

适用性及版权说明



适用性说明

本课程依据《AC-61-FS-2018-20R2民用无人机驾驶员管理规定》、《MD-92-FS-02民用无人驾驶航空器操控员执照考试管理办法》编写，仅适用于“民用无人驾驶航空器操控员执照培训”使用；使用限制为“旋翼-多旋翼”；如需“基于场景的操控员培训”的相关资料，请参考《AC-92-2019-01特定类无人机试运行管理规程（暂行）》、《IB-FS-0PS-011民用无人驾驶航空器固定设施设备巡检》或联系本人。

版权说明

此电子课件为本人编制的“多旋翼全套教学材料体系”中的核心材料及重要组成部份，其所有相关内容（包括但不限于文字、图表、图像、排版、课程结构和附录）的知识产权均归本人所有。未经版权持有人事先书面明确授权，任何个人或机构不得以任何形式（包括电子、机械、复印、录音或其他任何方式）复制、分发、转载、改编、修改、出版、传播本材料的任何部分，或将其用于任何商业性培训、出版或教学目的。

对于任何未经授权的使用行为，版权持有人保留依法追究其法律责任的权利。

授权查询请联系：yecaixiang@139.com 院校版请联系:13808889332

CONTENTS

目录

01 | 学前须知

02 | 民航法规与空中交通管制

03 | 无人机系统组成
与工作原理

04 | 空气动力学基础
与飞行原理

05 | 无人机结构与性能

06 | 通信链路
与任务规划

CONTENTS

目录

07

航空气象与飞行环境

附录

关键术语表

08

无人机系统特性与操纵技术

附录

核心法规与规范性文件索引

09

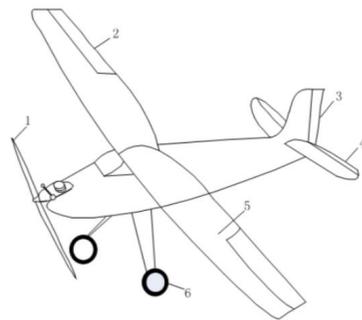
无人机飞行手册及其他文档

附录

教材章节与主要参考法规对应表

01

概述（学前须知）



课程学习目标



认知执照

深刻理解民用无人驾驶航空器操控员执照（CRPL）的法律性质、等级分类、权力边界，及其与普通飞行员执照的异同。



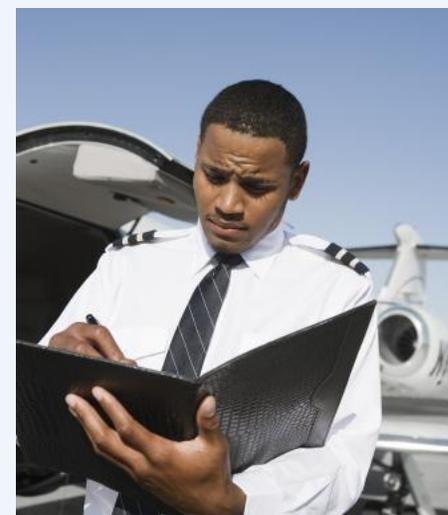
明晰路径

详细了解执照的考试流程、考核标准与学习方法，清晰个人学习规划。



建立思维

初步建立“飞行员思维”，掌握法规-标准-程序（RSP）模型。



建立思维

理解机长（PIC）职责。

民用无人驾驶航空器操控员执照 (CRPL)

英文全称

Civil Remote Pilot License



颁发机构

由中国民用航空局 (CAAC) 颁发。



法律依据

- 《民用航空器驾驶员合格审定规则》
(CCAR-61部)
- 《民用无人驾驶航空器驾驶员管理规定》
(AC-61-FS-2018-20R2)
- 《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》
(CCAR-92)



对应类别

多旋翼、固定翼、直升机、热气球、飞艇等。





民用无人驾驶航空器操控员执照

Civil Remote Pilot License



姓名: [REDACTED]

执照编号: [REDACTED]

签发日期: [REDACTED]

更新日期: [REDACTED]

失效日期: [REDACTED]



[查看详情](#)

VIII 附加条件

本执照根据中国民用航空规章第92部的有关规定颁发。

VII 持照人签字



权利等级

XII 等级

中型无人机操控员执照
旋翼机
旋翼机—多旋翼
超视距—多旋翼

中型无人机操控员执照
旋翼机
旋翼机—多旋翼
超视距—多旋翼
教员—多旋翼

备注

执照样式

执照的分类与等级

分类维度	具体分类	定义与权限说明	法规依据
无人机驾驶员等级	视距内驾驶员	能在驾驶员与无人机保持直接目视接触的范围内运行（半径≤500米，相对高度≤120米）。适用于基础作业。	CCAR-92第92.51条
	超视距驾驶员（机长）	能操控无人机在超出目视范围外飞行。具备更高权限，负责申请空域、规划航线、任务决策等。	CCAR-92第92.51条
	教员	具备教学资质，可培训学员。	CCAR-92第92.51条
无人驾驶航空器类别	多旋翼、固定翼、直升机、热气球、飞艇等	指所操控的航空器类型	CCAR-92第92.53条
飞行员执照类型	CRPL	民用无人驾驶航空器操控员执照	AC-61-FS-2018-20R2
	SPL	运动类飞行员执照	CCAR-61-R5
	CPL/PPL/ATPL	商用/私用/航线运输驾驶员执照	CCAR-61-R5

考试流程与标准

MD-92-FS-02民用无人驾驶航空器操控员执照考试管理办法



理论考试：

形式： 计算机考试，题型为选择题。

内容： 覆盖本教材各章节知识。

通过标准： 百分制，70/80分及以上为通过。



实践考试：

形式： 由局方委任的考试员主持，包括综合问答和实践飞行(360度自旋+水平八字)操作（超视距增加地面站操作）。

标准： 依据《民用无人机驾驶员实践考试标准》进行，对每个操作科目进行评分。



补考规定：

根据《民用无人驾驶航空器操控员执照考试管理办法》（MD-92-FS-02），考试分为两部分，必须理论考试通过后，方可参加实践考试。未通过者，需接受补充训练，并与上一次考试间隔至少14（实践）或28（理论）个日历日后方可补考。地面站与返航不通过者，飞行成绩保持60天有效。



课程与教学安排

地面理论课程共30课时，每课时60（45+15）分钟（集中第一周完成地面理论课程），不含地面站航线规划课程，具体参考Humar-LP-UAV-Ground-Theory-v1.0-教学计划。



RSP-无人机飞行员决策和行动的基本逻辑框架



法规 (Regulations - R)

国家或民航局制定的强制性规定，是安全运行的底线和红线。

标准 (Standards - S)

行业或企业制定的最佳实践和操作规范，高于法规要求。

程序 (Procedures - P)

为完成特定任务而制定的一系列步骤。

模型应用

任何飞行活动，都应先考虑法规是否允许，再选择更高标准，最后严格执行操作程序。。

机长 (Pilot in Command, PIC) 职责

在超视距运行中，超视距驾驶员通常就是法定的机长。

01

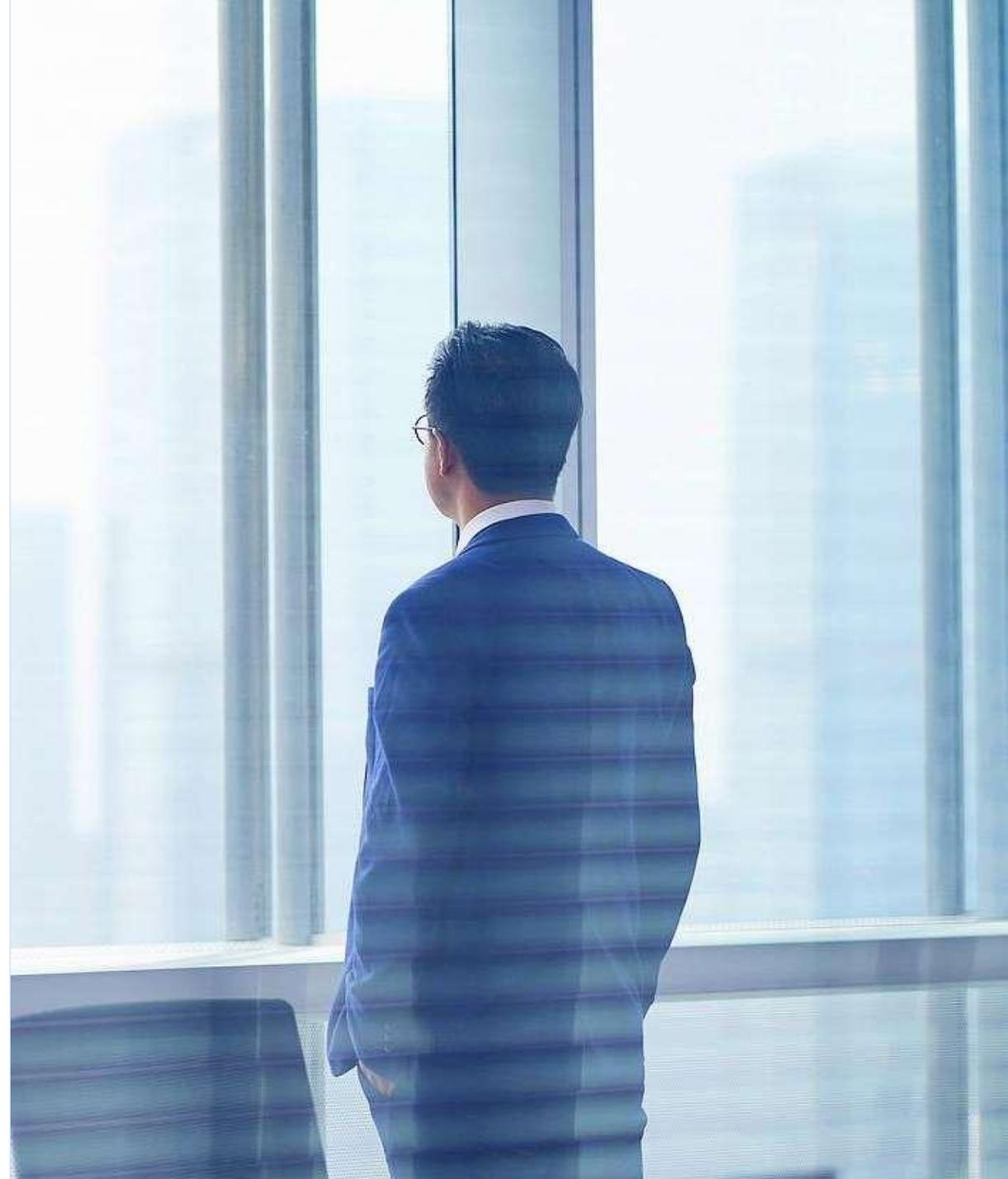
最终权利与责任：

在《CCAR-92》中明确，机长对飞行安全负有**最终责任**，并在运行期间具有最终决定权。

02

核心职责：

包括但不限于：任务决策、资源管理、风险评估、
应急处理、遵守法规



“

机长是一种职责，而非单纯的资格

”



“

持续学习状态保持是飞行学
习的最佳实践 $F=ma$

”



复习与思考题

思考

01

请阐述超视距驾驶员执照与视距内驾驶员执照在权力和职责上的核心区别。

02

查找《AC-61-FS-2018-20R2》，列出申请超视距驾驶员执照所需满足的基本资格条件

03

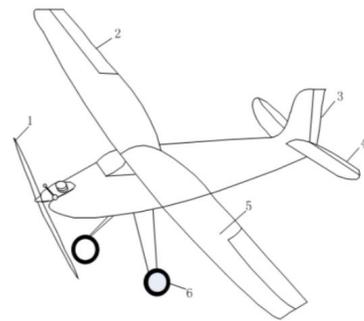
请用RSP模型分析一个场景：在航线规划时，发现计划航线需经过一个法规未明确禁止但信号复杂的区域，你作为机长将如何决策？

参考资料

1. 《民用无人机驾驶员管理规定》（AC-61-FS-2018-20R2）
2. 《民用航空器驾驶员合格审定规则》（CCAR-61-R5）
3. 《民用无人驾驶航空器操控员执照考试管理办法》（MD-92-FS-02）
4. 《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》（CCAR-92）

02

民航法规与空中交通管制



课程学习目标



掌握框架

系统掌握中国民用航空法规体系，特别是与无人机运行相关的核心规章条款。



明晰权责

深入理解空域分类、管理原则以及飞行计划申报的全流程和法律责任。



熟悉工具

掌握特定运行风险评估（SORA）的核心思想与具体评定流程，能初步应用于运行场景分析。



应用规则

掌握空中交通管制的基本通信要求和避让规则，具备在实际运行中依法依规飞行的能力。

民用航空法规体系框架

《中华人民共和国民用航空法》是我国民用航空领域的基础性法律

法律

《中华人民共和国民用航空法》（最高层级，基本法）；核心包括：空域主权、航空器与人员管理、机场与空中航行、航空运输与运营等

行政法规

《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》（国务院制定）

部门规章

中国民航局（CAAC）制定的规范性文件，是无人机运行管理的直接依据。

规范性文件

咨询通告（AC）
管理程序（AP）
管理文件（MD）
信息通告（IB）

部门规章（核心）

 01

CCAR-92部

《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》—— 无人机运行的“根本大法”。



 02

CCAR-91部

《一般运行与飞行规则》—— 包含对通用航空器的运行规定，部分条款适用于无人机。



 03

CCAR-61部

《民用航空器驾驶员合格审定规则》—— 规范驾驶员资质。

小结

92部做为无人机的运行标准，同121部一样，需要重点学习；局方查询：<https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/>



民航法规部号规则

按关键字检索

按CCAR部号检索

行政程序规则(1-20部)

航空人员(60-70部)

民用航空企业合格审定及运行(121-139部)

民用机场建设和管理(150-179部)

航空保险(190-199部)

航空基金(251-270部)

航空保安(326-355部)

航空器搜寻援救和事故调查(391-400部)

航空器(21-59部)

空域、导航设施、空中交通规则和一般运行规则(71-120部)

学校、非航空人员及其他单位的合格审定及运行(140-149部)

委任代表规则(180-189部)

综合调控规则(201-250部)

航空运输规则(271-325部)

科技和计量标准(356-390部)



规范性文件

01

咨询通告 (AC)

AC-61-FS-2018-
20R2: 民用无人机
驾驶员管理规定

02

管理程序 (AP)

AP-21-AA-2022-
71-民用无人驾驶航
空器系统适航审定
管理程序

03

管理文件 (MD)

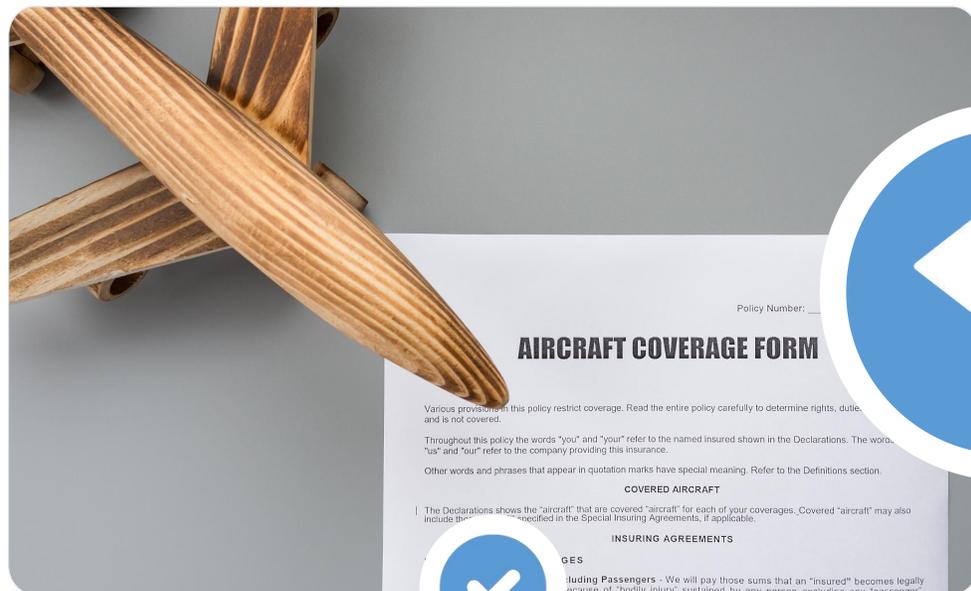
MD-92-FS-02
民用无人驾驶航空
器操控员执照考试
管理办法

04

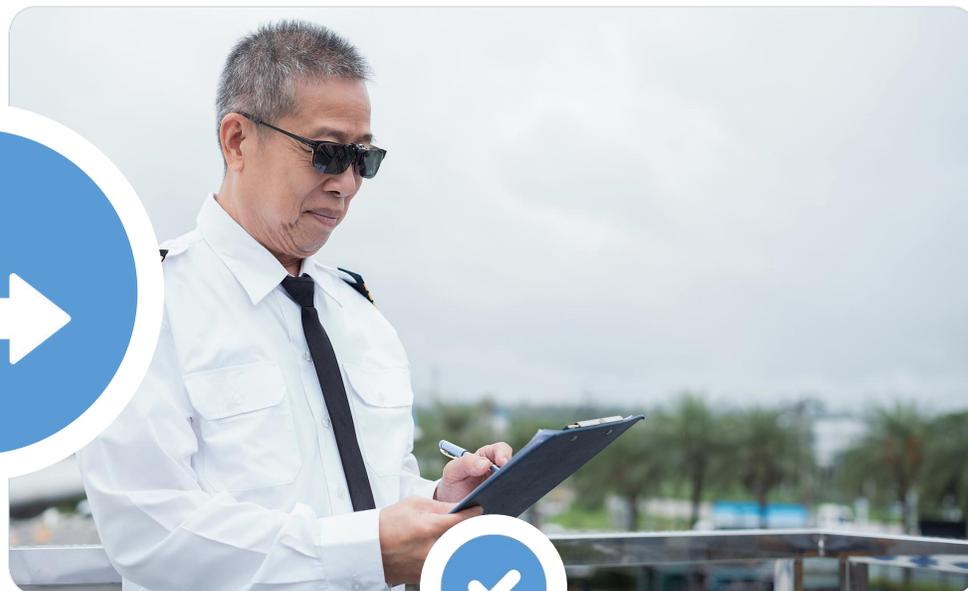
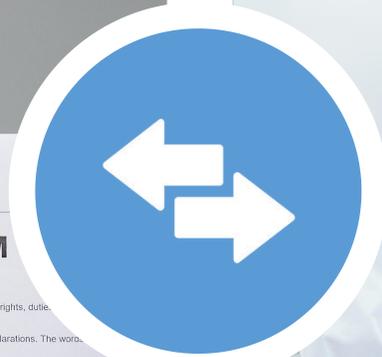
信息通告 (IB)

IB-FS-OPS-011
民用无人驾驶航空
器固定设施设备巡
检

学习重点：核心规章（92部与61部无人机部份）

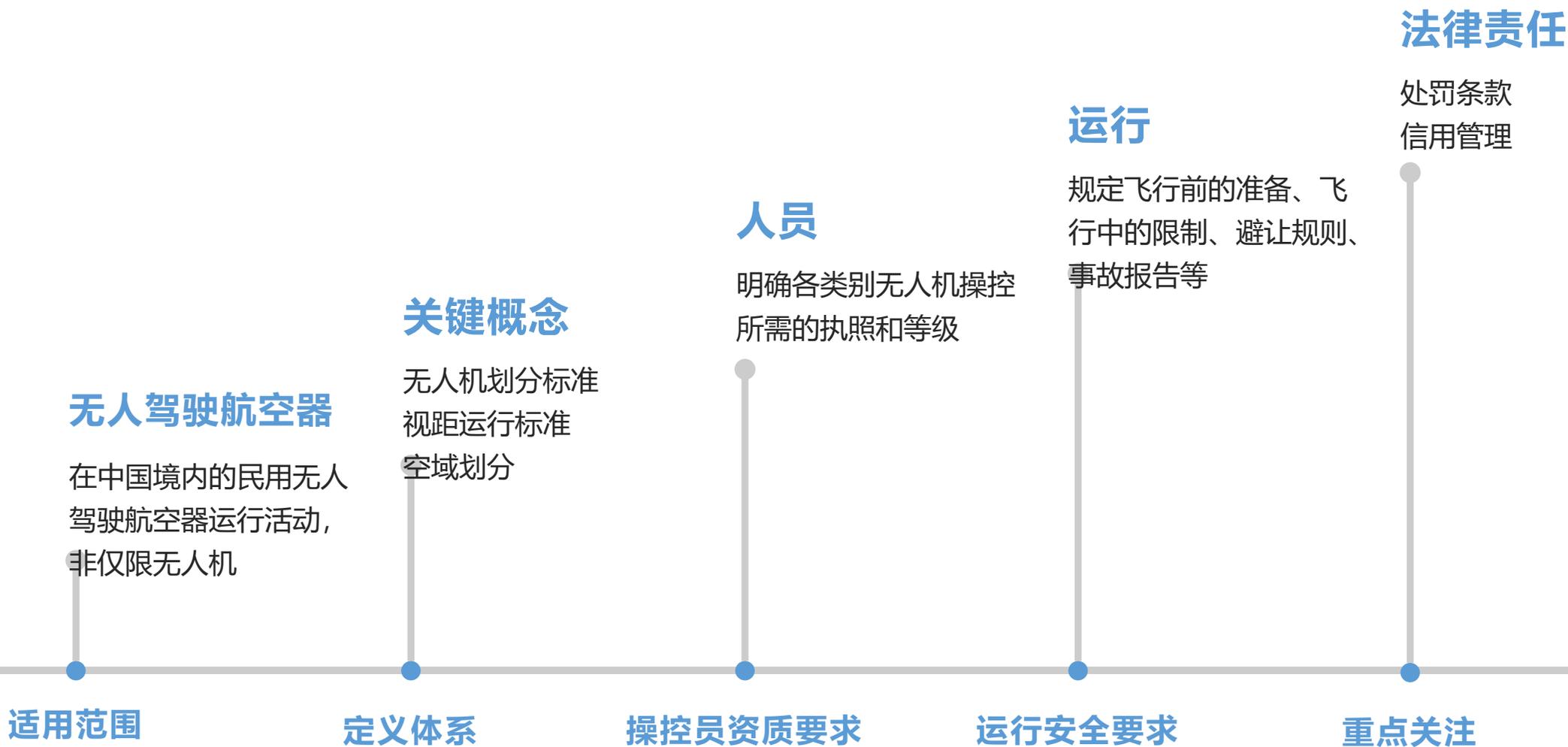


CCAR-92-民用无人驾驶航空
器运行安全管理规则



CCAR-61-R5民用航空器驾驶
员合格审定规则

核心规章CCAR-92部要点解读



CCAR-92.7 运行分类

审定类

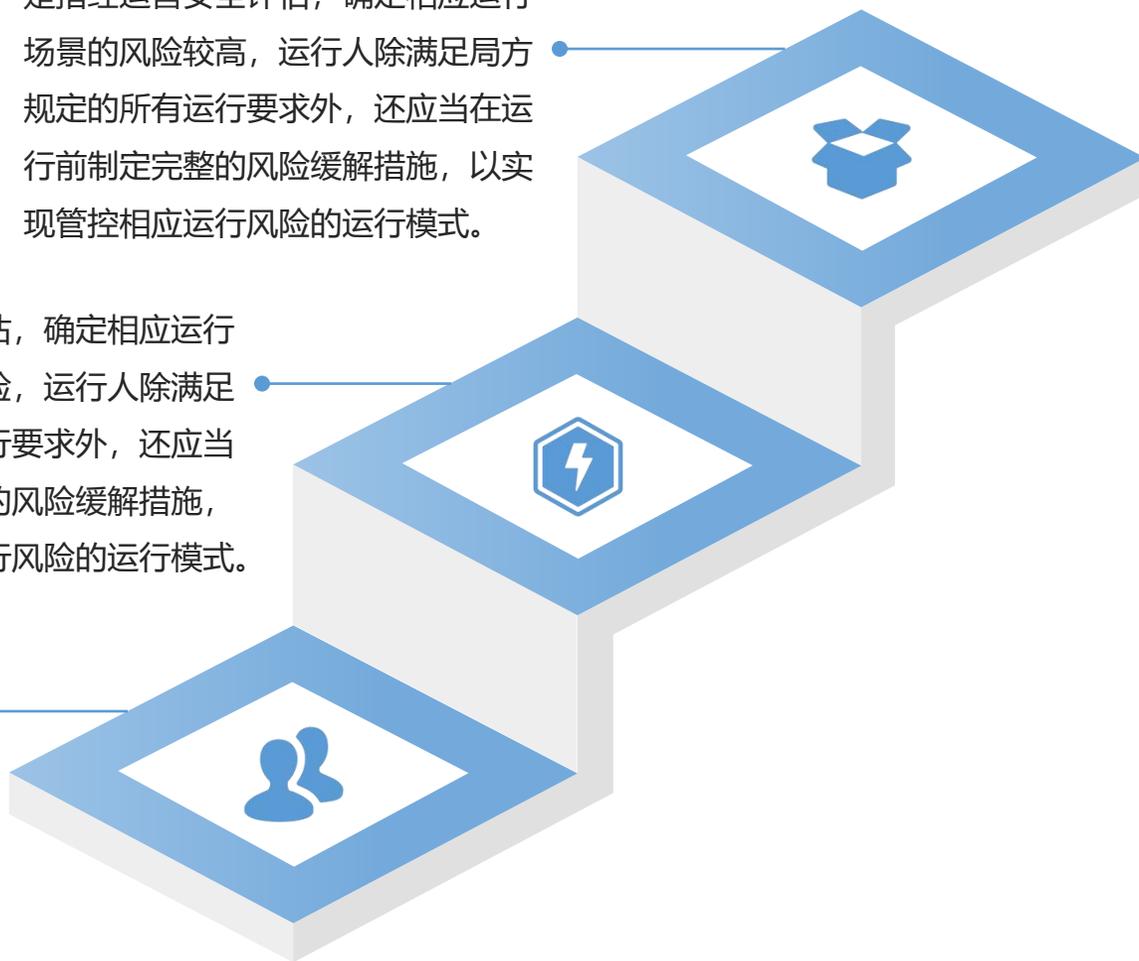
是指经运营安全评估，确定相应运行场景的风险较高，运行人除满足局方规定的所有运行要求外，还应当在运行前制定完整的风险缓解措施，以实现管控相应运行风险的运行模式。

特定类

是指经运营安全评估，确定相应运行场景存在一定的风险，运行人除满足局方规定的一般运行要求外，还应当在运行前制定相应的风险缓解措施，以实现防范相应运行风险的运行模式。

开放类

是指经运营安全评估，确定相应运行场景的风险较小，运行人满足局方规定的一般运行要求，即可规避相应运行风险的运行模式。





手机号登录 账号登录

请输入手机号

请输入计算结果

请输入短信验证码

[账号问题申诉](#) | [忘记密码?](#)

通知公告 / Announcement

更多

26
2025.08
转发天津市人民政府通告
临时禁飞管控

03
2025.08
转发北京市人民政府关于公布无人驾驶航空器管制空域范围的通告
管制空域范围

政策法规 / Regulation

更多

- 中国民用航空局关于印发《民用无人驾驶航空器事件信息管理办法...》 2025-05-30
- 民用无人驾驶航空器操控员执照考试委任代表管理办法 2024-05-11
- 民用无人驾驶航空器操控员执照考试试点管理办法 2024-05-11
- 民用无人驾驶航空器操控员执照考试管理办法 2024-05-11
- 民用无人驾驶航空器运行安全管理规则 2024-01-01



CCAR-92.9 管理平台（第92.9条）： 民用无人驾驶航空器综合 管理平台是局方实现管理 功能的统一平台

CCAR-92

分解

B章 | 操控员管理
51-81

C章 | 登记管理
201-215

D章 | 适航管理
301-450

E章 | 空中交通管理
500-525

F章 | 运行管理
601-623

M章 | 法律责任
1000+

92.B章：操控员管理

安全操控要求（第92.51条）

微型、轻型无人机操控员无需执照，但需满足安全要求（如熟练掌握操作、民事行为能力限制等）。小型、中型、大型无人机操控员需取得相应执照或符合特定条件（如农用无人机操作证书）。超视距运行、高风险特殊运行需持有相应执照和等级。

01

执照和等级（第92.53条）

包括小型、中型、大型操控员执照，以及类别、级别、型别、超视距和教员等级

02

申请条件（第92.55条）

需具备完全民事行为能力、无犯罪记录、通过理论和实践考试等。

03

有效期和检查（第92.61条、92.81条）

执照有效期6年，需定期检查 and 熟练检查（如大型无人机每12个月一次）

04

92.C章： 登记管理

一般要求（第92.201条）

包括实名登记和国籍登记。境内飞行的无人机须实名登记，境外飞行的须国籍登记。

01

实名登记（第92.205条）

所有人需在综合管理平台登记，取得登记标志后方可激活使用。信息包括所有人身份、无人机信息等。

02

国籍登记（第92.215条）

适用于特定所有人（如国家机构、企业法人），需申请国籍登记证书

03

标识要求（第92.213条）

中型、大型无人机需粘贴或喷涂登记标志，保持清晰可辨。）

04

92.D章：适航管理 (TC-PC-AC-OC)

适用范围 (第92.301条)

适用于国产中型、大型无人机的设计批准、生产批准和适航批准。

01

设计批准 (第92.321条)

需申请型号合格证或补充型号合格证，确保设计符合安全要求。

02

生产批准 (第92.381条)

需取得生产许可证，建立质量系统。

03

适航批准 (第92.451条)

包括标准适航证、特殊适航证、特许飞行证和出口适航证，确保无人机处于安全状态。)

04

92.E章：空中交通管理

管理原则（第92.501条）

基于运行风险分类管理，提供差异化服务。

01

空域管理（第92.509条）

空域分为管制空域和适飞空域，需科学划设和动态调整。

02

空中交通服务（第92.525条）：

由空管机构或航行服务提供商提供，包括管制类、协同类和信息类服务。

03

运行要求（第92.519条）

运行人需确保无人机具备空域保持能力和被监视能力。

04

92. F章：运行管理



基本要求 (第92.601条)

运行人需根据运行类别 (开放类、特定类、审定类) 满足相应要求。



运营许可 (第92.603条)

除微型无人机和常规农用作业外, 从事飞行活动的单位需取得运营合格证。



运行控制 (第92.615条)

运行人需对运行负责, 使用运行控制系统进行监控。



持续适航 (第92.619条)

运行人需确保无人机适航状态, 指定合格维修人员



飞行前准备 (第92.623条)

包括确认适航要求、气象条件、应急预案等。

92. M章：法律责任

处罚条款

详细规定了违反适航管理、登记管理、证照管理、运行规定等的处罚措施，包括罚款、暂扣执照、吊销资格等（如第92.1001条、92.1005条）

特别注意

第 92.611 条 涉及酒精及药物等的限制

(a)操控员在饮用任何含酒精饮料之后的 8 小时之内或者处在酒精作用之下，血液中酒精含量等于或者大于 0.04%，或者受到任何药物影响损及工作能力时，不得担任民用无人驾驶航空器操控员。

第 92.1013 条 涉及酒精或药物的违禁行为的处罚

对于违反本规则第 92.611 条规定的执照持有人、分布式无人驾驶航空器系统安全操作责任人或者相关操控人员，由局方责令当事人立即停止担任飞行机组成员，处 1 万元以下的罚款；拒不改正的，处 1 万元以上 5 万元以下的罚款，并处暂扣运营合格证、操控员执照 1 个月至 3 个月；情节严重的，处 5 万元以上 10 万元以下的罚款，并可以吊销相应运营合格证、操控员执照，2 年内不受理其相应申请。构成犯罪的，依法追究刑事责任。

92核心要点分析

风险导向管理：

规则根据运行风险分级分类（开放类、特定类、审定类），要求逐级增加安全措施。

全生命周期管理

覆盖无人机从设计、生产、登记、运行到退役的全过程，强调持续适航和安全责任

数字化管理

依赖综合管理平台进行登记、监控和数据交换，提升管理效率



61部 飞行员执照管理

AC-61-FS- 2018-20R2: 民用无人机驾 驶员管理规定

这是一部操作性极强的管理细则。它不仅是资质标准，更是一本完整的“操作手册”，详细规定了从申请、训练、考试到发证、更新的全流程有点类似141,对机构及考点有详细要求及程序

CCAR-61-R5 民用航空器驾 驶员合格审定 规则

第61.13条(e)款：规定对符合要求的申请人颁发无人机驾驶员执照和等级，并明确除该条等少数条款外，CCAR-61-R5的其他条款不适用于无人机驾驶员。这意味着无人机驾驶员管理主要遵循AC-61-FS-201820R2。

关键点

年龄：申请视距内/超视距等级**年满16周岁**；申请教员等级或XI/XII分类等级年满18周岁。（此依据仅来源于AC-61,92规定是**完全民事行为能力**）

分类等级	空机重量 (kg)	起飞全重 (kg)	执照要求
I / II	$0 < W \leq 4$	$0 < W \leq 7$	通常无需执照 (可备案)
III	$4 < W \leq 15$	$7 < W \leq 25$	需要执照
IV	$15 < W \leq 116$	$25 < W \leq 150$	需要执照
V	植保类无人机	植保类无人机	需要执照 (特殊要求)
XI / XII	$W > 116$	$W > 150$	需要执照 (更严格管理)

拓展知识，建议阅读



MD-TM-2016-004 民用无人驾驶航空器系统空中交通管理办法



AC-92-2019-01 特定类无人机试运行管理规程



MD-92-FS-02 民用无人驾驶航空器操控员执照考试管理办法



IB-FS-OPS-011 民用无人驾驶航空器固定设施设备巡检



MH-T 2013-2022 民用无人驾驶航空器系统分布式操作运行等级划分



忘记网络切片

忘记网络切片及一切不明来源的信息；所有定义、规则、程序、标准都按最新法规为准。本课程所有内容均以中国民航局相对应法规和文件为基础、为标准。包括但不限于无人机系统所有定义、操控员执照考试管理办法，无人机驾驶员管理规定，无人驾驶航空器运行安全管理规则等



复习与思考题

思考

01

操控小型无人机是否需要执照？

02

超视距运行的资质要求是什么？

03

饮酒驾机的相关条例

空域管理

管制空域/非管制空域

对航空器飞行提供空中交通管制服务的空域。无人机进入需经审批。

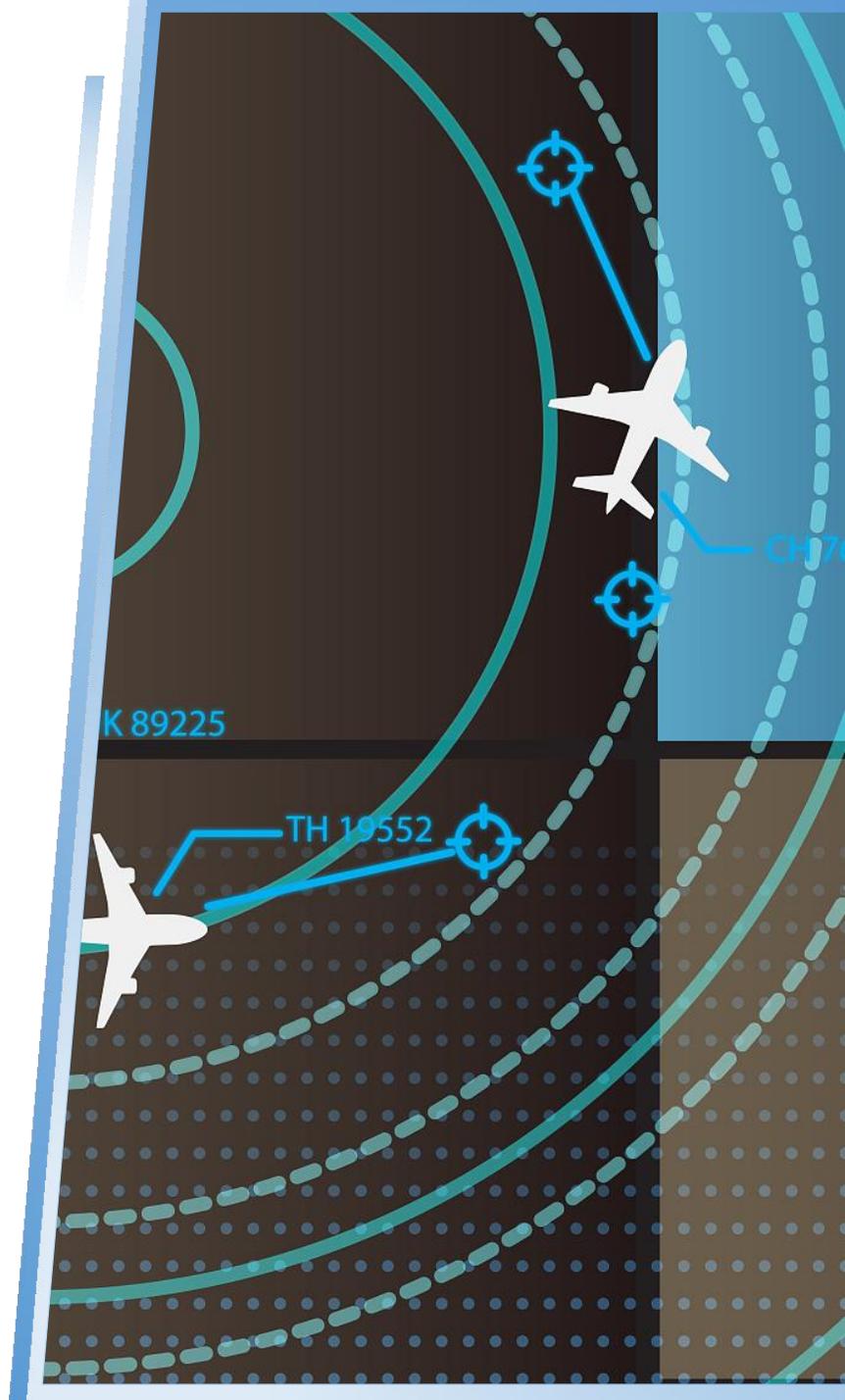
不对航空器飞行提供空中交通管制服务的空域。无人机可在符合法规条件下运行。

融合空域

指有其它有人驾驶航空器同时运行的空域。在此空域运行风险高，要求严。

隔离空域

专门分配给无人机系统运行的空域，通过限制其它航空器的进入以规避碰撞风险；经军方同意划设的临时培训空域为隔离空域



飞行空域与机场净空保护区



01 适飞空域

真高120米以下，非人口稠密区、非机场净空保护区等重点区域的空域。轻型、微型无人机在此空域内飞行通常无需申请飞行计划。

02 管制空域/限飞区

包括机场净空保护区、国境线、军事管理区、政府机关、核设施等敏感区域上空。未经批准，严禁飞行。

03 机场净空保护区

为保障飞机起飞、着陆和机场飞行安全而划定的限制物体高度的区域。无人机在此区域飞行有极其严格的限制和审批程序。

飞行计划的申报（课堂拓展详讲）

01

申报主体

无人机运行人

02

申报平台

UOM/当前战区/基地的
航气/管

03

申报时限

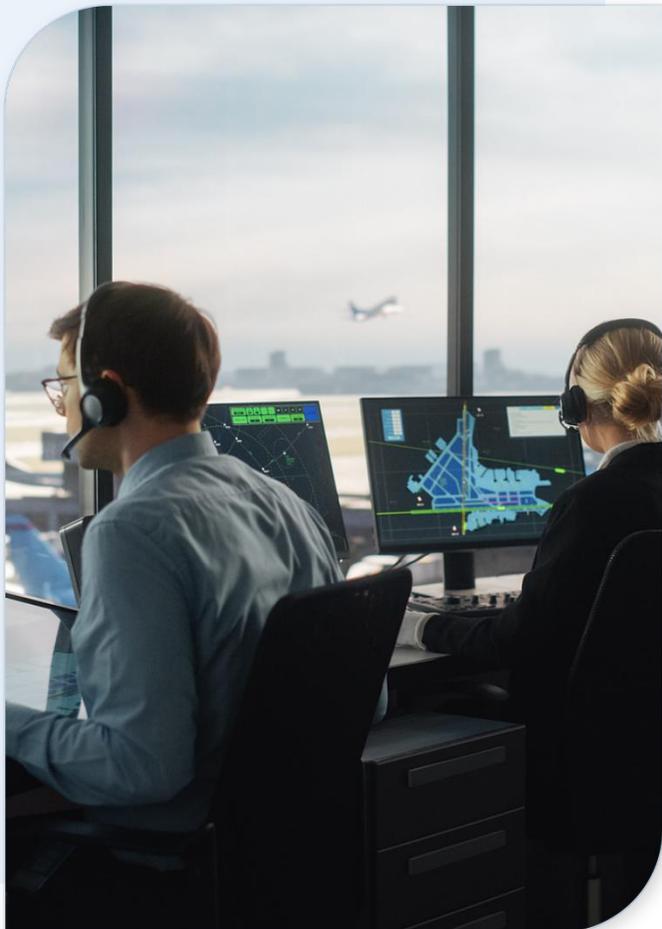
一般飞行申报前一日
15:00前；长期飞行提
前15天

04

申报内容

依据CCAR-92部
飞行单位、任务性质等

空中交通管制通信



通信要求

在管制空域内运行，必须按照空中交通管制单位的指令飞行，并保持通信畅通。



首次联系规范：

首次与ATC联系时，应首先呼叫所需联系的ATC名称，然后报告航空器呼号、位置、高度和意图。



通信失效程序

熟悉通信链路失效后的应急程序，如按预定方案返航或降落。

运行规则与避让

一般运行规则

目视飞行规则 (VFR)： 无人机驾驶员或观测员应与无人机保持直接目视接触（视距内运行的基本要求）。

飞行高度限制： 遵守不同空域的高度限制，如在适飞空域内通常不超过真高120米。

避让规则：

绝对原则： 民用无人驾驶航空器飞行应当避让有人驾驶航空器飞行。（CCAR-92第92.629条）

无人机间避让： 按相关规则保持安全间隔。（参照 ROSA 尺寸 重量 动能来计划安全间隔）

禁止性规定

严禁在人口稠密区上空飞行。

严禁酒后或药物影响下操控无人机。

严禁破坏考场设施、作弊等违反考试纪律的行为（CCAR-92第92.99条）。

复习与思考题

课堂讨论

01

学会使用AIP/EAIP :<https://www.eaipchina.cn/#/eAIP>

02

隔离空域的定义?

