼模型



(f) 飞行模拟器选项

飞行模拟软件配置流程

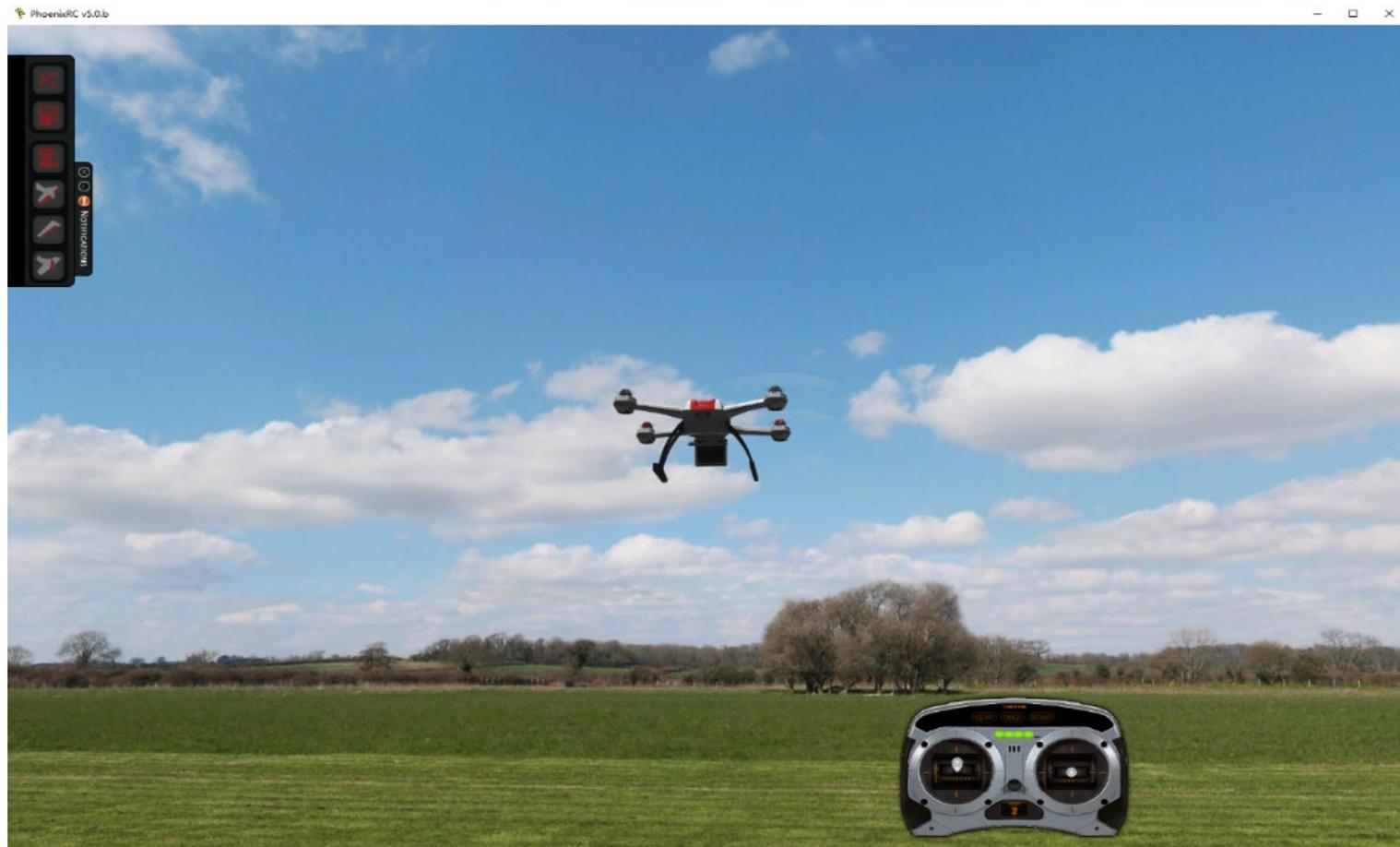
3. 遥控器飞行操作

基础遥控器飞行操作



动作要领：缓慢上推油门摇杆，使多旋翼离地。同时微调其他摇杆，避免多旋翼大幅漂移。

注意事项：离地高度不能过低，否则会收到地效影响，使得多旋翼不稳定。



起飞

3. 遥控器飞行操作

基础遥控器飞行操作



动作要领：缓慢下拉油门摇杆，使多旋翼降落。

注意事项：油门杆切勿收太快。



降落

3. 遥控器飞行操作

基础遥控器飞行操作



动作要领：微调油门杆，

保持多旋翼高度，缓慢上推

