

多旋翼飞行器：从原理到实践

第九讲 展望

王 培



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

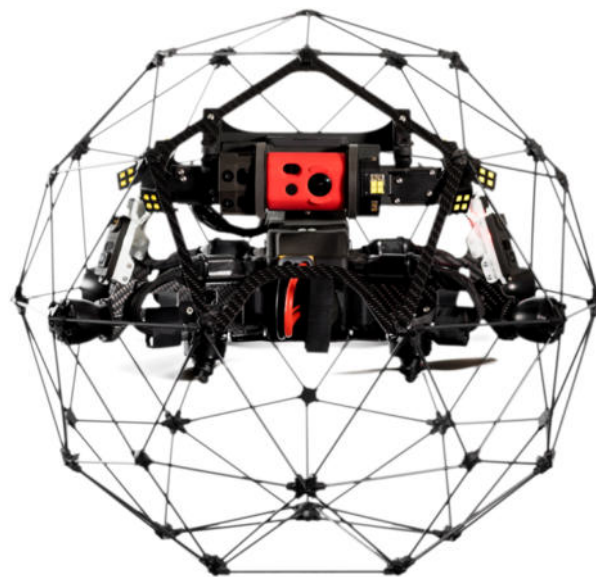


1. 多旋翼的新设计
2. 多旋翼的新应用
3. 反无人机技术
4. 多旋翼的新发展

1. 多旋翼的新设计

笼式多旋翼

瑞士Elios可碰撞多旋翼外有碳纤维保护罩，可以保护旋翼不被障碍物触碰而导致坠机。不仅如此，轻量化的碳纤维保护罩在与物体碰撞时可以回弹或旋转，利用接触力进行避障。这种飞行器比较适用于检测发电厂的锅炉、大型压力容器、货仓液罐等密封、危险和无照明的空间。



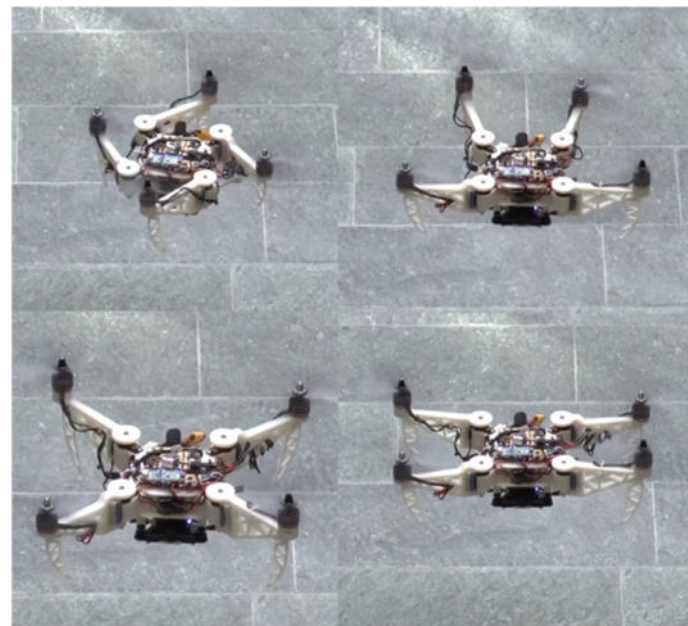
瑞士Elios可碰撞多旋翼

1. 多旋翼的新设计

可折叠多旋翼



可折叠多旋翼穿越洞口



可变形态

瑞士的苏黎世大学和研究组EPFL合作开发了自适应折叠多旋翼，它在遇到不同形状的空间或者洞口时，可以通过改变旋翼臂与机身的角度来变化多旋翼的形状，以达到目的地。

1. 多旋翼的新设计

全向多旋翼

全向多旋翼是一种能够朝任何方向飞行和盘旋的飞行器。苏黎世联邦理工学院研发的全向多旋翼原型机采用了十二个旋翼，而且每个都安装在能 360° 旋转的机械臂上，保证这款多旋翼能够在空中随时调整飞行方向，实现真正的全向飞行。