03

给定一个任务场景（如电力巡检），引导学员在UOM平台上完成一次完整的飞行计划申报。

特定运行风险评估 (SORA)



排除条件

农林牧渔
执照培训



基本条件

一般为中大型无人机运行于非标准场景



典型场景

物流运输、吊运非农产品、大楼清洗、非执照类中型及以上培训



运行限定

仅对“特定类”运行；排除开放类及审定类；开放类仅需要声明

特非标风险评估审定基础



AC-92-2019-01特定类无人机试运行管理规程（暂行） 附件 B 特定运行风险评估（SORA）

特定运行风险评估（SORA）-Specific Operations Risk Assessment是一套基于地面风险和空中风险评估，为局方、拟实施特定类无人机运行的运行责任人、空中交通管理等服务提供商以及相关第三方提供的评估无人机能否按照经过风险评估后的置信水平实施安全运行的方法。



特定运行风险评估 (SORA)



目标

SORA 是为无人机的运行评估提供一套方法论，主要用于支持对特定类无人机运行申请的批准。对于准备按照特定有限的方式进行无人机运行的运行责任人，传统的运行许可方式可能无法满足要求。为了适应无人机快速发展以及运行模式多样、灵活、复杂的特点，参考国际经验提出的方案，结合我国航空现状和无人机运行的特点，提出基于风险评估的无人机运行审定方法。



适用性

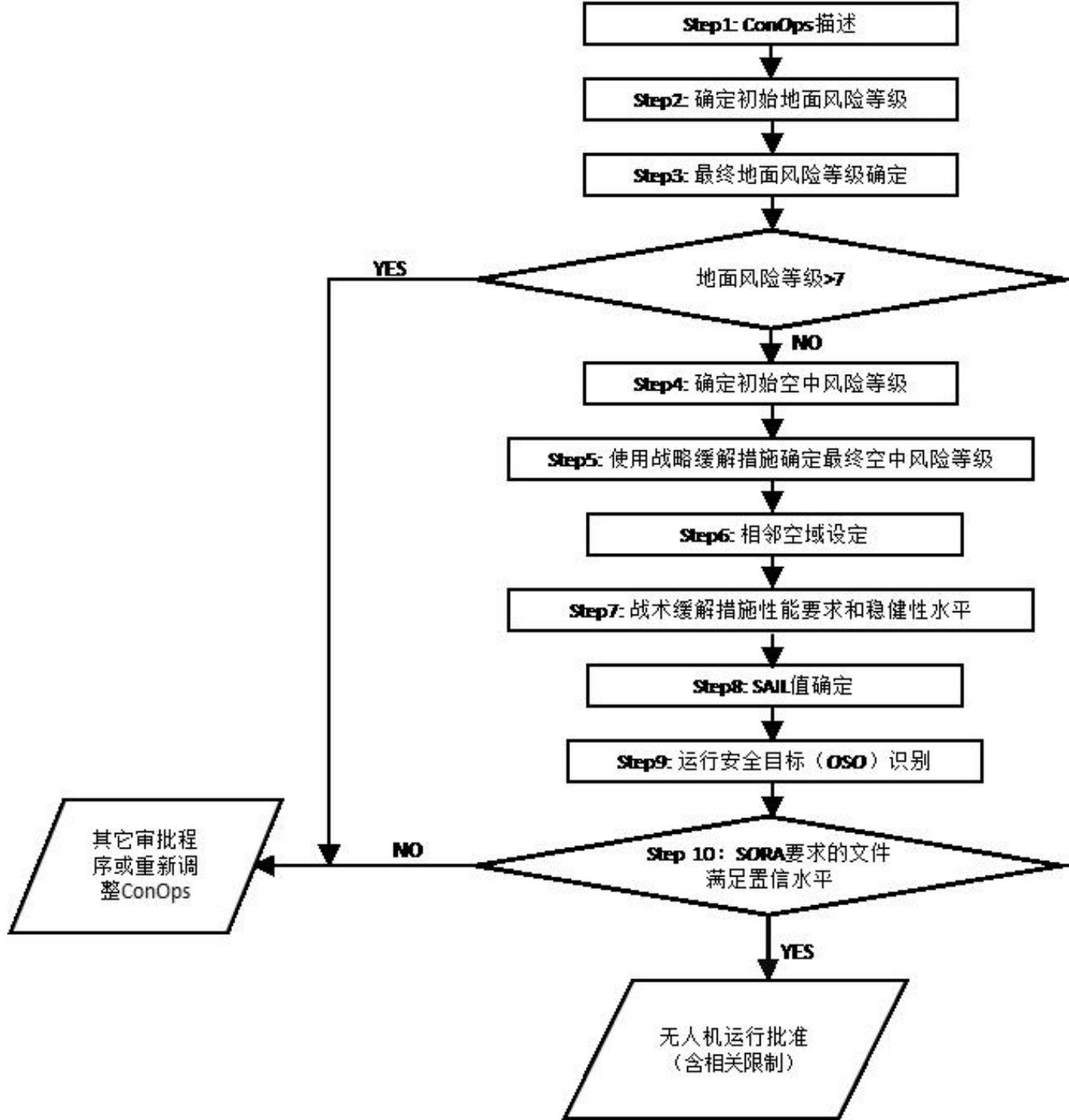
- (a) 本方法适用于使用任何类型和尺寸的无人机，拟从事任何类型运行的风险评估。运行可包括实验、研发以及原型设计等。
- (b) 本方法不适用于无人机之间空中相撞风险的评估。
- (d) 本方法不适用于安保相关的评估，如非法的电磁干扰等。



定义

- 1.地面风险等级 (GRC: Ground Risk Class)
- 2.冲突等级 (Airspace Encounter Category, AEC)
- 3.空中风险等级 (Air Risk Class ARC)
- 4.战略缓解措施 (Strategic Conflict Mitigation)
- 5.战术缓解措施 (Tactical Conflict Mitigation)

申请前评估



不适用于 SORA评估:

- (a) 局方认为拟申请的运行属于已批准的标准场景;
- (b) 属于开放类运行;
- (c) 空中禁区内;
- (d) 局方确认该运行对地面和空中均不会带来任何伤害。

流程描述

评估初始地面风险等级
初始GRC

01

评估初始空中风险等级
ARC

03

特定保证性和完整性等级评估
(Special Assurance and Integrity Level, SAIL)

05

运行风险缓解措施测试验证
报告/完整申请文件

07

02

确定最终地面风险等级
最终 GRC

04

1.应用战略缓解措施确定最终空中风险等级,最终ARC
2.对相邻空域的评估
3.战术缓解措施性能要求和稳健性水平判定

06

运行安全目标识别(oso)

初始地面风险等级



运行责任人应向局方提供拟运行的无人机的最大特征尺寸（如固定翼的翼展、多旋翼的最大尺寸等）、无人机性能参数，以及拟运行场景的基本信息。局方除考虑以上因素外，无人机的设计方面影响无人机致命性的因素也应当考虑。

内在的无人机地面风险等级				
最大的无人机特征尺寸	1 米/约 3 英尺	3 米/约 10 英尺	8 米/约 25 英尺	大于 8 米/ 约 25 英尺
预期的典型动能	<700 焦耳	<34 千焦	<1084 千焦	>1084 千焦
运行场景				
视距内(VLOS)在受控区域内，位于人口稀少的环境中	1	2	3	5
超视距(BVLOS)在人口稀少的环境中（飞越统一居住的区域）	2	3	4	6
视距内在受控区域内，位于人口居住的环境中	3	4	6	8
视距内在人口居住的环境中	4	5	7	9
超视距在受控区域内，位于人口居住的环境中	5	6	8	10
超视距在人口居住的环境中	6	7	9	11
视距内在人群上方	7			
超视距在人群上方	8			

确定最终地面风险等级

缓解措施编号	地面风险等级适用性	稳健性		
		低/无	中	高
M1	应急响应预案(ERP)已提供, 经过了验证并且有效。	1	0	-1
M2	地面影响的效果降低了	0	-1	-2
M3	技术遏制到位且有效	0	-2	-4

缓解措施

运行责任人可通过缓解措施来控制 and 减小地面人员被失控无人机击中的风险。用于修改初始 GRC 的缓解措施应当对特定运行相关的安全目标有直接的影响。

稳健性评估

局方通过对运行责任人缓解措施的可用性和稳健性进行评估, 从而确定最终 GRC。

终止评估

经缓解措施修正后的地面风险等级如大于 7, 则终止 SORA 评估, 志愿申请人可继续申请采用其他运行合格审批方式, 或修改运行概念重新启动 SORA 评估。

初始空中风险等级

空域相遇类别	运行空域	航空风险等级 (ARC)
1	120 米 AGL 以上，非隔离空域内的运行	d
2	120 米 AGL 以上，隔离空域内的运行	c
3	120 米 AGL 以下，管控空域内的运行	d
4	120 米 AGL 以下，非管控空域，非隔离空域内的运行	c
5	120 米 AGL 以下，非管控空域内，隔离空域内的运行	b
6	18000 米以上空域内的运行	b
7	适飞空域内的运行	a

空中相撞等级

空中相撞等级根据空域地理信息（经纬度、高度）、管制空域类型、空域是否为管控空域、空域是否为隔离空域等条件共同确定。

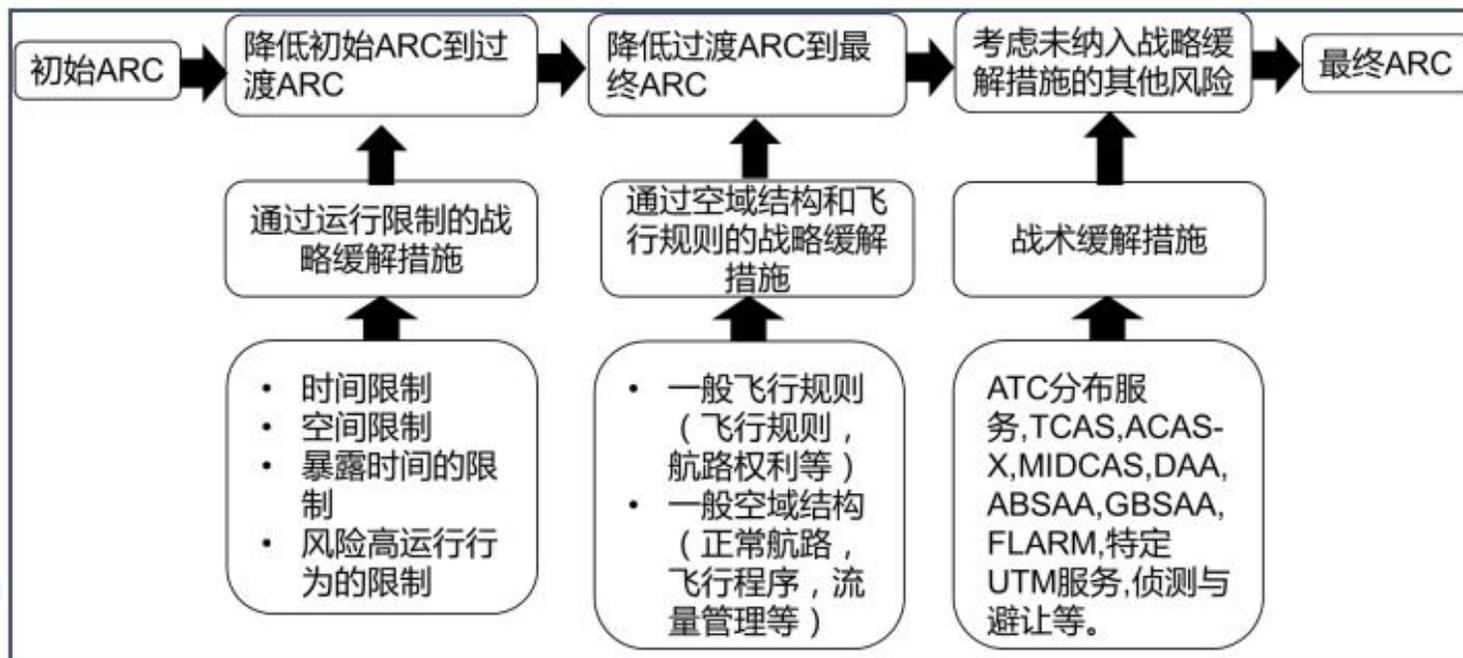
空域信息

局方、空管部门以及空域服务提供商应向志愿申请人提供拟运行空域的相关信息，用于空中相撞风险的评估。

不同航段

对于运行责任人拟实施的运行，如果不同航段在不同空域内运行，则需要按每个空域条件对每个航段进行初始空中风险等级的评估。

缓解措施确定最终空中风险等级



缓解措施

运行责任人可使用视距内或扩展视距内运行、使用侦测和避让系统等方式降低空中相撞风险。

相邻空域

对于保障措施完整性要求较高时，运行责任人可通过建立空中风险缓冲区的方式，来降低其防止空域入侵保障措施的完整性要求。

识别和评估

由于无人机失控，可能会导致无人机侵入与运行空域相邻的其它空域。运行责任人应对所有飞行阶段所对应的运行空域的相邻空域进行识别和评估。

特定保证性和完整性等级SAIL

通过对运行责任人申请运行的地面风险评估和空中风险评估，可以按照下表对照最终地面风险等级和最终空中风险等级来得到运行所对应的特定保证性和完整性等级（Special Assurance and Integrity Level SAIL），该等级表示 UAS 进行可控运行的置信水平。

SAIL 确定				
	最终空中风险等级			
最终地面风险等级	a	b	c	d
1	I	II	IV	VI
2	I	II	IV	VI
3	II	II	IV	VI
4	III	III	IV	VI
5	IV	IV	IV	VI
6	V	V	V	VI
7	VI	VI	VI	VI

运行安全目标识别

在对拟审定运行的 SAIL 值确定后，可根据 SAIL 值针对 UAS 相关技术问题、支持UAS 运行的外部系统性能、人为因素和不利的运行条件等方面对各项运行安全目标进行稳健性识别

运行安全目标 编号		SAIL					
		I	II	III	IV	V	VI
	无人机系统的技术问题						
运行安全目标#01	确保运营人是胜任的和/或认证的。	O	L	M	H	H	H
运行安全目标#02	无人机系统由有能力和/或经过认证的实体制造。	O	O	L	M	H	H
运行安全目标#03	无人机系统由有能力和/或经过认证的实体维护。	L	L	M	M	H	H
运行安全目标#04	UAS 根据权威认可的设计标准开发 ¹ 。	O	O	O	L	M	H
运行安全目标#05	C3 链路性能适合于运行。	O	L	L	M	H	H
运行安全目标#06	无人机系统的设计考虑了系统的安全性和可靠性。	O	O	L	M	H	H
运行安全目标#07	检查无人机系统（产品检查）以确保与行动纲要的一致性。	L	L	M	M	H	H
运行安全目标#08	运行程序已定义，验证和遵守。	L	M	H	H	H	H

运行安全目标识别

根据识别出的一系列运行安全目标所对应的稳健性：
O 表示可选，L 表示低稳健性，M 表示中稳健性和 H 表示高稳健性。

运行安全目标编号		SAIL					
		I	II	III	IV	V	VI
运行安全目标#09	远程工作人员训练有素，能够控制异常情况。	L	L	M	M	H	H
运行安全目标#10	对技术问题的安全恢复。	L	L	M	M	H	H
	支持无人机系统运行的外部系统的性能恶化						
运行安全目标#11	处理支持无人机系统运行的外部系统性能恶化的程序。	L	M	H	H	H	H
运行安全目标#12	无人机系统旨在管理支持无人机系统运行的外部系统的性能恶化。	L	L	M	M	H	H
运行安全目标#13	支持无人机系统运行的外部服务足以支持该运行。	L	L	M	H	H	H
	人为错误						
运行安全目标#14	运行程序已定义，验证和遵守。	L	M	H	H	H	H
运行安全目标#15	远程工作人员训练有素，能够控制异常情况。	L	L	M	M	H	H
运行安全目标#16	多人员协调	L	L	M	M	H	H
运行安全目标#17	远程工作人员适合操作。	L	L	M	M	H	H
运行安全目标#18	自动保护飞行包线免受人为错误的影响。	O	O	L	M	H	H
运行安全目标#19	对人为错误的恢复。	O	O	L	M	M	H
运行安全目标#20	人为因素评估已经完成，人机界面被认为适合于任务。	O	L	L	M	M	H
	不利的运行条件						
运行安全目标#21	运行程序已定义，验证和遵守。	L	M	H	H	H	H
运行安全目标#22	对远程工作人员进行培训，以识别关键的环境条件并采取避免的手段。	L	L	M	M	M	H
运行安全目标#23	已定义，可衡量和遵循的安全运行的环境条件。	L	L	M	M	H	H
运行安全目标#24	无人机系统已设计并符合恶劣环境条件。	O	O	M	H	H	H

稳健性水平表

	低保证性	中保证性	高保证性
低完整性	低	低	低
中完整性	低	中	中
高完整性	低	中	高

稳健性水平

稳健性水平由保证性和完整性 2 个维度来说明

保证性水平

低保证性是操作者/申请人须通过**声明**，中保证性是操作者/申请人须**提供证据证明**，高保证性是操作者/申请人须提供由**具备资质的第三方出具的验证**，保证相关缓解措施已达到预期安全提升水平。

完整性水平

并按照各相关缓解措施所要求的完整性水平，证明达到相应的安全运行置信水平

完整申请文件清单



运行责任人应向局方提供完整的用于支持 SORA 流程的文件，包括：

- (a) 用于降低地面风险等级的缓解措施；
- (b) 用于降低空中风险等级的战略缓解措施；
- (c) 用于降低空中风险等级的战术缓解措施；
- (d) 运行安全目标，以及达到相应安全运行置信水平的证明材料；
- (e) 其他局方要求运行责任人提供的文件。

完整申请文件清单 (样例20份不含合并SOP)



- 运行手册v1.1
- 附录J: 空域批文2025_958
- 附录I: LZ-OTP-001-PTS-FC30-FlyCart 30 初始资格实践考试标准
- 附录H: LZ-OTP-001-IFC-FC30-FlyCart 30 初始训练课程纲要
- 附录G: LZ-OTP-001- 司飞行训练大纲
- 附录F: 应急联络电话表
- 附录E: 载重与平衡计算工作单
- 附录D: 任务载荷安装与操作手册
- 附录C: 记录表单样本
- 附录B: 正常与应急程序检查单
- 附录A: FC30型无人驾驶航空器飞行前_后检查单
- 附件2: 空域批文 广州市开展无人机培训飞行 (岑)
- 附件1: 运行风险缓解措施测试验证报告-盖章
- TC0091A-ZN型号合格证数据单
- LZ-SOP-Attachment-002-高度表拨正程序
- LZ-OM-Attachment-001核心操控员清单
- LHZ-OC-RPT-SORA-20251021运行风险评估报告v1.0-盖章
- DJI_FlyCart_30空吊系统使用说明V1.0
- DJI_FlyCart_30_用户手册V1.2_0709
- DJI_FlyCart_30_保养手册



复习与思考题

思考

01

请列出向空管单位申报飞行计划时必须包含的至少5项核心内容。

02

案例分析：某公司计划在郊区（非机场净空区）进行航拍，飞行高度100米，属于超视距运行。请简述其从计划到执行需要完成的主要合规步骤。

03

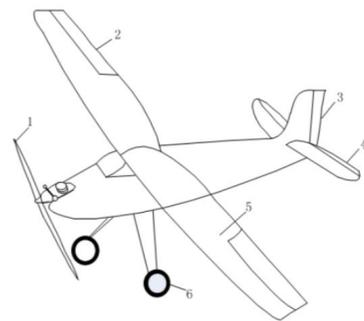
SORA应用：简述SORA评估中，从“初始GRC”到“最终GRC”的评定过程。如果一次评估的最终GRC计算结果为8，意味着什么？下一步应该怎么做？

参考资料

1. 《民用无人机驾驶员管理规定》（AC-61-FS-2018-20R2）
2. 《民用航空器驾驶员合格审定规则》（CCAR-61-R5）
3. 《特定类无人机试运行管理规程（暂行）》（AC-92-2019-01）
4. 《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》（CCAR-92）

03

多旋翼无人机系统组成



课程学习目标



系统认知

建立对无人机系统“机、站、链、载”四大核心部分的整体概念，理解其协同工作机理。



深入理解

掌握飞行器平台各分系统（飞控、动力、导航等）的功能、工作原理与关键部件。



明晰分工

熟悉地面控制站的组成与功能，以及不同通信链路（遥控、图传、数传）的作用



应用关联

了解常见任务载荷的类型，理解系统组成与任务能力之间的直接关系。

多旋翼飞行器技术发展历史

沉寂期

1907年法国，C.Richet 教授的指导下Breguet 兄弟进行了他们的旋翼式直升机的飞行试验

1990以前

复苏期

美国工程师M.Dammar 于90年代开发了电动四旋翼Roswell Flyer 随后将其卖给加拿大公司 Draganflyer

1990-2005

起步期

德国Microdrones GmbH于2005年成立，2006年推出的Md4-200四旋翼，2010年推出的Md4-1000四旋无人机系统

2005-2010

复兴期

2010年，法国的Parrot 公司与学校共同合作，经过6年努力（2004-2010） [15]，推出消费级的AR. Drone四旋翼玩具

2010-2013

爆发期

2013年底，3D Robotics公司牵手苏黎世联邦理工学院的PX4开源飞控开发团队，共同推出Pixhawk硬件

2013-

多旋翼发展史里程碑事件

微惯导确立

几克重的MEMS惯导系统已经被研制出来。学术界开始研究建模和控制。

2002

稳定飞控

2005年左右，真正稳定的多旋翼无人机飞行控制器才被制作出来

2005

开源飞控及大疆

1.PX4开源飞控推出硬件。
2.大疆小精灵 Phantom一体机

2013

多旋翼开源飞控的成熟

大量多旋翼开源飞控项目的成熟，制造工艺的提升、电机与电池技术的飞速发展。造就了多旋翼飞行器的复兴与爆发



基本术语定义

(AC-61-FS-2018-20R2.3定义, AC-92-2019-01附件A)

无人机/无人机系统

01

无人机 (UA: Unmanned Aircraft), 是由控制站管理 (包括远程操纵或自主飞行) 的航空器; 无人机系统 (UAS: Unmanned Aircraft System), 是指无人机以及与其相关的遥控站 (台)、任务载荷和控制链路等组成的系统。

空机重量

02

是指不包含载荷和燃料的无人机重量, 该重量包含燃料容器和电池等固体装置。

控制站

03

控制站 (也称遥控站、地面站), 无人机系统的组成部分, 包括用于操纵无人机的设备。

指令与控制数据链路

04

(C2: Command and Control data link), 是指无人机和控制站之间为飞行管理之目的的数据链接。

视距内

05

(VLOS: Visual Line of Sight) 运行, 无人机在驾驶员或观测员与无人机保持直接目视视觉接触的范围内运行, 且该范围为目视视距内半径不大于 500 米, 人、机相对高度不大于 120 米。在本规定中作为驾驶员等级中的一种。

超视距

06

BVLOS (Beyond VLOS) 运行, 无人机在目视视距以外的运行。在不使用摄像机、望远镜或其他视觉辅助可直观地观察到无人机, 可以安全操纵, 避免与其他航空器、地面上的人或财物碰撞的驾驶员与无人机飞行轨迹和位置的最远距离。

无人机系统组成

各类教材、AI定义五花八门

无论美国国防部、北京航空航天大学、中飞院、南京航空航天的定义的体系如何描述、是否合理，可以有自己的理解，但以局方文档为准。

以局方规范文档为准

以AC-61-FS-2018-20R2民用无人机驾驶员管理规定、AC-92-2019-01特定类无人机试运行管理规程（暂行）的定义为准

考试系统的通过标准

理论考试无人机有UA选UA,有UAV选UAV，无人机系统统一标准-“机、站、链、载”特别是教员口试，请明确指出参考局方文档条款



无人机系统 (UAS,) 组成-机、站、链、载

01

无人机平台

02

地面控制站

03

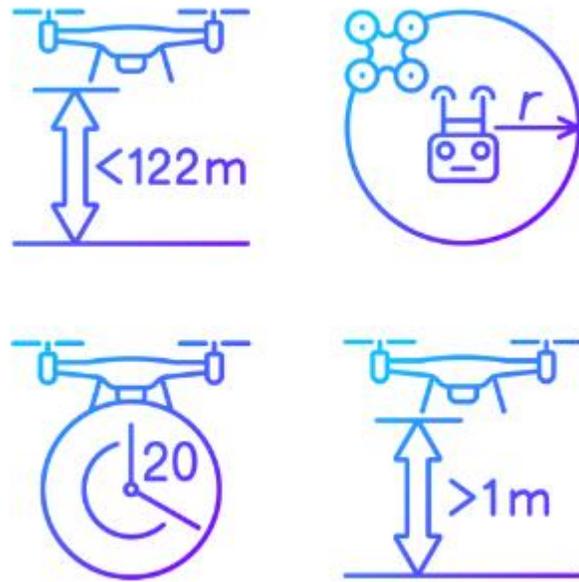
通信链路

04

任务载荷

系统工作流程

无人机系统呈现出“机上无人，人在回路”的典型特征。其基本工作流程为：



指令上行： 地面操控员通过地面控制站发出控制指令。

信号传输： 指令经由上行通信链路发送至无人机。

机载执行： 无人机飞控系统接收指令，驱动执行机构（舵机、电机等），控制无人机姿态与轨迹。

状态下行： 无人机将自身的状态信息（位置、姿态、电量等）和任务载荷信息（如实时画面）通过下行通信链路传回地面。

监控决策： 地面操控员根据回传信息，监控飞行状态并做出下一步决策，形成闭环控制。

多旋翼无人机平台

📦 机体结构

机架：是整个无人机的基础骨架，承载所有设备。材质通常为碳纤维、铝合金、工程塑料等，追求轻量化和高强度。

机臂：安装电机和螺旋桨的支架。布局决定了飞行器的构型（如X型、十字型）。

起落架：用于起降和地面停放，也为下部设备（如云台）提供空间。

📦 动力系统

电机：多为无刷直流电机，将电能转化为机械能。关键参数是KV值（转速/电压）。

电子调速器：简称电调，接收飞控的指令，精确控制电机的转速。

螺旋桨：产生升力和推力的关键部件。有正反桨之分，成对出现以抵消反扭矩。材质有塑料、碳纤维等。

电池：通常为锂聚合物电池，为整个系统提供能量。是影响续航时间的关键因素。

📦 飞行控制系统

主控制器：核心处理器，运行飞行控制算法。

惯性测量单元 (IMU)：包含陀螺仪、加速度计，实时感知飞行器的角速度和加速度，是保持姿态稳定的核心传感器。**气压计：**测量大气压来估算高度。

磁罗盘和GPS模块：感知地磁场方向，提供航向信息。提供精确的位置、速度

其他传感器：超声波传感器、光流传感器、避障传感器等。

考试中加入:PMU&LED

📦 电气与链路系统

电源管理系统：负责分配和管理电力，包括分电板、电压监测等。

遥控接收机：接收来自遥控器的指令信号。

图传发射机：将任务载荷（如相机画面）实时传输到地面。

数传电台：与地面站进行双向数据通信，传输飞行状态和接收指令。

天线：用于信号的接收和发射。

飞行平台分类

AC-61-FS-2018-20R2-5.1

01

类别

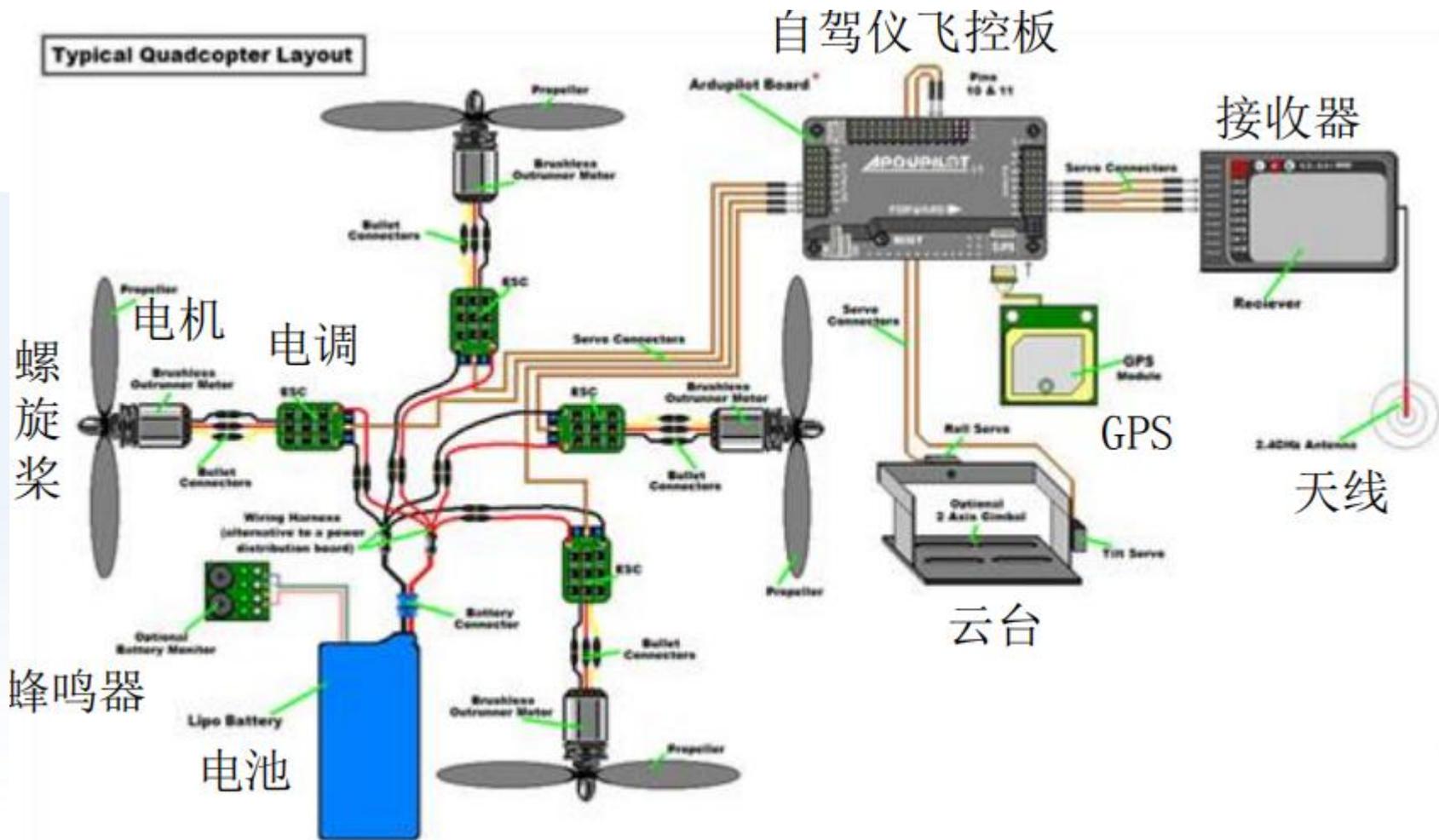
- 1) 固定翼
- 2) 直升机
- 3) 多旋翼
- 4) 垂直起降固定翼
- 5) 自转旋翼机
- 6) 飞艇
- 7) 其他

02

按重量

分类等级	空机重量 (千克)	起飞全重 (千克)
I	$0 < W \leq 0.25$	
II	$0.25 < W \leq 4$	$1.5 < W \leq 7$
III	$4 < W \leq 15$	$7 < W \leq 25$
IV	$15 < W \leq 116$	$25 < W \leq 150$
V	植保类无人机	
XI	$116 < W \leq 5700$	$150 < W \leq 5700$
XII	$W > 5700$	

多旋翼无人机平台总体介绍



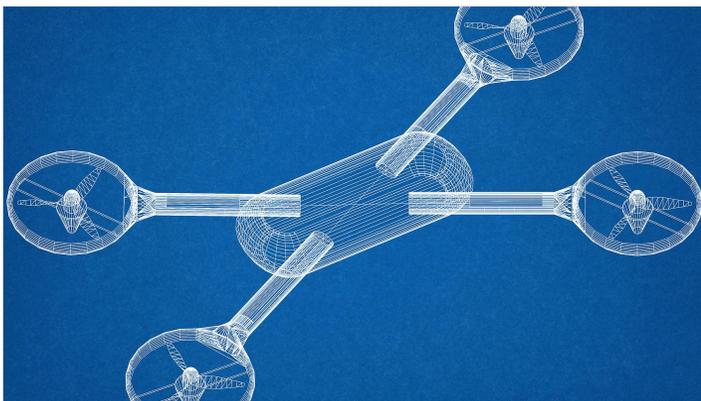
无人机平台-机架

作用

多旋翼的承载平台，所有设备都是用机架承载。因此，多旋翼的机架的好坏，很大程度上决定了这架多旋翼是否好用。衡量一个机架的好坏，可以从耐用性和安全性、使用方便程度、元器件安装是否合理等方面考察。



无人机平台-机架-指标参数



重量

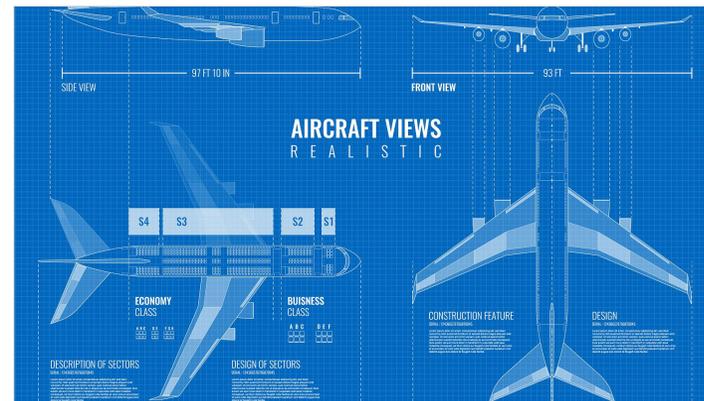
基础指标，与刚度、强度成反比最佳



大疆 风火轮 F450

轴距 (Diagonal Size)

轴距是指对角线两个螺旋桨中心的距离，单位通常是毫米 (mm)，用于表达机架的尺寸大小。比如：大疆风火轮F450，轴距450mm；大疆风火轮F550轴距550mm。



材料

碳纤维、玻璃钢、聚碳酸酯、丙烯酸塑料、铝合金、轻木

飞行平台-机架-材料

(a) 刚度。弹性模量表示是材料在弹性变形阶段，其应力和应变成正比例关系；形变越难改变，刚度越大

(b) 强度。抗拉强度就是试样拉断前承受的最大标称拉应力

姓名	碳纤维	玻璃钢	聚碳酸脂	丙烯酸塑料	铝合金	轻木	其它
密度 (lb/cuin)	0.05	0.07	0.05	0.04	0.1	0.0027-0.0081	
刚度 (Msi)	9.3	2.7	0.75	0.38	10.3	0.16-0.9	
强度 (Ksi)	120	15-50	8-16	8-11	15-75	1-4.6	
价钱 (越大越优)	1	6	9	9	7	10	
加工 (越大越优)	3	7	6	7	7	10	

无人机平台-机架-起落架作用



支撑多旋翼重力



避免螺旋桨离地太近，而发生触碰



减弱起飞时的地效

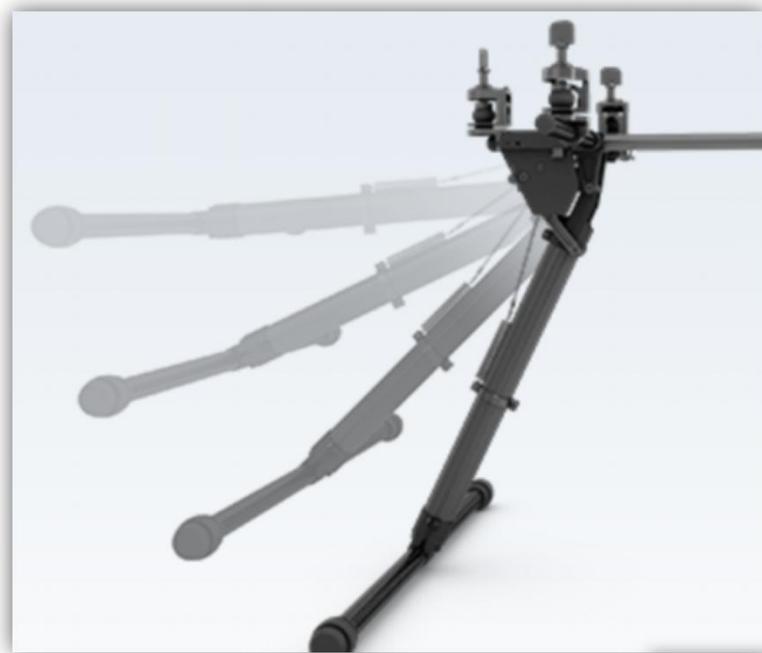


消耗和吸收多旋翼在着陆时的撞击能量



智能起落架

使用智能起落架功能，一旦通电后，保护起落架在地面默认放下(不会意外收起)；在紧急情况时(如：断桨保护、自动降落等)放下起落架，以保护飞行器和云台；飞行高度超过5m后可通过设置的开关控制起落架的收起和放下。大疆悟系列也算是使用的智能起落架。



无人机平台-机架-涵道

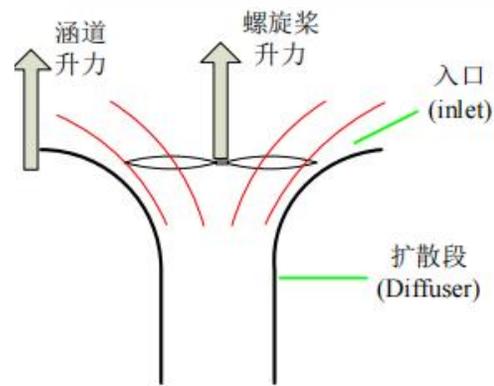
作用

- 1) 保护桨叶和人身安全
- 2) 提高升力效率
- 3) 减少噪音

工作原理

工作原理为：当螺旋桨工作时，进风口内壁空气速度快静压小，而进风口外壁静压大，因此涵道能产生附加升力。

伯努利定理：在一个流体系统，流速越快，流体产生的压力就越小-丹尼尔·伯努利



(a) 涵道工作原理





无人机平台-动力系统-螺旋桨

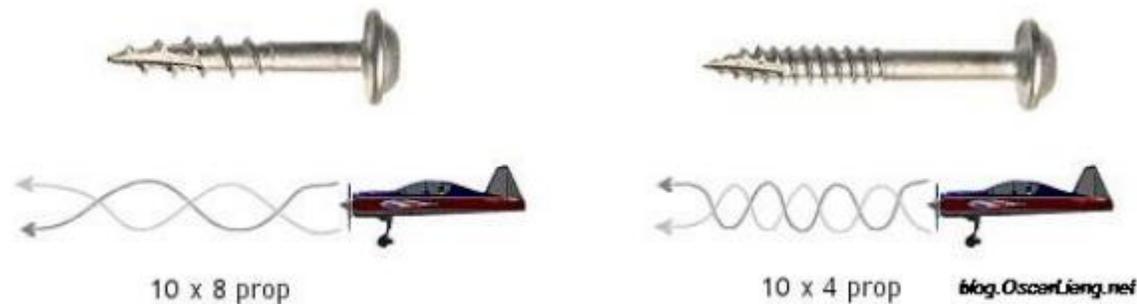
作用

螺旋桨是直接产生推力的部件，同样是以追求效率为第一目的。

选择

匹配的电机、电调和螺旋桨搭配，可以在相同的推力下耗用更少的电量，这样就能延长多旋翼的续航时间。因此，选择最优的螺旋桨是提高续航时间的一条捷径。

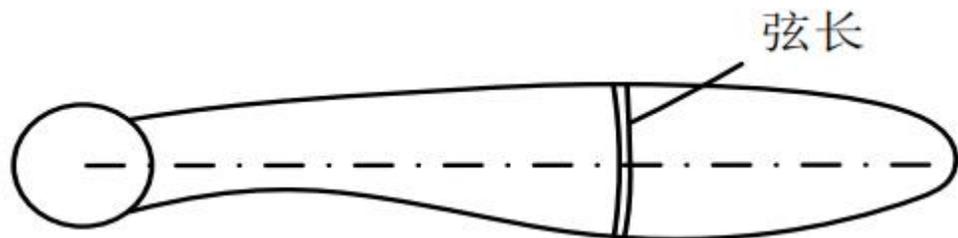
无人机平台- 动力系统-螺旋桨



螺距：假设螺旋桨在一种不能流动的介质中旋转，那么螺旋桨每转一圈，就会向前进一个距离，就称为螺距（ Propeller Pitch ）。显然，桨叶的角度越大，螺距也越大，角度与旋转平面角度为0，螺距也为0。螺旋桨一般用4个数字表示，其中前面2位是螺旋桨的直径，后面2位是螺旋桨的螺距。比如：1045桨的直径为10英寸，而螺距为4.5英寸。

1.英寸与厘米毫米的换算(22.5)

2.取值规则（直径 \leq 30）



无人机平台- 动力系统-螺旋桨

转动惯量:

转动惯量越小，控制起来更灵敏。更重要的是，螺旋桨的转动惯量越小，改变转速所消耗的能量就越小，因此能提高飞行效率。因此，为了减少转动惯量，在不改变外形和强度的前提下，有些特制的螺旋桨内部材质还会进一步设计。

桨叶数:

有实验表明，对于多旋翼，2叶桨的性能最优。



无人机平台- 动力系统-螺旋桨

材料:

一般有碳纤维、塑料、复合材料、木制等材料。碳纤维桨比塑料桨贵几

乎2倍。以下是碳纤维桨的优势:

- 碳纤维桨刚性较好，因此产生振动和噪音较少
- 较塑料桨，更轻，强度更大
- 适用于高KV值电机，控制响应比较迅速。然而，当发生坠机时，因为碳纤维桨刚性强，电机将吸收大部分的冲击力。