俯仰摇杆，使多旋翼前飞。

注意事项：自稳模式下，

前飞会导致多旋翼高度下降，

要时刻注意保持高度。



前飞

3. 遥控器飞行操作

基础遥控器飞行操作



动作要领：微调油门杆，

保持多旋翼高度，缓慢下拉

俯仰摇杆，使多旋翼向后飞。

注意事项：要时刻注意保

持高度。



后飞

3. 遥控器飞行操作

基础遥控器飞行操作

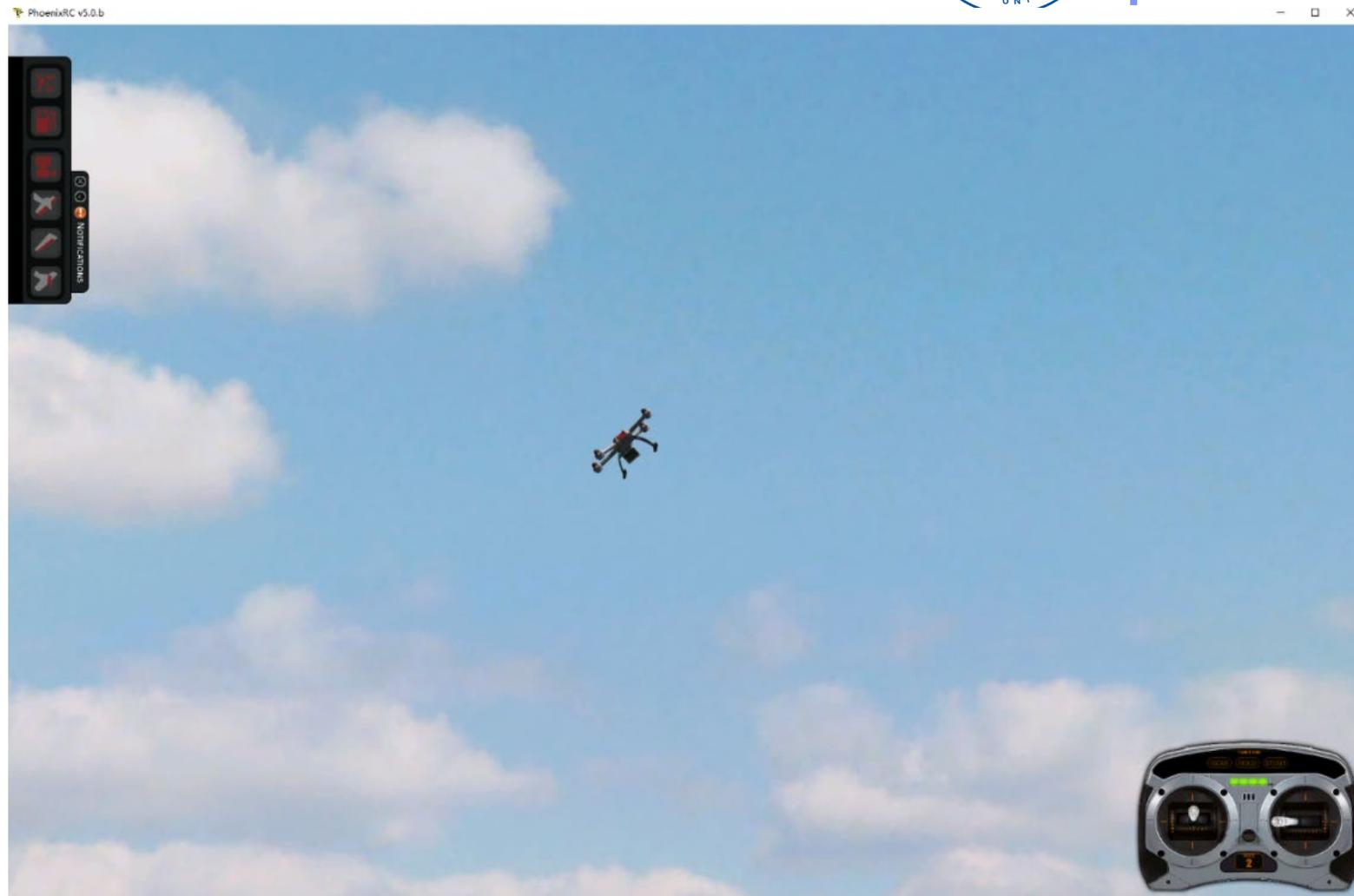


动作要领：微调油门杆，

保持多旋翼高度，缓慢左推

滚转摇杆，使多旋翼向左飞。

注意事项：注意保持高度。



左飞

3. 遥控器飞行操作

基础遥控器飞行操作