苏黎世联邦理工学院研发的全向多旋翼

1. 多旋翼的新设计

带机械臂多旋翼



以色列Tevel公司开发的水果采摘多旋翼配备了一个抓手、一组前置摄像头及水果保护框。摄像头通过算法可识别出成熟的水果，由多旋翼抓手进行采摘，然后放置到水果箱中。



美国SkyMul公司的SkyTy多旋翼配有可移动的机械爪，可自动捆扎交叉的钢筋。SkyTy多旋翼系统由一个地面站、一架测绘多旋翼和多架钢筋捆扎多旋翼组成。

1. 多旋翼的新设计

带机械臂多旋翼



Mine Kafon Drone

(MKD) 多旋翼是一种专门为了追踪以及安全引爆地雷的模块化多旋翼。其最大的特点是通过更换不同的配件执行不同的任务，



1. 多旋翼的新设计

■ 系留多旋翼



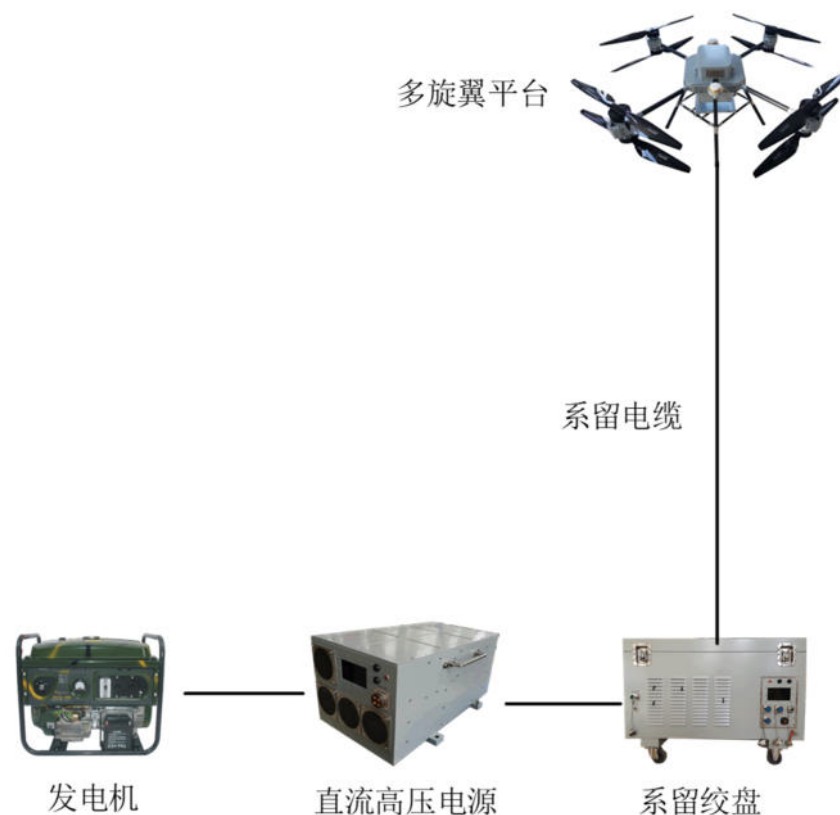
随着多旋翼技术的发展，其缺点也逐渐突显出来。

- 一是安全可靠性问题：
 - 多旋翼可能因失控飞出预期空域；
 - 所带电池容量严重限制其无线传输功率，由此带来了抗干扰性能差和通信能力不足等问题。
- 二是续航时间和有效载荷与各个行业的需求还有差距。

1. 多旋翼的新设计

系留多旋翼

系留主要由多旋翼平台，系留电缆和系留平台组成。其中系留平台主要由直流高压电源和发电机组成。系留电缆一方面可以在物理上对多旋翼进行拖拽，另外一方面可以将地面上的电能和控制信号持续输送到多旋翼上。



卓翼智能系留多旋翼结构组成

1. 多旋翼的新设计

系留多旋翼

系留多旋翼无人机可以分为固定式平台系留和移动式平台系留。固定式平台系留常用于定点区域内的监视、侦察、通讯等；移动式平台系留多旋翼应用更加灵活，可以装载在车辆、坦克和舰船等，并可以按一定的速度跟随平台飞行执行任务。



移动式平台系留

1. 多旋翼的新设计

固定翼-多旋翼复合式飞行器



固定翼-多旋翼复合式飞行器（Convertiplane）又称垂直起降固定翼，这种多旋翼是在固定翼两侧机翼的前后方各安装一个定距螺旋桨（通常为四个），为飞行器提供垂直起降所需拉力。在机尾，或机头部位安装推力或拉力螺旋桨，提供平飞阶段的动力。



JOUAV推力和拉力式垂起固定翼

1. 多旋翼的新设计

固定翼-多旋翼复合式飞行器



复合式飞行器按动力可划分为三类：油动垂直起降固定翼、油电混合垂直起降固定翼、电动垂直起降固定翼。



油动、油电混合、电动固定翼-多旋翼复合式飞行器

1. 多旋翼的新设计

尾坐式多旋翼

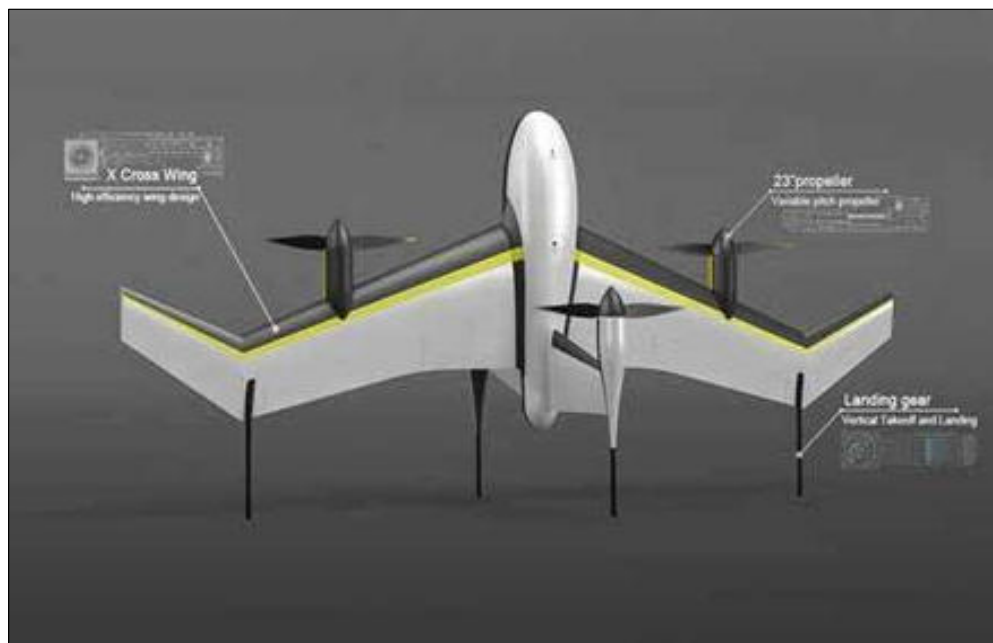


尾座式（Tailsitter）多旋翼是多旋翼与固定翼飞行器的另一种组合，它与固定翼-多旋翼复合式飞行器有所不同。尾座式多旋翼起飞时机头朝上，机身四周的旋翼为飞行器提供拉力，待飞行器起飞到预定高度后，飞行器改为机头向前平飞，此时旋翼为飞行器提供前飞动力。