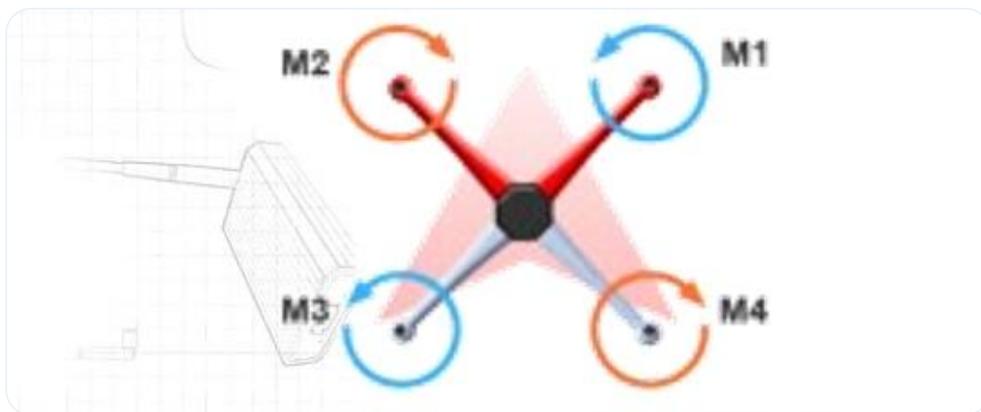




静平衡和动平衡

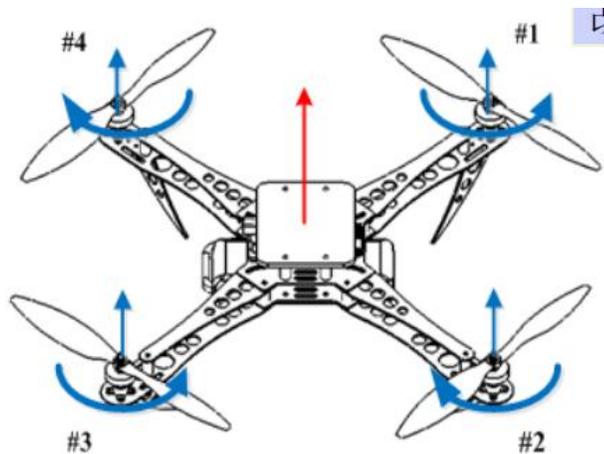
- 进行静平衡和动平衡的目的是减少振动
- 螺旋桨静平衡是指螺旋桨重心与轴心线重合时的平衡状态；而螺旋桨动平衡是指螺旋桨重心与其惯性中心重合时的平衡状态
- 出现不平衡的情况时，可以通过贴透明胶带到轻的桨叶，或用砂纸打磨偏重的螺旋桨平面（非边缘）来实现平衡。

无人机平台-动力系统-螺旋桨



正反桨及区别

多旋翼为了抵消单个螺旋桨的反扭力，相邻的两个桨的旋转方向是不一样的，所有需要正反桨。对尾俯视，逆时针转的是正桨，标记为CCW,顺时针转的是反桨（逆桨），标记为CW。安装时记一定要注意对应电机的转向。

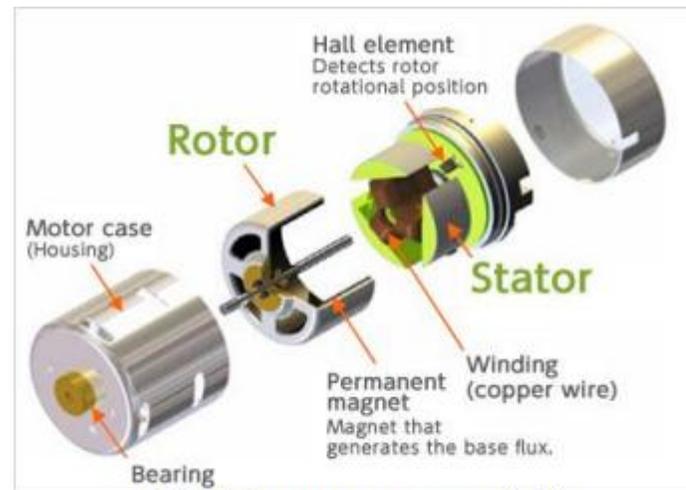


逆时针转-正桨-CCW(Counter Clock Wise)-135

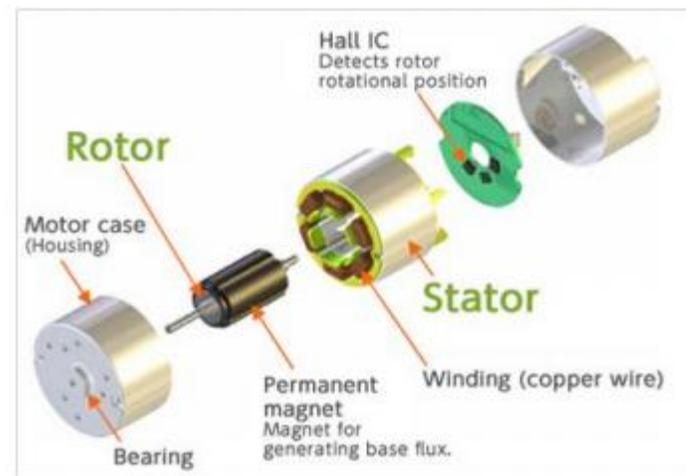
顺时针转-反桨-CW(Clock Wise)246

无人机平台 动力系统-电机

多旋翼的电机主要以无刷直流电机为主，将电能转换成机械能。无刷直流电机运转时靠电子电路换向，这样就极大减少了电火花对遥控无线电设备的干扰，也减小了噪音。它一头固定在机架力臂的电机座，一头固定螺旋桨，通过旋转产生向下的推力。不同大小、负载的机架，需要配合不同规格、功率的电机。

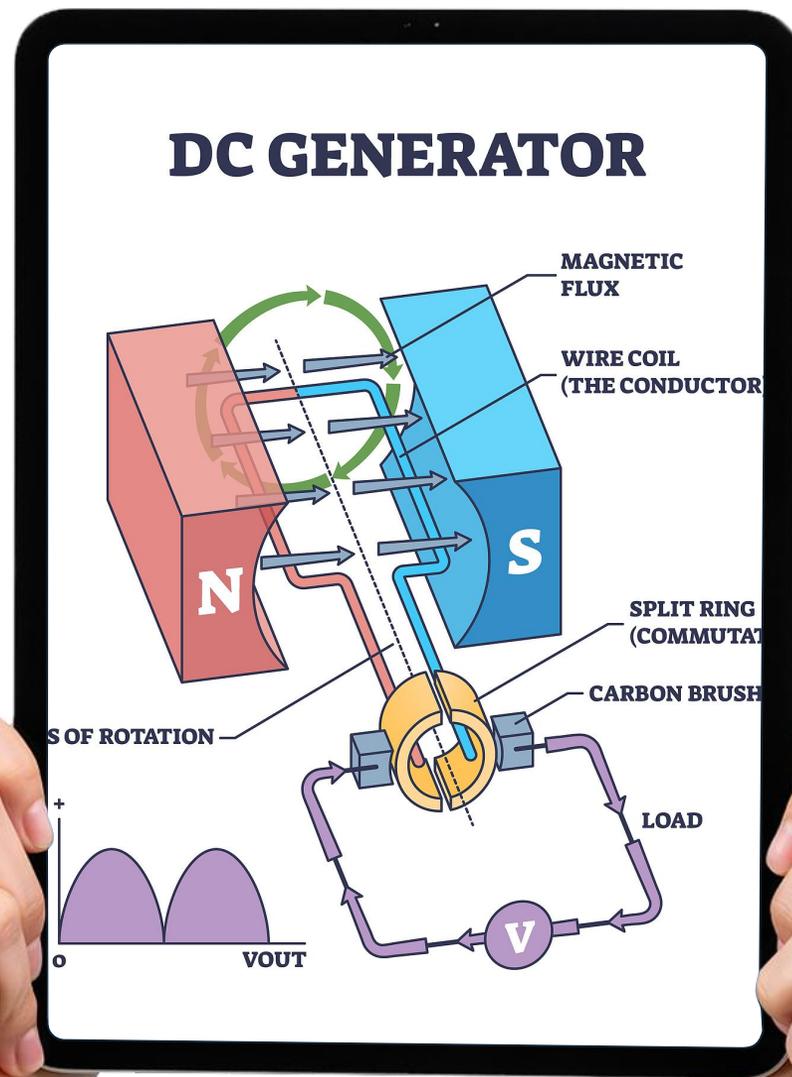


外转子(Outer rotor) 电机



内转子(Inner rotor)电机

电机工作原理



无人机平台-动力系统-电机-参数

尺寸

一般用4个数字表示，其中前面2位是电机转子的直径，后面2位是电机转子的高度。简单地说，前面2位越大，电机越肥，后面2位越大，电机越高。又高又大的电机，功率就更大，适合做大四轴。比如：**2212**电机表示电机转子的直径是**22mm**，电机转子的高度是**12mm**。

标称空载KV值

无刷电机KV值定义为“转速/伏特”，意思为输入电压增加1伏特，无刷电机空转转速增加的转速值。例如：1000KV电机，外加1V电压，电机空转时每分钟转1000转，外加2V电压，电机空转就2000转了。单从KV值，无法评价电机的好坏，因为不同KV值有适用不同尺寸的桨

标称电流电压

也叫**标称空载电流和电压**
在空载试验时，对电动机施加标称空载电压(通常为10V)，使其不带任何负载空转，定子三相绕组中通过的电流，称为标称空载电流

最大电流

最大瞬时电流/最大持续电流：
电机能承受的最大瞬时通过的电流，电机能允许持续工作而不烧坏的最大连续电流

内阻

电机电枢本身存在内阻，虽然该内阻很小，但是由于电机电流很大有时甚至可以达到几十安培，所以该小内阻不可忽略

电机 参数

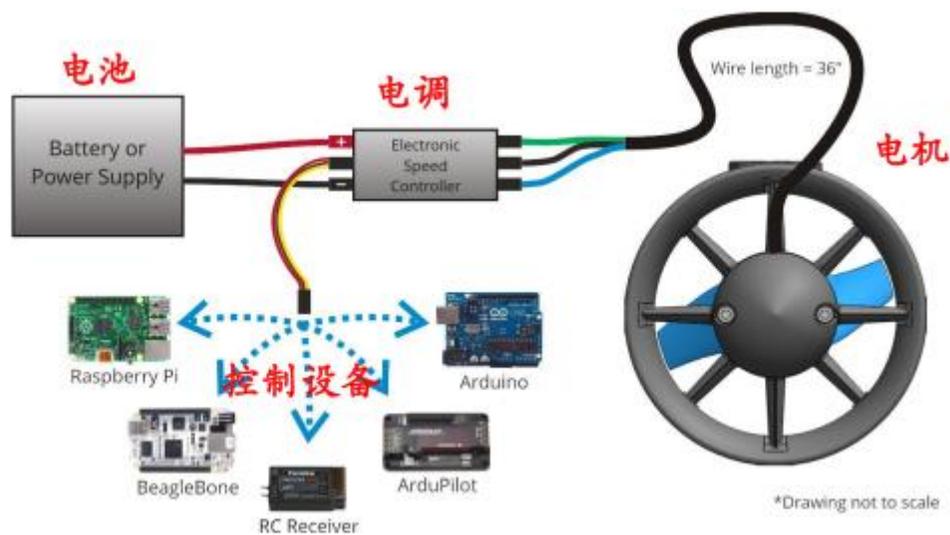


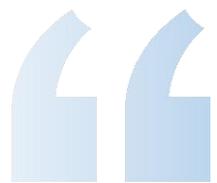
无人机平台-动力系统-电调



电调全称**电子调速器**，英文 Electronic Speed Control，简称ESC。

- 1) 电调最基本的功能就是电机调速（通过飞控板给定PWM信号进行调节）
- 2) 为遥控接收器上其它通道的舵机供电
- 3) 充当换相器的角色，因为无刷电机没有电刷进行换相（直流电源转化为三相电源供给无刷电机，并对无刷电机起调速作用），所以需要靠电调进行电子换相。
- 4) 电调还有一些其它辅助功能，如电池保护，启动保护、刹车等。





电子调速器

Electronic Speed Control



无人机平台-动力系统-电调-指标参数

01

电流

无刷电调最主要的参数是电调的功率，通常以安数A来表示，如10A、20A、30A。不同电机需要配备不同安数的电调，安数不足会导致电调甚至电机烧毁。

02

电流-瞬时

更具体地，无刷电调有持续电流和X秒内瞬时电流两个重要参数，前者表示正常时的电流，而后者表示X秒内的容忍的最大电流。

03

电流-选择

选择电调型号的时候一定要注意电调最大电流的大小是否满足要求，是否留有足够的安全裕度容量，以避免电调上面的功率管烧坏。

无人机平台-动力系统-电调-指标参数

01

内阻

电调具有相应内阻，其发热功率需要得到注意。有些电调电流可以达到几十安培，发热功率是电流的平方的函数，所以电调的散热性能也十分重要，因此大规格电调内阻一般都比较小。

02

刷新频率

电机的响应速度与电调的刷新速率有很大关系。在多旋翼开始发展之前，电调多为航模飞机而设计，航模飞机上的舵机由于结构复杂，工作频率最大为50Hz。相应地，电调的刷新速率也都为50Hz。多旋翼与其它类型飞机不同，不使用舵机，而是由电调直接驱动，其响应速度远超舵机。目前，具备UltraPWM功能的电调可支持高达500Hz的刷新率。

03

可编程特性

可通过接收器、USB连接、编程卡设置的参数包括：电池低压断电电压设定、电流限定设定、刹车模式设定、油门控制模式、切换时序设定、断电模式设定、起动方式设定以及PWM 模式设定等等。

电调作用-考点-教员

- 1.直流转交流（直流电源转化为三相电源）
- 2.充当BEC(降压模块)给飞控供电(一般5V1A)
- 3.通过改变供电电压调节电机转速
- 4.通过改变供电电流调节电机扭矩
- 5.接收和反馈控制信号
- 6.其实可答(调换线序改变转向、刹车 稳压 降压等)

电调连线-考点-教员

- 1.普通电调一般8/7根线（含BEC 8根）
- 2.最粗 红黑 2根连接电池
- 3.中粗、同色 3根连电机（任意调换可改变电机转向）
- 4.细的杜邦线或者3根细线连飞控或接收机（黑白红，红色为BEC供电）
- 5.以上仅为一般普通电调，高端电调有许多功能排线

无人机平台 动力系统-电池

电池主要用于提供能量。目前航模最大的问题在于续航时间不够，其关键就在于电池容量的大小。现在可用来做模型动力的电池种类很多，常见的有锂电池（LiPo）和镍氢电池（NiMh），主要源于其优良的性能和便宜的价格优势。然而，对于多旋翼无人机而言，电池单位重量的能量载荷很大程度上限制了其飞行时间和任务拓展。



容量: 22000mAh
电压: 6SIP 22.8V
放电电流: 550A
倍率: 25C
重量: 2344g
62*93*213mm

适用机型:大中小型多轴、植保机、大型固定翼等

容 量	22000mAh 12S
电 压	45.6V
倍 率	25C
满电电压	52.2V
重 量	5750±150g
尺 寸	110*166.5*226mm

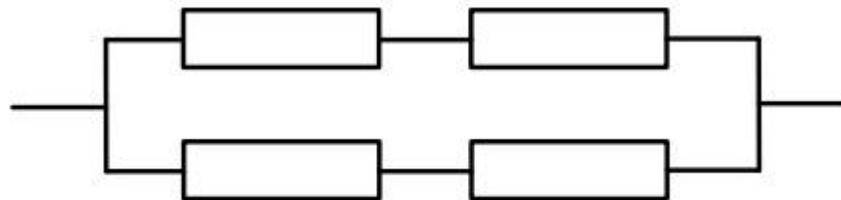
TATTU 雨燕PRO

适用机型: 中大型多轴、植保季、大型固定翼等

无人机平台-动力系统-电池-指标参数



(a) 3S1P



(b) 2S2P

电压

锂电池

标称电压: 3.7V

满电电压: 4.2V

保护电压: 3.6V

存储电压: 3.85-3.9V

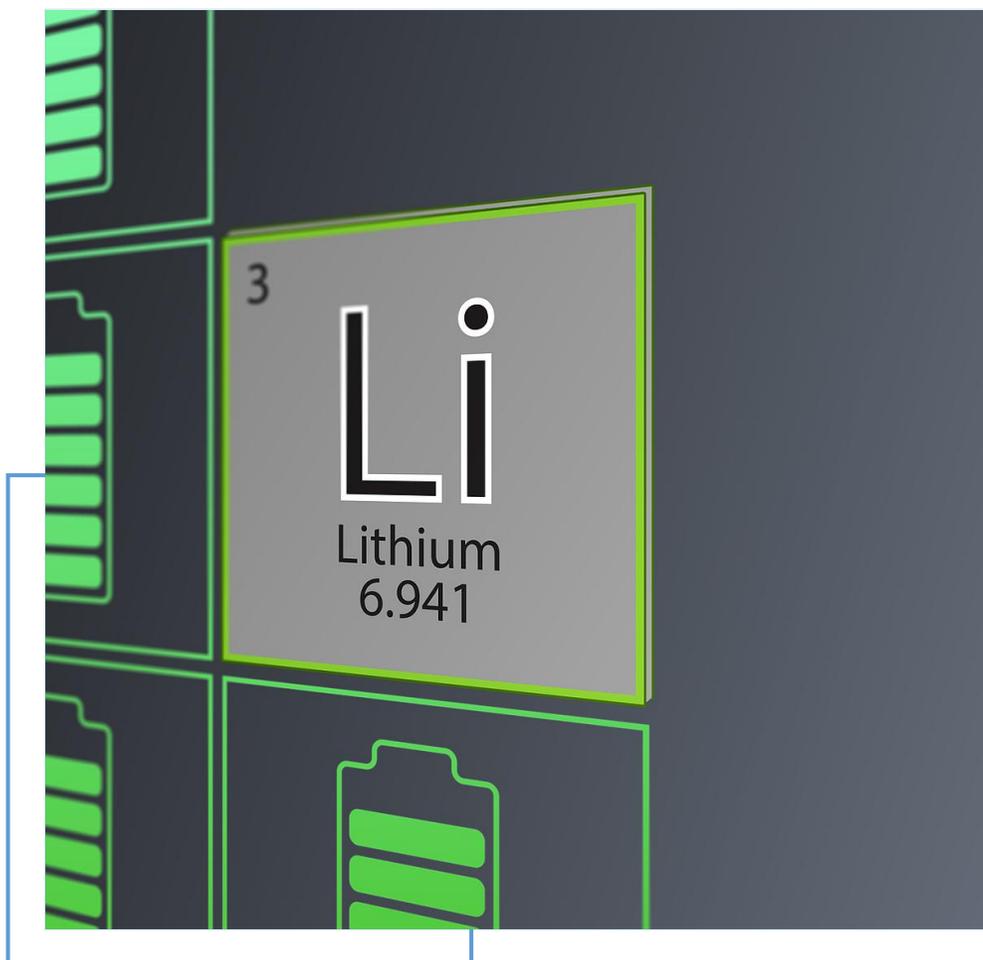
组合方式

S是串联, P表示并联。又如2S2P电池表示2片锂聚合物电池的串联, 然后两个这样的串联结构并联, 总电压是7.4V, 电流是单个电池的两倍。

基本组成

锂电池组包含两部分: 电池和锂电池保护线路。

无人机平台-动力系统-电池-指标参数



电池的容量是用毫安时表示的。5000毫安时的电池表示该电池以5000毫安的电流放电可以持续一小时。但是，随着放电过程的进行，电池的放电能力在下降，其输出电压会缓慢下降，所以导致其**剩余容量与放电时间并非线性关系**。

- 在实际多旋翼飞行过程中，有两种方式检测电池的剩余容量是否满足飞行安全的要求。一种方式是检测**电池单节电压**，另一种方式是实时检测电池输出电流做积分计算。
- 注意：单电芯充满电电压为4.2V，放电完毕会降至3.0V(再低可能过放导致电池损坏)，一般无人机在3.6V时会电量报警

无人机平台-动力系统-电池-指标参数

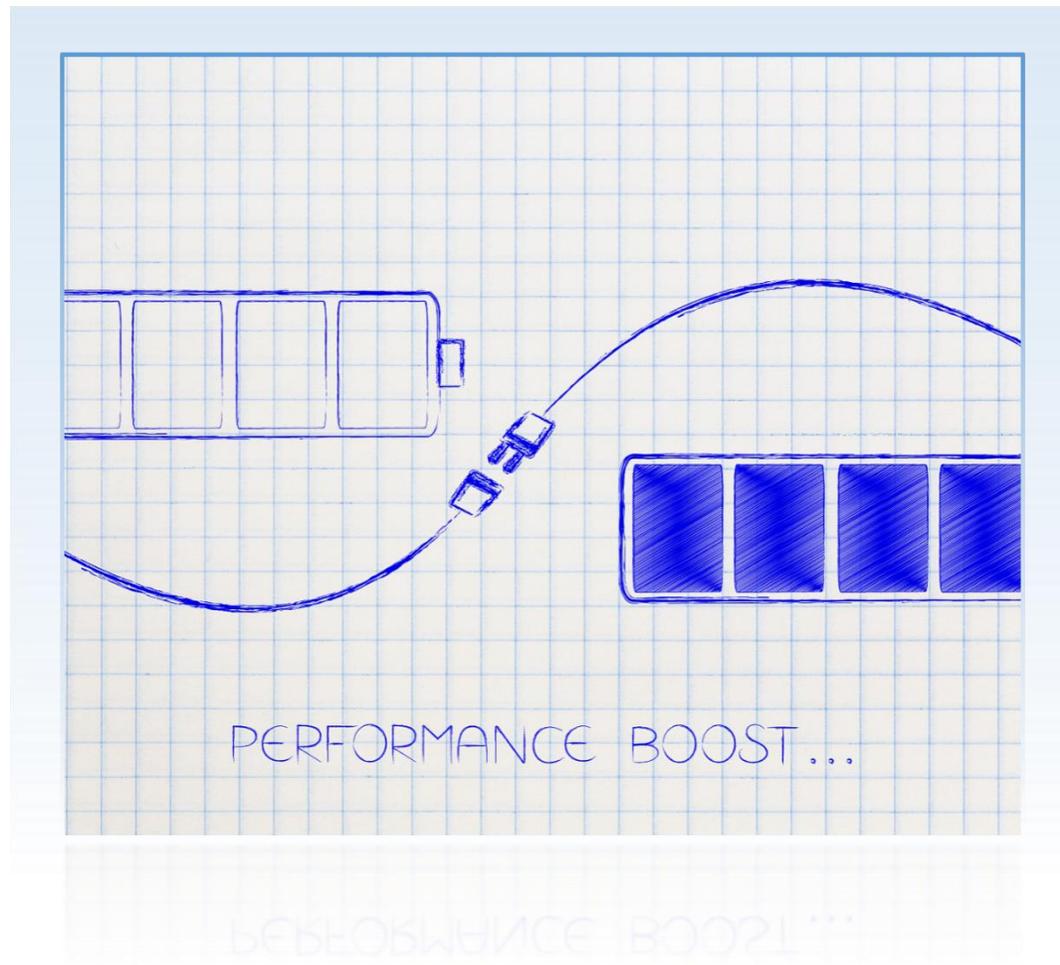


放电倍率

一般充放电电流的大小常用充放电倍率来表示，即

$$\text{充放电倍率} = \text{充放电电流} / \text{额定容量}$$

例如：额定容量为100Ah的电池用20A放电时，其放电倍率为0.2C。电池放电倍率是表示放电快慢的一种量度。所用的容量1小时放电完毕，称为1C放电；5小时放电完毕，则称为 $1/5=0.2C$ 放电。容量5000毫安时的电池最大放电倍率为20C，其最大放电电流为。锂聚合物电池一般属于高倍率电池，可以给多旋翼提供动力。



电池章节特别说明



适用性要求

电池章节对于驾驶员与机长仅需了解；教员需要按一类要求严格掌握。单位符号、大小写



一类知识点

电池分类、发展特点、充电步骤阶段、平衡头算法；容量、电压（标、低、保）、功率、充放电倍率、并串联特点。



教员掌握要求说明

基础定义100%正确率；各类混合习题100%正确率。

教员部份留页(含习题5页)



Tony



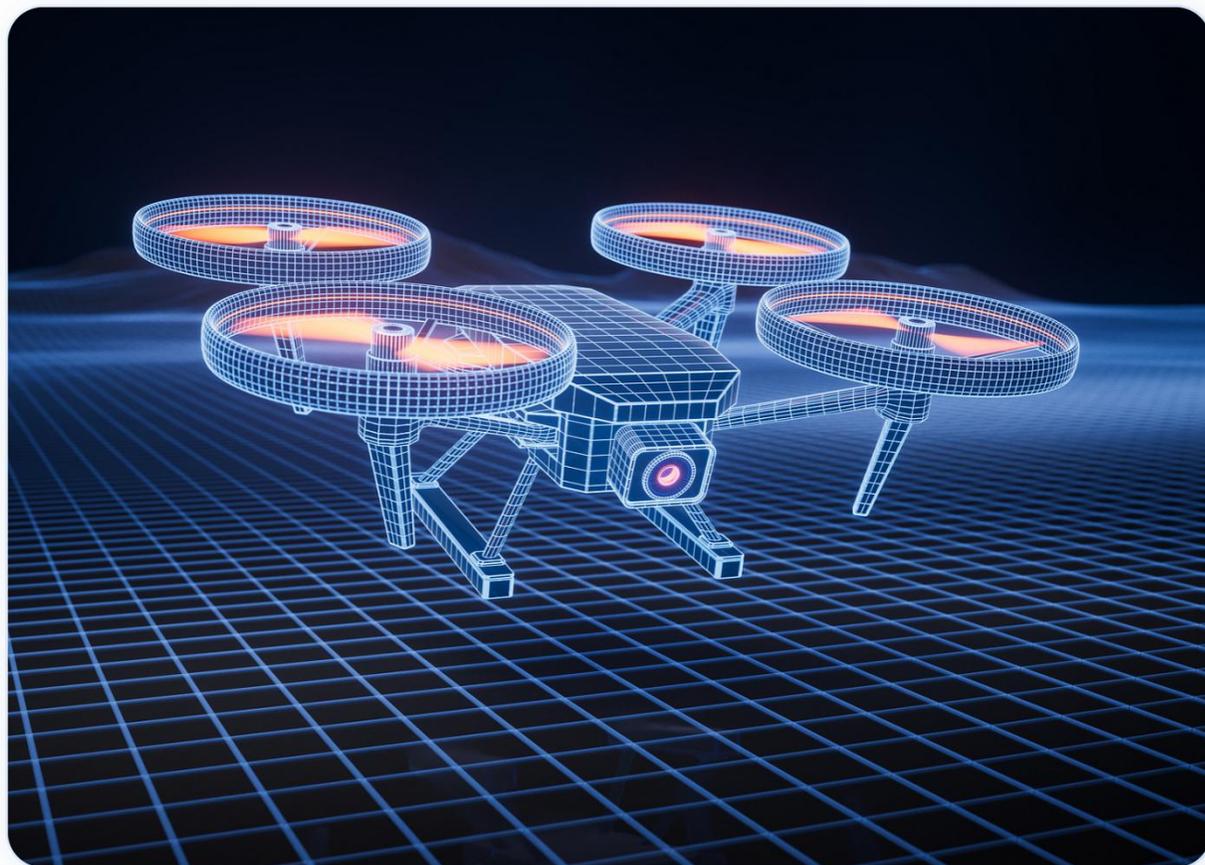
Ava



David



Lily

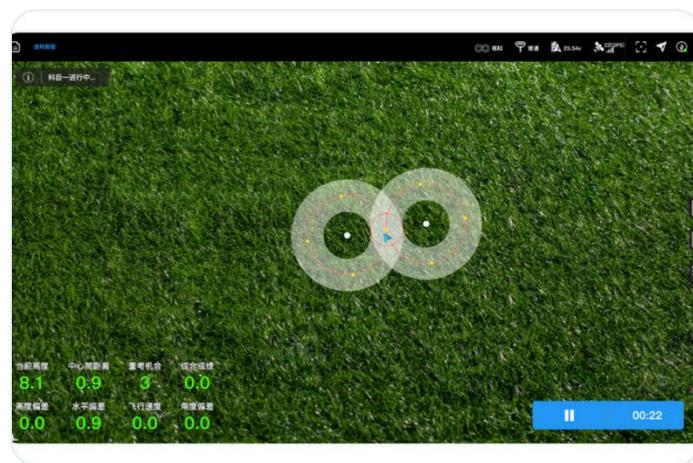
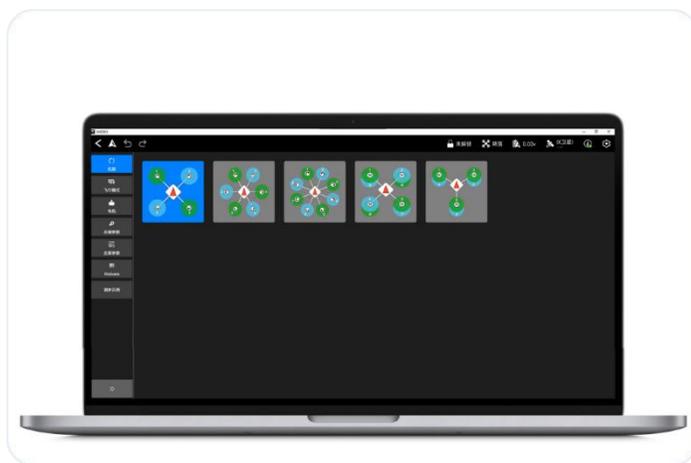
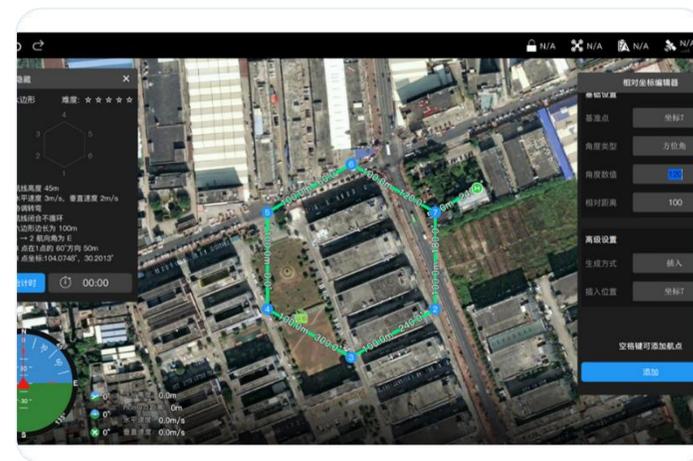


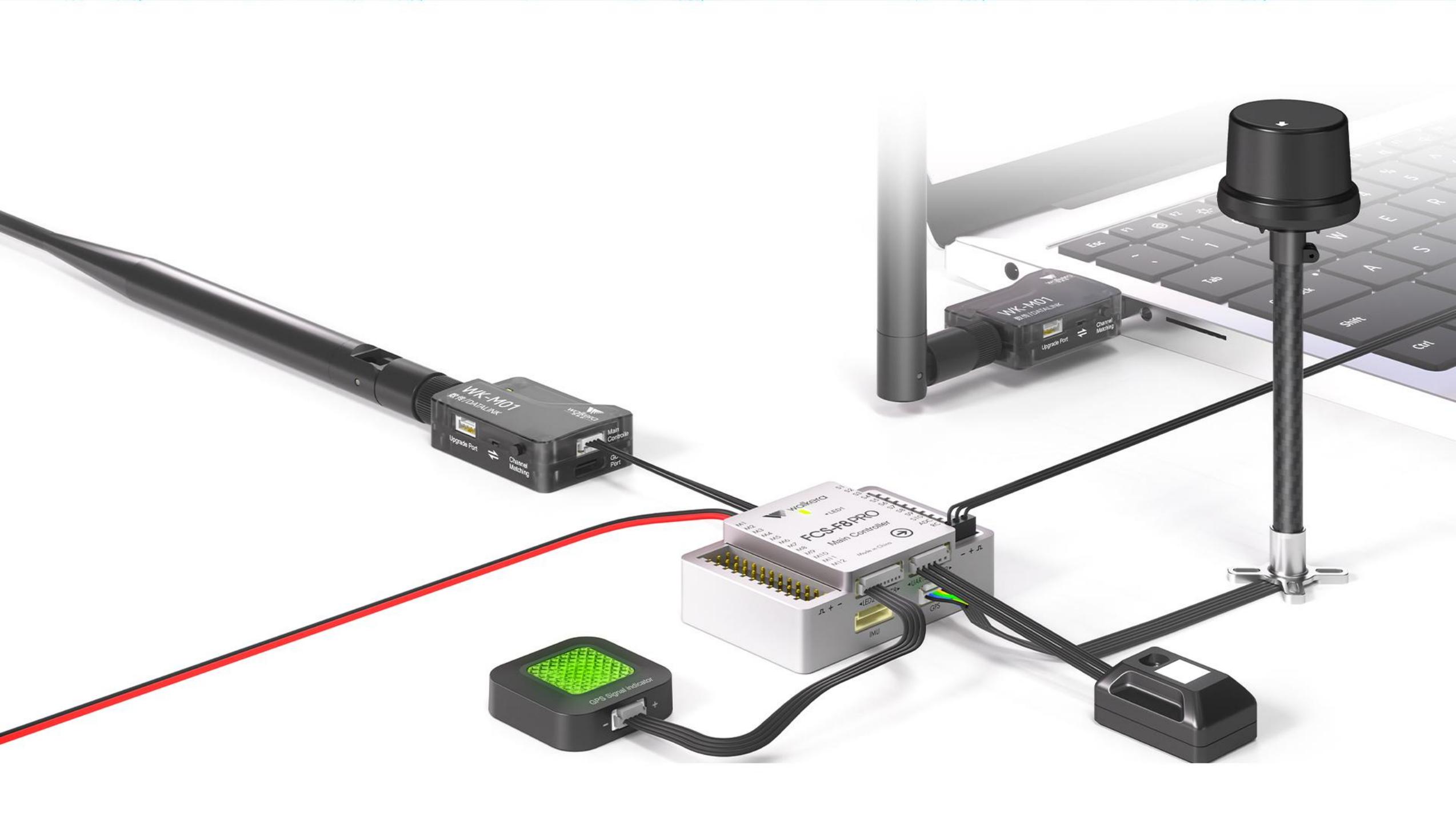
”

无人机平台 飞行控制系统



华科尔 高集成套装





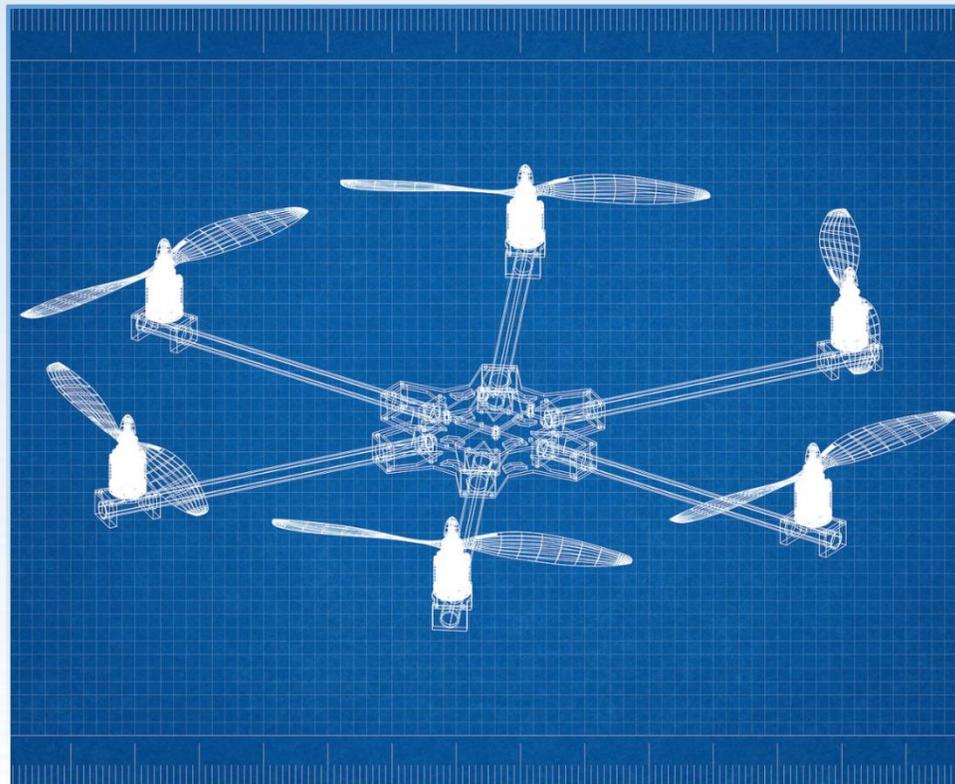
无人机平台-飞行控制系统



飞行控制系统通过高效的控制算法内核，能够精准地感应并计算出飞行器的飞行姿态等数据，再通过主控制单元实现**精准定位悬停**和**自主平稳飞行**。

在没有飞行控制系统的情况下，有很多的专业飞手经过长期艰苦的练习，也能控制飞行器非常平稳地飞行，但是，这个难度和要求特别高，同时需要非常丰富的实战经验。如果没有飞行控制系统，飞手需要时时刻刻关注飞行器的动向，眼睛完全不可能离开飞行器，时时刻刻处于高度紧张的工作状态。而且，人眼的有效视距是非常有限的，即使能稳定地控制飞行，但是控制的精度也很可能满足不了航拍的需求，控制距离越远，控制精度越差。还有，对于不同的拍摄需求，以及面临不同的拍摄环境或条件，人为飞行控制更是难上加难，甚至根本不可能实现。

飞行控制系统是目前实现**简单操控和精准飞行的必备武器**。



无人机平台-飞控的组成及作用

主控MCU

主控单元是飞行控制系统的核心模块

IMU

IMU (惯性测量单元), 包含3轴加速度计、3轴角速度计和气压高度计, 是高精度感应飞行器姿态、角度、速度和高度的元器件集合体, 在飞行辅助功能中充当极其重要的角色。

GPS&指南针

GPS指南针模块, 包含GPS模块和指南针模块, 用于精确确定飞行器的方向及经纬度。对于失控保护自动返航, 精准定位悬停等功能的实现至关重要。指南针-机头方向, GPS:位置、高度

PMU

电源管理模块:

- 1.给各组件供电
- 2.降低系统功耗
- 3.较好的信噪抑制比和瞬时响应
- 4.集成化能节省内容空间, 使供电系统统一和有序化

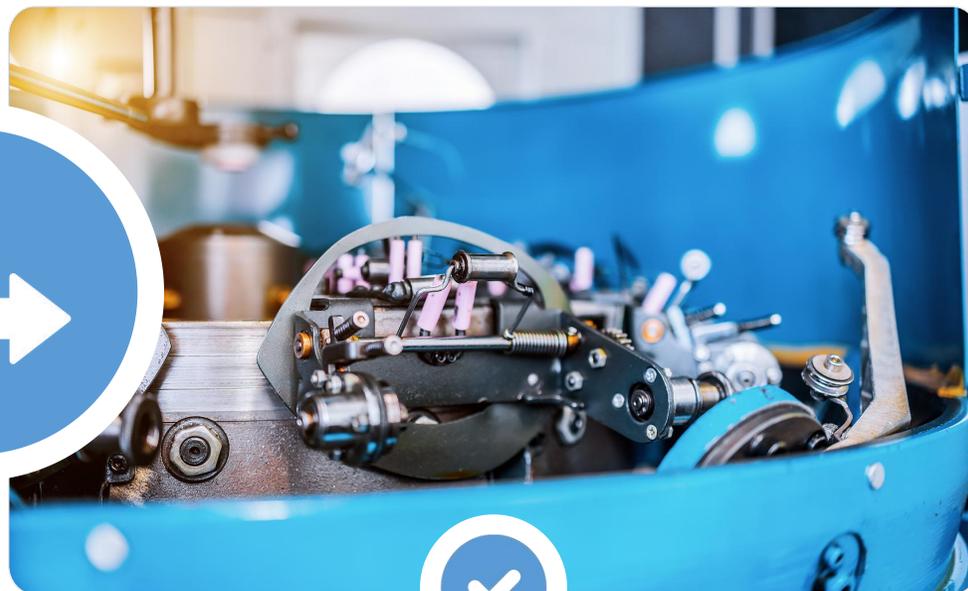
LED灯

LED指示灯模块, 用于实时显示飞行状态, 是飞行过程中必不可少的, 它能帮助飞手实时了解飞行状态。

IMU惯性测量单元重点



1.惯性传感器（三个单轴加速计，三个单轴陀螺仪）-测试飞行姿态



2.气压计-测试飞机高度

IMU惯性测量单元的五个工作





飞控的工作原理

飞控通过传感器获得飞行器的姿态、速度、方向、位置、高度等信息，根据任务规划或操作指令调整动力以太到控制飞行器的目的。



飞控的基础传感器及获取信息



飞控的三大算法

PID算法

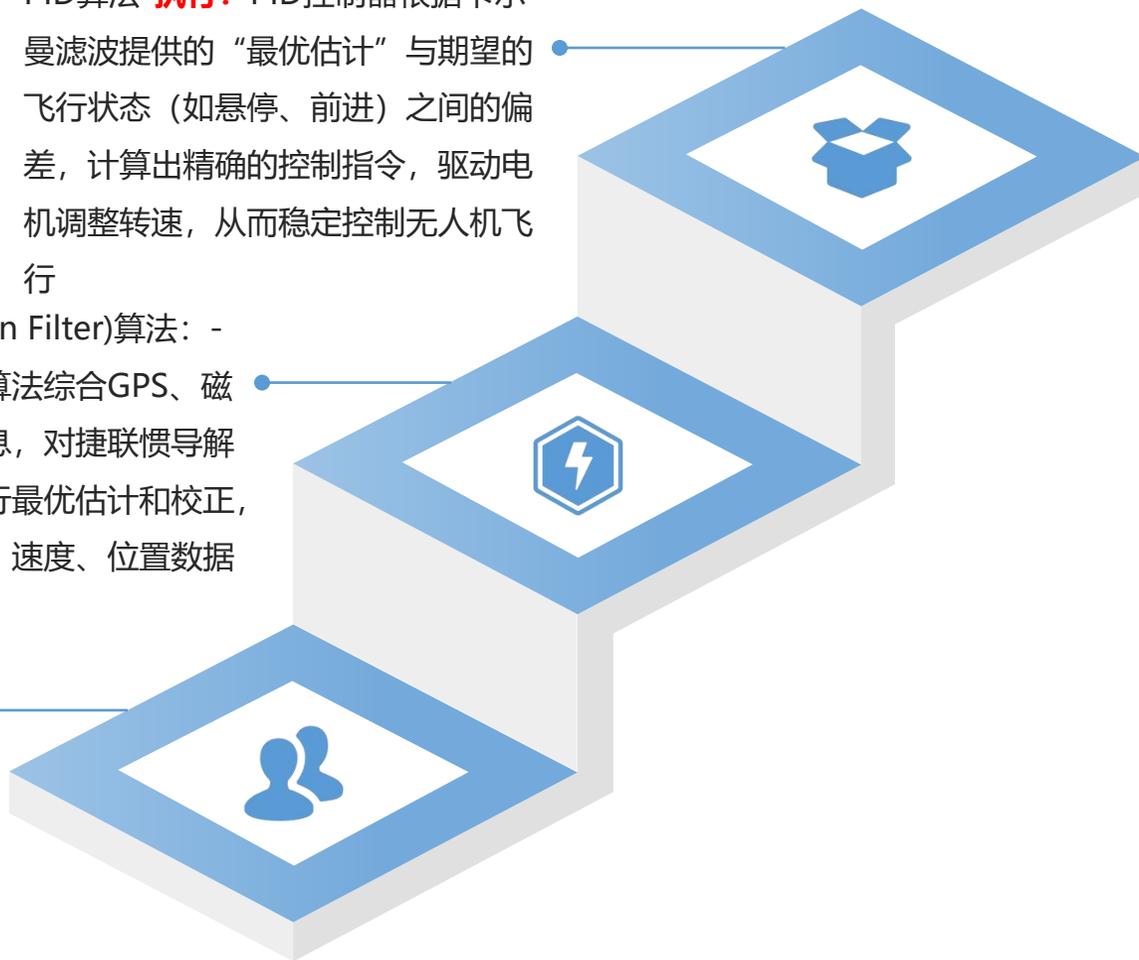
PID算法-**执行**: PID控制器根据卡尔曼滤波提供的“最优估计”与期望的飞行状态（如悬停、前进）之间的偏差，计算出精确的控制指令，驱动电机调整转速，从而稳定控制无人机飞行