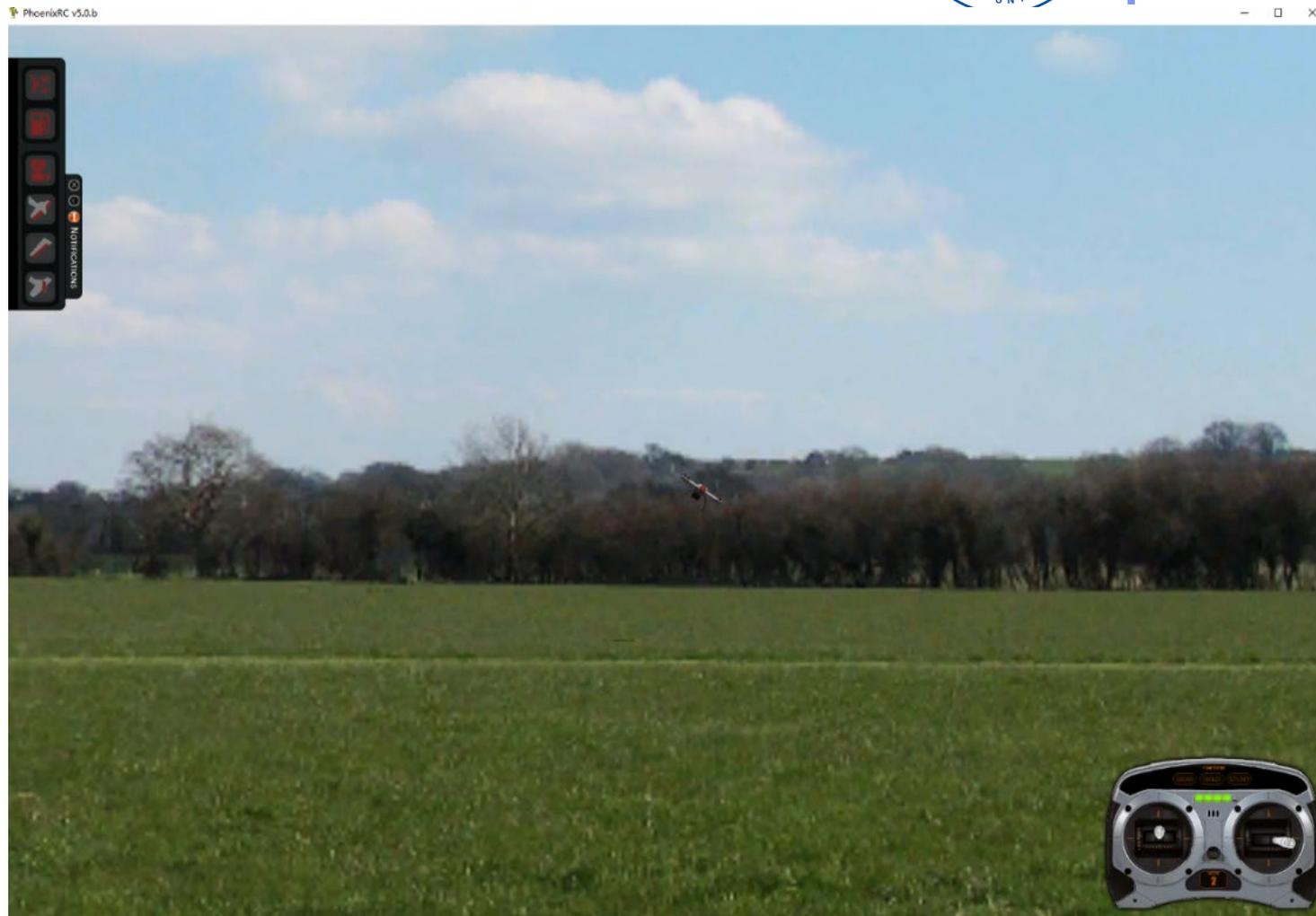


动作要领：微调油门杆，

保持多旋翼高度，缓慢右推

滚转摇杆，使多旋翼向右飞。

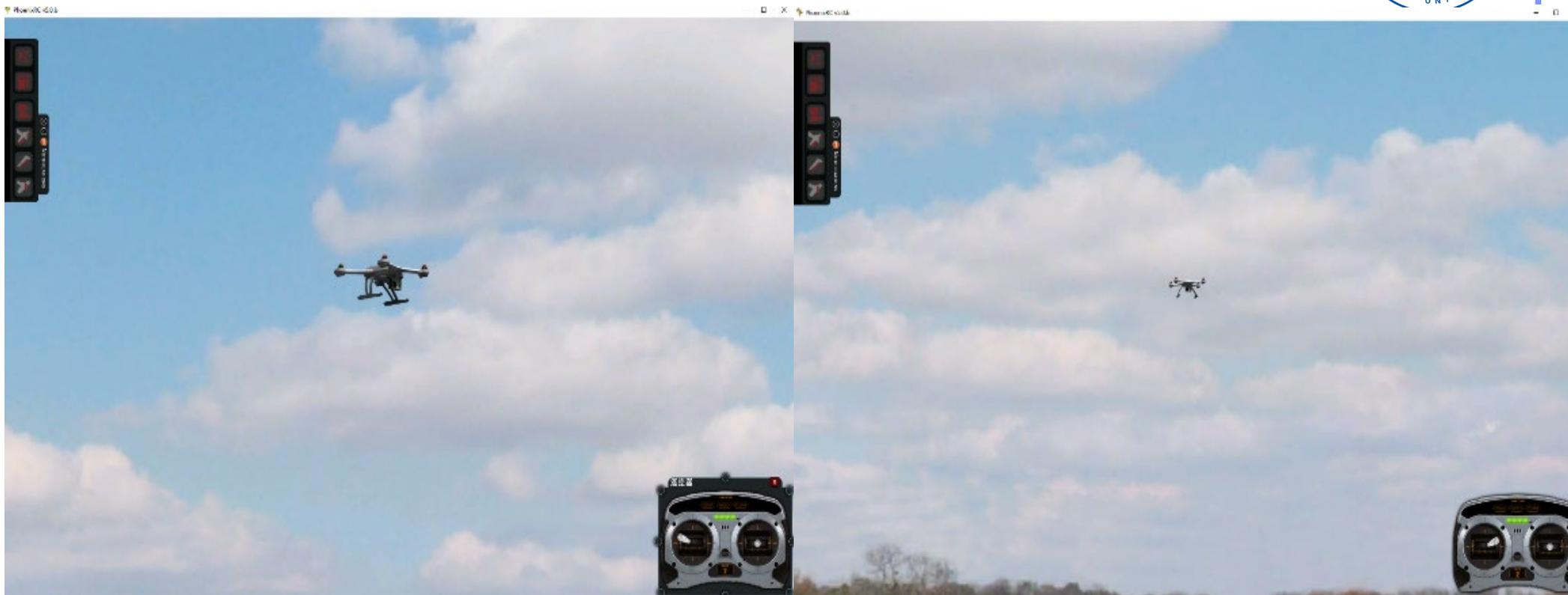
注意事项：注意保持高度。



右飞

3. 遥控器飞行操作

基础遥控器飞行操作



左右偏航

动作要领：缓慢左推或右推偏航摇杆，使多旋翼向左或者向右转向。

注意事项：注意保持高度。

3. 遥控器飞行操作

基础遥控器飞行操作



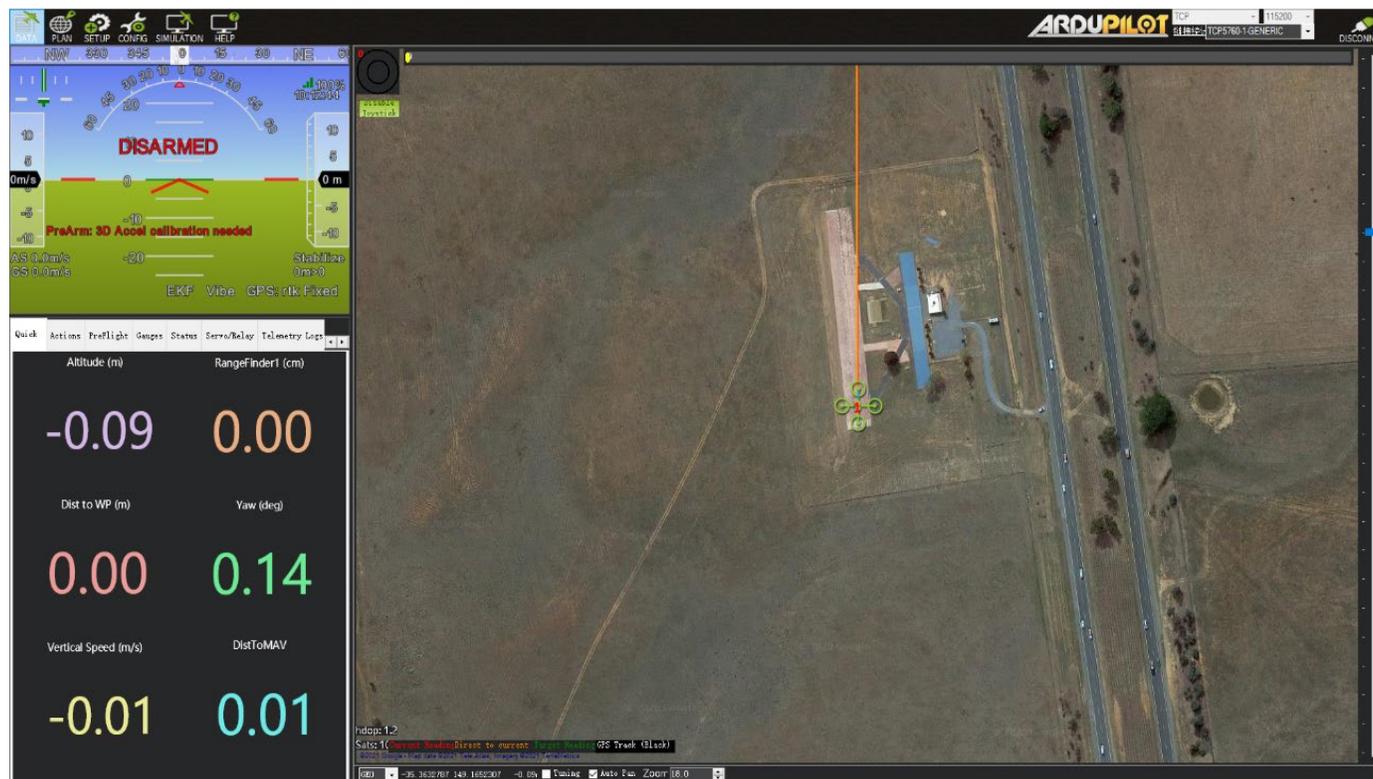
对尾悬停