- 优点：旋翼气流不会与机翼相互干扰；
- 缺点：是在起飞和降落时，受侧向风影响较大，容易倾倒。

1. 多旋翼的新设计

尾坐式多旋翼



X-Hawk尾座式多旋翼



Quantix Recon尾座式多旋翼

1. 多旋翼的新设计

升力翼多旋翼

升力翼多旋翼（Lifting-wing Multicopter）是一种翼身融合体（升力翼）与多旋翼的组合构型，旋翼桨盘平面与升力翼呈固定安装角度（比如：30~45度左右。相比传统固定翼和固定翼-多旋翼复合式飞行器，升力翼多旋翼的短小机翼和强劲的旋翼，使之具有较强的抗风性能。



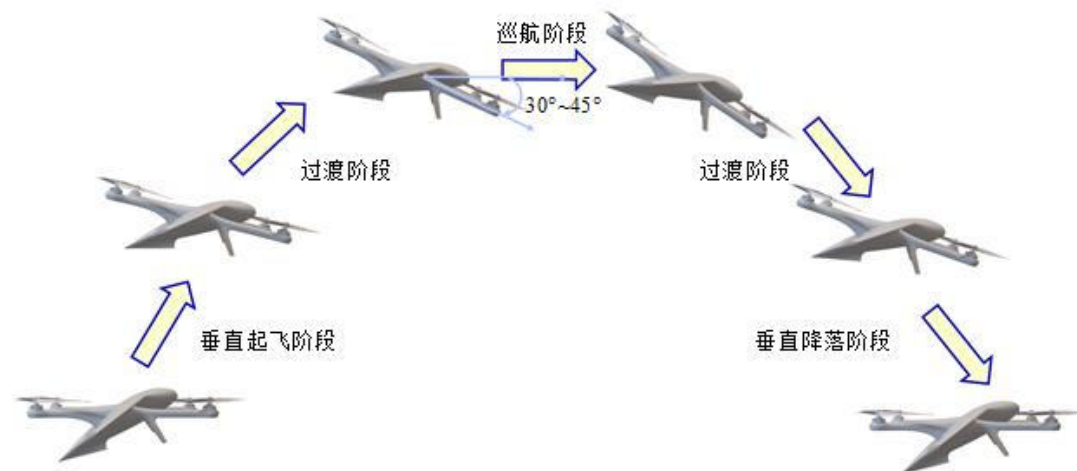
北航可靠飞行研究组设计的升力翼多旋翼



1. 多旋翼的新设计

升力翼多旋翼

升力翼多旋翼可以从悬停状态平滑地过渡到高效前飞状态。在前飞过程中，多旋翼可提供无人机的前飞动力和部分升力，而另一部分升力由升力翼提供。优化的设计降低了多旋翼的重心，增强了稳定性。北京航空航天大学可靠飞行控制研究组通过实验对比，在一定巡航速度范围内，升力翼相比传统构型多旋翼的功耗可降低50%左右。



升力翼多旋翼飞行过渡示意图

1. 多旋翼的新设计

升力翼多旋翼



VERTIKUL 2升力翼多旋翼融合了多旋翼和固定翼的优势，可由垂直模式直接过渡到平飞模式，相对常规多旋翼具有高速、长航程等优势。



VERTIKUL 2升力翼多旋翼

1. 多旋翼的新设计

双旋翼



双旋翼是在多旋翼的基础上发展而来，主要采用旋翼倾转控制技术，实现多种飞行动作，其体积较小、续航时间长。零零科技的Falcon双旋翼采用全新的V型双旋翼动力系统，可显著提高其续航能力和飞行器的灵活性。



Falcon双旋翼

1. 多旋翼的新设计

双旋翼



极飞V40矢量动力双旋翼农业无人机在性能与能源使用效率方面有明显优势，通过多重空气动力学优化，V40双旋翼下方风场变得更为集中，有效提升了施药穿透力。



极飞V40矢量动力双旋翼

1. 多旋翼的新设计

多栖多旋翼

多栖多旋翼是多旋翼深度发展的产物，它是飞行器与车辆的融合，能够在空中飞行，也能像车辆一样在地面行驶，或者在水中航行。

Robotic Research LLC的一款Pegasus Mini可变形机器人是飞行器和陆地车辆的组合。用途主要包括检查、营救、执法、公共安全以及管道检测、石油和天然气探测等方面。



Pegasus Mini可变形机器人



Distribution A: Approved for Public Release; Distribution is unlimited.
UNCLASSIFIED

1. 多旋翼的新设计

多栖多旋翼



HexH2O 是 QuadH2O 无人机公司研发的一种可进行航拍又能降落在水面上拍摄水下画面的两栖多旋翼。它的机身主要是环氧纤维/碳纤维，可以为其提供降落在水面的浮力。