卡尔曼滤波

卡尔曼滤波 (Kalman Filter)算法: -
决策: 卡尔曼滤波算法综合GPS、磁场等多种传感器信息，对捷联惯导解算出的导航信息进行最优估计和校正，得到更精准的姿态、速度、位置数据

捷联惯导

捷联惯性导航算法 (SINS)-**感知**: 自主定位定姿-捷联惯导系统快速感知无人机本身的角运动和线运动-就像无人机的“内在感觉器官”和“肌肉记忆”



飞控的三大算法

简而言之，捷联惯导是感知基础，卡尔曼滤波是决策优化，PID控制是最终执行，三者共同构成了无人机稳定、精准飞行的核心算法基础。

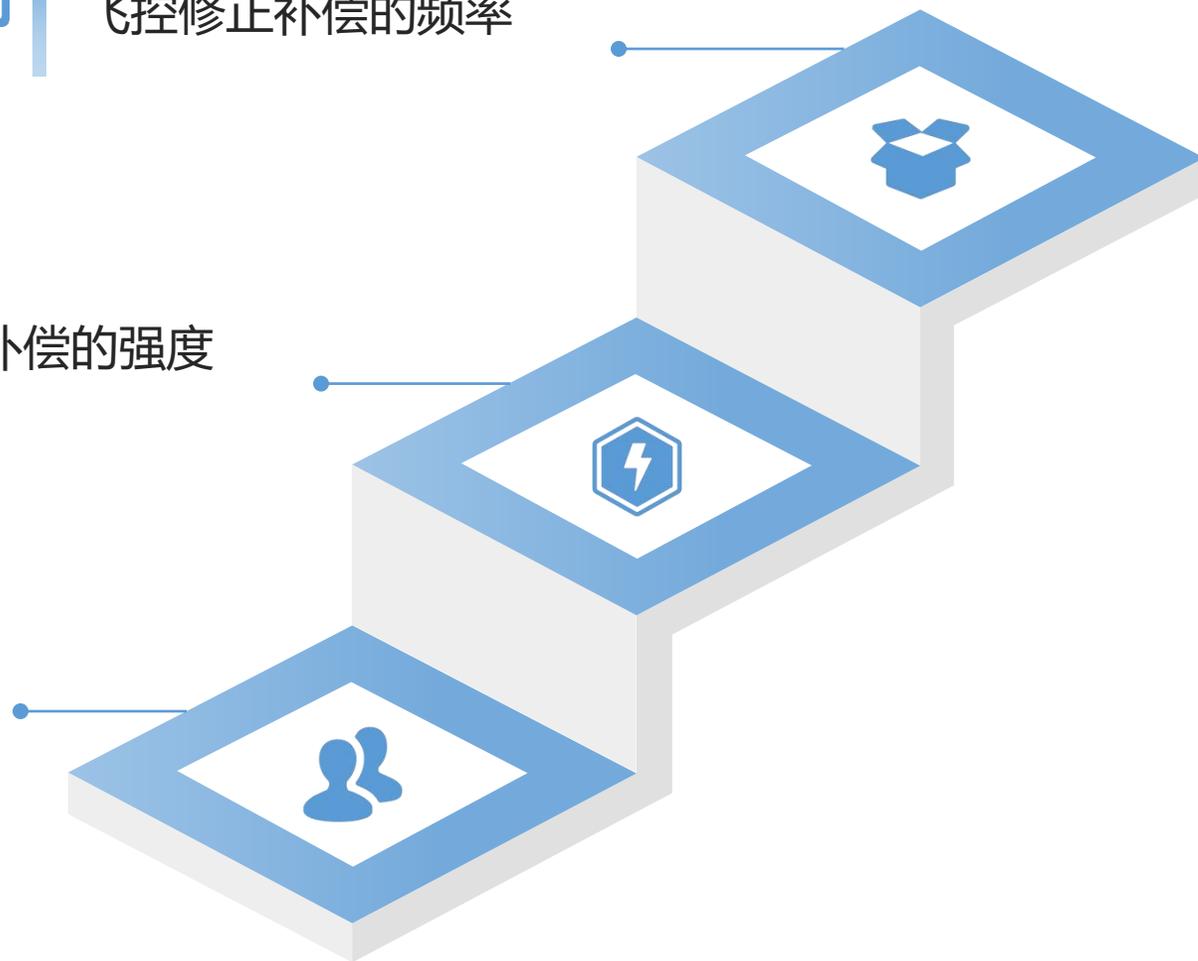
算法名称	核心功能	类比说明	在飞控中的主要作用
捷联惯导 (SINS)	自主定位定姿	无人机的“内在感觉器官”和“肌肉记忆”	在GPS信号弱/无的环境（如室内、隧道）下，通过惯性传感器实时推算飞行器的姿态、速度、位置
卡尔曼滤波 (Kalman Filter)	多传感器数据融合	飞控系统的“首席信息官”	优化融合捷联惯导、GPS、磁罗盘等多个传感器的数据，得出更精确、可靠的状态估计（如位置、速度），并有效抑制噪声
PID控制算法	飞行姿态与轨迹控制	无人机的“自动驾驶员”	根据期望姿态/位置与实际状态的偏差，通过比例、积分、微分计算控制量，驱动电机，实现稳定悬停、平滑飞行和准确跟踪航线

PID的含义

P比例 | 飞控修正补偿的频率

I积分 | 飞控修正补偿的强度

D微分 | 飞控修正补偿的幅度



飞控的安装注意事项

01

朝向

IMU、GPS方向要和机头保持一致

02

位置

靠近重心位置安装，震动较小



飞控系统的组成

01

传感器

三轴速率陀螺、三轴加速度计、三轴磁力计、GPS、空速传感器、各类高度传感器

02

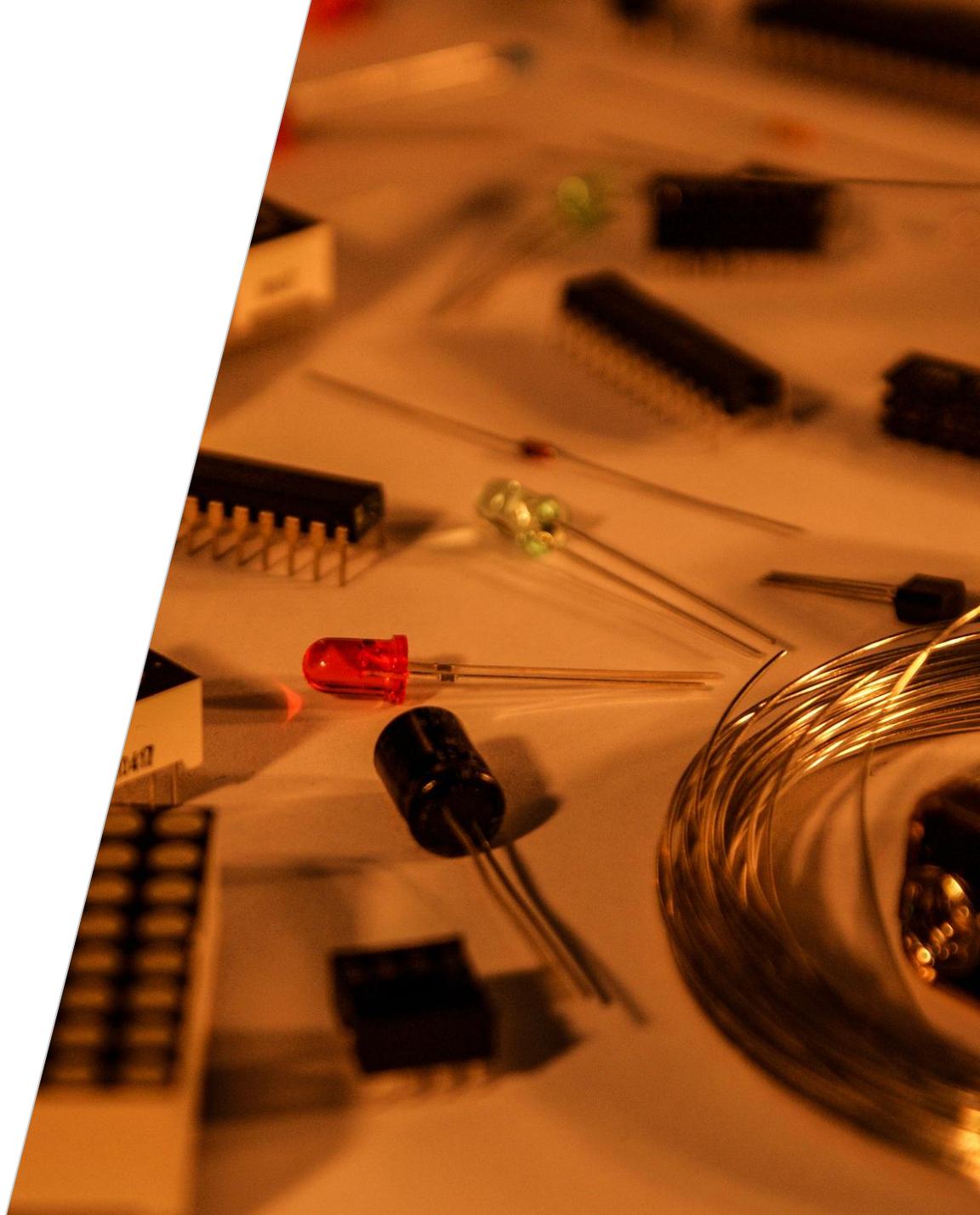
处理器

有ARM、DSP、FPGA(架构与封装)

03

伺服机构

舵机、电调



无人机飞控怎么实现姿态解算和感觉姿态

使用卡尔曼滤波算法采集加速计的线性加速度、陀螺仪的角速率、磁场信息（方向）、GPS信息。

其中将角速率和加速度使用四元数法进行捷联惯导解算姿态；使用磁场和GPS进行融合解算修正。

伺服舵机的组成



飞控小结

核心功能 (GNC)

01

导航 (Navigation)：确定“我在哪儿”。通过GPS、惯性测量单元 (IMU) 等传感器，获取无人机的位置、速度、航向信息。

02

制导 (Guidance)：确定“我要去哪儿”。根据任务规划，计算出从当前位置到目标位置的飞行路径（航迹）

03

控制 (Control)：确定“我如何去”。根据制导指令和当前姿态，解算出控制量，驱动执行机构，使无人机稳定跟踪预定航迹。



题库高频题：

“飞控子系统必须具备的功能？”

(姿态稳定与控制、飞行管理、应急控制)、

“不属于飞控子系统所需的信息？”

(如：经度、纬度是导航信息，飞控更关注姿态角、空速等)。





“

无人机系统 地面控制站

“地面控制站是无人机系统的指挥中心，
是“人在回路”中“人”的接口。”

地面控制站组成

计算主机

显示终端系统

数传与天线

遥控器、操纵杆



训练机构最佳实践

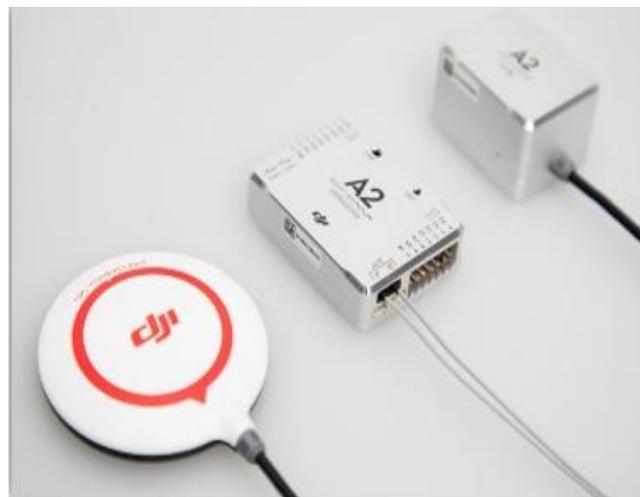


01 笔记本电脑

基本性能稳定，U口功率足够

02 飞控+数传

飞控接数传GPS



03 电脑数传+天线

数传直接电脑，如信息较差可以连接一个增益天线

地面控制站基本功能作用



飞行监控与显示

实时显示无人机姿态、位置、电池电量、航线轨迹等。



任务规划

规划航线、设置航点、设定任务动作。



参数设置与校准

对飞控参数、传感器进行设置和校准。



紧急接管

在紧急情况下可紧急介入，中断规划的航线和任务，通过地面站紧急接管无人机。



数据记录与分析

记录飞行数据，用于事后分析。



运行限制保证

利用空域保持能力做为电子围栏功能

The screenshot displays the Roflying GCS software interface. At the top, there is a status bar with icons for flight data, status parameters, and settings. Below this is a toolbar with various flight control icons such as '一键起飞' (One-click takeoff), '获取控制' (Get control), '开始航线' (Start mission), '暂停航线' (Pause mission), '高度设置' (Altitude setting), '随点随行' (Follow point), '原地降落' (Land in place), '返航降落' (Return to home and land), and '虚拟手柄' (Virtual joystick). The main area is a 3D map showing a city with roads, buildings, and greenery. A yellow flight path is overlaid on the map. On the right side, there is a 3D view of a drone with associated flight data: 横滚角: 0 (Roll angle: 0), 俯仰角: 0 (Pitch angle: 0), 航向角: 0 (Yaw angle: 0), 高度: 0.00米 (Altitude: 0.00m), 速度: 0.00米/秒 (Speed: 0.00m/s), 飞行时间: 00:00:00 (Flight time: 00:00:00), 累计飞行时间: 00:00:00 (Cumulative flight time: 00:00:00). Below the drone view, there are three channels with values: 通道1: 1500.0, 通道2: 1500.0, 通道3: 1010.0. At the bottom, there is a coordinate display: 经度: 113.2653490 纬度: 23.1456117 级别: 18.00. The map rotation angle is shown as 0 degrees.



汉鯤地面站



任务规划

任务规划为重要考核内容，本章节只做为无人机系统部分进行基本介绍，详细课程在第六章：通信链路
与任务规划



无人机系统 通信链路

通信链路是连接“机”与“站”的“神经”，负责数据的双向传输。



无人机系统三大通讯链路

 指挥与控制C&C

 感知和规避S&A

 空中交通管制ATC



常见链路



遥控链路 (上行链路)

功能： 传输地面站对无人机的控制指令。至关重要，一旦中断可能导致失控。

特点： 要求高可靠性、低延迟。



遥测链路 (下行链路)

功能： 传输无人机的状态数据（飞行参数）。



图传链路 (下行链路)

功能： 传输任务载荷采集的图像/视频数据。

特点： 数据量大，要求高带宽。



数传链路 (上下行)

用于远距离、中继通信（如通过卫星）



空中交通管制 ATC

适用于大型机运行在融合空域

教员部份留页(含习题3页)



Tony



Ava



David



Lily

无人机系统 任务载荷

任务载荷是无人机直接执行任务的设备，决定了无人机的具体应用领域。



任务载荷



投送装置

用于物流运输、应急投送。



喷洒载荷

用于农业植保。



光电载荷

可见光相机、红外热成像相机、多光谱相机等，用于航拍、侦查、巡检。



激光雷达

用于三维建模、测绘。

载荷注意事项



任务载荷安装与操作手册



载重与平衡计算工作单

复习与思考题

思考

01

请画出无人机系统基本组成的框图，并简述各部分的功能。

02

飞控系统中的“导航、制导、控制”三者有何区别与联系？。

03

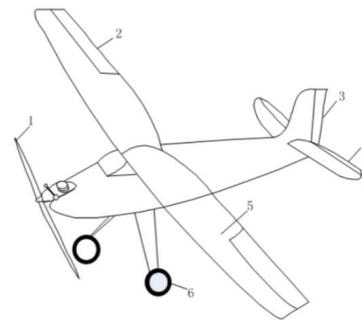
案例分析：为大疆M300 RTK无人机执行电力巡检任务列出其系统组成，并说明巡检任务主要依赖哪个部分的功能？

参考资料

1. 《特定类无人机试运行管理规程（暂行）》（AC-92-2019-01）
2. 《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》（CCAR-92）
3. 《无人机驾驶员航空知识手册》
4. 《先进无人机系统制导与控制》
5. 《无人机概论》

04

空气动力学基础与飞行原理



课程学习目标



掌握定律

深入理解牛顿三大运动定律和伯努利定理，并能应用于分析无人机升力、阻力的产生机理。



明晰受力

熟练掌握飞行中的四个作用力（升力、重力、拉力、阻力）及其在平衡与不平衡状态下的关系



理解原理

掌握固定翼、直升机、**多旋翼**等不同构型无人机的飞行操纵与姿态控制原理



识别效应

了解地面效应、失速等关键空气动力学现象及其对飞行安全的影响。



牛顿三定律

无人机的一切飞行现象都遵循经典力学规律

01

牛顿第一定律（惯性定律）：

除非受到外来的作用力，否则物体的速度(v)会保持不变。 没有受力即所有外力合力为零，当飞机在天上保持等速直线飞行时，这时飞机所受的合力为零，与一般人想象不同的是，当飞机降落保持相同下沉率下降，这时升力与重力的合力仍是零，升力并未减少，否则飞机会越掉越快。

02

牛顿第二定律 ($F=ma$) -加速度

某质量为m的物体的动量($p = mv$)变化率是正比于外加力 F 并且发生在力的方向上。 揭示了无人机加速、减速、转弯的根源在于合外力。例如，增大电机转速（增大拉力）可使无人机加速上升；调整副翼产生滚转力矩使无人机转弯。

03

牛顿第三定律（作用与反作用）

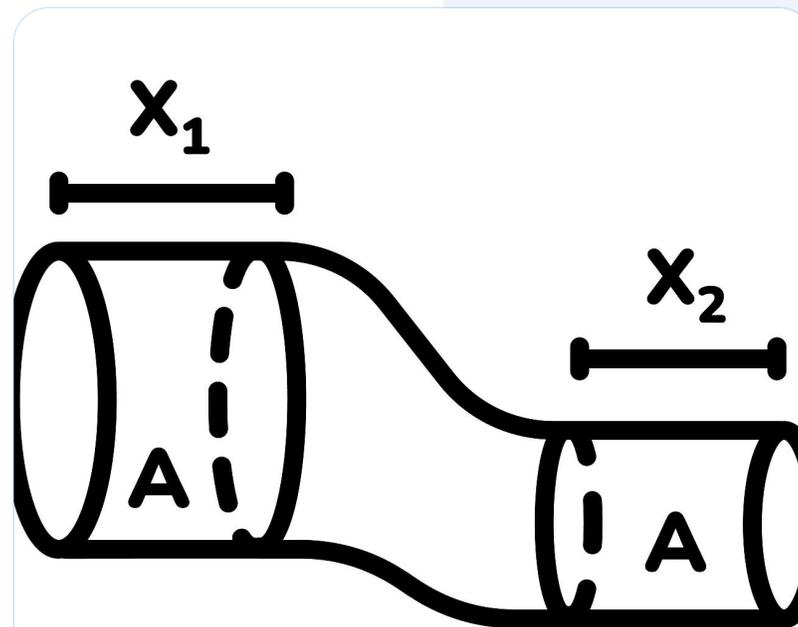
作用力与反作用力是数值相等且方向相反。 是理解升力产生的关键。旋翼或螺旋桨向下推动空气（作用力），空气则对桨叶施加一个向上的反作用力，即升力。

伯努利定理

丹尼尔·伯努利-1726年

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{常量}$$

伯努利定律是空气动力最重要的公式，简单的说在理想流体的稳定流动中，流速大的地方压强小，流速小的地方压强大，这里说的流体一般是指空气或水，在这里当然是指空气，设法使机翼上部空气流速较快，静压力则较小，机翼下部空气流速较慢，静压力较大，两边互相比较力，于是机翼就被往上推去，然后飞机就飞起来--升力之一



$$W = PAx$$

Bernoulli Equation

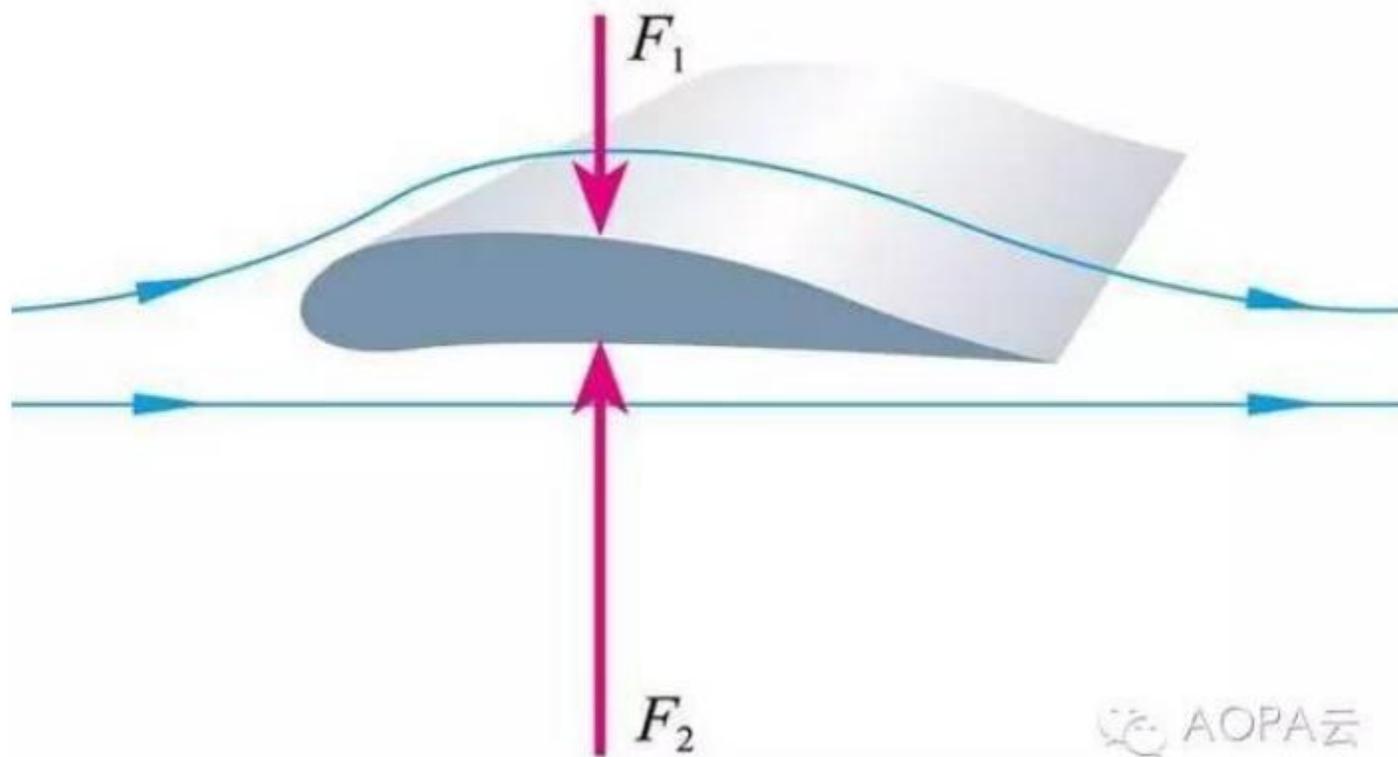
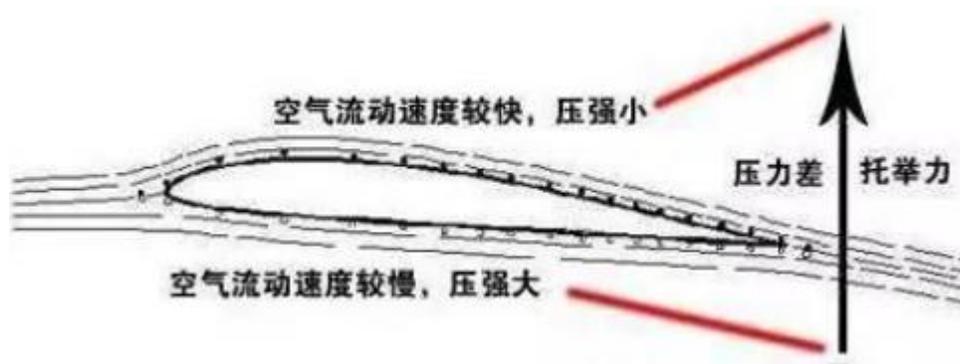


圖1-3

飞机机翼的横截面通常被设计成上侧弧长大于下侧。当空气流经机翼时，上表面的气流流速更快，导致压强小于下表面，从而产生向上的升力。这一定性解释正源于伯努利原理。

多旋翼无人机升力合力

01



02



无人机的升力主要源于旋翼的旋转，这背后有两个关键的物理学原理在同时起作用：

牛顿第三定律：当电机驱动电机，带动螺旋桨高速旋转时，桨叶会持续向下“推”空气。根据牛顿第三定律，空气也会给螺旋桨一个大小相等、方向相反的反作用力，这个向上的力就是升力。你可以想象直升机起飞时地面尘土被吹飞的场景，道理是相同的。

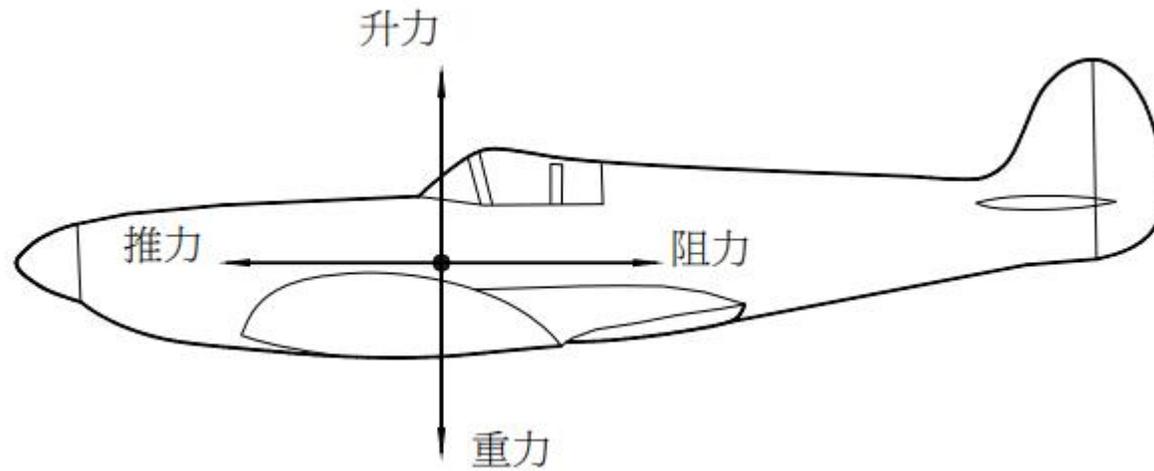
伯努利定理：螺旋桨的桨叶剖面并非平板，而是类似机翼的不对称翼型。当气流流过时，流经上侧弯曲表面的路径更长、流速更快，导致压强降低；而下侧气流流速较慢，压强较高。这个压强差就形成了向上的升力。

产生的总升力大小可以用以下公式估算： $\text{升力} = 0.5 \times \text{空气密度} \times \text{转速}^2 \times \text{桨盘面积} \times \text{升力系数}$ 。因此，通过改变电机的转速，就能直接控制升力大小。

感受起飞与降落

多旋翼无人机的升力由“空气压差”和“反作用力”合力组成的升力；特别是在无人机起降阶段，要特别注意，起飞阶段，由于地效反作用力比较大，无人机可以较轻松的起飞，注意感受训练机从地面升到1.5米-3米之间的感觉，会有明显的地效升力减弱的过程；但降落时需要特别注意地效带来的扰流。

力的平衡

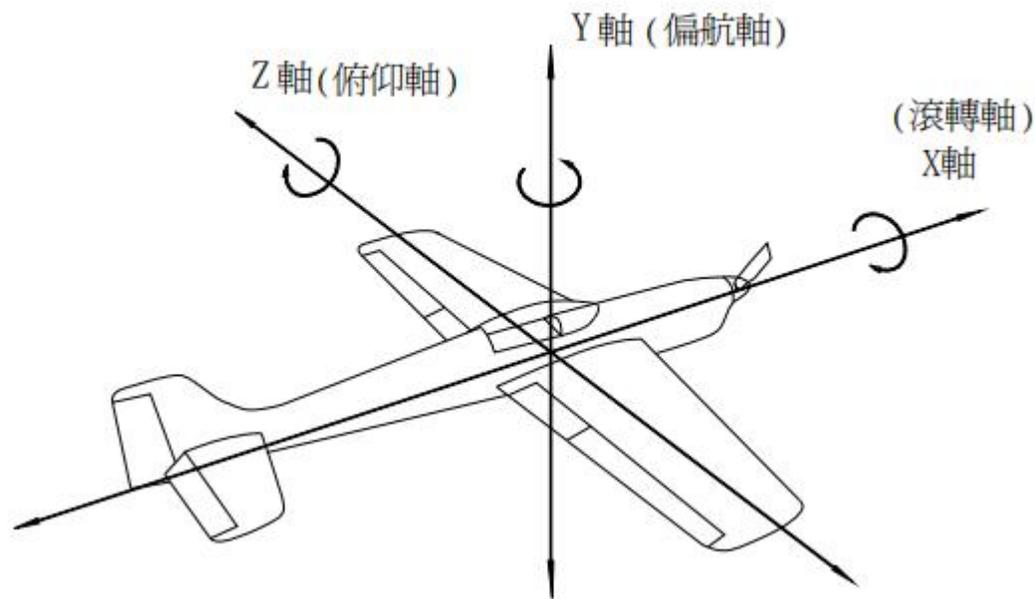


作用于飞机的力要刚好平衡，如果不平衡就是合力不为零，依牛顿第二定律就会产生加速度，为了分析方便我们把力分为X、Y、Z三个轴力的平衡及绕X、Y、Z三个轴弯矩的平衡。

力的平衡

轴力不平衡则会在合力的方向产生加速度，飞行中的飞机受的力可分为升力、重力、阻力、推力（如图1-1），升力由机翼提供，推力由引擎提供，重力由地心引力产生，阻力由空气产生，我们可以把力分解为两个方向的力，称 x 及 y 方向（当然还有一个 z 方向，但对飞机不是很重要，除非是在转弯中），飞机等速直线飞行时 x 方向阻力与推力大小相同方向相反，故 x 方向合力为零，飞机速度不变， y 方向升力与重力大小相同方向相反，故 y 方向合力亦为零，飞机不升降，所以会保持等速直线行。

弯矩不平衡则会产生旋转加速度，在飞机来说， X 轴弯矩不平衡飞机会滚转， Y 轴弯矩不平衡飞机会偏航、 Z 轴弯矩不平衡飞机会俯仰

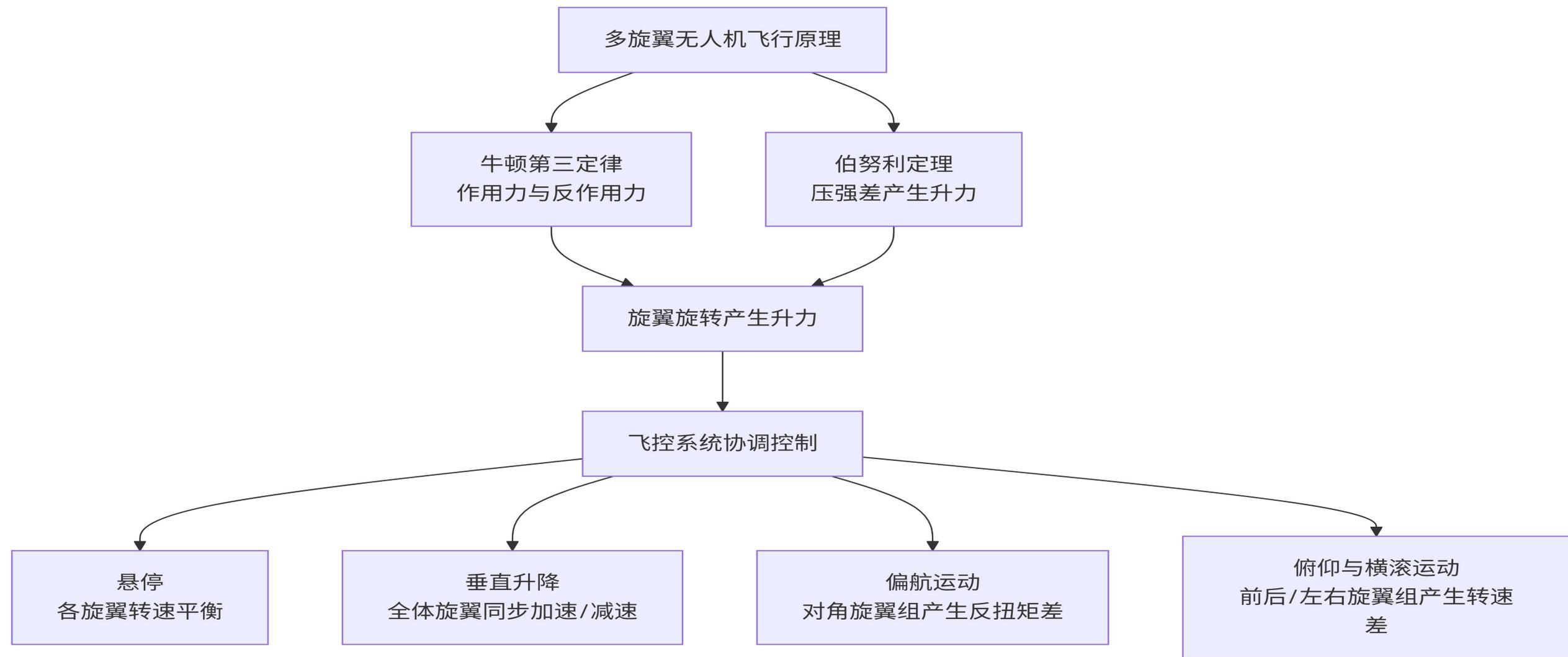


- **平衡状态:**
 - **水平匀速飞行:** 升力 = 重力，拉力 = 阻力。
 - **加速上升:** 升力 > 重力，拉力 > 阻力。
 - **减速下降:** 升力 < 重力，拉力 < 阻力。

升力公式

- 升力公式: $L = \frac{1}{2}C_L\rho v^2S$
 - L : 升力
 - C_L : 升力系数 (与翼型和迎角有关)
 - ρ : 空气密度
 - v : 相对气流速度
 - S : 机翼面积

多旋翼无人机的空气动力学原理

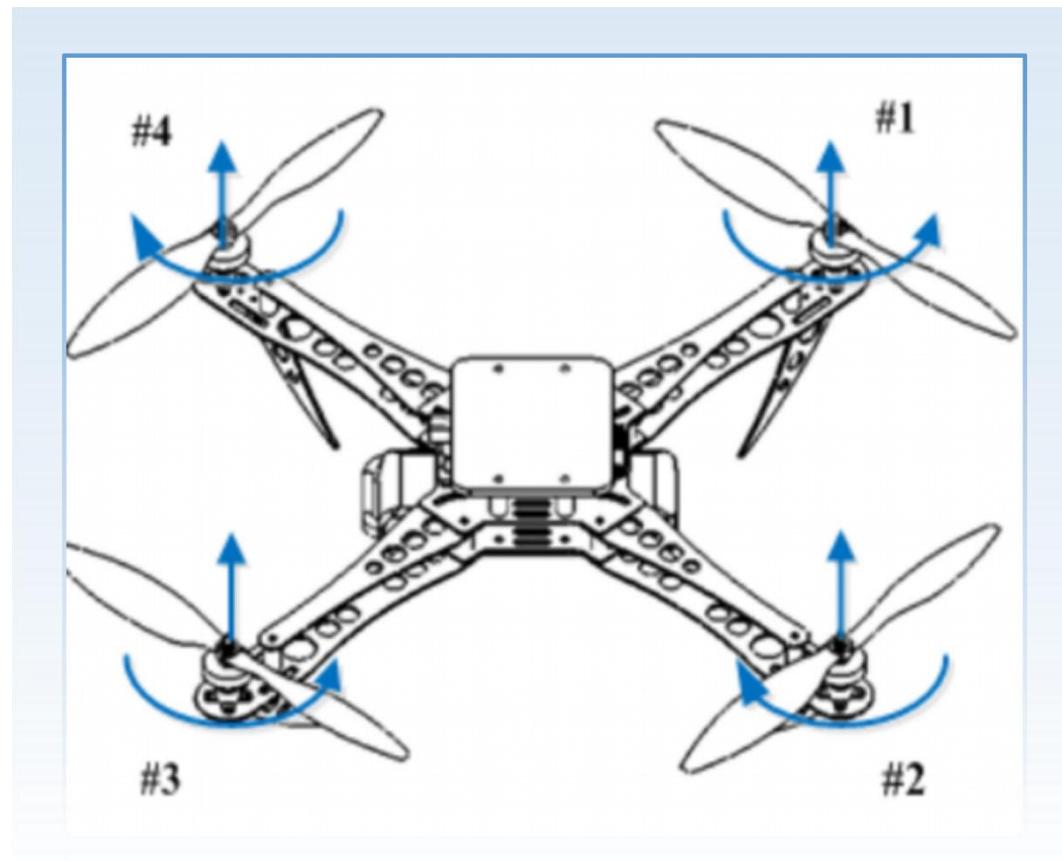


多旋翼飞行原理-悬停



当飞行器悬停时：

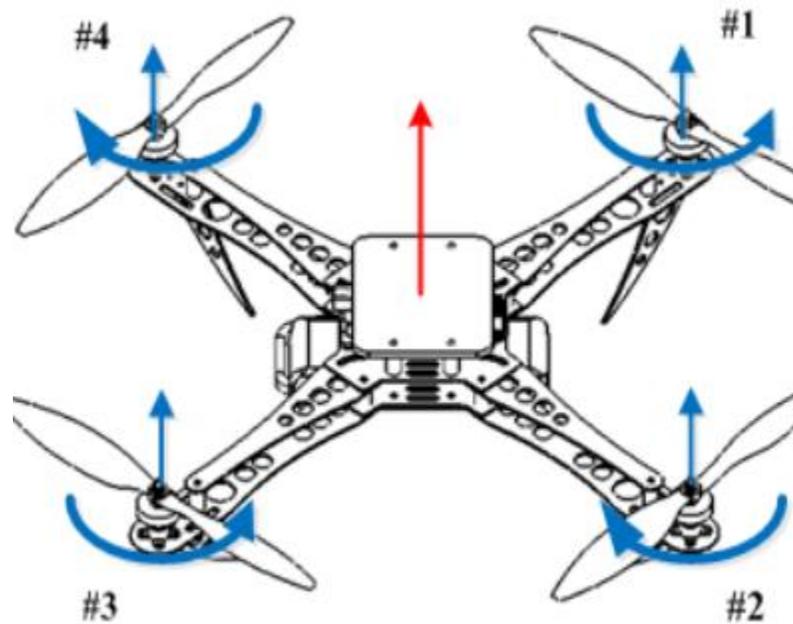
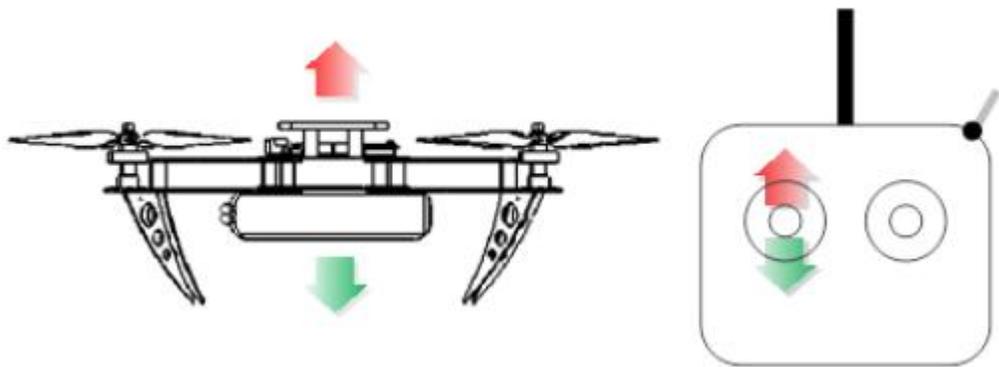
- 拉力抵消重力
- 四个螺旋桨拉力产生的滚转、俯仰力矩为零
- 偏航力矩为零，四个螺旋桨反扭矩效应均被抵消