动作要领：综合运用各个摇杆，使得多旋翼保持在一定范围内。

注意事项：切勿大幅度拨动摇杆

4. 地面站飞行操作

Mission Planner地面站界面介绍



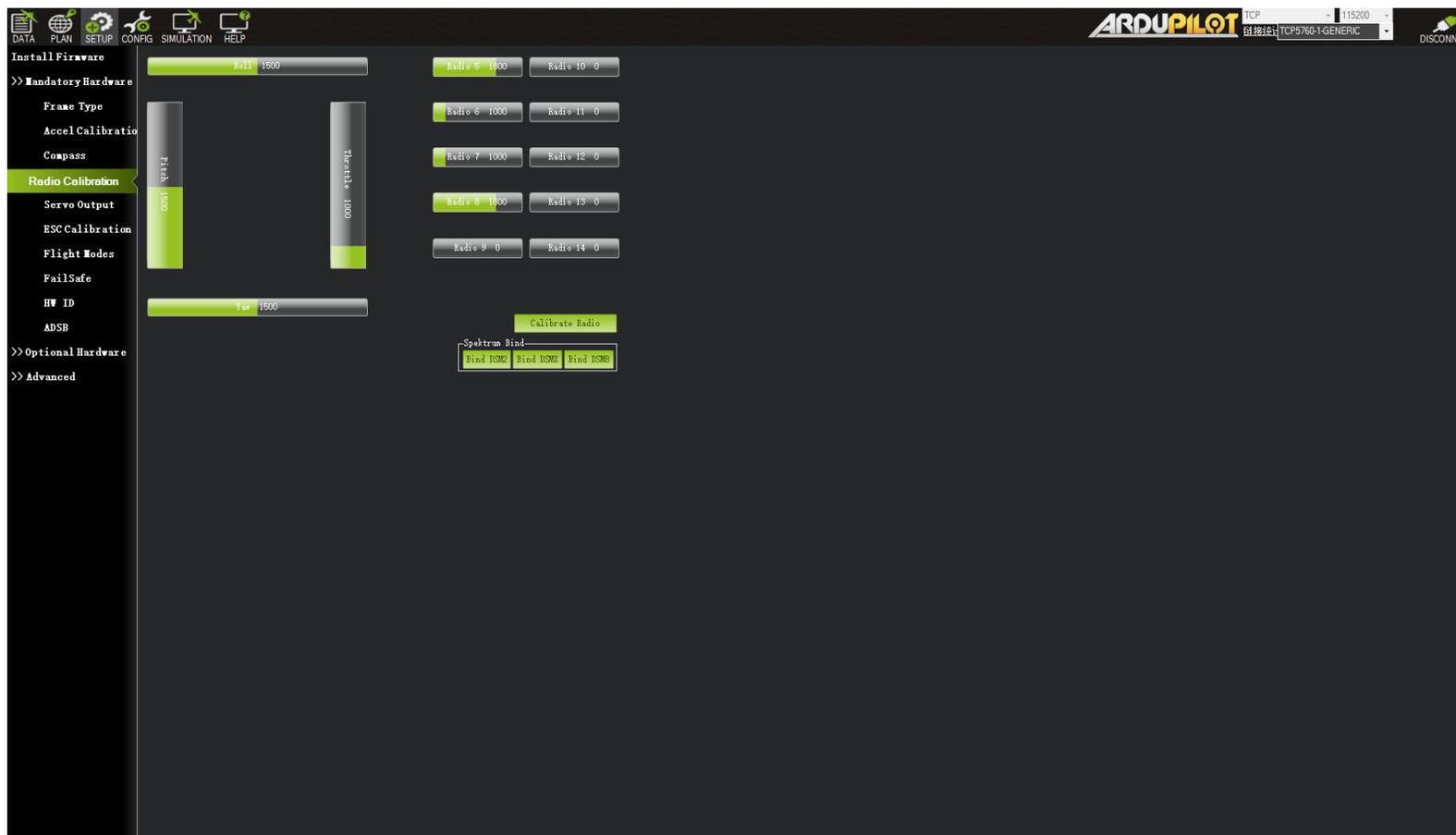
Mission Planner地面站启动界面

Mission Planner地面站是开源飞控软件Ardupilot的配套地面站，同时支持所有MavLink协议的开源飞控软件，例如PX4。

4. 地面站飞行操作



Mission Planner地面站界面介绍

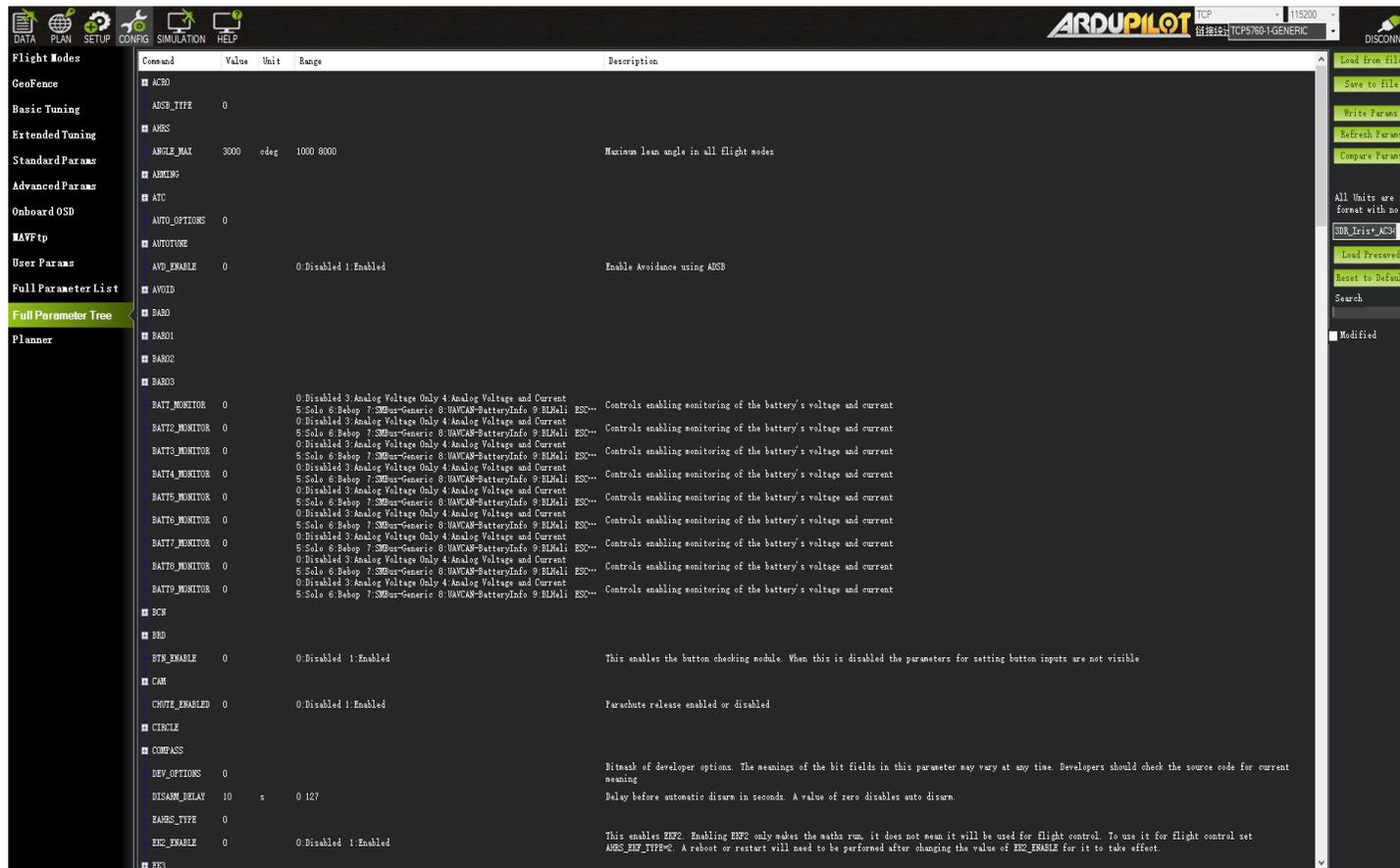