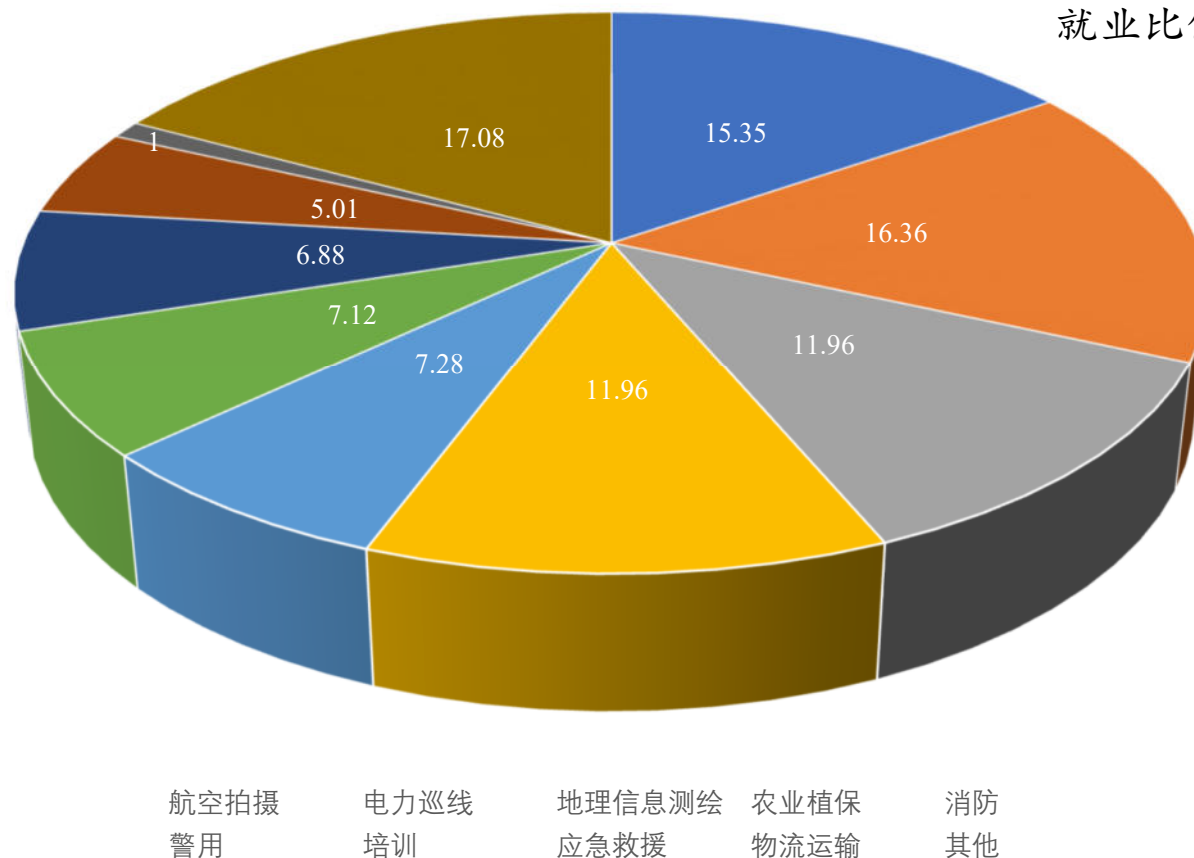
HexH2O多旋翼

2. 多旋翼的新应用

飞行器从诞生至今一百多年，在材料、电池、飞控等诸多方面都有了巨大的突破和革新，并逐渐在社会各领域发挥着越来越重要的作用。多旋翼按用途可分为民用多旋翼和军用多旋翼，民用多旋翼按行业可划分为消费级和工业级。