#3

#5

多旋翼飞行原理-升降运动

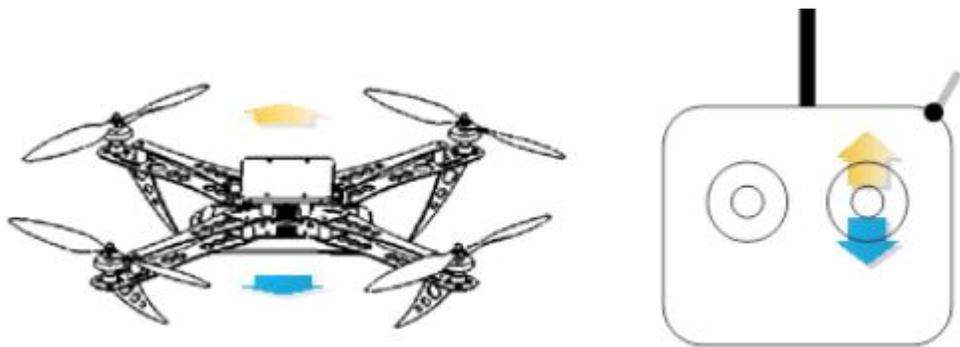


	#1	#2	#3	#4
改变拉力	+1	+1	+1	+1

上升运动螺旋桨变化(+表示增加转速)

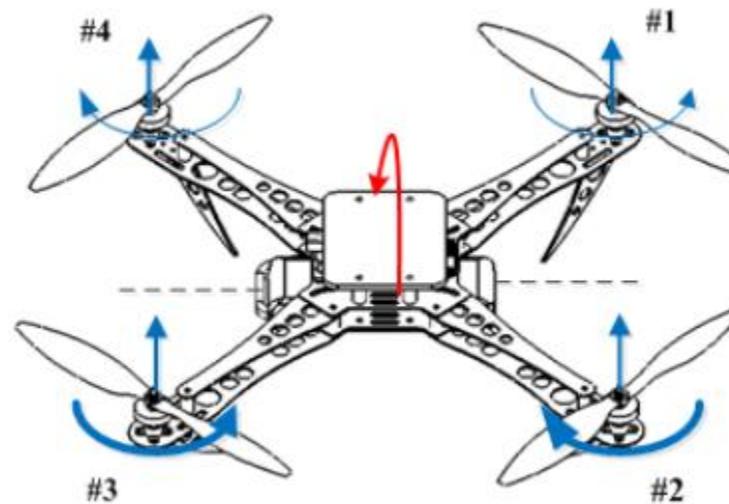
--	--	--	--	--

多旋翼飞行原理-前后运动

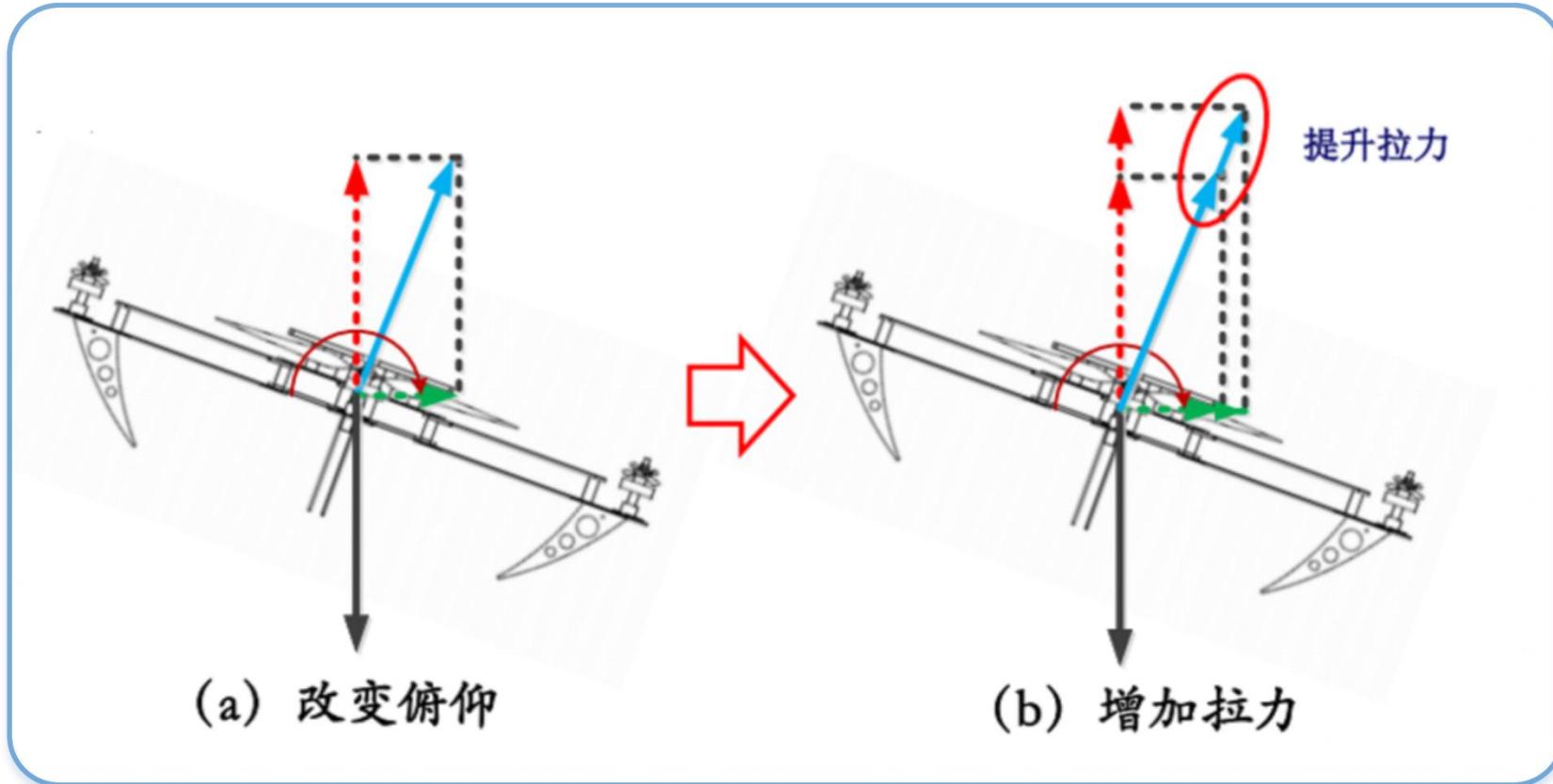


	#1	#2	#3	#4
改变俯仰	-1	+1	+1	-1
增加拉力	+0.2	+0.2	+0.2	+0.2
合成	-0.8	+1.2	+1.2	-0.8

向前运动螺旋桨变化(-表示降低转速)

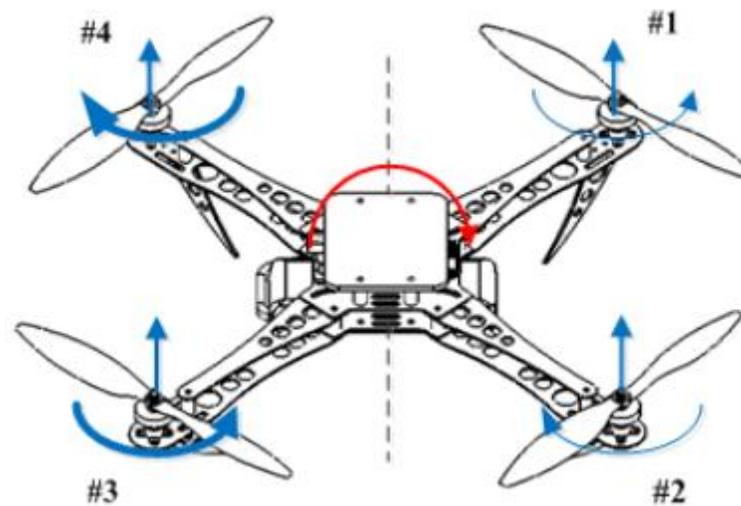
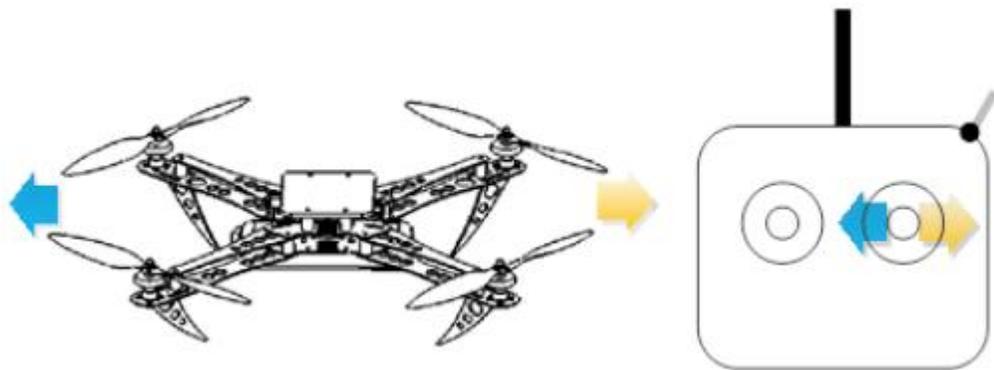


多旋翼飞行原理-前后运动



倾斜后拉力在重力方向的分量抵消不了重力，因此需要再提升拉力

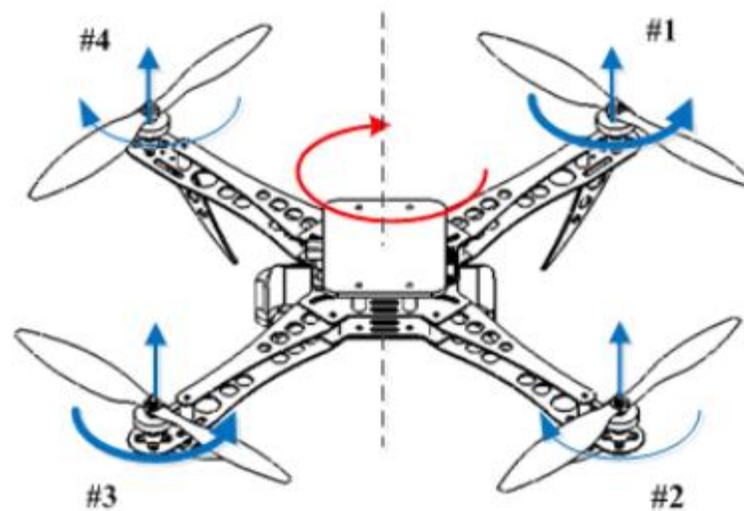
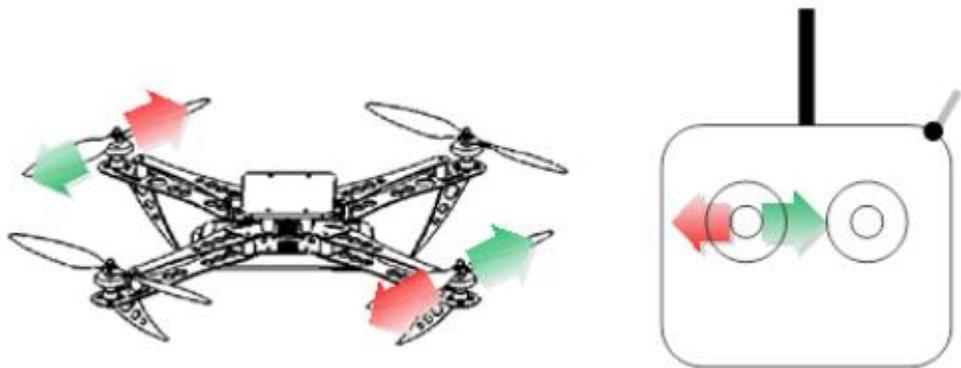
多旋翼飞行原理-左右运动



	#1	#2	#3	#4
改变横滚	-1	-1	+1	+1
增加拉力	+0.2	+0.2	+0.2	+0.2
合成	-0.8	-0.8	+1.2	+1.2

向右运动螺旋桨变化

多旋翼飞行原理-偏航运动



	#1	#2	#3	#4
改变横滚	+1	-1	+1	-1

顺时针偏航运动螺旋桨变化

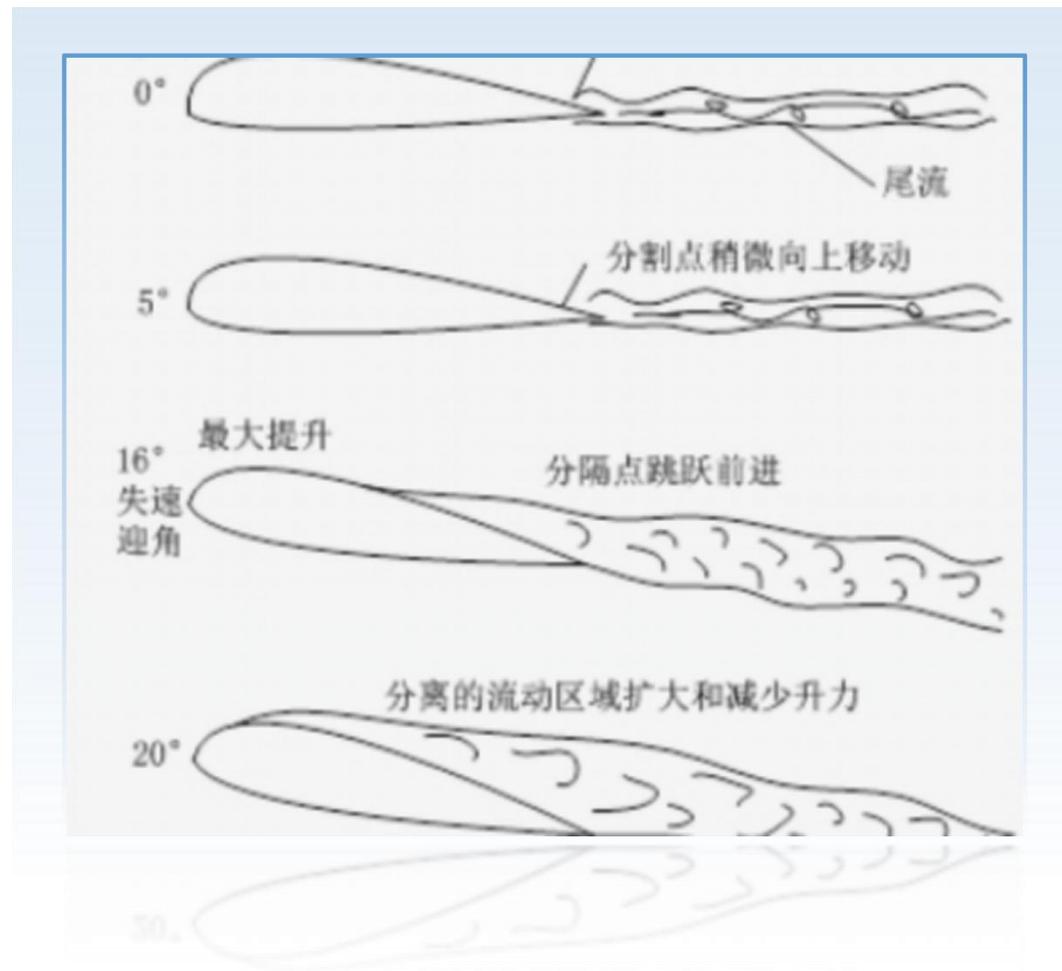
特别注意-常考-偏航运动为拉力，其它为推力

失速



定义： 当翼型迎角增大超过临界迎角时，上表面气流严重分离，升力急剧减小，阻力急剧增大的现象。

多旋翼的失速通常是合力严重失衡导致，可能是一边电机、电调失效停车，改出难度极大，一般飞控会通过冗余电机来稳定姿态，所以理论上来说越多轴越安全，但不包括某些不成熟飞控本身就会带来失速。



地面效应

01

定义

当无人机在接近地面（高度小于旋翼直径或半翼展）飞行时，下洗气流受到地面阻碍，形成气垫，使升力增加、诱导阻力减小的现象。

02

影响

有利：起飞离地瞬间更轻松，着陆时需注意拉平。

不利：进入或脱离地面效应区时，升力突变，需谨慎操纵以保持稳定。

多旋翼的优势

	固定翼	直升机	多旋翼
易用性	+	+	++++
可靠性	++++	+	++++
勤务性	++	+	++++
续航性	++++	++	+
承载性	++++	++	+

01 运动相互解耦

02 无机械磨损

03 结构简单

04 模块化

多旋翼的局限性 无法大尺寸应用

$$M = \frac{1}{2\pi} C_M \rho \omega^2 (2r_p)^5 \Rightarrow M \sim \omega^2 R^5$$
$$J \sim R^5 \Rightarrow \alpha = \frac{M}{J} \sim \frac{\omega^2 R^5}{R^5} = \omega^2$$

桨尖速度常数假设 $\omega \sim 1/r_p \Rightarrow \omega \sim \frac{1}{R}$

$$\Rightarrow \alpha \sim \frac{1}{R^2}$$

- 桨叶尺寸越大，越难迅速改变其速度
- 在大载重下，桨叶上下挥舞会导致刚性大的桨很容易折断

多旋翼局限性解决方案



01

更灵敏 更好操作

随着飞控技术的飞速发展，增加更多的旋翼和动力，可以避免加大桨叶带来的问题，不仅使负载大幅提升，而操作简易性的灵敏度、飞行器稳定性都有所提升

02

更安全

电机冗余大，虽然单个电机失效概率增加，但通过控制分配安全性增加

多旋翼无人机飞行原理

通过调节多个电机转速，改变旋翼拉力的大小和合力矩，实现姿态控制。



垂直运动（升降）： 四个电机转速同增同减。



俯仰运动（前后）： 前后电机转速差动



横滚运动（左右）： 左右电机转速差动



偏航运动（旋转）： 对角电机转速差动。利用反扭矩原理



复习与思考题

思考

01

用伯努利原理解释机翼如何产生升力。

02

试分析四旋翼无人机实现“向左前方45度角斜向飞行”时，各个电机的转速应如何配合。。

03

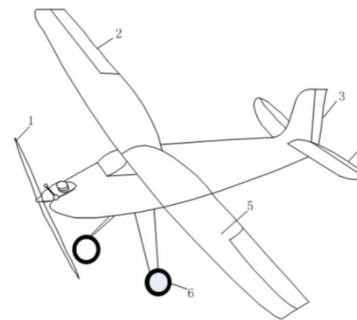
固定翼无人机在着陆过程中，如何利用和应对地面效应？

参考资料

1. 《无人机驾驶员航空知识手册》
2. 《飞行原理 (I) 》
3. 《无人机概论》第3章

05

无人机结构与性能



课程学习目标



掌握结构

深入掌握固定翼、直升机、多旋翼无人机各核心部件的结构组成、功能与工作原理。



理解布局

理解不同气动布局（如常规布局、飞翼布局）的特点及其对性能的影响。



计算性能

掌握关键飞行性能参数（如升力、续航时间）的计算方法，并能解读性能图表



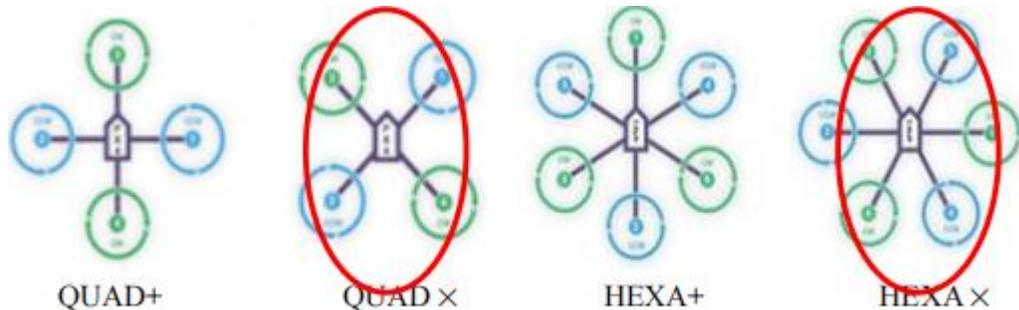
分析关联

能够分析无人机结构、气动布局与整体飞行性能之间的内在联系。。

多旋翼无人机基本布局



1.交叉型：按飞行方向与机身关系，又分为+字型和X字型。



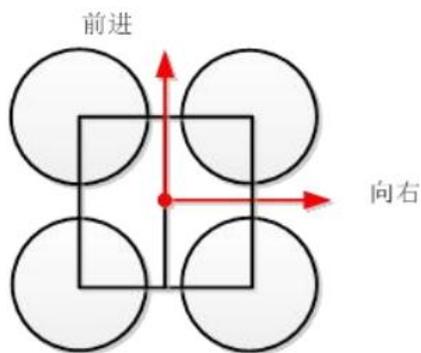
(a) 四旋翼

(b) 六旋翼

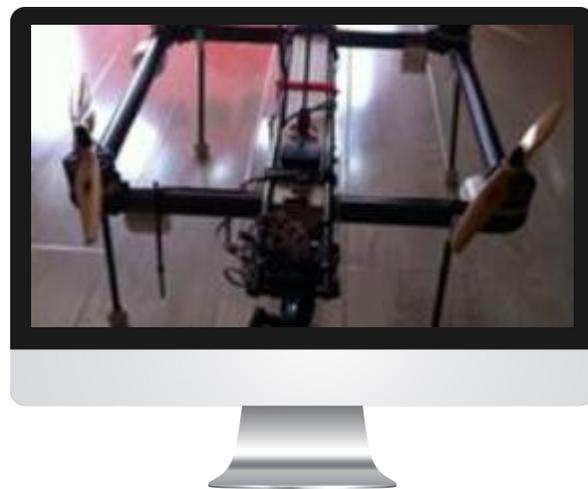


2.环型：可较大程度避免飞行中机架所产生的振动，增加了机架结构强度。

增加了机架的重量，转动惯量，灵活性降低。



(a) 示意图



3.H型：在环型的基础上优化，即减小了飞行中机架的振动，又保证了灵活性不被大幅降低，典型机型：大疆“悟”

课堂讨论



1.为什么现在主流常用的都是X字型布局，较少见+字型布局，是机动性原因？前视云台相机原因还是什么？

2.为什么大疆“悟”系列会选择H型布局？



旋翼安装布局

● 单桨和共轴双桨

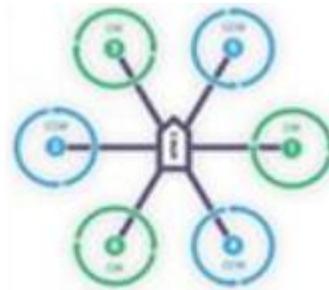
1. 不增加多旋翼整体尺寸, 增加载重
2. 减少螺旋桨对相机视场的遮挡
3. 上下桨转动方向相反, 相互抵消陀螺力矩

● 注意:

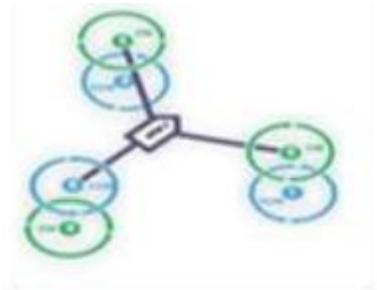
会降低单个螺旋桨的效率。大概共

轴双桨只相当于1.6个螺旋桨 $h/r_p > 0.357$

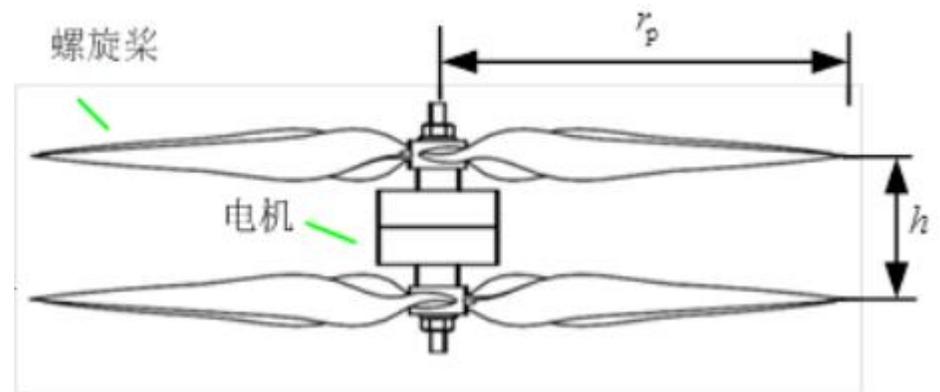
[1] Bohorquez F. Rotor hover performance and system design of an efficient coaxial rotary wing micro air vehicle [Ph. D. dissertation], University of Maryland College Park, USA, 2007.



(a) 一轴一桨形式



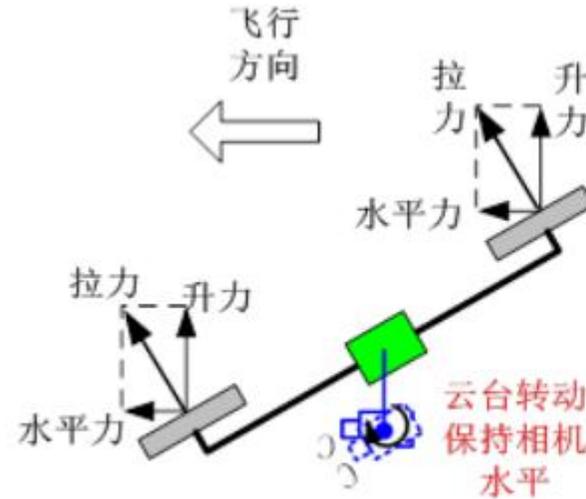
(b) 一轴双桨形式



旋翼安装布局-桨盘角度

● 螺旋桨桨盘水平装配

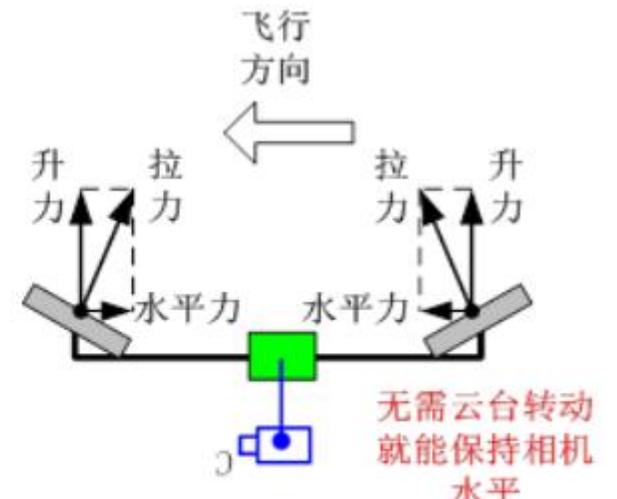
- 1.简单
- 2.需云台使相机保持水平



(a) 桨盘水平

● 螺旋桨桨盘倾斜装配

- 1.至少六个桨
- 2.无需云台



(b) 桨盘倾斜



旋翼安装布局-桨盘位置

- 桨盘位于机臂位置上方

- 1) 螺旋桨产生拉力
- 2) 着陆阶段不易碰到障碍，而损伤桨
- 3) 遮挡相机视野小



- 桨盘位于机臂位置下方

- 1) 螺旋桨产生推力
- 2) 下洗气流完整，防雨，气流低于飞控气压计高度准确，不脱桨

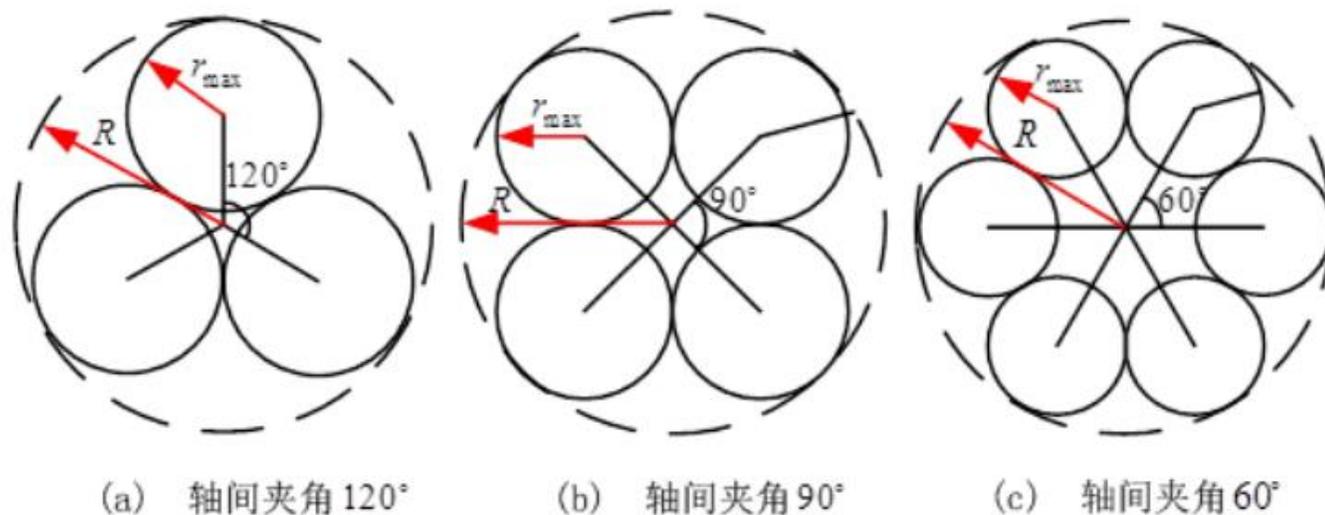


旋翼 和机体半径

机体半径 R 与旋翼最大半径 r_{\max} 存在如下关系(θ 表示轴间夹角)

$$R = \left(1 + \frac{1}{\sin(\theta/2)} \right) r_{\max}$$

当桨与桨之间的距离从一个桨半径到0.1个桨半径变化时，气流对飞行器的整体性能影响很小。因此，为了使飞行器尽量紧凑，比如可以令 $r_{\max} = 1.05r_p \sim 1.2r_p$



尺寸和机动性关系



尺寸和机动性关系

减小多旋翼机体尺寸对多旋翼惯性、有效负载具有很大影响，并最终影响最大可达角加速度和线加速度。



结论

尺寸越大，机动性越大

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2\pi} C_T \rho \omega^2 (2r_p)^4 \\ M &= \frac{1}{2\pi} C_M \rho \omega^2 (2r_p)^5 \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} T &\sim \omega^2 R^4, M \sim \omega^2 R^5 \\ m &\sim R^3, J \sim R^5 \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} a &= \frac{T}{m} \sim \frac{\omega^2 R^4}{R^3} = \omega^2 R \\ \alpha &= \frac{M}{J} \sim \frac{\omega^2 R^5}{R^5} = \omega^2 \end{aligned}$$

(1) 马赫数常数限制

$$\omega \sim 1/r_p \Rightarrow a \sim \frac{1}{R}, \alpha \sim \frac{1}{R^2}$$

(2) 弗劳德数限制

$$v_b^2/Rg = \omega^2 r_p^2/Rg \sim 1 \Rightarrow \omega \sim 1/\sqrt{r_p} \Rightarrow a \sim 1, \alpha \sim \frac{1}{R}$$

布局 重心位置

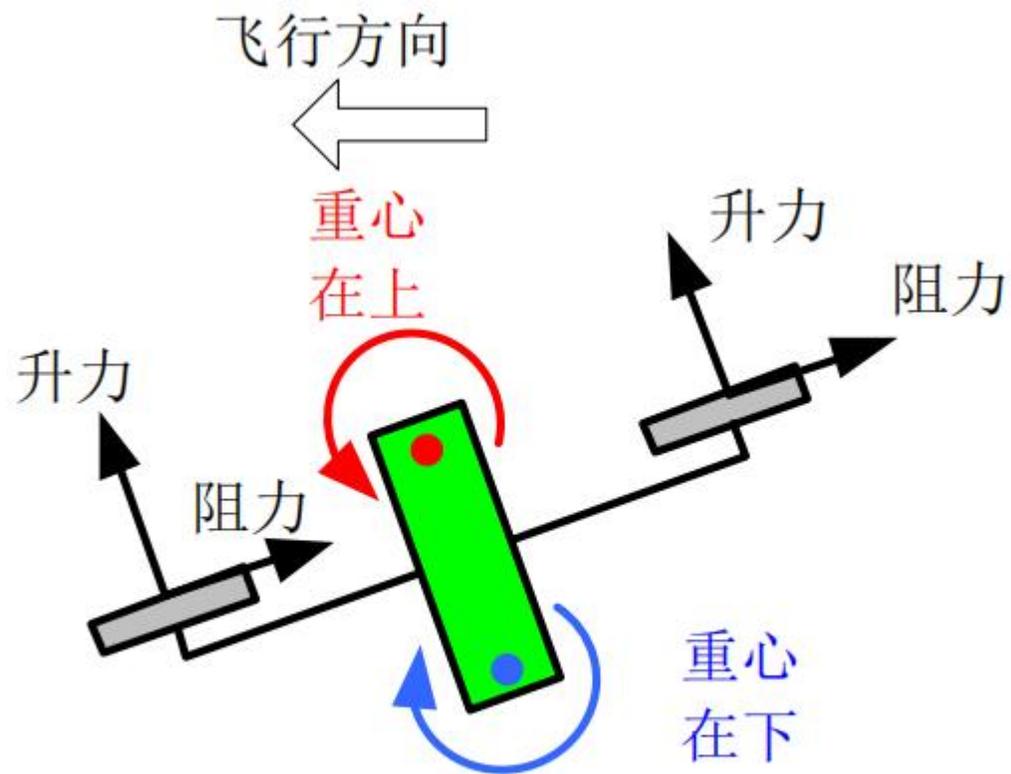
在设计时，需要将重心设计到多旋翼的中心轴上。另外的一个问题是将重心设计到多旋翼螺旋桨形成的桨盘平面的上方还是下方呢？



布局 重心位置

(1) 多旋翼前飞情形

- 在右图中，因为螺旋桨的柔性，诱导的来流会产生阻力。
 - 如果多旋翼重心在桨盘平面下方，那么阻力形成的力矩会促使多旋翼俯仰角转向0度方向。
 - 若多旋翼重心在桨盘平面上，那么阻力形成的力矩会促使多旋翼俯仰角朝发散方向发展，直至翻转。
- 因此，当多旋翼前飞时，重心在桨盘平面的下方会使前飞运动稳定。

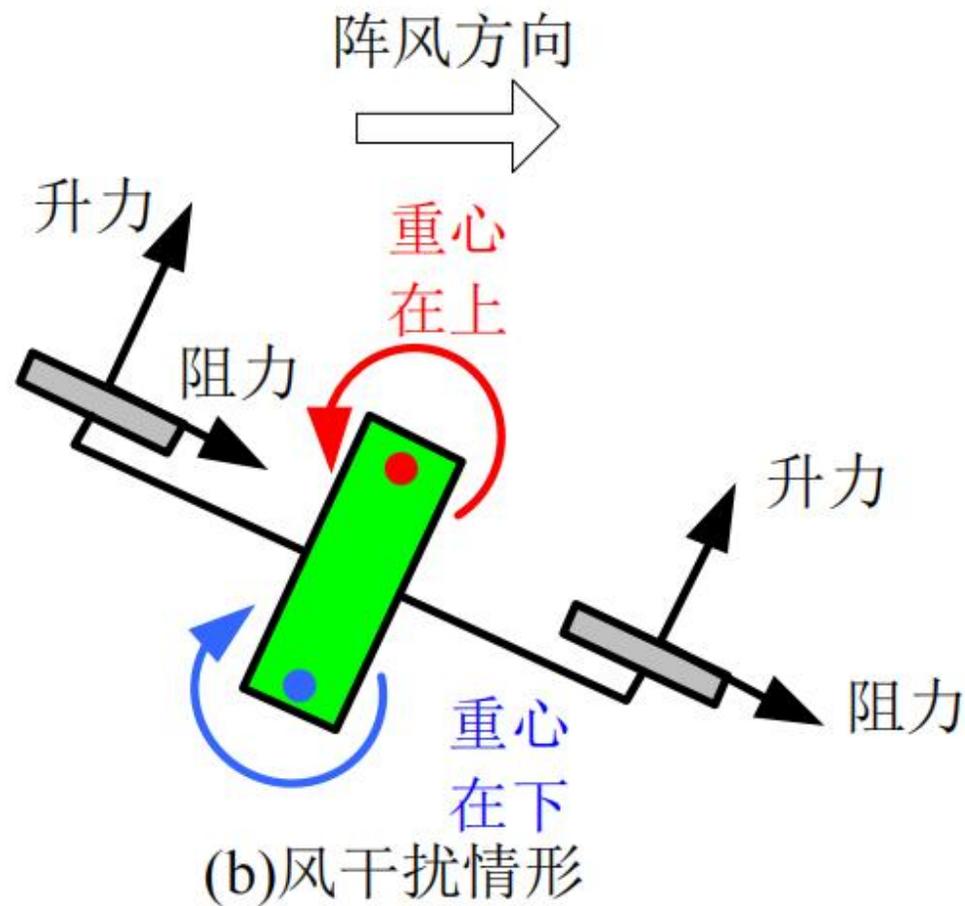


(a) 飞行器前飞情形

布局 重心位置

(2) 多旋翼风干扰情形

- 当阵风吹来，因为螺旋桨的柔性，诱导的来流会在产生阻力。
- 如果多旋翼重心在下，那么阻力形成的力矩会促使多旋翼俯仰角朝发散的方向发展，直至翻转。
- 若多旋翼重心在上，那么阻力形成的力矩会促使多旋翼俯仰超0度方向发展。因此，当多旋翼受到外界风干扰时，重心在桨盘平面的上方可以抑制扰动。



布局 重心位置

(3) 结论

- 无论重心在桨盘平面的上方或下方都不能使多旋翼稳定。
- 需要通过反馈控制将多旋翼平衡。然而，如果重心在桨盘平面很靠上的位置，会使多旋翼某个运动模态很不稳定。因此，实际中建议将重心配置在飞行器桨盘周围，可以稍微靠下。这样控制器控制起来更容易些。所以目前市面上大部份上重心的都是“大型”航拍穿越机，他们的飞手更容易克服操作上的困难。

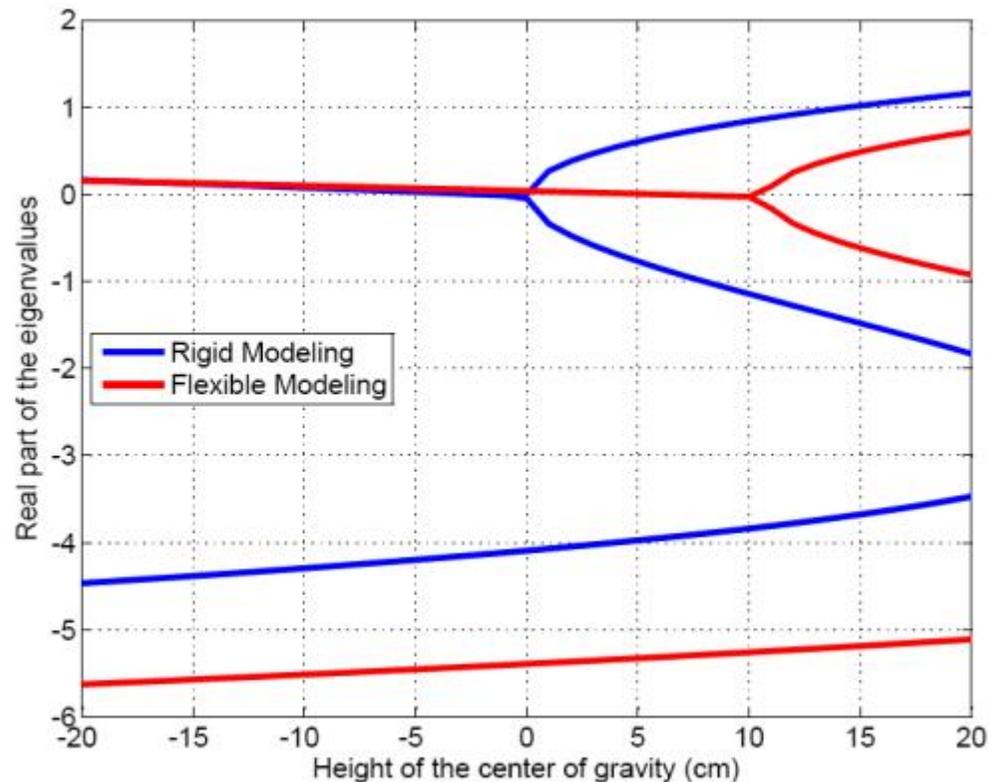


图 重心高度与稳定性的关系[3, Fig.7]

布局-飞控安装位置



飞控安装位置

理想位置应在多旋翼的重心。若飞控离飞行器中心较远，由于存在离心加速度和切向加速度，将会引起加速度计的测量误差，即“杆臂效应”。

标准安装方位

工业飞控一般都会有白色箭头标定正方向，安装飞控时使白色箭头直接指向飞行器的正前方。安装时，飞控应尽量被安置于离飞行器的水平和竖直重心较近的地方。一般情况下离飞行器中心就几厘米以内，并且与电机水平。

气动布局

● 气动布局

对外形进行设计主要是为了降低飞行时的阻力。按其产生的原因不同可分为

- (1) 摩擦阻力
- (2) 压差阻力
- (3) 诱导阻力
- (4) 干扰阻力。要减少该阻力，需要妥善考虑和安排各部件之间的相对位置关系，部件连接处尽量圆滑过渡，减少漩涡产生。

● 压差阻力

它与物体的迎风面积有很大关系，迎风面积越大，压差阻力也越大。物体的形状也对压差阻力影响很大。如图所示的三个物体，平板的压差阻力最大，球体次之，而流线体的最小，就压差阻力而言可以是平板压差阻力的1/20。