Mission Planner地面站设置界面

在“SETUP”选项里，可以进行各个器件的初始化和校准操作。

4. 地面站飞行操作

Mission Planner地面站界面介绍



Mission Planner地面站参数设置界面

在“CONFIG”选项里，可以获取飞控的全部参数并对其进行设置。

4. 地面站飞行操作

Mission Planner地面站界面介绍



点击“DATA”选项进入其主页面，在“DATA”主页面左下区域点击“Action”按钮，会得到控制按钮界面。通过该界面可以对飞机进行多项直接控制，例如“Arm/Disarm”、飞行模式切换等。



Mission Planner地面站控制按钮

4. 地面站飞行操作



地面站全自主飞行设置流程

生成航点有多种方式，最简单的可以用鼠标左键在地图上选点，每次在地图上单击鼠标左键即可将鼠标光标处的点添加到航点列表。除此之外Mission Planner地面站还支持生成网格、多边形航点。



生成航点

4. 地面站飞行操作

地面站全自主飞行设置流程



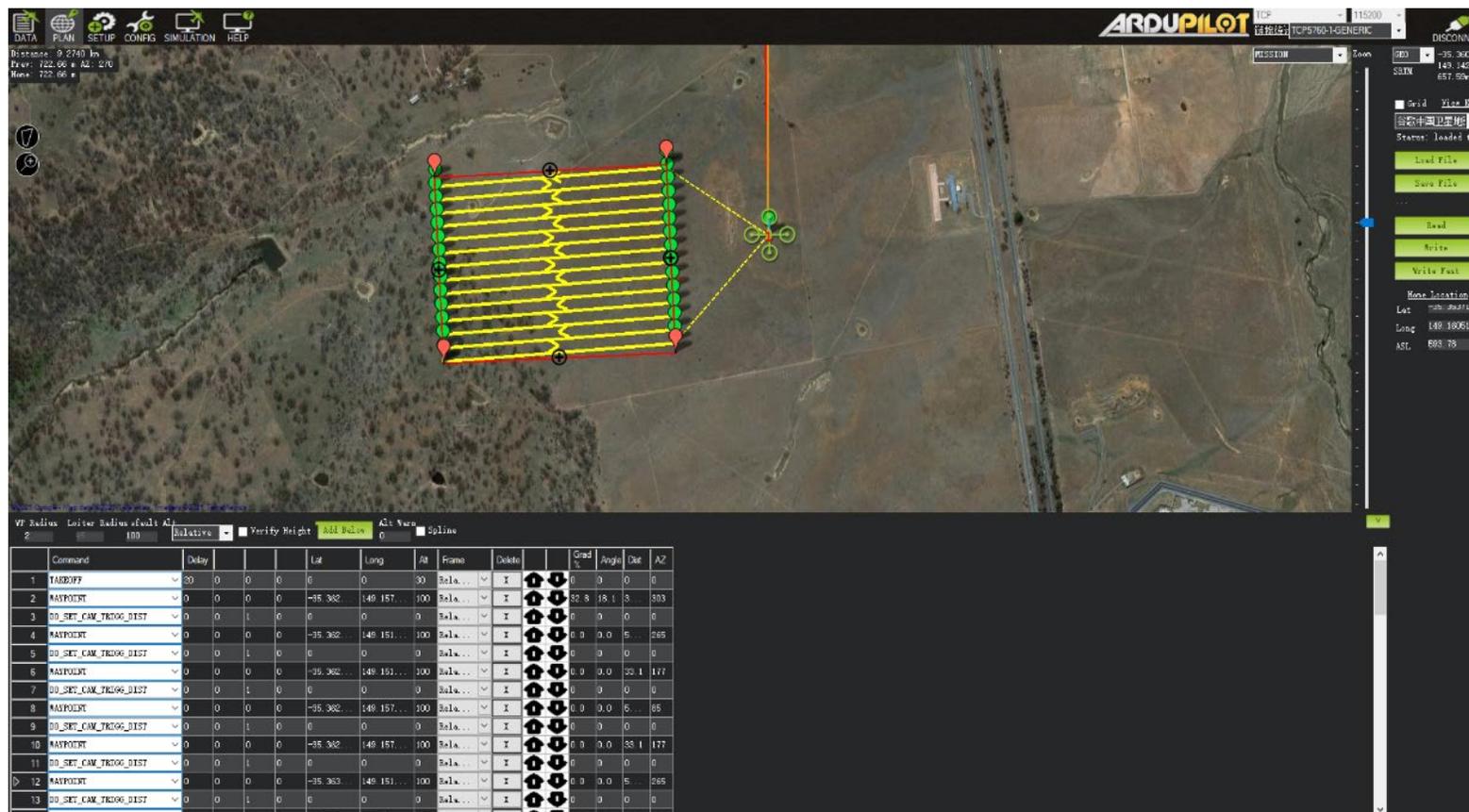
生成的航点会出现在航点列表里，可以将每个航点设置成不同的类型，例如起飞点、普通航点、降落点、悬停点等等，还可设置每个航点的高度、航点间飞行速度、航点处悬停时间等参数。