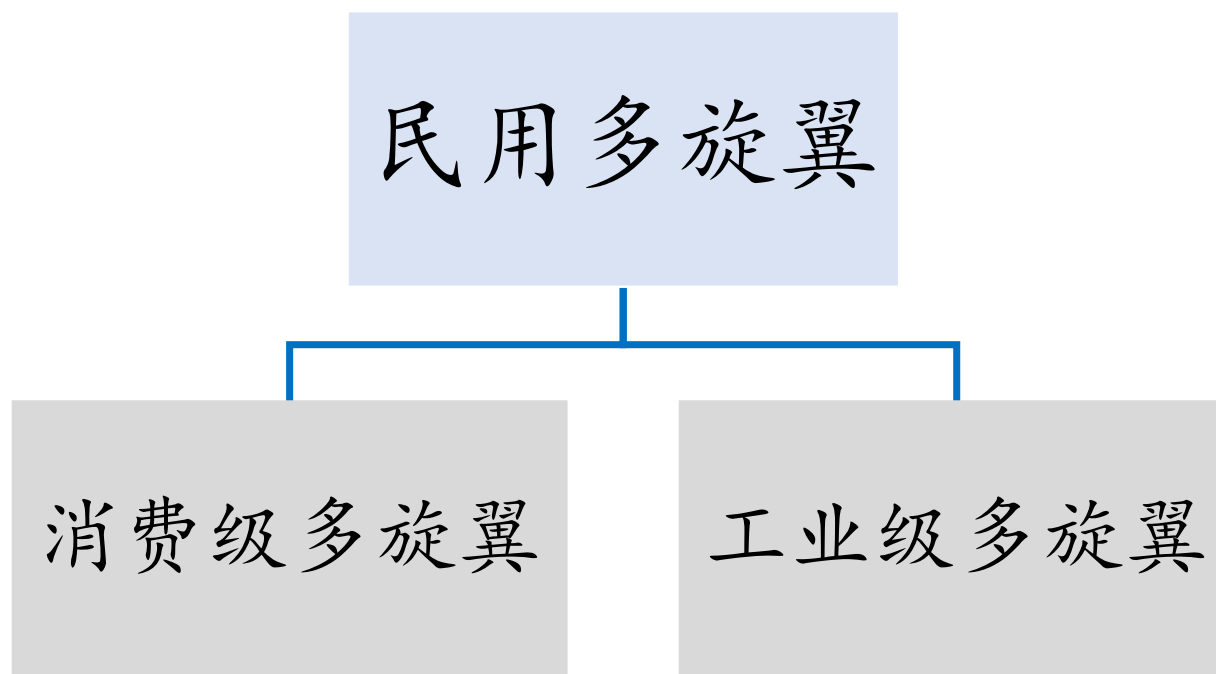
就业比例



中国AOPA民用无人机驾驶员报告（2020年）

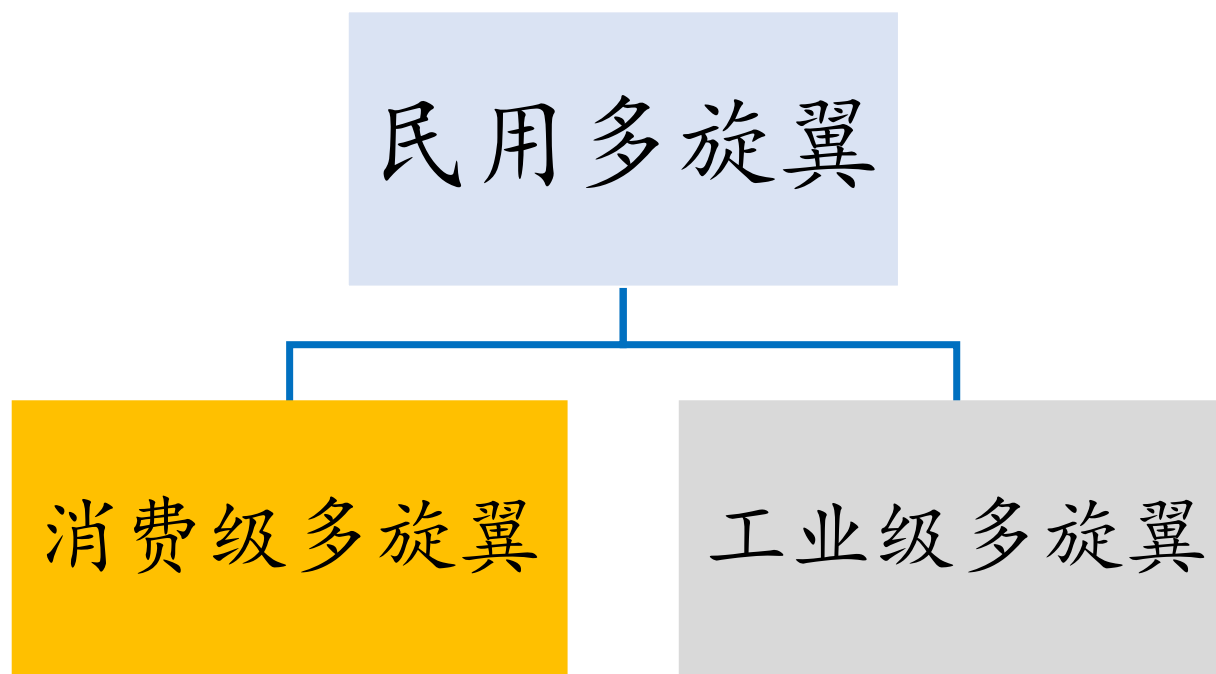
2. 多旋翼的新应用

民用多旋翼



2. 多旋翼的新应用

■ 民用多旋翼



2. 多旋翼的新应用

■ 民用多旋翼



(1) 航拍多旋翼

传统航拍作业主要使用有人机，空域申请、飞行器维护保养、起降场地的协调都会消耗大量的人力财力。多旋翼的出现越过了这一困难，易操作、免维护、价格低等优点让多旋翼受到了业内外人士的青睐。



大疆创新无人机公司的Mini SE

2. 多旋翼的新应用

民用多旋翼



(1) 航拍多旋翼

专业级航拍多旋翼主要应用于影视拍摄，Flying Pictures公司的Ultra最大起飞重量为110kg，最大载荷高达60kg。Ultra可下挂载荷也能置顶载荷，用于满足不同的拍摄要求。



Flying Pictures Ultra多旋翼

2. 多旋翼的新应用

民用多旋翼



(2) 多旋翼穿越机

多旋翼穿越机体积小，能在障碍物之间自如穿梭，并能做出多种特技飞行动作经常被用来竞速。部分穿越机上安装了摄像机，它不但能拍高速度感的画面，也能轻松跟上高速运动的对象。



大疆FPV穿越多旋翼



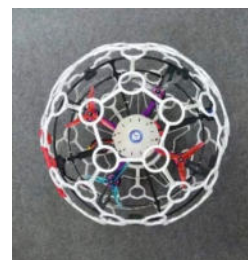
《挑战不可能》节目片段镜头

2. 多旋翼的新应用

民用多旋翼

(3) 多旋翼足球

多旋翼足球在无人机界是一项创新性的无人机竞赛。竞赛中所使用的多旋翼属于笼式多旋翼，将球形保护罩安装在多旋翼上，并在保护罩上搭配不同颜色的灯带以区分队别，队员使用遥控器控制多旋翼穿越对方的“球门”得分。