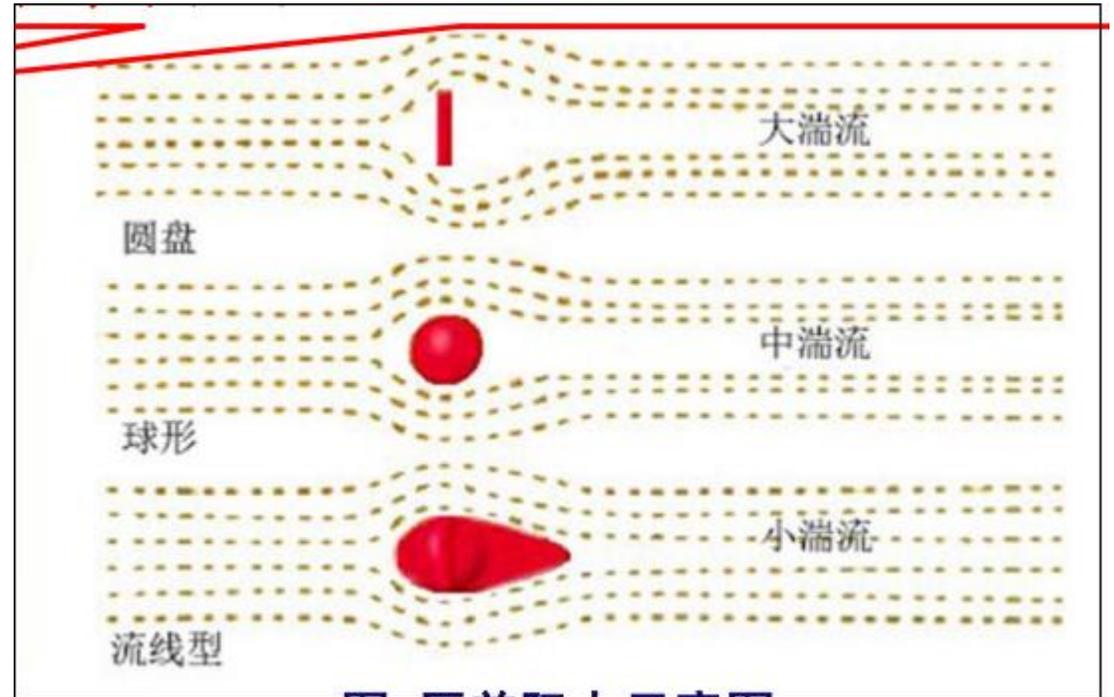


图 压差阻力示意图

气动布局

• 建议:

- (1) 需要考虑多旋翼前飞时的倾角, 减少最大迎风面积。
- (2) 并设计流线型机身
- (3) 考虑和安排各部件之间的相对位置关系, 部件连接处尽量圆滑过渡, 飞机表面也要尽量光滑
- (4) 通过CFD仿真计算阻力系数, 不断优化



(a) 大疆悟



(b) 极飞极侠

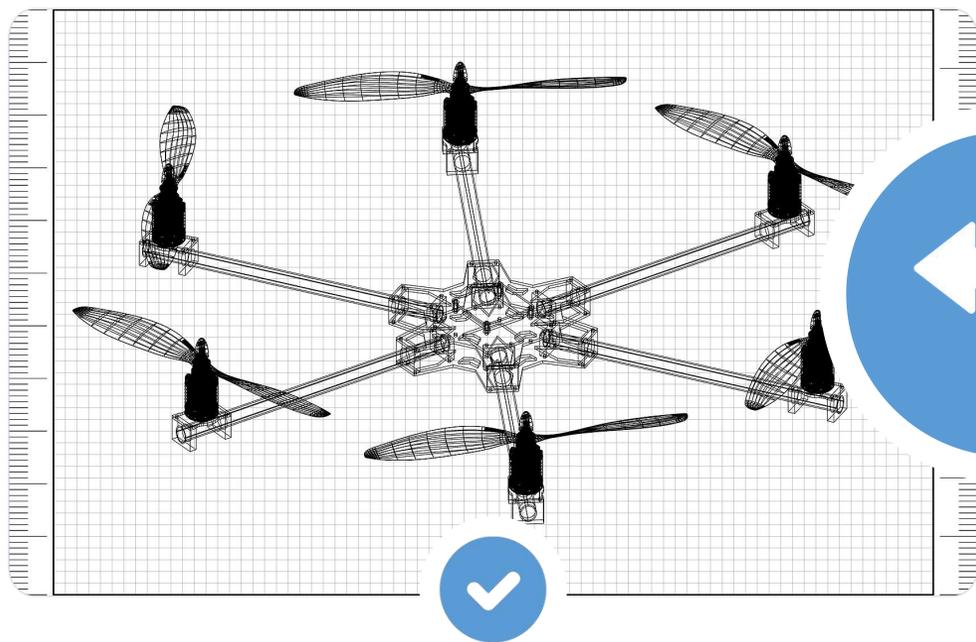


(c) AR.Drone

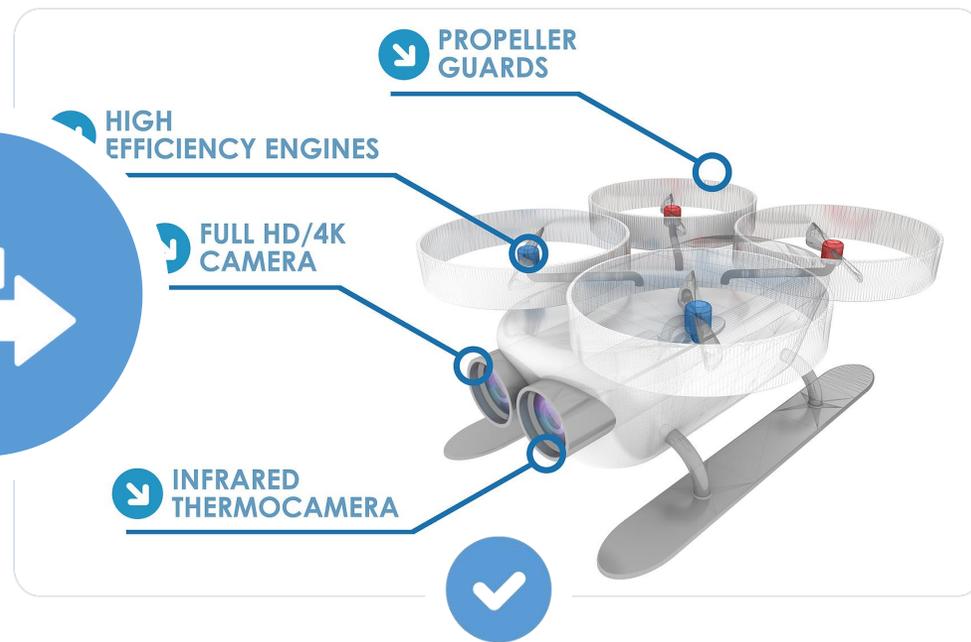
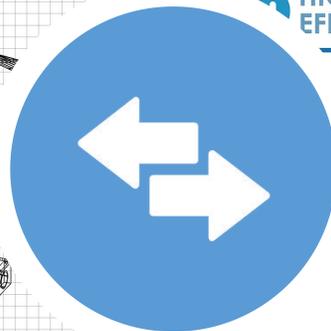


(d) DHL送货四旋翼

结构设计两大关键核心



各部件的减振



各部件的减噪

结构设计 独立课程



性能 基础简版



关键性能参数

1

升限

无人机能达到的最大平飞高度。分理论升限和实用升限。

2

航程

在预定条件下，耗尽可用能源所能飞行的水平距离。

3

续航时间

在预定条件下，耗尽可用能源所能持续飞行的时间。是多旋翼的关键指标。

4

最大平飞速度

在一定高度下，无人机可达到的最大水平飞行速度。

5

巡航速度

执行任务时最经济、最常用的速度。

6

载重能力

安全携带的最大任务载荷重量。

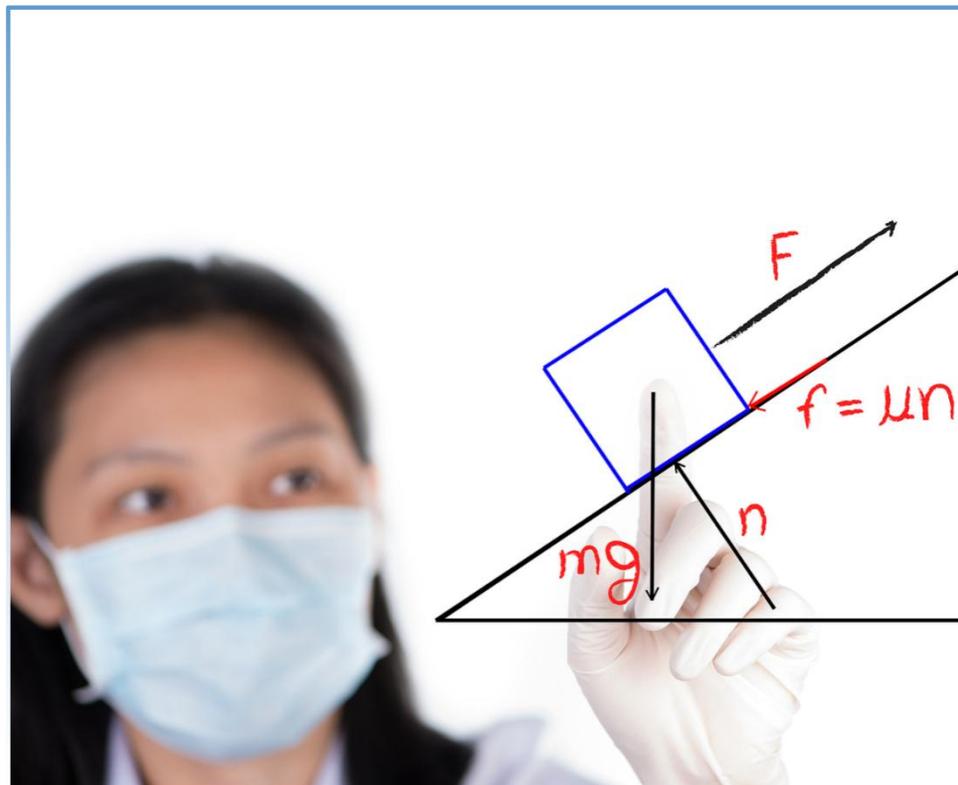
性能参数计算基础



升力计算：

公式： $L = \frac{1}{2}C_L\rho V^2S$

应用： 悬停时，总升力 = 无人机总重； 平飞时，升力 = 重力垂直分力。



需用功率与续航时间估算：



核心公式： $T = \frac{E \cdot \eta}{P}$

T (续航时间)： 单位： 小时 (h)

E (电池能量)： 单位： 瓦时 (Wh)。 $E = \text{电池电压} (V) \times \text{电池容量} (Ah)$

P (平均功率)： 单位： 瓦 (W)。 悬停时约等于悬停功率。

η (放电效率)： 通常取0.8-0.9， 考虑电池和电调损失。

举例： 电池为6S (22.2V)、10000mAh (10Ah)， 悬停功率为500W， 效率取0.85。

- $E = 22.2V \times 10Ah = 222Wh$
- $T = \frac{222Wh \times 0.85}{500W} \approx 0.377h \approx 22.6\text{分钟}$



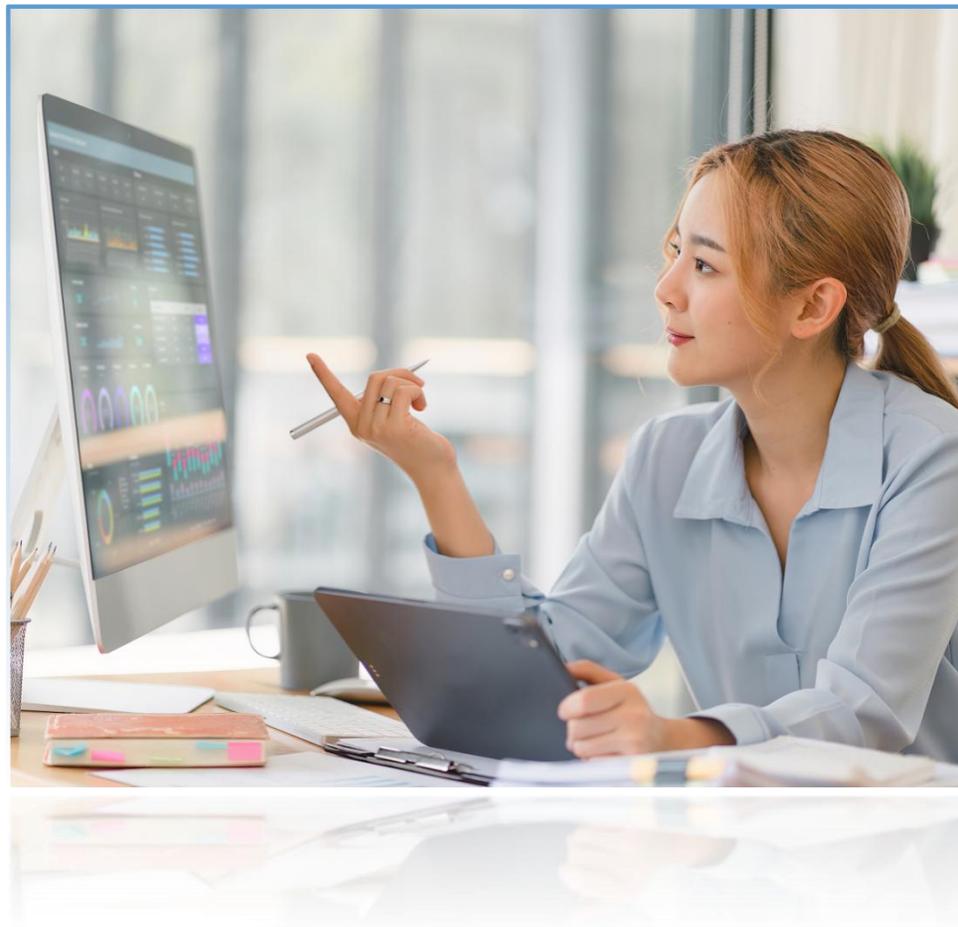
性能图表解读



性能图表解读：

续航时间-载重关系图： 通常呈下降曲线，载重越大，续航越短。

升力-转速关系图： 通常呈上升曲线，转速越高，升力越大。



结构、布局与性能的关联分析



机翼展弦比:

大展弦比: 诱导阻力小, 升阻比高, 利于长航时巡航 (如 “全球鹰”), 但结构强度挑战大, 机动性差。

小展弦比: 波阻小, 适合高速飞行 (如战斗机), 结构强度高, 机动性好, 但诱导阻力大。

材料与重量: 采用轻质高强材料 (如碳纤维) 可有效降低结构重量, 提升载重和续航性能。

气动外形: 流线型机身、翼身融合等设计能减小阻力, 直接提升航程和航时。



复习与思考题

思考

01

对比分析常规布局与飞翼布局固定翼无人机在稳定性、操纵性和隐身性上的差异。

02

某四旋翼无人机总重（含载荷）为5kg，使用6S 20000mAh 电池，实测其悬停总功率为800W。请估算其悬停续航时间（放电效率按0.85计算）。

03

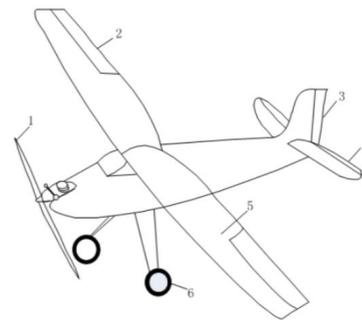
为什么高空长航时（HALE）无人机普遍采用大展弦比机翼？

参考资料

1. 《无人机驾驶员航空知识手册》
2. 《飞机飞行力学》
3. 《无人机系统导论》

06

通信链路规划与任务规划



课程学习目标



掌握链路原理

深入理解遥控、图传、数传等通信链路的组成、工作机制与关键性能指标。



具备排障能力

能够分析常见通信故障的原因，并掌握基本的排查与解决措施。



熟练任务规划

掌握使用地面站软件进行航点设置、航线规划与任务载荷控制的方法。



制定飞行预案

能够根据具体任务需求，制定合理、安全的超视距飞行预案。



通信链路

通信链路

01

指挥与控制 (C&C)

指挥控制数据链路/Command and Control Data Link是指为保障无人机飞行管理，在无人机与其控制器（如遥控器或地面站）之间建立的双向数据通信链路

02

感知和规避 (S&A)

感知和规避/Sense and Avoid是指无人机系统为实现自主飞行安全，用于探测、评估并规避空中及地面碰撞威胁的完整信息感知与决策控制链路。它并非单一通信线路，而是一个集成了传感器、数据处理和决策控制模块的系统功能链。

03

空中交通管制 (ATC)

无人机空中交通管制 (ATC) 是针对无人机飞行活动实施的强制性统一监督、管理与控制体系。其根本目的是防止无人机与航空器、地面障碍物相撞，维持飞行秩序，保证安全。

“

指挥控制数据 链路/C&C



典型场景的C&C

遥控器

向无人机发送指挥与控制指令，控制及修正其飞行，是较为典型的**上行链路**，重点关注无线电频率及链路稳定性和可持续性

地面站

典型**上下行数据传输链路**：地面站向飞机发送规划与控制指令，飞机将自身的飞行状态和设备状态等数据发回地面控制站

电子桩

典型**下行链路**：仅向地面站或者模拟系统发送飞行器位置、高度、速度等信息，常见集成式和外置载荷式

图传

典型**下行链路**：也可视为载荷通信链路，将图像信息通过该链路传回地面控制终端，为控制决策提供依据

名称	传输方向	常用频率
遥控器	上行	40MHz、72MHz、2.4GHz
地面站	上下行	(亚太)433MHz/(欧美)868MHz/(国内)915MHz
电子桩	下行	GPS-L5频段1176.45 MHz、北斗-B3频段1268.52 MHz
图传	下行	2.4GHz/5.82.4GHz/433-440MHz



线缆长度/Cable length:	20m
3. 遥控器/Remote controller	
a. 型别/Model	DJI RC PLUS
b. 控制模式/Control mode	一机一控、一机双控/Single control in one aircraft, Dual control in one aircraft
c. 最小飞行机组/Minimum Flight Crew	1 人/机 (1 pilot/UAS)
4. 指挥控制数据链路/Command and Control Data Link	
a. 视距链路/Direct data link	
a) 工作频率/Operating frequency:	2.400-2.4835 GHz 5.725-5.850 GHz
b) 有效作用距离 (无干扰、无阻挡) /ETR (w/o interference and blockage):	FCC: 20 km CE/SRRC/MIC: 8 km
b. 4G	
a) 网络制式/Network Mode:	FDD/TDD/WCDMA/GSM
5. 使用限制/Operational Limitations	

大疆FC30 E2MTR-30A TC数据单

C2链路支撑设备

- **视距链路点对点小功率短行程**

机载小功率芯片/天线，常见的训练机用的遥控器、数传设备大部份为5V1A

- **大功率远行程&基础通信设备**

大功率无线电装置/天线（军用较多）和常见的运营商提供的网络



指挥、控制与通信 (C3) Communications



通信为核心的设计哲学：与更基础的指挥控制系统相比，C3系统明确将高效、可靠的通信网络视为实现有效指挥控制的前提，而非仅仅是辅助工具。通信分系统的质量直接决定了整个系统的可靠性

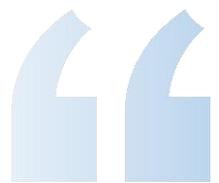


支持双向信息流：C3链路保障了完整的指挥闭环。它不仅传递从指挥中心到作战单元的控制指令（下行链路），也负责将前线传感器、作战平台的状态和情报信息（如无人机飞行状态、侦察影像）实时回传（上行链路），形成决策-行动-反馈的循环



强调抗干扰与生存能力：为应对现代电子战环境，C3链路通常采用多重通信手段、迂回线路以及抗干扰设计，以确保在部分链路受损时系统仍能运转。例如，在导弹防御系统中，关键通信环节会部署备份地面站以缓解气象等因素的干扰

维度	C2	C3	C4ISR
核心要素	指挥、控制	指挥、控制、通信	在C3基础上增加情报、监视、侦察等
功能重点	决策生成与行动协调	在决策协调基础上，极度依赖通信网络实现信息实时共享与跨单元互操作	实现从情报获取到打击评估的全流程、网络化融合
系统复杂度	相对基础	更为复杂和集成，其架构更庞大	极其复杂，是多领域、多源信息的融合体
典型应用	通用指挥场景，部分自动化决策支持	复杂战场、多种联合作战、导弹防御等对实时通信要求极高的场景	网络中心战、全域协同作战



感知和规避 链路(S&A)





无人机“感知和规避（S&A）链路”

指无人机系统为实现自主飞行安全，用于探测、评估并规避空中及地面碰撞威胁的完整信息感知与决策控制链路。它并非单一通信线路，而是一个集成了传感器、数据处理和决策控制模块的系统功能链。

其核心目标是替代飞行员的“看见-规避”能力，确保无人机能在共享空域中安全运行。根据国际民航组织及各国航空管理机构的定义，该能力是无人机进入融合空域飞行的必备条件。



核心功能与流程

S&A链路的工作遵循一个标准的“感知-决策-行动”闭环，主要包含四个关键功能环节

目标检测与跟踪

利用机载或外部传感器，持续监视周围空域，识别并跟踪潜在的威胁目标，如其他飞行器、建筑物、地形等

碰撞威胁估计

基于目标的跟踪信息（如距离、速度、航向），评估其与本机的相对运动关系，判断是否存在碰撞风险及威胁等级

规避路径规划

当判定存在碰撞威胁时，系统（或操作员）需生成新的、安全的飞行路径。这涉及复杂的航路重规划算法，如人工势场法、AI算法、蚁群算法等

规避机动控制

最终执行环节，由飞行控制系统根据规划出的新路径，计算出具体的控制指令（如调整姿态、速度），驱动无人机完成规避动作

实现方式

合作式感知系统

广播式自动相关监视系统 (ADS-B)：飞行器主动向外广播自身的精确位置、速度、高度等信息，其他装备ADS-B IN功能的接收机可获取这些信息以实现相互感知。

交通警戒与防撞系统 (TCAS)：通过主动询问和接收他机应答信号来测距测向，但受限于设备尺寸和安装要求，在无人机上应用有一定局限。

非合作式感知系统

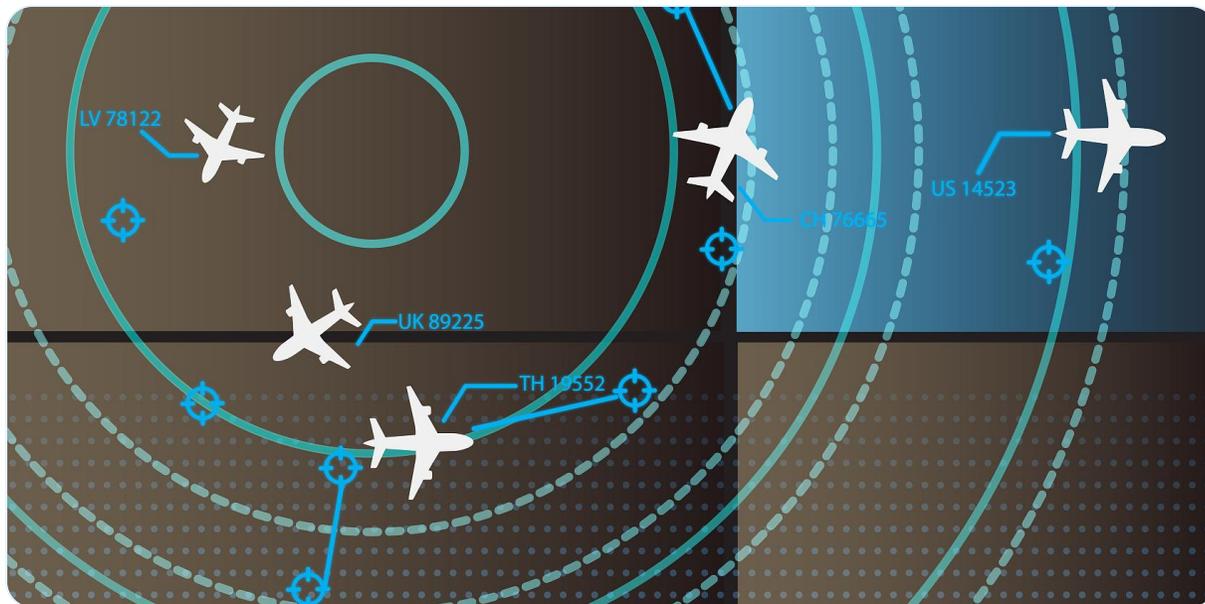
不依赖他机配合，完全依靠本机传感器独立探测。常用设备包括视觉传感器（摄像头）、雷达、激光雷达（LiDAR）、红外传感器等。这类系统能检测未装备协同设备的“非合作目标”，但受天气、探测距离等因素影响更大。

“Sense and Avoid”

总而言之，无人机的“感知和规避（S&A）链路”是一个为了保障飞行安全而设计的、功能完整的智能系统。它通过合作与非合作相结合的感知手段获取环境信息，经过实时的威胁评估与智能决策，最终驱动无人机执行自动化的规避机动，是无人机实现超视距飞行和空域融合的关键技术支柱

“

空中交通管制 (ATC)



空中交通管制 (ATC)

无人机ATC的实现方式与传统有人机存在显著差异。由于无人机没有机上飞行员，传统基于无线电通话的空中交通服务（ATS）体系难以直接适用。因此，现代无人机ATC高度依赖于**基于互联网的无人驾驶航空器航行服务系统**，例如UOM平台。

监管强度具有层次性。在远离机场的低空空域运行的小型无人机，可能没有ATC提供实时指挥，其运行者主要依据批准的飞行规则自行保证安全



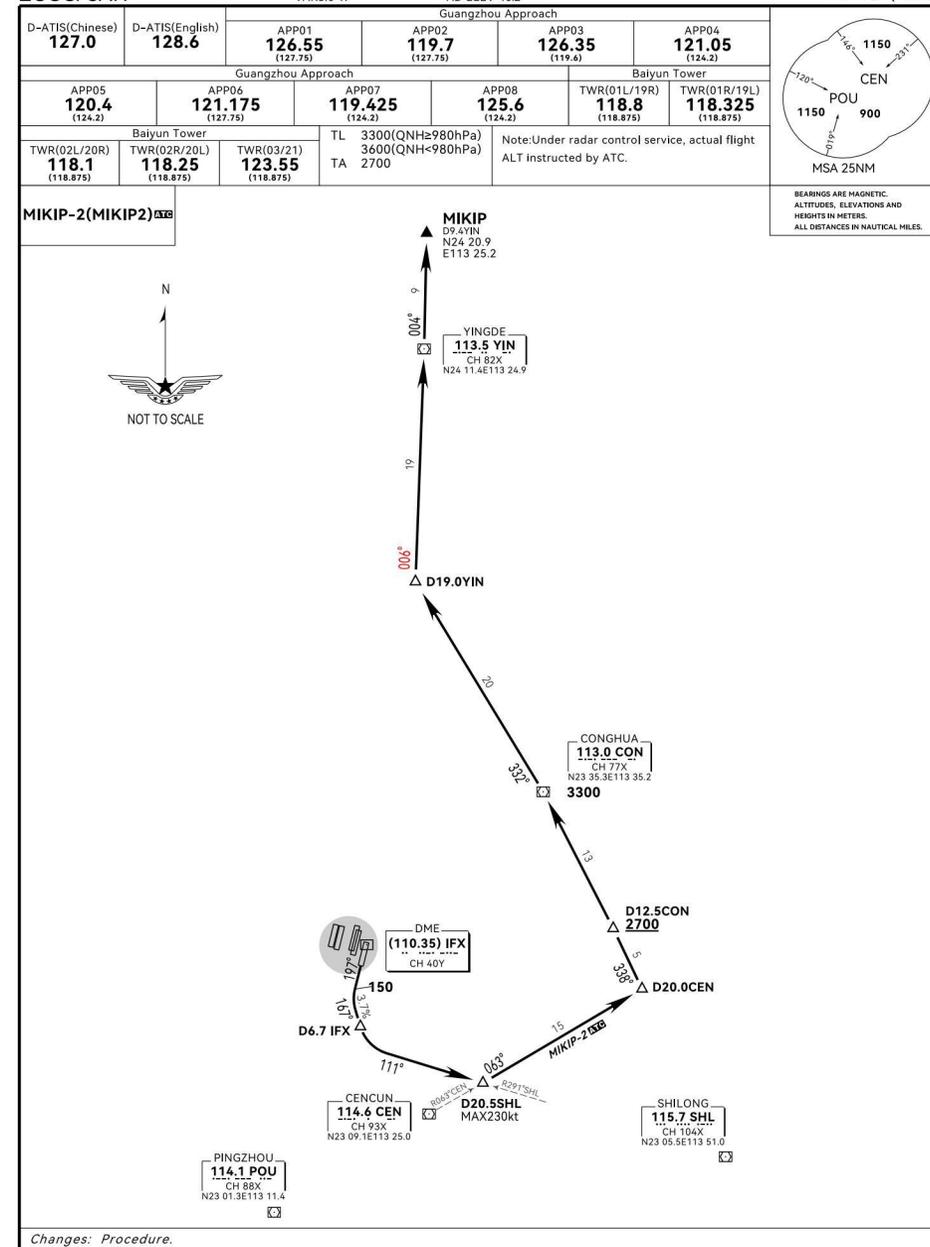
标准仪表离场程序-SID

请注意最新广州机场离场程序表中的各项
ATC&ATS的区分与频率,如自动情报服务
(ATIS)、进近 (APP)、塔台 (TWR)

STANDARD DEPARTURE
CHART-INSTRUMENT
ZGGG/CAN

3V-12

GUANGZHOU/Baiyun
RWY21(MIKIP)



航空管制与服务核心选修课程

飞行报备与管制通联
专业版

AIP详解
NO.1

无线电基础
简版

1.5GB

Eaip-Full Package

4项

4大类ATS详解

22项

无线电基础知识

6项

4+2全覆盖飞行计划模版

76个

76个值班室的飞行报备流程联系方式

3项

3个基础概念详解



“

任务规划

任务规划

无人机任务规划 (Mission Planning) 是指根据无人机需要完成的任务、无人机的数量以及携带任务载荷的类型，对无人机制定飞行路线并进行任务分配。任务规划的主要目标是依据地形信息和执行任务的环境条件信息，综合考虑无人机的性能、到达时间、耗能、威胁以及飞行区域等约束条件，为无人机规划出一条或多条自出发点到目标点的最优或次优航迹，保证无人机高效、圆满地完成飞行任务，并安全返回基地。



通用地面站软件功能



地图加载显示

加载在线/离线地图（卫星图、地形图）。



飞行监控

实时显示无人机位置、姿态、航线、设备状态等。



航线规划

航点模式：设置一系列航点，并可定义每个航点的动作（如悬停、拍照、转向方式）。
区域模式：划定多边形区域，自动生成覆盖该区域的“之”字形航线（用于测绘、巡检）。



参数设置

设置飞行高度、速度、航点触发动作、返航点、失控行为等。



数据管理

记录、回放和分析飞行数据

航线规划要素



安全高度

避开航线上的所有障碍物（建筑、树木、电线），并预留安全余量。
利用高程数据（DEM）



空域信息

确认规划空域是否合法、可用，避开禁飞区、限飞区、其他飞行活动区



气象条件

考虑任务时段的风向、风速、能见度，逆风飞行需预留更多电量。



应急程序

预设应急返航点（如信号丢失点）、紧急降落区。



载荷任务设置

航测： 设定航向/旁向重叠率、相机曝光间隔、云台角度。
巡检： 在关键设备点设置悬停和变焦动作。

飞行预案制定



人员职责

明确任务机长、观测员、地面站操作员等岗位职责。



任务目标

明确本次飞行的具体目的。



飞行区域

明确边界坐标和海拔高度。



航线描述

附上航线图，说明关键航点。



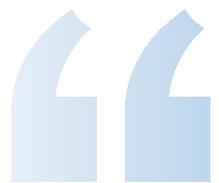
通信配置

主用和备用通信频率/信道。

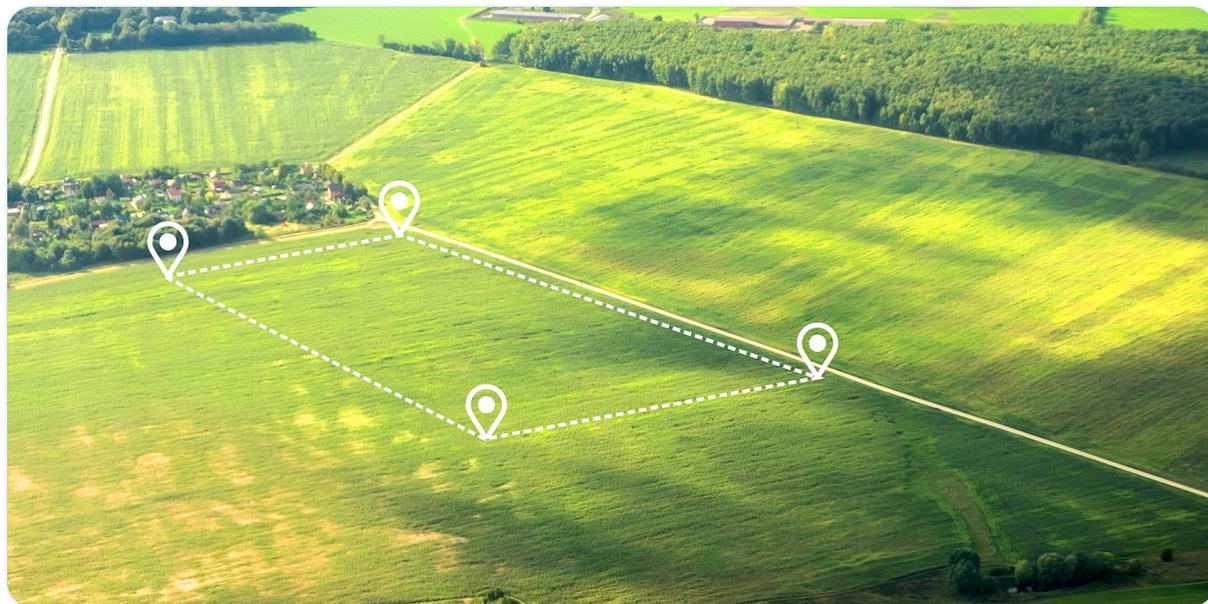


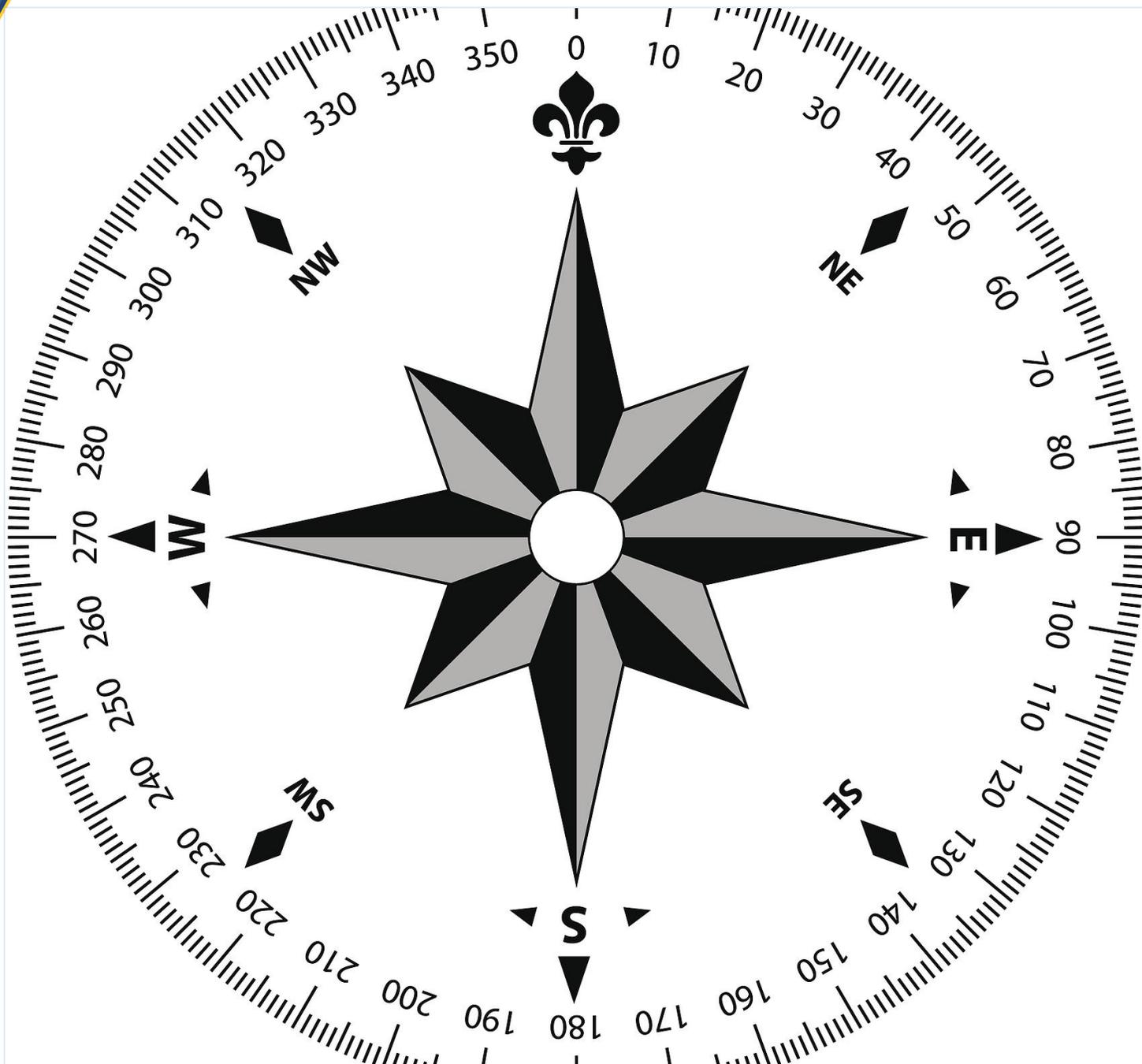
应急程序

针对通信中断、动力不足、天气突变、飞控故障等情况的处置流程。



航线规划 航点模式





导航坐标系 度量与正方向

机体坐标系

原点在无人机重心，X轴（横轴）指向机头，Y轴（纵轴）指向右侧，Z轴（竖轴）指向下方（或上方，依定义而定），构成右手直角坐标系

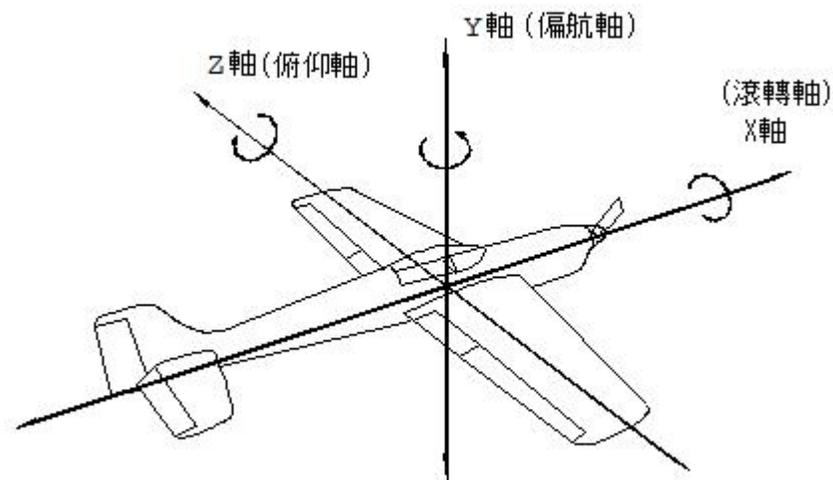
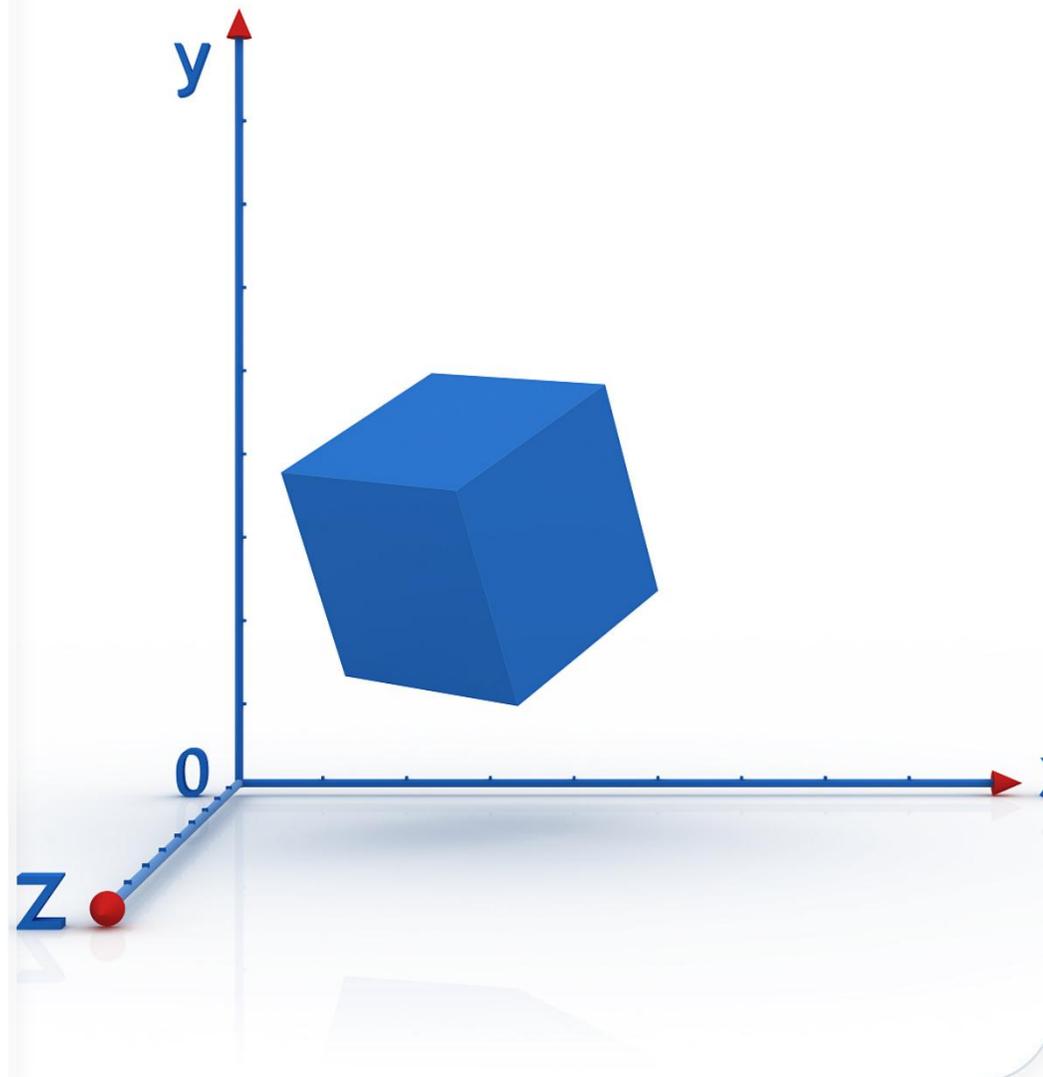


圖1-2

地理坐标系 导航坐标系

——

原点在无人机所在点，X轴指向地理东，Y轴指向地理北，Z轴指向天（或地），同样构成右手直角坐标系



航向角

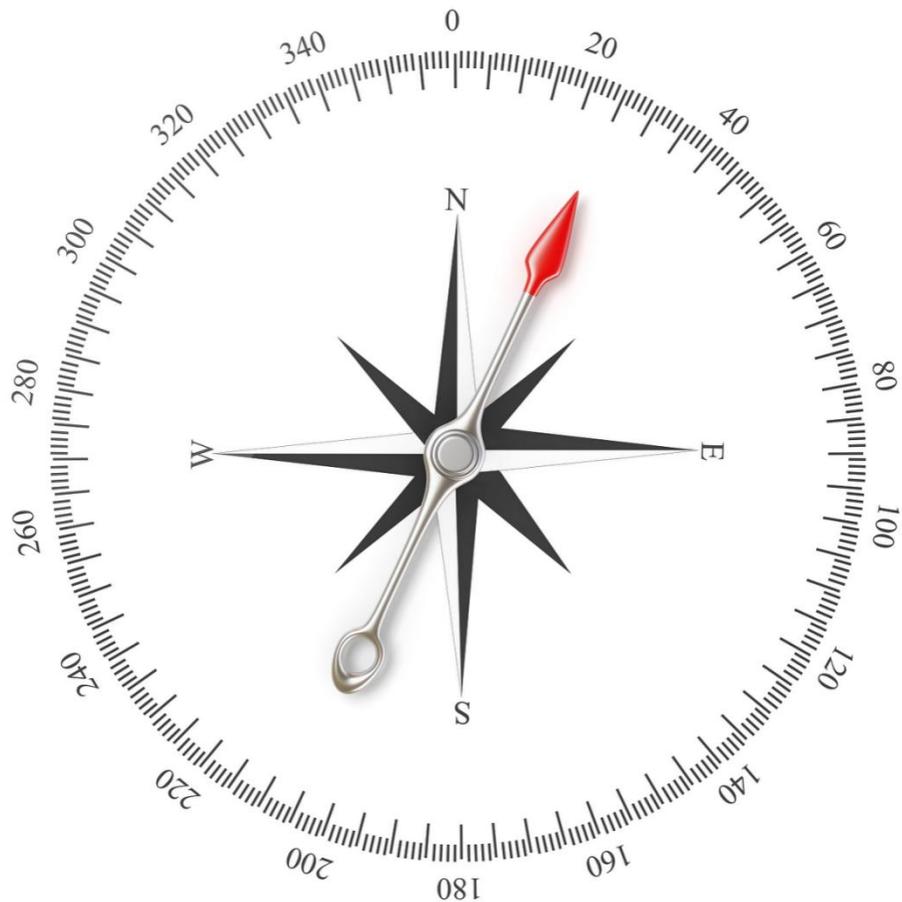
航向角，通俗地说，就是无人机机头所指的方向是描述飞行器（包括无人机）姿态的三个欧拉角之一，它特指飞行器机头方向在水平面上的投影与地理北向之间的夹角。



度量与正方向

航向角的度量以地理北向为基准 (0°)，顺时针旋转为正方向。

- 0° 或 360° : 正北
- 90° : 正东
- 180° : 正南
- 270° : 正西 5



Hello world !