	Command									Frame	Delete			Grad %	Angle	Dist	AZ
1	TAKEOFF	20	0	0	0	0	0	0	30	Rela...	X			0	0	0	0
2	WAYPOINT	0	0	0	0	-35.362...	149.157...	100	Rela...	X				32.8	18.1	3...	303
3	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Rela...	X				0	0	0	0
4	WAYPOINT	0	0	0	0	-35.362...	149.151...	100	Rela...	X				0.0	0.0	5...	265
5	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Rela...	X				0	0	0	0
6	WAYPOINT	0	0	0	0	-35.362...	149.151...	100	Rela...	X				0.0	0.0	33.1	177
7	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Rela...	X				0	0	0	0
8	WAYPOINT	0	0	0	0	-35.362...	149.157...	100	Rela...	X				0.0	0.0	5...	85
9	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Rela...	X				0	0	0	0
10	WAYPOINT	0	0	0	0	-35.362...	149.157...	100	Rela...	X				0.0	0.0	33.1	177
11	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Rela...	X				0	0	0	0
12	WAYPOINT	0	0	0	0	-35.363...	149.151...	100	Rela...	X				0.0	0.0	5...	265
13	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Rela...	X				0	0	0	0
14	WAYPOINT	0	0	0	0	-35.363...	149.151...	100	Rela...	X				0.0	0.0	33.1	177
15	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Rela...	X				0	0	0	0
16	WAYPOINT	0	0	0	0	-35.363...	149.157...	100	Rela...	X				0.0	0.0	5...	85
17	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Rela...	X				0	0	0	0
18	WAYPOINT	0	0	0	0	-35.363...	149.157...	100	Rela...	X				0.0	0.0	33.1	177
19	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Rela...	X				0	0	0	0
20	WAYPOINT	0	0	0	0	-35.363...	149.151...	100	Rela...	X				0.0	0.0	5...	265
21	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Rela...	X				0	0	0	0

航点列表

4. 地面站飞行操作

地面站全自主飞行设置流程



写入航点

单击PLAN界面右侧的Write写入航点，即可将航点信息全部写入飞控。

4. 地面站飞行操作



地面站全自主飞行设置流程

将航点上传至飞控之后。首先进入地面站DATA界面，点击左下角的Actions按钮。设置为Stabilize或者Guided模式，然后解锁，解锁后执行动作栏选择MISSION_START命令，多旋翼会自动进入Auto模式，开始自主飞行。



解锁多旋翼

4. 地面站飞行操作

地面站全自主飞行设置流程



The screenshot displays the Ardupilot Mission Planner interface. The main window shows a top-down view of a mission plan with a grid of waypoints and a 'Tracker Home' point. The left sidebar contains various mission controls and a table of mission items.

	Command	Delay			Lat	Long	Alt	Frame	Delete			Grad %	Angle	Dist	AZ
36	WAPPOINT	0	0	0	-36.383	149.158	100	Rela...	I			0.0	0.0	87.2	2.72
37	DO_SET_CAM_TRIGGER_DIST	0	0	1	0	0	0	Absc...	I			0	0	0	0
> 38	WAPPOINT	0	0	0	-36.384	149.158	100	Rela...	I			0.0	0.0	6.4	1.80
39	DO_SET_CAM_TRIGGER_DIST	0	0	1	0	0	0	Absc...	I			0	0	0	0

自主执行飞行任务

4. 地面站飞行操作

地面站全自主飞行设置流程



The screenshot displays the ArduPilot ground station interface. On the left, there are various status indicators and a 'MISSION' table. The main area shows a top-down view of a mission plan with a grid of waypoints and flight paths. A 'Tracker Home' point is also visible. The bottom right corner contains a detailed table of mission commands.