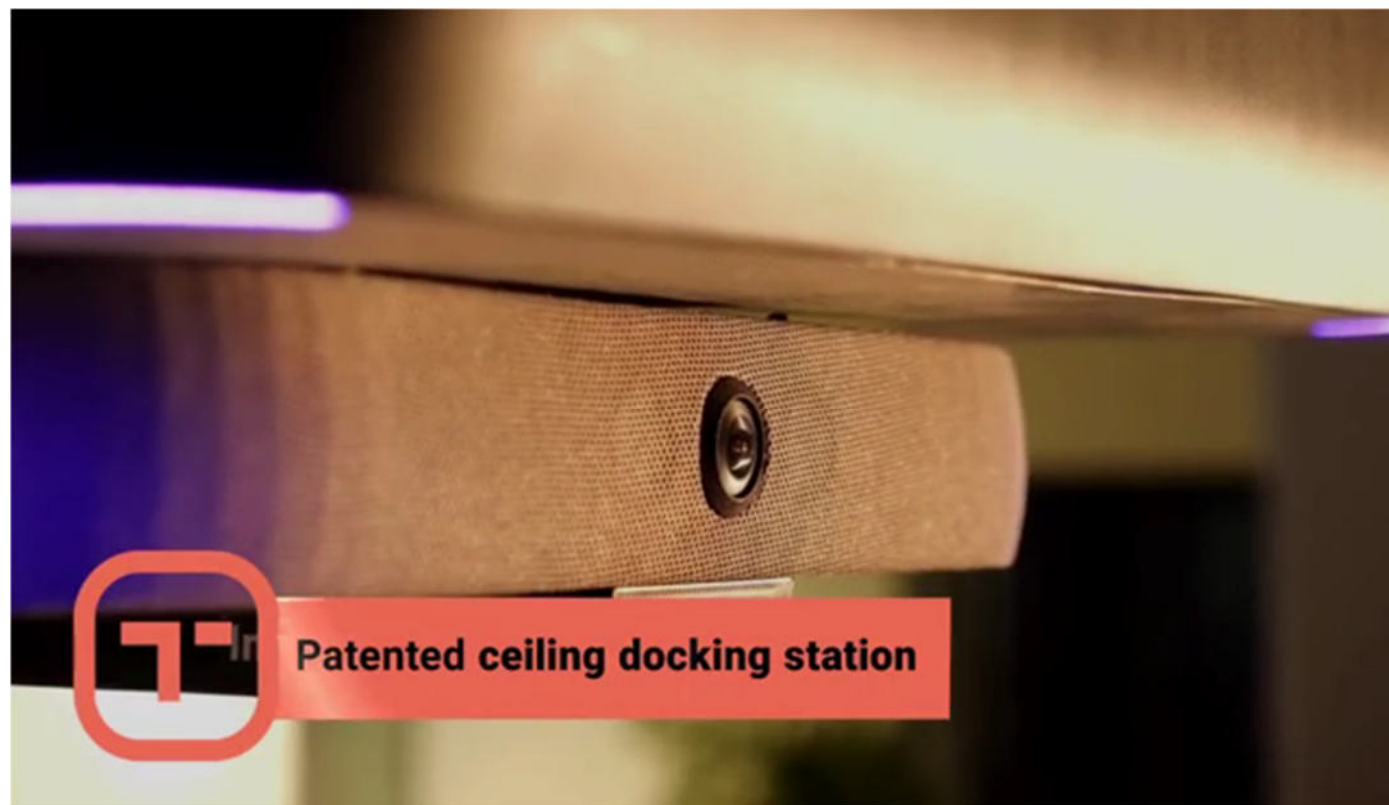
多旋翼足球比赛现场

2. 多旋翼的新应用

■ 民用多旋翼

(4) 室内安防多旋翼

基于自动机场的Tando室内无人机系统由以色列Indoor Robotics开发，无人机“机场”安装在天花板上，供多旋翼待命和充电。该多旋翼通过光学和热成像摄像头，可以360度扫描周围的环境。