01

一个基准点

让我们先确认一个基准点或者起降点

中间航点

让我们朝东南方向
(135度) 50米处一条线

02

03

直角转弯

让我们向左转个90度的弯，飞向45度的东北角50米处

04

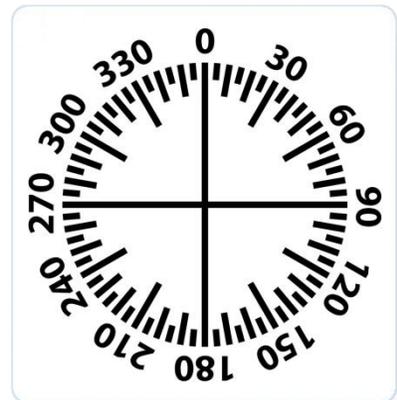
右偏15度

让我们右偏15度再飞50米

05

航向99度

航向99度，最后50米

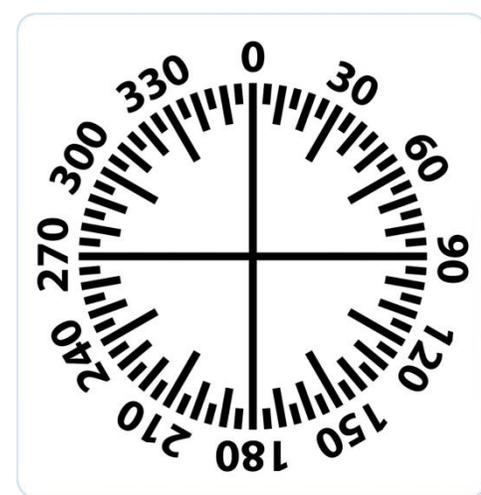


Hello world !

01

第一条航线

航向 360
距离100米



正方向-北

思考一下该图为什么
正方向是北

Hello world !

01

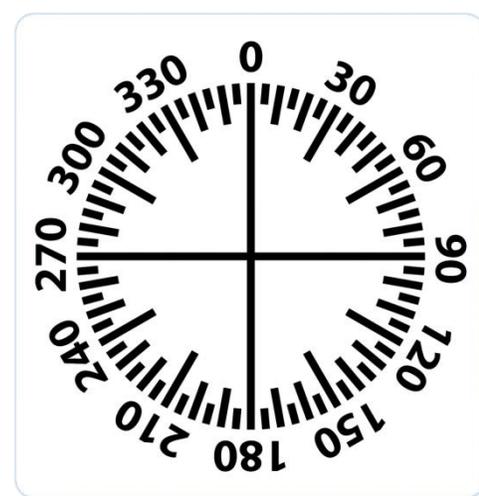
第一条航线

航线 360
距离100米



2-3的航向角计算

角2为90度直角
请思考2-3的航向角
计算方法



Hello world !

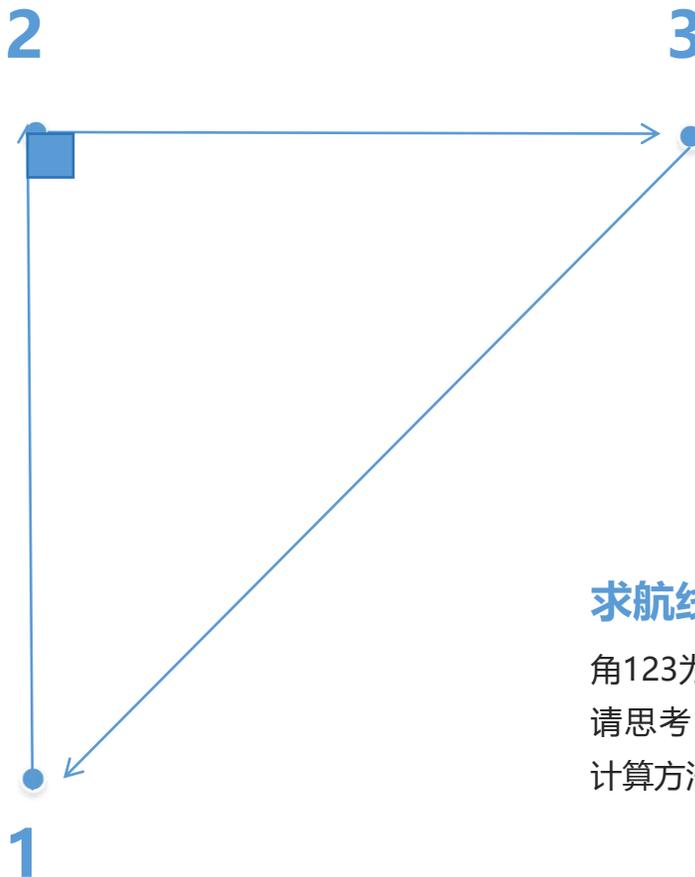
01

求3-1的航向

航线1-2=2-3=100米

1-2航向0/360度

角2=90度



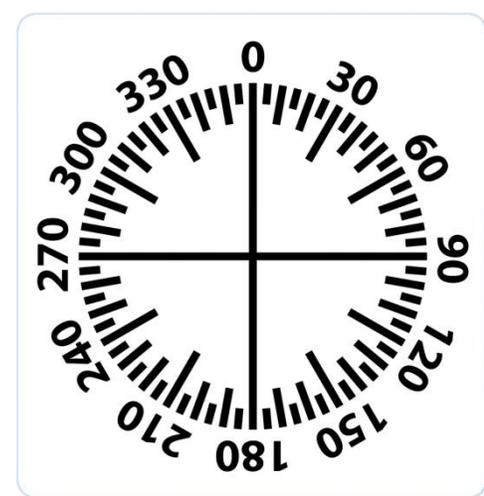
02

求航线3-1的长度

角123为90度直角

请思考2-3的航向角

计算方法







顺加逆减



顺加逆减

“顺加逆减”的几何本质

01

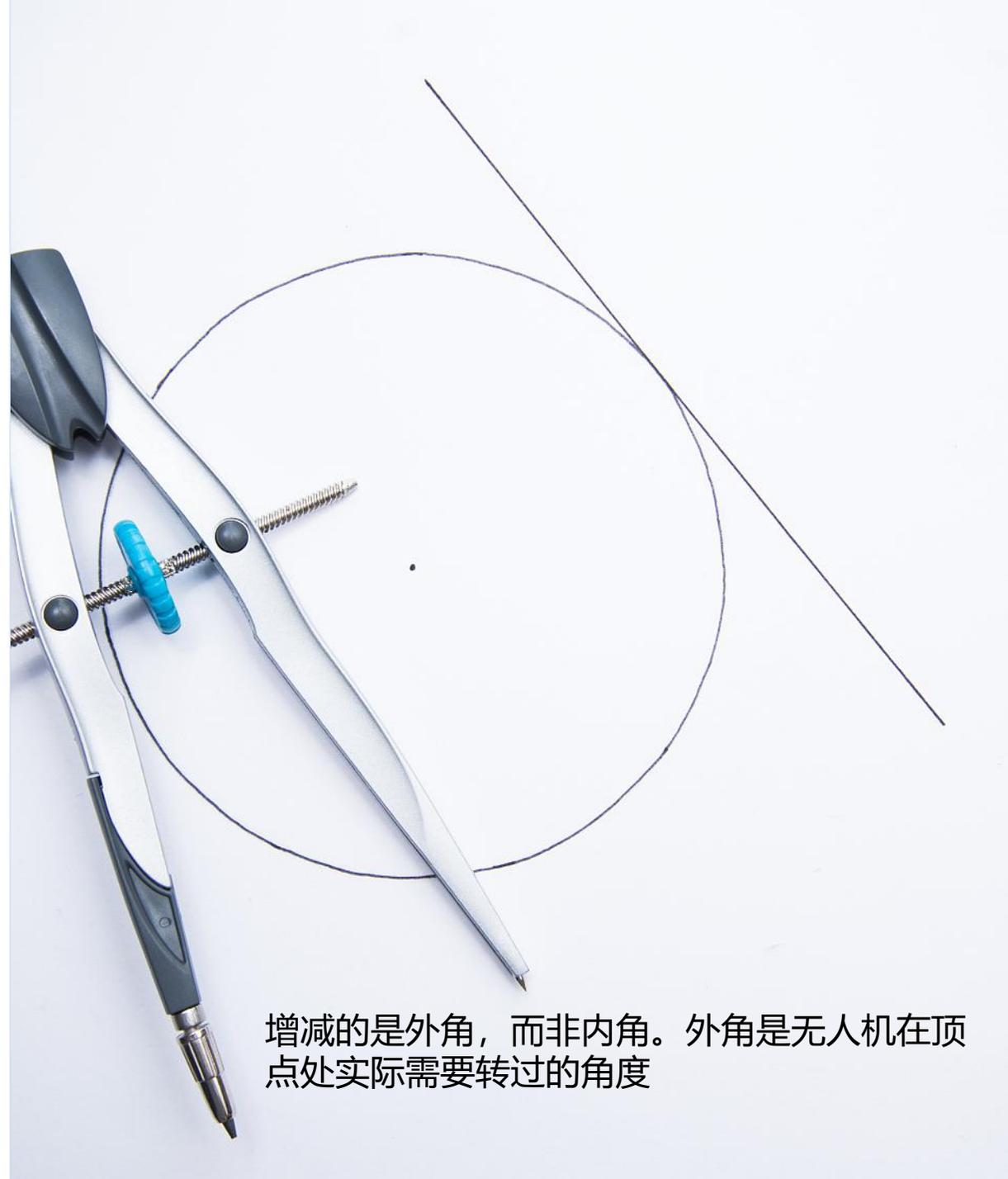
“顺加”

当无人机顺时针绕多边形飞行时，每飞完一条边，其航向需要向右转动一个外角才能对准下一条边。这个转动导致航向角数值增加。增加的量正是该多边形的外角度数

02

“逆减”

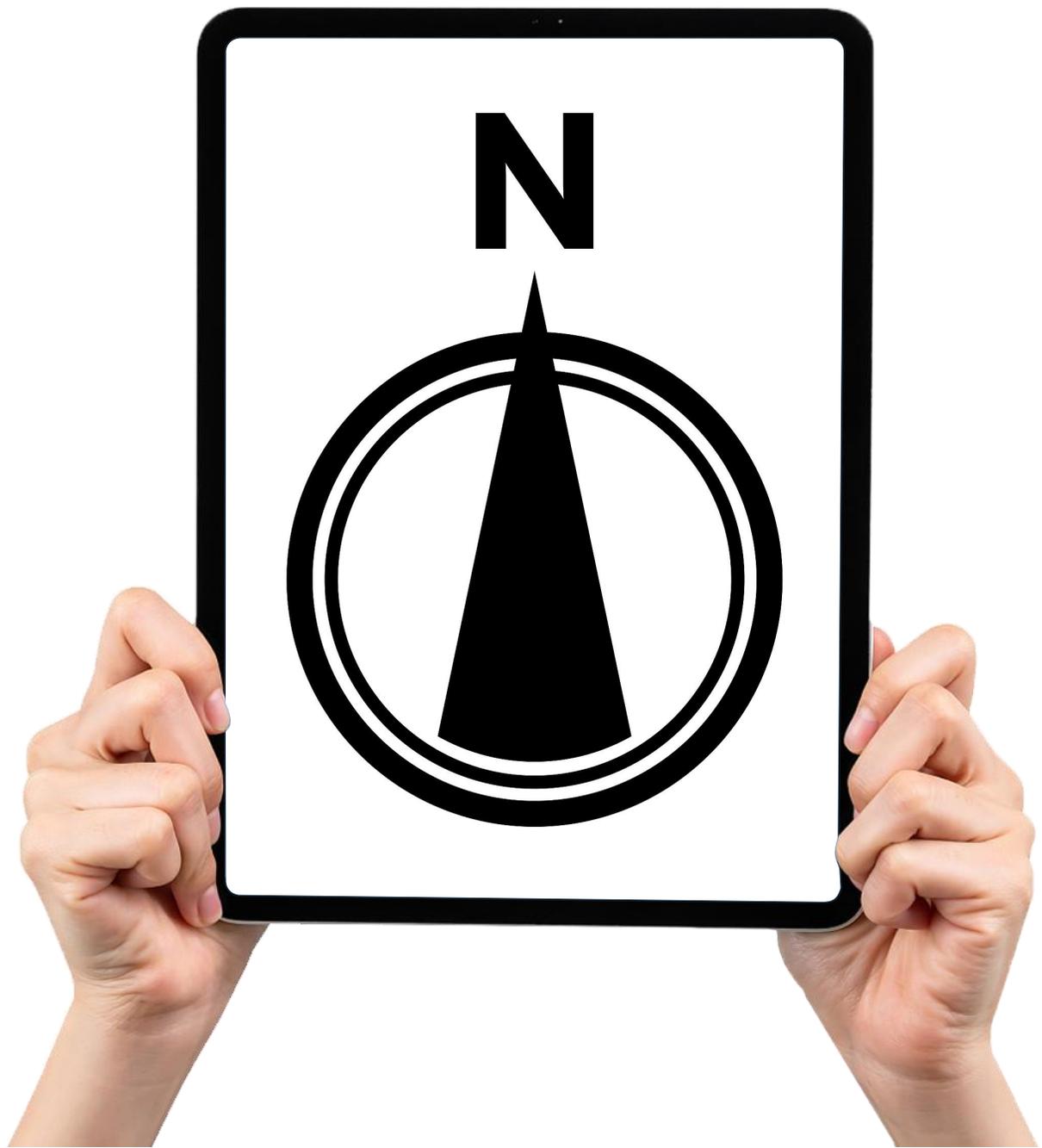
当无人机逆时针飞行时，每飞完一条边，其航向需要向左转动一个外角，这导致航向角数值减少



增减的是外角，而非内角。外角是无人机在顶点处实际需要转过的角度

找不到北? 找北!

- 1.明确标出正北 (N) 方向。航向角定义为从正北方向顺时针旋转至航线方向的角度, 范围 0° - 360° 。这是所有计算的绝对基准。
- 2.如果图形正方向不是正北 (N) 方向, 请先确定正方向度数。
- 3.图形正方向可以帮助理解与检查核对





基础图形-三角形 (默认正北)

01

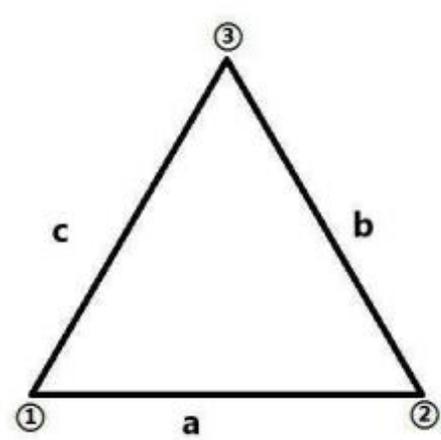
“内角”

等边三角形的每个内角都为固定的 60° ，所有三角形的内角和都是 180°

02

“边长”

等边三角形的三条边的边长相等



☆ 起飞点 (返航点)

航线要求:

(一) 任务航线为等边三角边, 起飞点前方规划如图任务航线 (起飞点距离航线距离不作要求)。

(二) 航线边长 50 米, 航线相对地面高度 40 米, 水平速度 5 m/s, 垂直速度 2 m/s, 转弯模式为停止转弯, 各点停留 10 秒。

(三) 航线闭合不循环, ②点开始执行。

基础图形-三角形 (默认正北)

01

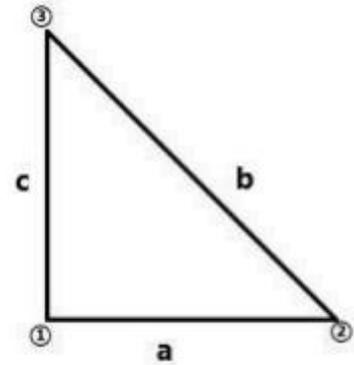
“内角”

等腰直角三角形由一个 90° 的直角和两个 45° 锐角组成，所有三角形的内角和都是 180°

02

“边长”

两腰边长相等，斜边为腰长的1.414倍



☆ 起飞点 (返航点)



航线要求:

- (一) 任务航线为等腰直角三角边，起飞点前方规划如图任务航线（起飞点距离航线距离不作要求）。
- (二) 航线边长 30 米，航线相对地面高度 50 米，水平速度 6 m/s，垂直速度 1.5 m/s，转弯模式为停止转弯，各点停留 8 秒。
- (三) 航线闭合循环，①点开始执行。

在实际计算中，以下特殊角的值也常被视为基础“公式”进行记忆和应用

角度	0°	30°	45°	60°	90°
sin	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1
cos	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
tan	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	$\sqrt{3}$	不存在

几何推导：

45°的值：来源于等腰直角三角形。设两直角边为1，则斜边为 $\sqrt{2}$ ，可死记 1: 1: 1.414

30°和60°的值：来源于等边三角形。将其沿高线分割，可得到一个30°-60°-90°的直角三角形。设最短边（30°对边）为1，则斜边为2，另一条直角边（60°对边）为 $\sqrt{3}$ ，可记固定比例 1: 2: 1.732



常用特殊角 三角函数值

基础图形-正六角形（默认正北）

01

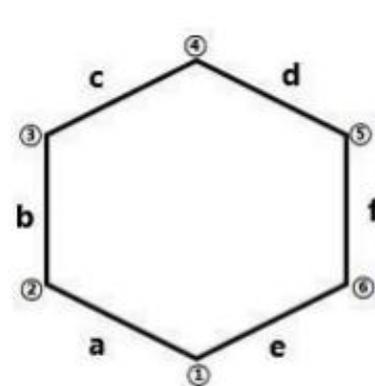
“内外角”

正六边形的内角和为 720° ，由6个 120° 的内角组成
外角和：正六边形的外角和恒为 360° ，每个外角均为 60°

02

“边长”

正六边形的每一条边的边长都相等



☆ 起飞点（返航点）



航线要求：

- （一）任务航线为等边六边形，起飞点前方规划如图任务航线（起飞点距离航线距离不作要求）。
- （二）航线边长 50 米，航线相对地面高度 60 米，水平速度 9 m/s，垂直速度 2 m/s，转弯模式为停止转弯，各点停留 5 秒。
- （三）航线闭合循环，③点开始执行。

基础知识-图形方向

01

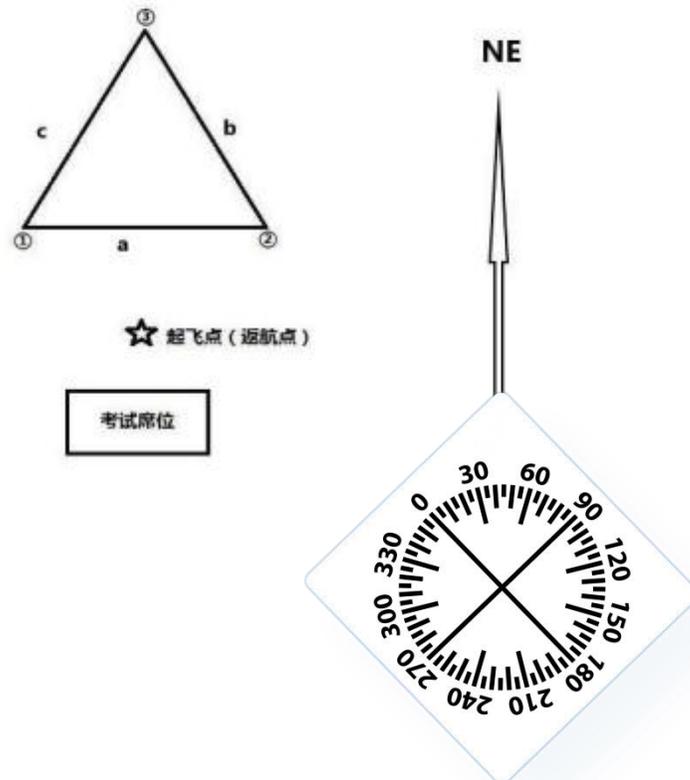
“图形方向”

无论试题的图形方向如何改变，在不熟练的情况下，都可以利用十字坐标快速检验

02

“指示箭头”

注意图形方向的指示箭头方向



航线要求:

(二) 任务航线为等边三角边，起飞点（坐标北纬 23 度 10 分 10.55 秒，东经 113 度 4 分 33.64 秒）箭头正前方 20 米处规划如图任务航线。坐标保留 8 位小数（精确）。

(二) 航线边长 50 米，航线相对地面高度 40 米，水平速度 10 m/s，垂直速度 1.8m/s，转弯模式为停止转弯。③停留 60 秒，机头朝 NW 方向。

(三) 航线闭合不循环，②点开始执行

基础知识-图形方向

01

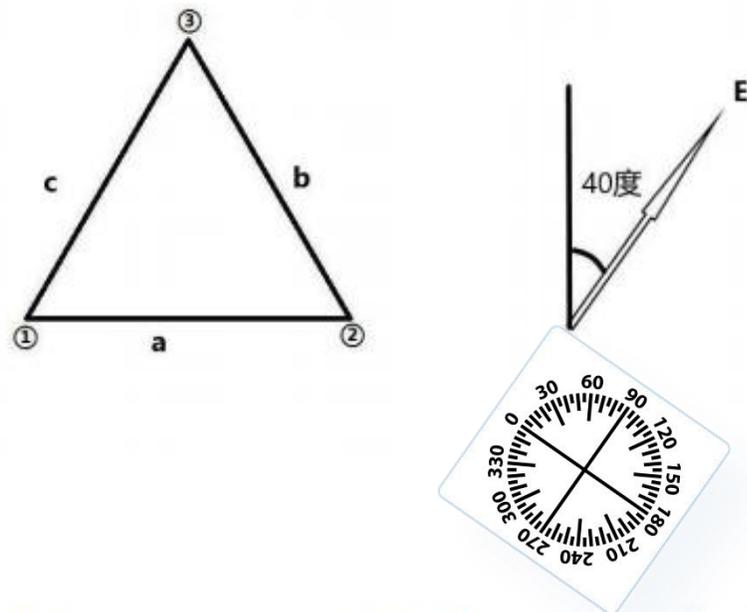
“图形方向”

无论试题的图形方向如何改变，在不熟练的情况下，都可以利用十字坐标快速检验

02

“指示箭头”

注意图形方向的指示箭头方向



航线要求：

（一）任务航线为等边三角边，②点位于起飞点位置（坐标北纬 23 度 16 分 21.63 秒，东经 113 度 15 分 7.55 秒），图形正前方航向为右图所示。

（二）a 航线边长 100 米，航线相对地面高度 50 米，水平速度 6 m/s，垂直速度 1.2m/s，转弯模式为停止转弯。③停留 45 秒，机头朝 NE 方向。

（三）航线闭合不循环，①点开始执行。

基础知识-图形方向

01

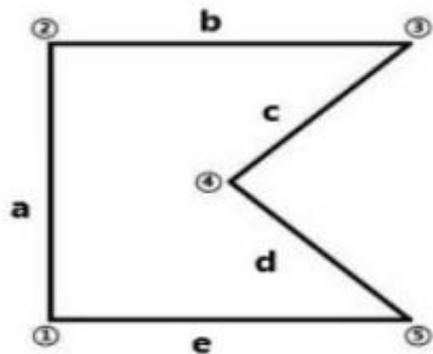
“图形方向”

无论试题的图形方向如何改变，在不熟练的情况下，都可以利用十字坐标快速检验

02

“指示箭头”

注意图形方向的指示箭头方向



航线要求：

（一）任务航线为五边形，②点位于起飞点位置，图形正前方航向为右图所示。

（二）a、e 航线长 50 米，c、d 航线相等（长度不做要求），航线相对地面高度 60 米，水平速度 5 m/s，垂直速度 1.8 m/s，转弯模式为停止转弯。④停留 20 秒，机头朝 E 方向。

（三）航线不循环闭合，0 点开始执行。

基础知识-图形方向

01

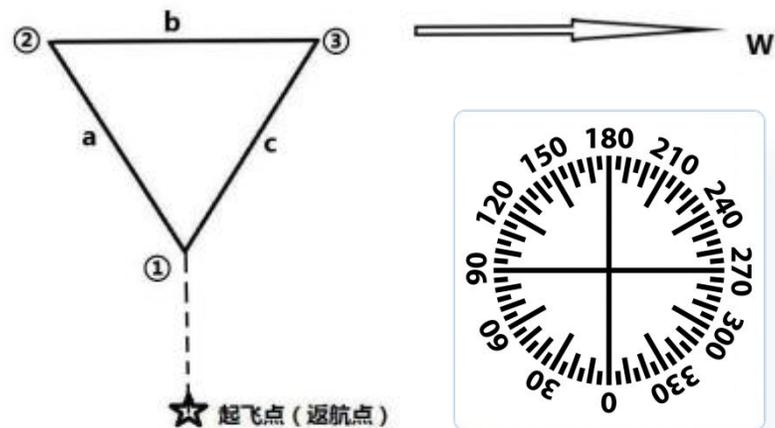
“图形方向”

无论试题的图形方向如何改变，在不熟练的情况下，都可以利用十字坐标快速检验

02

“指示箭头”

注意图形方向的指示箭头方向



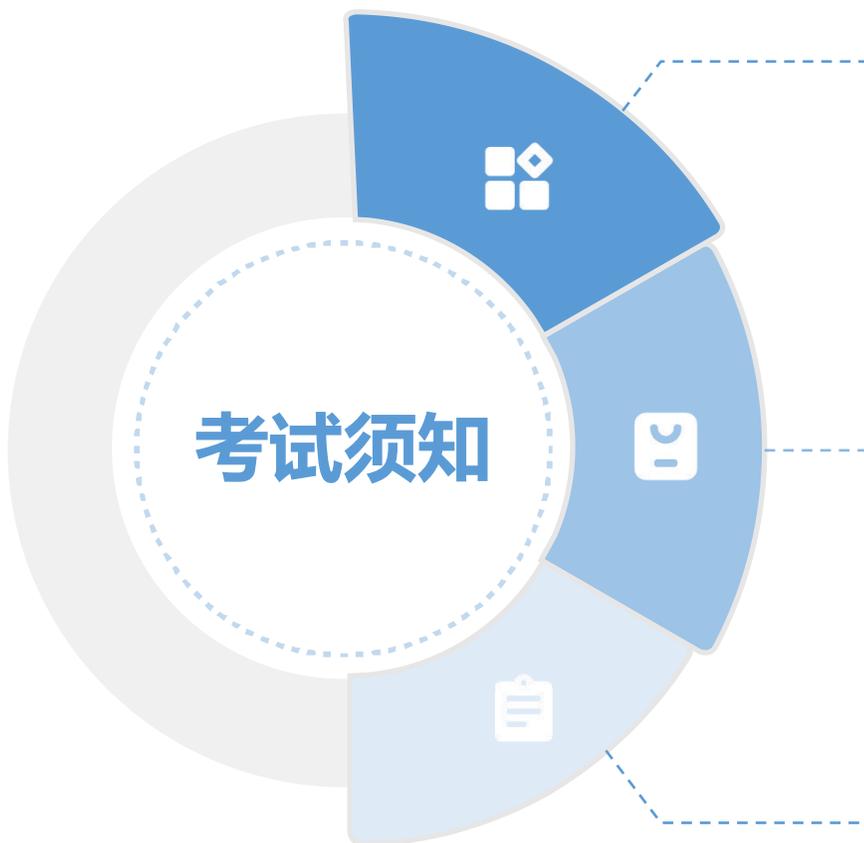
航线要求：

(一) 任务航线为等边三角边，起飞点（坐标北纬 23 度 6 分 54 秒，东经 113 度 7 分 56 秒）到①点距离为 40 米，图形方位根据箭头方向判定。

(二) a 航线边长 100 米，航线相对地面高度 50 米，水平速度 6 m/s，垂直速度 1.2m/s，转弯模式为停止转弯。③停留 45 秒，机头朝 NE 方向。

(三) 航线闭合不循环，①点开始执行。

注意事项



1、正前方与前方的区别

答：正前方位置为起飞点正上方（唯一），如等边三角，一般方向跟底边(a 或者①到②)垂直，最近点一般是 a 或者①到②的中间点。前方范围不唯一，左前方、右前方，和正前方都是前方。

航线运行时间

航线运行时间定义为飞行完该航线所用的飞行时间。在地面站中航线运行时间无法直接设置，需要改变航点的飞行速度、停留时间等间接设置。在日常考试中一般考航线**总运行时间**或者单条航线**运行时间**。

任务航线和非任务航线：（一）任务航线日常一般定义为执行作业或者某些飞行任务时所飞行的航线，考试一般定义为图形标注的图形为任务航线（如等边三角形）。

（二）非任务航线：除任务航线以外的航线都定义为非任务航线，一般非任务航线有进入航线（进入任务航线的航线）、应急返航航线等。

“

练习！ 练习！ 练习！
做题！ 做题！ 做题！

”



复习与思考题

思考

01

请对比分析遥控链路、图传链路和数传链路在功能、性能要求和技术特点上的异同。

02

为你所在城市的一个公园规划一条航拍航线（使用在线地图截图示意），并书面说明你考虑了哪些安全因素。

03

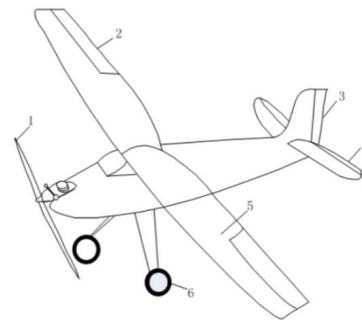
在超视距飞行中，若突然失去图传信号，但数传链路正常，作为机长你应该如何处置？

参考资料

1. 《无人机驾驶员航空知识手册》
2. 《地面站操作指南》
3. 《理论考核题库》

07

航空气象与飞行环境



课程学习目标



掌握大气特性

深入理解大气的成分、分层结构，特别是对流层的气象特点及其对飞行环境的影响。



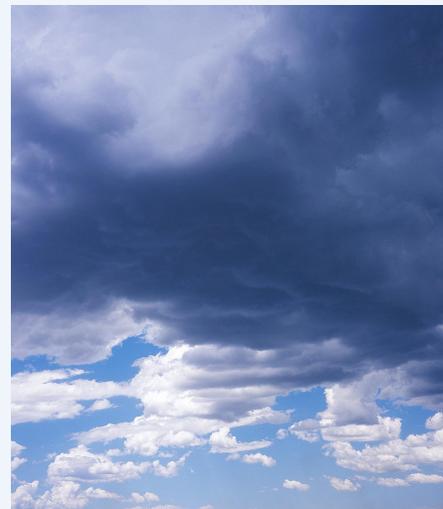
辨识危险天气

熟练掌握风、云、降水、能见度等核心气象要素的成因及其对飞行安全的危害，能准确识别风切变、雷暴、积冰等天气状况。



应用气象资料

学会获取、解读地面天气图、卫星云图等航空气象资料，并能基于气象条件进行飞行决策和风险评估。



应对复杂环境

掌握在山地、城市、海洋等特殊飞行环境下，针对复杂气象条件的飞行安全措施和应急处置方法。

大气成分与结构

01

干洁空气

大气的主体，主要成分是氮气（约78%）和氧气（约21%），此外还有氩、二氧化碳、臭氧等痕量气体。

02

水汽

含量不固定，是成云致雨的必要条件，也是导致天气变化的重要因素。

03

气溶胶粒子

包括尘埃、盐粒、花粉等，作为凝结核，是云、雾、降水形成的核心。

Air

Nitrogen N₂

78.08 %

Oxygen O₂

20.95 %

Argon Ar

0.93 %

Carbon dioxide CO₂

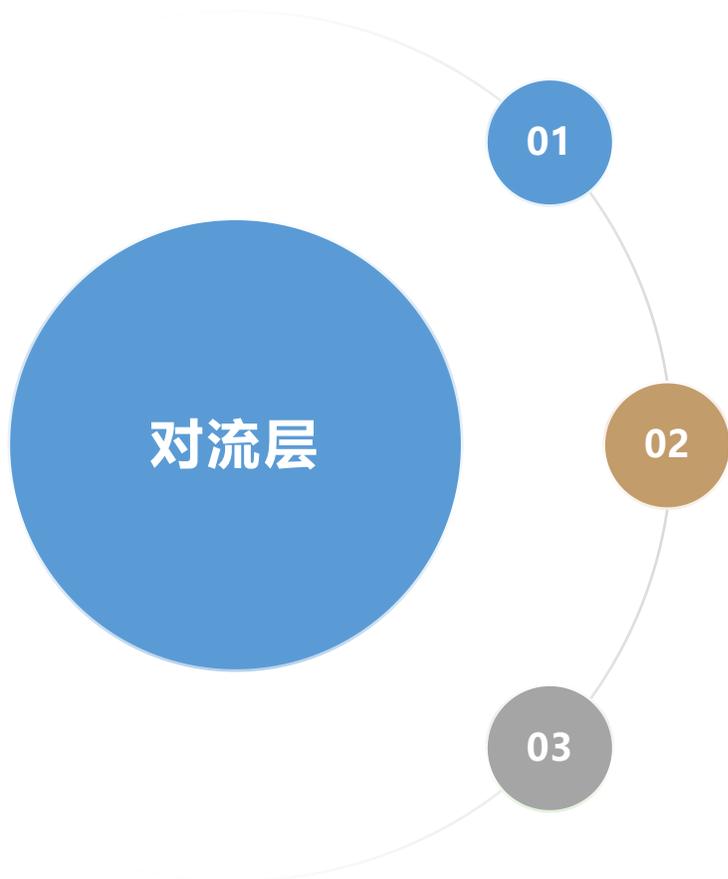
Neon Ne · Helium He · Methane CH₄ · Krypton Kr

0.04 %

大气垂直分层

层次名称	大致高度范围	温度变化趋势	核心特征
对流层	地表 ~ 8-18 km	随高度增加而降低	集中了约75%的大气质量和几乎全部水汽，天气现象复杂，空气垂直对流运动显著。
平流层	对流层顶 ~ 50-55 km	下层变化小，上层 随高度增加而升高	气流以水平运动为主，平稳。包含 臭氧层 ，能吸收紫外线使该层上部增温。
中间层	平流层顶 ~ 80-85 km	随高度增加而迅速降低	顶部温度可达-83°C以下。因存在垂直对流，又称“高空对流层”。
暖层 (热层)	中间层顶 ~ 500-800 km	随高度增加而迅速升高	温度可达1000°C以上。空气稀薄，处于高度电离状态，故又称 电离层 ，对无线电通信有重要作用。
散逸层 (外层)	暖层顶以上 (~2000-3000 km)	温度随高度升高	大气最外层，向星际空间过渡。空气极其稀薄，受地球引力小，一些高速粒子可逃逸至太空。

对流层



高度

低纬度地区约17-18千米，中纬度地区约10-12千米，高纬度地区约8-9千米。

特点

1. 气温随高度增加而降低（平均直减率为 $6.5^{\circ}\text{C}/\text{千米}$ ）。
2. 空气具有强烈的垂直混合运动（对流），云、雨、雪、雷暴等主要天气现象均发生在此层。
3. 集中了大气总质量的 $3/4$ 和几乎全部的水汽。

对飞行的影响

是对流层是无人机飞行环境最为复杂、多变的一层，其气象条件直接决定飞行的安全性与可行性。



【考点关联】

题库常见题：

“无人机飞行主要在哪一层大气？”

“对流层的主要特点是什么？”



主要气象要素及其对飞行的影响

01



气温

Temperature

02



气压

Atmospheric Pressure

03



风

Wind

04



云与能见度

Clouds and Visibility

主要气象要素及其对飞行的影响

对动力系统

低温会严重降低锂电池的放电效率，缩短续航时间；高温则影响电机和电控系统的散热，可能导致性能下降或故障。

对空气密度

气温高，空气密度小，无人机需更大的转速才能获得同等升力，起飞滑跑距离增长，载重能力下降。

气温

应对

飞行前需根据环境温度调整电池预热策略和任务载荷规划。

主要气象要素及其对飞行的影响

对高度测量

无人机的高度表（气压计）通过测量气压来换算高度。气压变化会直接影响高度读数的准确性。

对天气指示

气压的持续下降通常预示坏天气（如降水）可能来临；气压升高则预示天气转好。

气压

应对

飞行前必须在起飞点进行气压校准。
飞行中关注气压趋势，作为天气判断的辅助依据。

主要气象要素及其对飞行的影响

对飞行轨迹与能耗

顺风飞行增加地速，节省能耗；逆风飞行减少地速，增加能耗和飞行时间；侧风会使无人机产生偏航。

对飞行姿态

湍流和阵风会引起无人机颠簸，影响飞行稳定性和任务载荷（如相机）的工作效果。

风

对起降安全

起降阶段应尽量选择逆风方向。侧风过大会增加操控难度和侧翻风险。

应对

严格遵守无人机的抗风等级限制。规划航线时考虑风向风速，起降时选择逆风方向。

主要气象要素及其对飞行的影响

云

低云会遮蔽障碍物，影响目视飞行安全；进入云中飞行可能导致空间定向障碍（对于超视距驾驶员，主要影响的是图传画面和安全感）；积雨云中隐藏着强烈的湍流、积冰和雷电，极其危险。

能见度

低能见度（由雾、霾、沙尘、降水引起）严重影响目视观察，增加与障碍物相撞的风险，也使超视距飞行的图传监控和应急目视接管变得困难。

云 能见度

应对

飞行前查询天气报告，避开低云和低能见度区域。严禁进入积雨云。



【考点关联】

题库高频题：

“低空风切变对起飞着陆的影响？”

“雾对能见度的影响？”