Command	Delay	Lat	Long	Alt	Radius	Order	Group	Order	Order	Order	Order	Order	Order
13 DO_SET_CAN_FTRNG_DIST	0	0	0	0	0	0	Alias...	X	X	X	X	X	X
14 MAVPOINT	0	0	0	-05.383	149.158	1.00	Rela...	X	X	X	X	X	X
15 DO_SET_CAN_FTRNG_DIST	0	0	0	0	0	0	Alias...	X	X	X	X	X	X
16 MAVPOINT	0	0	0	-05.383	149.159709	1.00	Rela...	X	X	X	X	X	X

飞机依次飞过航点

5. 常见的故障及维修



启动时故障

多旋翼启动时常见故障的可能原因及解决方案

问题	可能原因	解决方案
遥控器无法对频	遥控器频道模式选择错误	根据接收机类型选择正确的遥控器发射模式
	接收机故障	更换新的接收机进行验证
	接收机没有进入对频状态	长按接收机上的按钮进入对拼状态
数传连接不上	数传设备未供电	检查数传供电
丢失GNSS信号	处于高楼大厦或者深山峡谷等GNSS信号弱的地区	检查GNSS卫星数量，并避免多旋翼周边有障碍物遮挡
	多旋翼GNSS模块损坏	更换新的GNSS模块进行验证
自驾仪无法解锁	GNSS信号差	检查GNSS卫星数量，并避免多旋翼周边有障碍物遮挡
	部分器件未校准	依次校准各个传感器和遥控器
	遥控器通道配置错误	正确配置遥控通道
	飞行模式选择不合适	检查多旋翼是否处于可解锁的飞行模式，例如在无GNSS时，无法在定点模式下解锁

5. 常见的故障及维修

启动时故障



多旋翼启动时常见故障的可能原因及解决方案

问题	可能原因	解决方案
解锁后电机怠速不一致	电调未校准	校准电调行程
电机转速很大但无法起飞	螺旋桨正反面装反	正确安装螺旋桨
需要很大的油门才能起飞		
起飞及飞行巨大噪音		
起飞时侧翻	电机正反转顺序错误	根据飞控要求正确配置电机正反转
	加速度计水平需要校准	重新校准加速度计水平
	螺旋桨的转向	检查螺旋桨安装是否正确

5. 常见的故障及维修

飞行中故障



多旋翼飞行中的常见故障的可能原因及解决方案

问题	可能原因	解决方案
多旋翼飞行时抖动	PID参数不合适	调试PID参数
	飞控板震动剧烈	飞控板加装减震装置
多旋翼响应与遥控操作不一致	遥控器通道设置错误	正确配置遥控器通道
多旋翼完全不受遥控器控制	多旋翼飞行过远超过遥控器作用距离	通过地面站让飞行器返航、降落，或在失控保护中设置油门保护
无法切换为悬停模式	GPS信号未定位	检查GPS是否定位并转移至开阔地带
定点悬停时多旋翼漂移	指南针受严重干扰	重新校准指南针
多旋翼向某一侧持续飘移	多旋翼重心过于不平衡	重新设计多旋翼安装布局
	多旋翼水平加计需要校准	校准加速度计
	遥控器需要校准	校准遥控器
空中自由落体	电池掉电或电池没电	飞行时随机携带BB响
	四旋翼其中一个桨无法提供足够动力，无法维持平衡	检查是否有电机损坏

5. 常见的故障及维修

载荷系统故障



多旋翼载荷系统的常见故障的可能原因及解决方案

问题	可能原因	解决方案
图传没有画面	图传设备未供电	正确给图传设备供电物遮挡
	图传发射端与摄像机连接错误	按照图传说明书正确接线
	图传设备未对频	正确配对图传设备
图像不稳定	飞行距离太远	减小飞行距离
	附近有强干扰或遮挡	到干扰少的空旷地带飞行

6. 本讲实践

课堂实践



(1) 多旋翼遥控飞行模拟操作

按照教材8.3.2小节的训练顺序进行模拟飞行训练，以此来熟悉遥控器各个开关和摇杆操控，完成起飞、降落、前后左右飞行、四面悬停、8字飞行等动作。

(2) 地面站航线飞行软件仿真

按照教材8.4节和8.6.1.2小节的内容在地面站上规划出一条航线，并实现地面站控制的模拟航线飞行。

6. 本讲实践

课外实践



(1) 空域申请

给定一个区域，查清楚该区域的空域申请流程，并写一份“飞行试验任务临时空域申请”。

(2) 真实多旋翼遥控器飞行操控

按照教材8.2节的流程，完成各项飞前准备，之后分别在自稳、定高和定点模式下依次完成下列训练：起飞与降落、四面悬停、8字航线飞行。

(3) 真实多旋翼地面站操控

按照教材8.4节的流程，熟悉地面站的各个界面，并在地面站航线飞行软件仿真小节的基础上，进一步实现在真实多旋翼的地面站操控，在地面站上规划出一条航线，并实现地面站控制的航线飞行。



可靠飞行控制研究组
RELIABLE FLIGHT CONTROL GROUP

□ 感谢李展博为本讲课程准备做出的贡献



R f l y 官网



研究组公众号



视 频 号



B 站官方账号



优酷账号

相 关 书 籍

RELATED BOOKS



多旋翼飞行器

从原理到实践

ISBN9787121454158

组装试飞



多旋翼无人机

远程控制实践

ISBN9787121447129

开发实践



多旋翼飞行器

设计与控制实践

ISBN9787121377648

开发实践



多旋翼飞行器

设计与控制

ISBN9787121312687

理论研究



可靠飞行控制研究组
RELIABLE FLIGHT CONTROL GROUP