Tando室内无人机系统

2. 多旋翼的新应用

■ 民用多旋翼

(4) 室内安防多旋翼

亚马逊旗下Ring发布的
“Ring Always Home Cam”多
旋翼是一款安装了摄像头的小
型值守多旋翼。



Ring Always Home Cam多旋翼



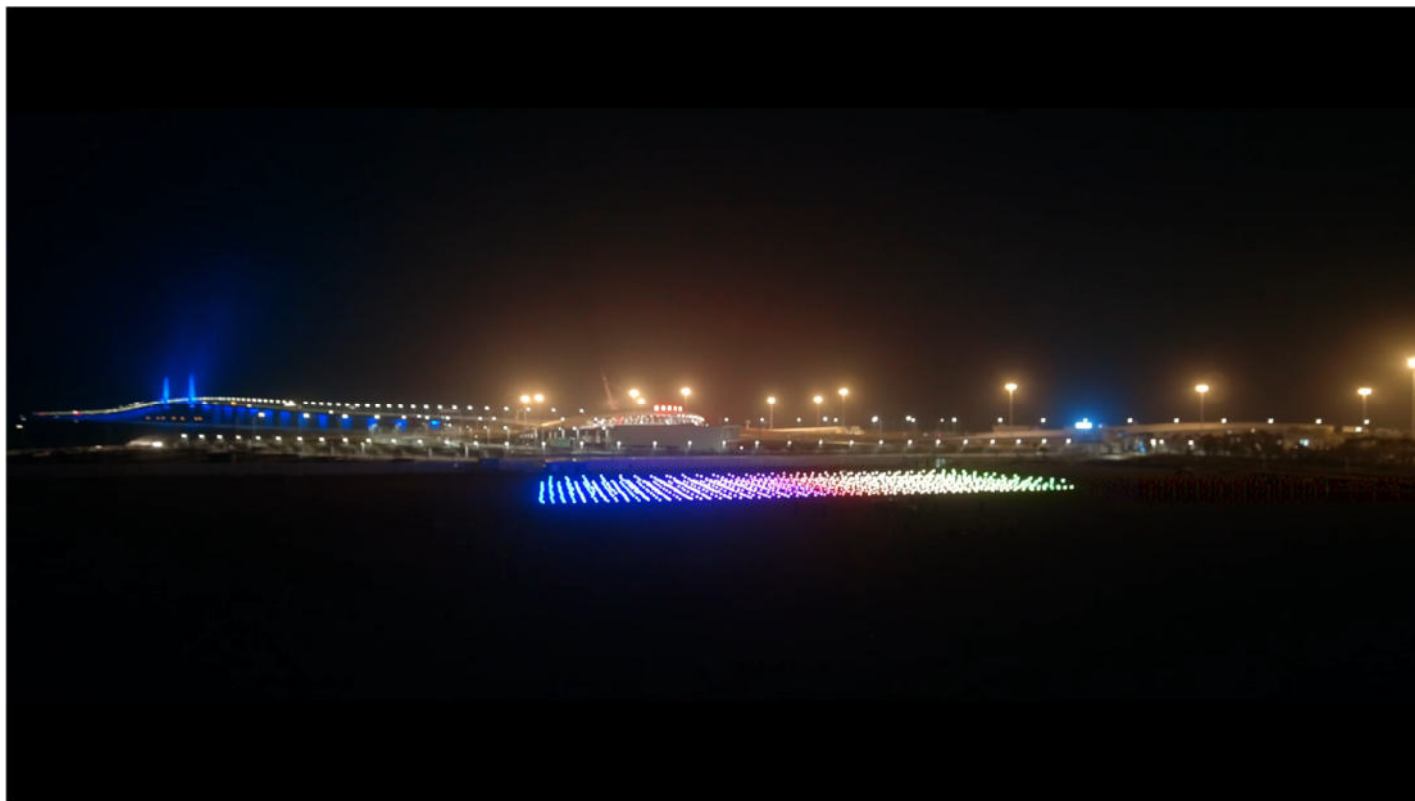
2. 多旋翼的新应用

■ 民用多旋翼



(5) 灯光秀表演多旋翼

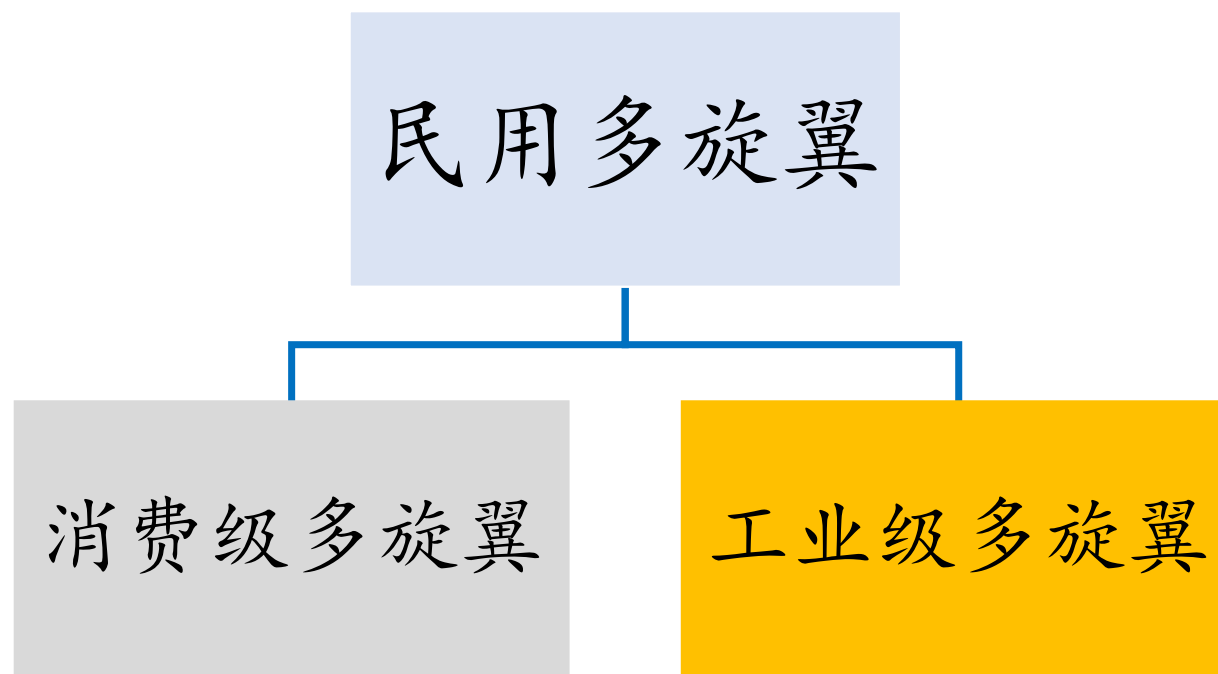
无人机灯光秀表演通常使用四旋翼。在表演前需要事先编好每架四旋翼的飞行轨迹和位置，以及对灯光的控制。



深圳大漠大智控技术有限公司制作灯光秀表演现场

2. 多旋翼的新应用

民用多旋翼



2. 多旋翼的新应用

民用多旋翼

(1) 农林畜牧多旋翼

农 



大疆T20植保多旋翼

林 



大疆多旋翼林业作业

畜 

传统的小龙虾投喂方式主要是人工行走喂料或者划船进入虾田中喂料，劳动强度大，播撒不均匀。使用多旋翼进行播撒投喂，可快速提高投喂效率，大大减少了成本消耗和人工对秧苗的踩踏。