严重影响飞行的天气现象与应对

01



低空风切变

Wind Shear

02



雷暴

Thunderstorm

03



飞机积冰

Aircraft Icing

04



严重影响飞行的天气现象与应对

定义

指600米高度以下风向和/或风速在短距离内发生的剧烈变化。

识别

雷暴下垂的雨幡、地面卷起的尘卷、机场风向风速仪指示的剧烈变化。

低空风切变

危害

特别是微下冲气流，会使无人机突然损失升力，高度急剧下降，是起飞和着陆阶段的“无形杀手”。

应对

起飞时遭遇：果断加油门至最大，争取安全操作高度。

降落时遭遇：立即执行复飞程序，加油门至最大，果断脱离切变区。

飞行中：立即转向，保持机头迎风。

严重影响飞行的天气现象与应对

危害

雷暴是“天气的监狱”，内部蕴含极强的湍流、积冰、闪电、冰雹和暴雨，对任何航空器都是极端危险的。

应对

飞行计划应远离雷暴活动区，保持至少20公里以上的安全距离。

雷暴

应对

绝对禁止飞入雷暴云。

应对

如在飞行中无法绕开，应推迟或取消飞行。

严重影响飞行的天气现象与应对

条件

无人机飞过温度低于 0°C 的过冷水滴区域时，机体表面会结冰。

应对

避免飞入已知的结冰条件（如温度在 0°C 至 -20°C 的云层或降水中）。

飞机 积冰

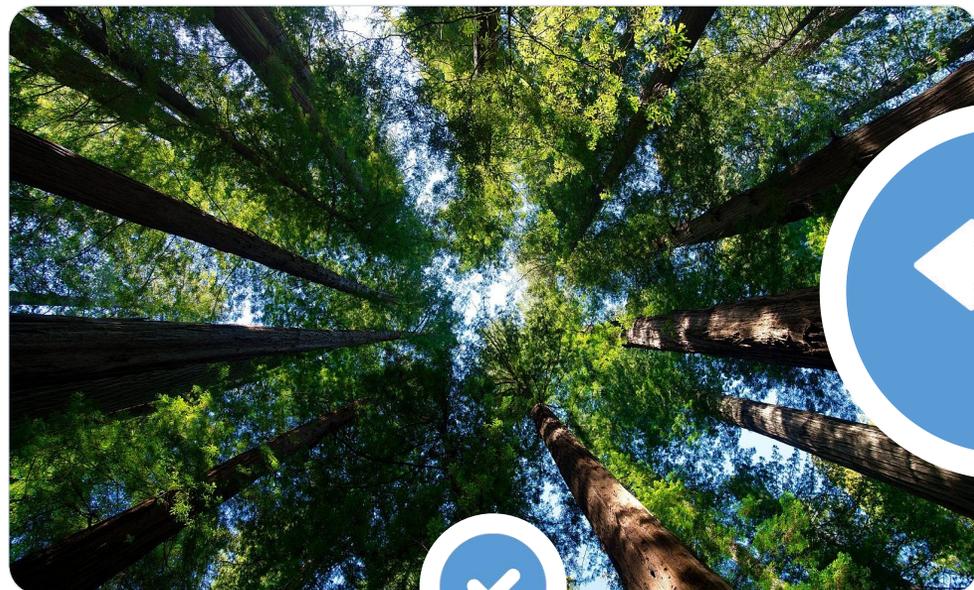
危害

结冰会破坏气动外形，导致升力减小、阻力增大、重量增加，严重时可能使操纵失灵。还会堵塞空速管，导致仪表失灵。

应对

如意外进入，应立即改变高度或航向，飞向温度较高的区域。

特殊飞行环境下的气象特点



山地环境



城市环境

特殊飞行环境下的气象特点

山地环境

特点：地形波、乱流强烈；天气瞬息万变；山谷风（日吹谷风、夜吹山风）现象明显。

应对：

1. 飞行前详细研究地形和天气预报。
2. 飞行中保持与山脊的足够安全距离，避免在背风坡的强紊流区飞行。
3. 预留更多电量以应对可能增加的能耗。

城市环境

特点：“城市热岛效应”明显；建筑物之间易产生“峡谷风”和强紊流；电磁干扰源多。

应对：

1. 特别注意起降区域的选择，避开楼间狭窄区域。
2. 飞行高度应高于最高障碍物15米以上，并考虑紊流的影响。
3. 注意GPS信号可能因建筑物遮挡而丢失，做好手动操控准备。

航空气象资料分析与应用

资料来源

民航气象预报：最权威的来源，包括机场天气预报（TAF）、航路天气预报（ROB）、重要天气图（SIGWX）等。

互联网气象服务：如中国气象网、Windy、Satellite等专业APP，可提供实时卫星云图、雷达图、数值预报等。

现场观测：飞行前对现场风向、云况、能见度的直观判断。

资料解读与应用

卫星云图：用于识别天气系统（如锋面、台风）、云系范围和性质。例如，卷云通常预示好天气，而发展旺盛的积雨云团必须避开。

地面天气图：用于分析气压场、锋面位置，判断大范围的天气趋势。

应用流程：飞行前，综合各类资料，判断任务时段的天气是否适航。将其作为任务规划（参见第六章）和特定运行风险评估（SORA）的重要输入，制定相应的应急预案。

案例分析与实操



案例分析与实操

情景模拟： 给定一个任务场景（如山区电力巡检）和一份模拟的天气预报图，引导学员分析未来6小时内的天气趋势，判断是否存在风切变、雷暴、低能见度等风险，并做出是否执行的决策。

案例分析： 分析因忽视气象预警，误入雷暴或强风切变区而导致无人机坠毁的真实案例，强调气象决策的重要性。

复习与思考题

思考

01

请阐述低空风切变的定义、危害及在起飞着陆阶段的应对措施。

02

查找一份当日的卫星云图，尝试分析你所在区域的云系特征和可能的天气变化。

03

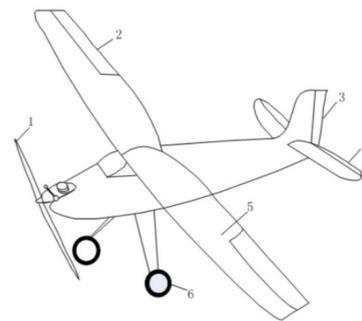
请用RSP模型分析一个场景：任务规划时，气象预报显示任务区域在飞行时段有出现局地雷暴的可能，但概率不高。你作为机长将如何决策？

参考资料

1. 《无人机驾驶员航空知识手册》第4章
2. 《一般运行和飞行规则》（CCAR-91-R3）
3. 中国民用航空局相关气象咨询通告
4. 理论考核题库（第七章相关部分）

08

无人机系统特性与操纵技术



章节说明

本章节针对“**所使用无人机**”的特性和操作说明，由于无法明确教学所使用机型技术参数、飞控型号，本章以**大疆 Flycart 30** 为例



课程学习目标



掌握系统特性

了解无人机的系统组成、双电池系统、重载气动特性、防护等级等核心特性及关键性能参数。



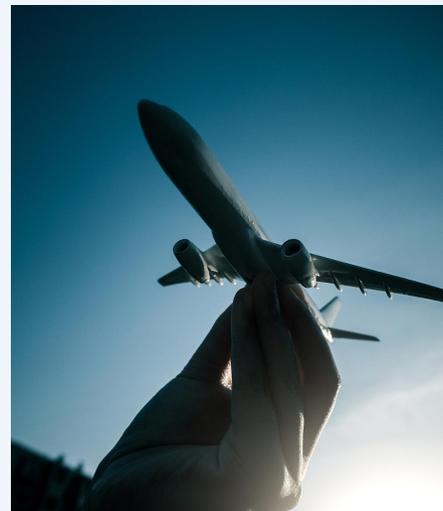
熟练操纵程序

掌握从飞行前准备、重载起降、巡航、任务执行（吊挂/抛投）到着陆复飞的完整正常操纵程序要点。



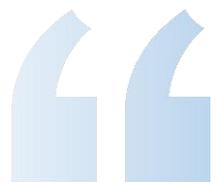
应对应急情况

熟练掌握双电池系统故障、链路丢失、货物晃动等特定应急情况的判断与标准化处置程序。



理解性能限制

能根据 Flycart 30 的载重-续航曲线、抗风性能图表，合理规划物流任务，确保运行安全高效。



Flycart 30

系统特性详解



系统组成与设计特点

飞行平台

机体结构：采用可折叠轴臂设计，兼顾运输便携性与飞行稳定性。

动力系统：采用双电池系统（电池 A / 电池 B），互为备份，大幅提升系统可靠性。

飞控导航系统：搭载高性能飞控，集成多目视觉传感器、毫米波雷达、多模卫星导航系统，并支持 O3图传行业版，实现稳定操控、精准定位与智能避障。

任务载荷（货箱）

标配 30 升货箱，最大载荷能力为 30 公斤（起飞重量 \leq 42公斤）。具备内置绞盘，可实现空中精准释放（抛投）作业。

货箱与飞行平台采用快拆设计，并具备货箱状态检测功能。

地面控制站

通过 DJI Pilot 2 应用程序运行于智能移动设备上，提供航线规划、飞行监控、货箱控制、日志管理等核心功能。

关键性能参数与限制

最大起飞重量： 42 kg（含飞机本体、电池、货箱及货物）。

最大有效载荷： 30 kg。

续航时间： 约 18 分钟（双电池，载荷 15 kg，无风环境）。实际续航与载重强相关，需严格查表确认。

最大水平飞行速度： 20 m/s（满载）。

最大抗风能力： 12 m/s（6 级风）。

工作环境温度： -20°C 至 45°C。

防护等级： IP55（机体核心）。



Flycart 30 飞行前准备与检查程序

环境与任务确认

确认天气在抗风限速内，空域已获批，起降场地满足重载无人机起降要求（平坦、坚实、无障碍）。

设备外观检查

机体与货箱： 检查机体、轴臂、脚架、货箱及绞盘机构有无变形、裂纹，快拆接口是否锁紧。

螺旋桨： 检查有无破损，安装是否牢固。

电池： 重点检查两块电池的电量均充足，电池外观无鼓包、破损，插入到位且卡扣锁紧。

系统通电与自检

开启遥控器与飞行器，等待系统自检完成。在 DJI Pilot 2 界面中确认：IMU、指南针、视觉系统、雷达系统状态正常。卫星数量 ≥ 12 颗，定位精度良好。电池电压、电量均衡，无报警信息。测试图传画面、遥控器各通道响应（特别是货箱释放功能）是否正常。

设置与任务规划

设置返航点与返航高度： 返航高度必须高于航线上的最高障碍物。

规划物流航线： 在 DJI Pilot 2 中规划航线，明确设置起飞点、降落后货箱动作（保持/释放）、降落点。

确认失控行为： 设置为“悬停”。

Flycart 30 正常飞行操纵程序要点

重载起飞与爬升

起飞： 将无人机置于水平的地面。柔和推动油门，由于重量大，起飞动作需更平稳、更缓慢。观察无人机离地后姿态稳定，无异常晃动。

悬停检查： 在低空（3-5米）悬停，重点观察电池电量输出是否均衡，监听电机声音是否正常，确认货物悬挂稳定。

平飞与航线跟踪

在自动航线飞行模式下，监控飞行状态。特别注意重载情况下，速度变化和转弯动作要更加柔和，避免货物产生过大摆动

物流任务操作

吊挂运输： 保持平稳飞行，避免急加速、急减速和急转弯。

精准抛投：

1.飞行至目标点上空并稳定悬停。2.通过遥控器触发货箱释放指令。确认绞盘工作，货物平稳下降至地面。3.确认释放成功后，执行下一步飞行指令。

重载下降与着陆

下降： 选择坚实平整的着陆点。下降率应小于轻载无人机。

拉平与着陆： 在离地约1米高度时开始柔和拉平，使无人机轻盈、平稳接地。

关机： 着陆后，确认货箱指令（如保持），然后收油门，关闭电机，再关闭电源。

Flycart 30 应急飞行操纵程序

单块电池故障

立即决策，中断任务，执行紧急返航。鉴于剩余电量可能紧张，应选择最近、最安全的备降点优先降落。

柔和操纵，减少不必要的机动动作以节省电量。

货物晃动或卡滞

立即减速，尝试通过柔和调整飞行姿态（如小幅反向操作）来抑制摆动。如摆动加剧，危及飞行安全，应寻找安全区域，优先执行应急降落。对于抛投卡滞，尝试再次发送指令。若无效，记录状态，携带货物返航着陆后处理，严禁在空中进行暴力操作。

通信链路丢失

按预设执行失控行为；操作员应尝试重新建立链路（如调整天线方向）。

特别关注：重载无人机返航爬升耗电量大，需监控其能否安全返回。链路恢复后，应第一时间接管，评估电量，必要时引导其前往更近的降落点。

突遇强风或降水

在确保安全的前提下可继续飞行一段距离以脱离恶劣区域。

但需知重载无人机抗风能力会下降。应果断降低飞行高度，减小速度，迎风飞行。

若天气恶化严重，立即寻找安全区域迫降，优先级高于返回原定起降点。

复习与思考题

思考

01

请列出 Flycart 30 在飞行前必须进行的至少 3 项与其他轻型无人机不同的重点检查项目，并说明原因。

02

案例分析：Flycart 30 在运输 20 公斤货物飞行途中，DJI Pilot 2 突然报警提示“电池A断开连接”。请描述此时无人机系统的反应和你作为驾驶员应立即采取的处置步骤。

03

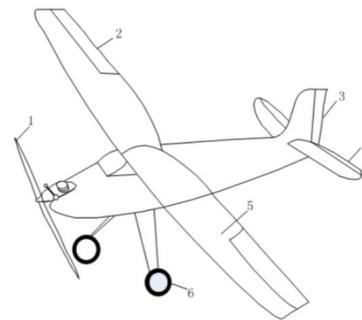
请阐述在 Flycart 30 上执行空中抛投任务的标准化流程和注意事项。

参考资料

1. 《DJI Flycart 30 用户手册 v1.0》
2. 《无人机驾驶员航空知识手册》
3. 《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》（CCAR-92）
4. 理论考核题库（第八章相关部分）

09

无人机飞行手册及其他文档



课程学习目标



文档认知

全面了解无人机系统运行中涉及的核心文档类型、内容及其法律效力，包括飞行手册、检查记录表、飞行任务单等。



规范使用

掌握无人机飞行手册 (AFM/POH) 的结构、各章节要点，能快速查阅并严格执行其中的正常程序、应急程序和技术限制。



准确填写

能够独立、准确地填写飞行前/中/后检查记录表、飞行任务单、飞行报告等操作文档，确保记录真实、完整、规范。



合规管理

理解文档的存档要求和管理流程，明确无人机驾驶员在文档使用与保存中的职责，满足局方审计和事故调查的追溯要求。

无人机机构 | 文档体系符合性核心

文档体系的根本目的是系统化地证明并保证机构持续符合中国民用航空局的各项规章要求。所有文件的编写、执行和记录都应围绕此核心展开。

设计

制造

培训



维修

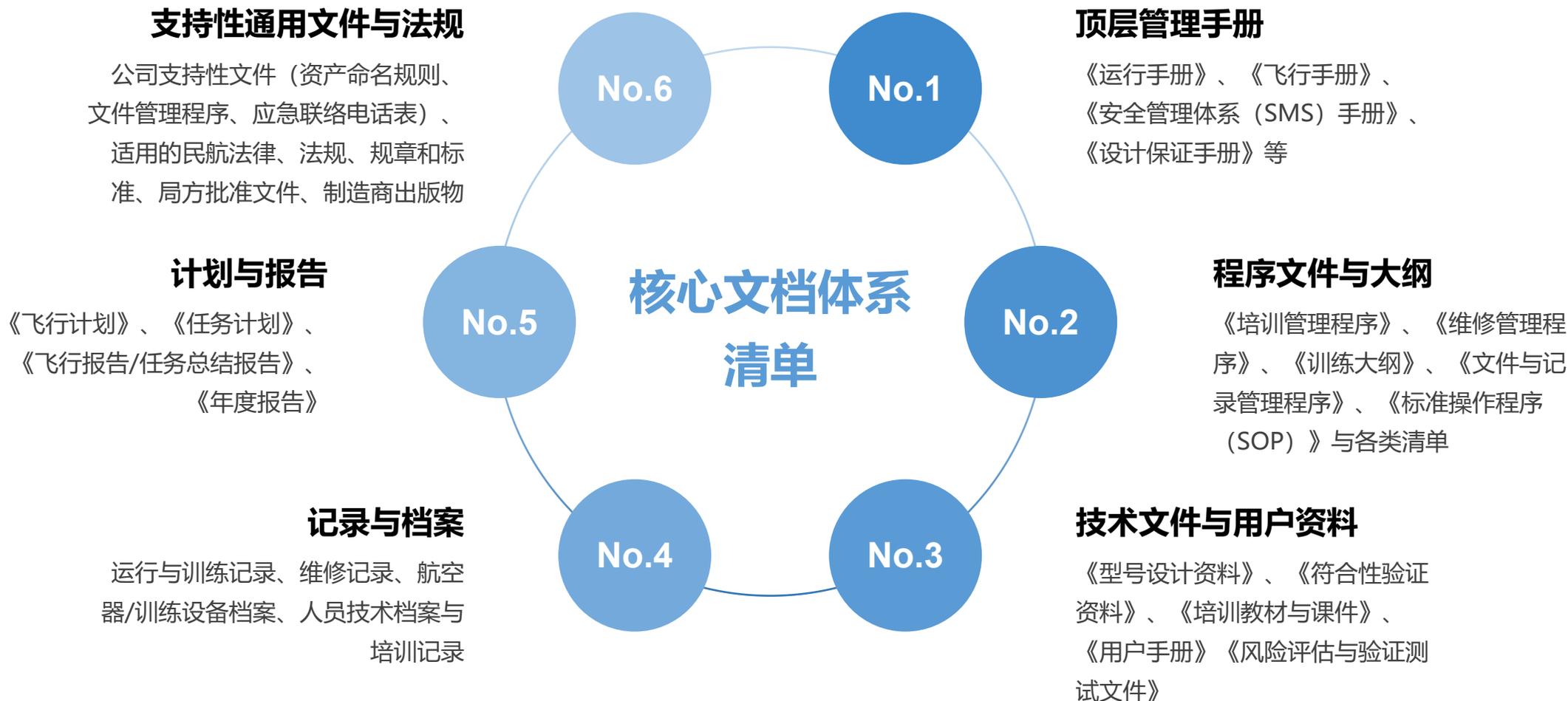


运行



服务

文档体系层级结构



操控员基本要求

了解

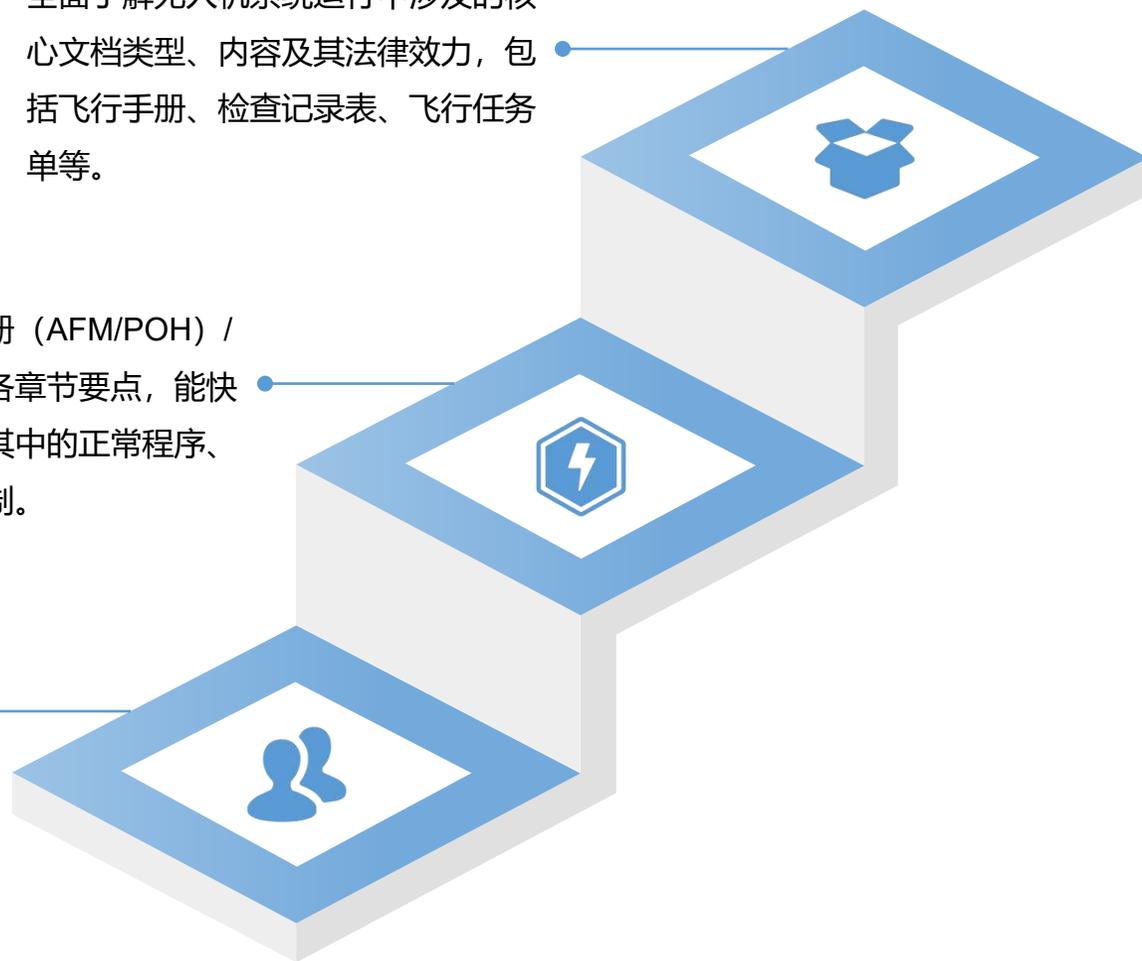
全面了解无人机系统运行中涉及的核心文档类型、内容及其法律效力，包括飞行手册、检查记录表、飞行任务单等。

使用

掌握无人机飞行手册 (AFM/POH) / 运行手册的结构、各章节要点，能快速查阅并严格执行其中的正常程序、应急程序和技术限制。

填报

能够独立、准确地填写飞行前/中/后检查记录表、飞行任务单、飞行报告等操作文档，确保记录真实、完整、规范。



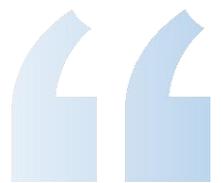
操控员核心文档手册



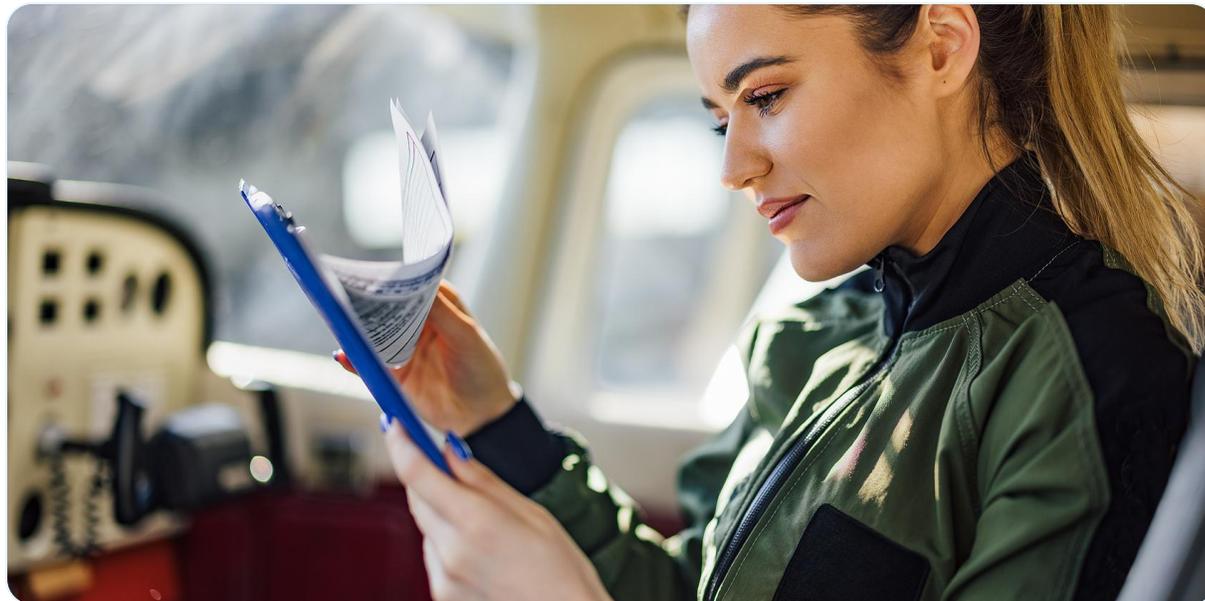
《运行手册》



《飞行手册》



核心区别



运行手册与飞行手册核心区别

飞行手册是航空器制造商提供的、针对特定型号产品的“产品说明书”，而运行手册是航空器运行人（运营单位）制定的、针对自身运行体系的“内部操作规程”。



对比维度	飞行手册	运行手册
定义与性质	航空器型号的必备随机文件。是制造商根据适航审定要求编制的，用于说明特定型号无人机系统的安全操作限制、程序、性能和数据的官方技术文件。	运行人的内部管理手册。是运行人为获得运行合格证并确保日常运行安全，根据规章要求自行编写的，阐述其组织管理政策、标准和具体操作程序的文件。
编制与批准主体	由无人机系统的制造商（型号合格证持有人）编制，并作为产品的一部分随每架无人机交付给用户。 其核心内容（特别是使用限制和性能数据）必须提交局方审查批准。	由运行人（运营单位）自行编写和持续修订，用以指导其内部的飞行、维修和其他地面人员。 运行手册的整体符合性由局方在运行合格审定时进行批准或认可。
核心内容	聚焦于“物”（航空器本身），内容具有唯一性和特定性，主要包括： 基本信息 ：系统构成、功能描述、性能参数。 使用限制 ：该型号无人机的重量重心、飞行包线（速度、高度）、空速限制、动力限制、气象条件限制等。 操作程序 ：该型号无人机的正常、非正常及应急操作程序（如启动、起飞、巡航、着陆、链路丢失处置等）。 性能数据 ：爬升率、航时航程、起飞着陆距离等。 重量与平衡 ：装载计算资料。	聚焦于“组织与流程”（运行体系），内容具有组织特性，主要包括： 组织政策与职责 ：安全管理政策、各部门及人员职责。 运行规范摘录 ：局方批准该运行人可实施的运行种类、使用的航空器、区域等。 具体管理程序 ：飞行准备程序、重量与平衡控制程序、维修管理程序、应急预案、事故报告程序、人员培训管理、记录保存系统等。 与飞行手册的衔接 ：规定如何在实际运行中应用飞行手册中的限制和程序。

运行手册与飞行手册核心区别

飞行手册 回答的是：“这个型号的无人机，它的能力边界是什么？应该怎么安全地飞？”

运行手册 回答的是：“我们公司，要如何组织和管理，才能确保每次飞行都安全合规？”



对比维度	飞行手册	运行手册
主要使用者	无人机操控员（飞行员）、维修人员、运行指挥人员。是他们在执行每次飞行任务前、中、后必须查阅和遵守的设备操作根本依据。	运行人内部所有相关人员，包括管理层、飞行机组、维修人员、签派员、安全管理人员等。是他们进行日常运行、管理和决策的内部工作手册。
法律与规章依据	适航规章的产物。主要依据各类专用条件、适航标准和适航管理程序。目的是证明航空器设计符合安全标准。	运行规章的产物。主要依据运行安全管理规则（CCAR-92）、运行合格审定规则（CCAR-136, CCAR-135）。目的是证明运行组织具备安全运行的能力。
文件关系	是运行手册制定的重要输入和依据之一。运行人在制定自己的操作程序时，必须严格遵守其所运行无人机《飞行手册》中规定的限制和程序。	引用并细化飞行手册的要求，将其转化为本组织的具体管理制度和流程。一个运行人的《运行手册》可能涵盖其机队中多种不同型号的无人机，但针对每一型号的操作都必须符合其对应的《飞行手册》

手册主要内容

01

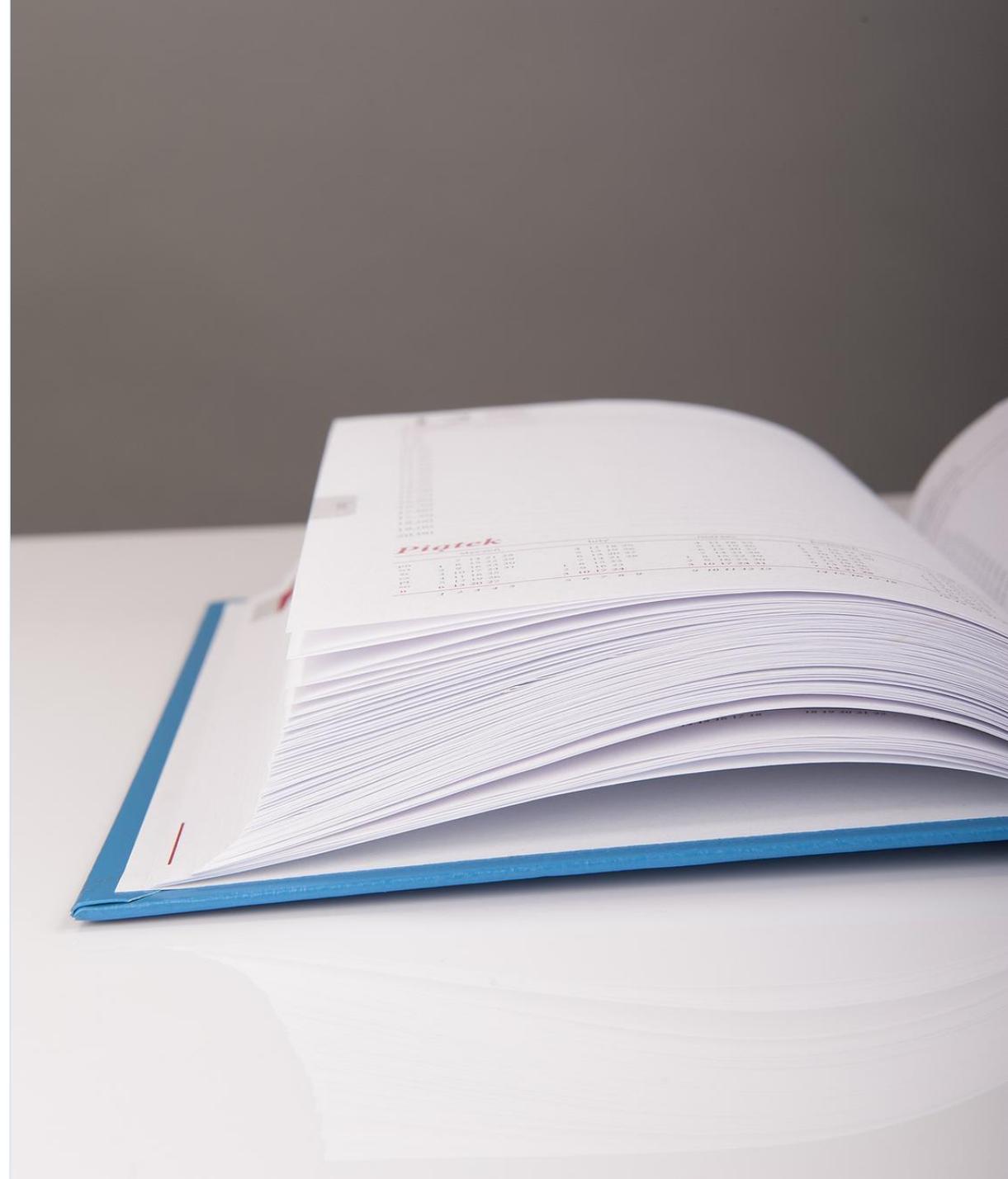
飞行手册

系统概述、使用限制（空速、重量、重心、环境等）、正常/应急程序、性能数据、载重平衡资料、系统说明等

02

运行手册

运行种类、使用的航空器、人员职责、正常/非正常/应急程序、记录保存、安全管理等。



“

飞行的前提是熟练的掌握
双手册

”



飞行手册的性质与重要性



法律性

飞行手册是局方审定无人机适航性和运行能力的基础，其规定的程序、限制和性能数据具有法律约束力。违反手册操作可能被视为违规运行。



专属性

手册针对具体的无人机注册号 and 序列号，包含了该架飞机的独特信息（如重量平衡、设备清单）。



指导性

提供了从飞行前准备到飞行后维护的全流程、标准化操作指南，是安全飞行的根本保障。

飞行手册的核心组成部分

概述

提供无人机系统的基本描述、三视图、尺寸、核心性能参数（如最大起飞重量、巡航速度）以及术语定义。

正常程序

以检查单形式列出标准操作流程，例如：
飞行前检查单（飞行器、控制站、链路）
发动机启动/关闭检查单
起飞、爬升、巡航、下降、着陆、复飞检查单
飞行后检查单

应急程序

详细描述在各种紧急情况（如动力故障、通信中断、飞控系统故障）下的处置步骤。应急检查单通常用醒目颜色（如红色）标注，便于快速查找。

性能

提供无人机在不同重量、高度、温度条件下的性能数据和图表，如爬升率、续航时间、着陆距离等。这是任务规划的重要依据。

限制

明确规定无人机的运行边界，包括：
空速限制：通过空速表色标显示。
动力装置限制：发动机/电机转速、功率限制。
重量与重心限制：最大起飞重量和重心安全范围。
飞行机动限制：允许和禁止的飞行动作。

飞行手册的核心组成部分

重量和配平

提供计算飞机重量和平衡所需的所有数据、表格和示例，确保每次飞行载荷分布均在安全范围内。

系统描述

详细说明飞控、动力、导航、通信等各分系统的工作原理和交互关系，帮助驾驶员深入理解系统。

运行和维护

概述制造商推荐的日常保养、定期检查和维护要求。

附录

包含可选设备的使用说明、补充数据等。

安全提示

提供增强安全运行的额外建议，如特殊气象条件下的运行提示。

关键运行文档及填写规范



检查记录表

用于系统化记录飞行前、飞行中和飞行后的检查结果，是判断无人机适航状态的关键证据。



飞行任务单

是每次飞行任务的规划和授权文件，明确任务目标、资源分配和飞行参数。



飞行报告

在任务完成后，对任务执行情况的总结和评估文档。

检查记录表

01

飞行前检查记录表

内容： 机体结构、螺旋桨、电池电量与外观、动力系统、通信链路、传感器（IMU、指南针）校准、任务载荷等。

填写要求： 逐项检查，正常打“√”，异常需详细记录问题描述和处理措施。检查员和驾驶员签字确认。

02

飞行后检查记录表

内容： 记录飞行后无人机的状态，是否有新增损伤或异常，以及进行的简单维护（如清洁、紧固）。

填写要求： 如实记录，为后续维护提供依据。

A.2 飞行前检查单LZ-SOP-OA-001

类别	序号	检查项目	标准/要求	检查结果 (<input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 不符合)	备注
文件与计划	1	任务飞行计划是否已获批准?	计划内容完整，经运行负责人签字	<input type="checkbox"/>	
	2	气象条件评估是否在限制内?	风速 <10m/s, 能见度 >5km, 无降水雷电	<input type="checkbox"/>	
	3	空域申请是否已获核准?	具备有效的空域批准文件或代码	<input type="checkbox"/>	
机体结构	4	检查机体结构有无裂纹、变形或损伤	结构完好，无可见损伤	<input type="checkbox"/>	
	5	检查螺旋桨有无裂纹、变形或松动	桨叶完好，安装牢固	<input type="checkbox"/>	
	6	检查起落架是否完好	无变形，减震功能正常	<input type="checkbox"/>	

飞行任务单

填写要求：由任务负责人或机长填写，内容应具体、可执行，经批准后方可生效。

1. **任务基本信息：** 任务名称/编号、日期、地点。
2. **无人机与人员信息：** 无人机型号/编号、驾驶员/机长、观测员姓名。
3. **任务目标与要求：** 具体飞行任务描述（如航拍区域、巡检线路）。
4. **飞行计划：** 预计起止时间、航线航点、飞行高度、速度。
5. **应急预案：** 指定备降场、紧急联络方式。

飞行报告

填写要求： 由机长或指定人员填写，应客观、准确，用于持续改进运行质量。

任务概述

简述任务完成情况。

飞行过程记录

实际飞行时间、航线、遇到的特殊情况及处置。

任务结果

任务达成效果（如图像质量、数据完整性）。

经验教训与建议

总结本次飞行的成功经验和存在的问题，提出改进措施。

文档使用流程

01

任务规划阶段

填写《飞行任务单》，明确任务细节和风险控制措施。

02

飞行前准备阶段

参照《飞行手册》进行系统设置；逐项完成并签署《飞行前检查记录表》。

03

飞行执行阶段

随身携带《飞行手册》以备查阅应急程序；必要时在《飞行任务单》上记录关键节点。

04

飞行后阶段

完成《飞行后检查记录表》；撰写并提交《飞行报告》。



文档管理要求



存档

所有飞行文档（检查记录、任务单、报告）需保存至少2年，以备局方审查。



真实性

必须如实填写，严禁弄虚作假。虚假记录将承担法律责任。



可追溯性

文档应清晰、完整，确保任何一次飞行活动都可被准确追溯。

文档编制建议

01

格式

格式应服务于内容的清晰、准确和易于审查，而非追求花哨。

02

构型控制

所有文件必须体现出严格的构型控制，即能明确标识其版本、状态和有效性。

四、 总结：最佳实践建议

为确保您的文档顺利通过局方的格式审查，请遵循以下“最佳实践”：

1. **优先使用中文：** 所有技术文档、手册、报告均以中文编写。
2. **严格遵循官方模板：** 对于申请书、符合性检查单、问题纪要等，直接使用局方提供的标准表格。
3. **建立规范的文档头/页脚：** 每一页都应包含文件编号、名称、版本、页码（例如：AL-PDS-001 / 产品设计说明 / V1.0 / Page 10 of 50）。
4. **体现构型控制：** 通过版本号、修订记录和批准签名，清晰展示文件的生命周期。
5. **清晰、专业、简洁：**
 - (1) **字体字号：** 虽无明文规定，但推荐使用宋体（中文）和 Times New Roman（英文）等标准、易读的字体。正文字号建议小四(12pt)或五号(10.5pt)，标题加粗并逐级增大。
 - (2) **排版：** 段落清晰，多使用图表、列表，避免大段纯文字。
6. **提前沟通：** 在编制重要文件（如审定计划）前，与您的审查组工程师沟通，了解他们是否有特定的格式偏好或内部指引。
7. **一致性：** 确保所有提交的文件在术语、缩写、参考标准等方面保持一致。

核心要点回顾：局方并不苛求字体是否美观，但极度重视文件的规范性、可追溯性、严谨性和与既定模板的一致性。一份格式规范、结构清晰的文档，是向局方展示您专业性和严谨管理能力的第一步。

执照培训教学材料体系文件清单

文件编号: Humar-LIST-Teaching-Materials-System-v1.0

编制日期: 2025 年 12 月 03 日

编制人: 叶彩祥

版权声明: 本文档内容版权归编制人所有, 仅供个人项目规划使用。未经授权, 任何个人或机构不得复制、传播或用于商业目的。



1. 文档目的

本文档旨在系统化地梳理与界定“多旋翼无人驾驶航空器操控员执照培训”教学材料体系的完整构成。它作为该系列材料开发与管理的总索引和核心依据, 确保所有教学资源编写工作有章可循、结构统一、管理有序。



文档示例

建议的最小文件体系

核心管理文件	运行手册	程序	一般运行程序
			标准操作程序
			紧急操作程序
			高度表拨正程序
		记录单	核心操控员清单
			飞行前检查单
			飞行后检查单
			正常程序检查单
			应急程序检查单
			飞行记录本（航空器）
			维修工作单
			运行日志
			人员训练记录
	手册	任务载荷安装与操作手册	
		飞行训练大纲	
		初始训练课程纲要	
		初始资格实践考试标准	
	安全管理体系（SMS）手册	程序	特定风险非标准操作程序
		手册	作业安全手册
		记录单	作业前现场风险评估单
			个人防护装备（PPE）穿戴检查单
		报告	运行风险评估报告
	投诉管理办法	程序	投诉调查程序
			投诉处理程序
		记录单	投诉沟通记录单
			投诉调查证据记录单
			投诉处理记录单

建议的最小文件体系

通用程序文件	通用程序文件清单
	培训管理程序
	维修管理程序
	文件与记录管理程序
	符合性验证与核查程序
清单文件	学员训练信息复核清单
	电池日常维护清单
记录与档案	教员信息记录表
	学员合同
	学员基础信息表
	航空器维修记录
	航空器飞行记录本
	飞行经历记录本
计划与报告文件	飞行计划/申请表
	任务计划表
	飞行报告/任务总结报告
	年度报告
技术文件	培训教材与课件
	维护手册
	飞行手册 (AFM) 或用户手册
	型号合格证数据单
规则类	文件系统命名规则
	文档结构与编制规范
	文件清单列表

复习与思考题

思考

01

请简述无人机飞行手册中“应急程序”部分的重要性，并列举三种必须查阅该部分的情况。

02

案例分析：你作为机长即将执行一次超视距电力巡检任务。请列出从任务规划到飞行后总结整个过程中，你需要准备、填写和保存的所有主要文档名称，并说明其各自的主要作用。

03

为什么说准确填写飞行检查记录表不仅是技术要求，更是法律责任的体现？

参考资料

1. 《无人机驾驶员航空知识手册》第10章
2. 《无人机飞行手册编写规范》（附录）
3. 《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》（CCAR-92）中关于文档记录的要求
4. 理论考核题库（第九章相关部分）

附录

附录一：关键术语表

术语	定义与说明	来源/依据
民用无人驾驶航空器 (UA)	由遥控设备或自备程序控制装置操纵, 从事民用航空活动的无人航空器。	《CCAR-92部》
民用无人驾驶航空器系统 (UAS)	指由无人驾驶航空器、相关的遥控站(台)、所需的指挥与控制链路以及批准的型号设计规定的任何其他部件构成的系统。	《AC-61-FS-2018-20R2》
操控员/驾驶员	由运营人指派对无人机的运行负有必不可少职责并在飞行时适时操纵飞行控件的人。	《AC-61-FS-2018-20R2》
机长 (PIC)	由运营人指定在飞行时间内对无人机运行负有最终责任和最终决定权的驾驶员。	《CCAR-92部》
视距内 (VLOS) 运行	驾驶员或观测员与无人机保持直接目视视觉接触的运行方式。通常指在半径500米、相对高度120米范围内。	《CCAR-92部》第92.51条
超视距 (BVLOS) 运行	无人机在驾驶员或观测员直接目视视觉接触范围外的运行。本教材针对此等级。	《CCAR-92部》第92.51条
视距内驾驶员	持有仅允许在视距内运行等级的驾驶员执照。	《CCAR-92部》
超视距驾驶员 (机长)	持有允许在超视距运行等级的驾驶员执照, 具备更高权限, 负责空域申请、航线规划等。	《CCAR-92部》

附录

请查看主教材



THE END
谢谢