牧 

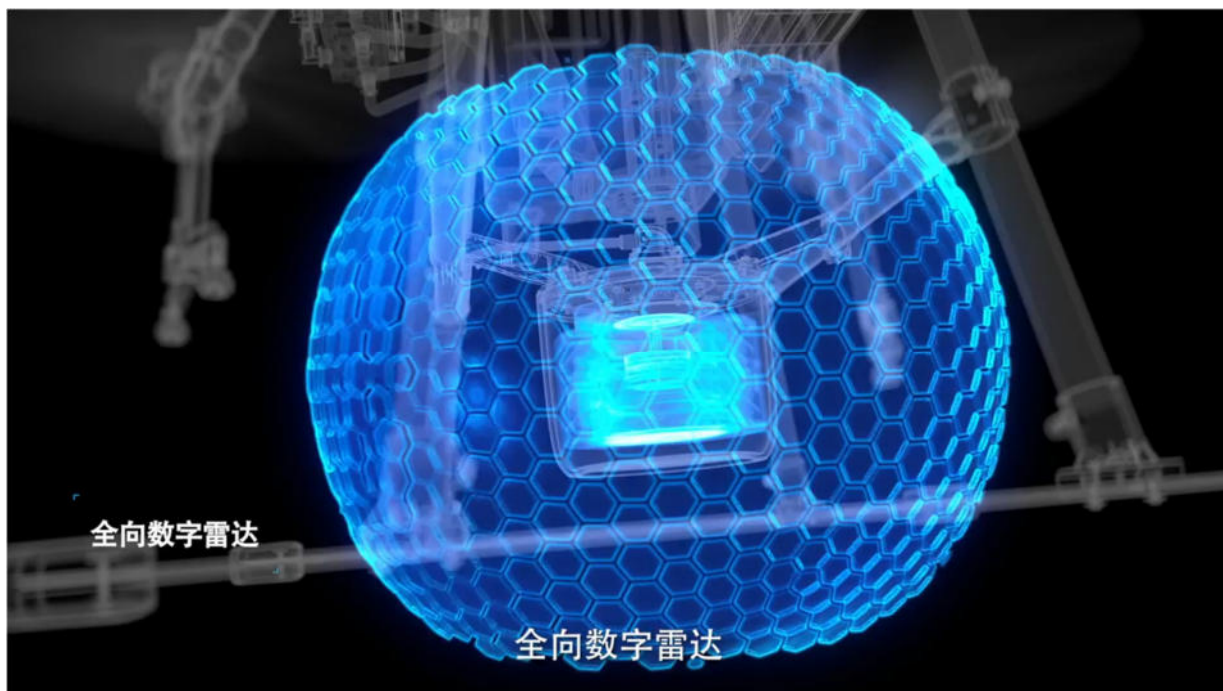
冬季牧民需要携带牧羊犬乘坐直升机在山顶空降，从山上徒步将羊群赶下来。多旋翼起飞迅速、机动性好，可以快速找到羊群的位置，可为牧民节约了大量时间。



2. 多旋翼的新应用

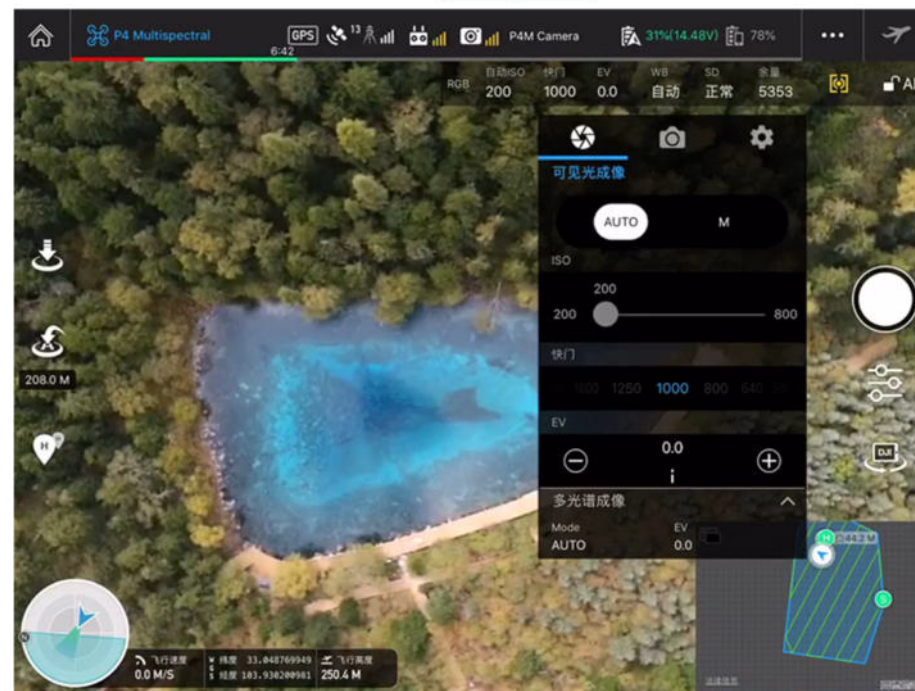
民用多旋翼

农 



大疆T20植保多旋翼

林 



大疆多旋翼林业作业



2. 多旋翼的新应用

■ 民用多旋翼

(2) 电力巡线多旋翼

多旋翼巡线可以大幅减少人力巡线成本，缩短巡线时间，提高巡线效率。

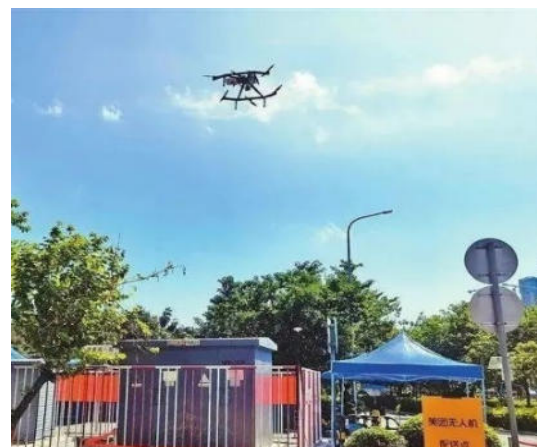
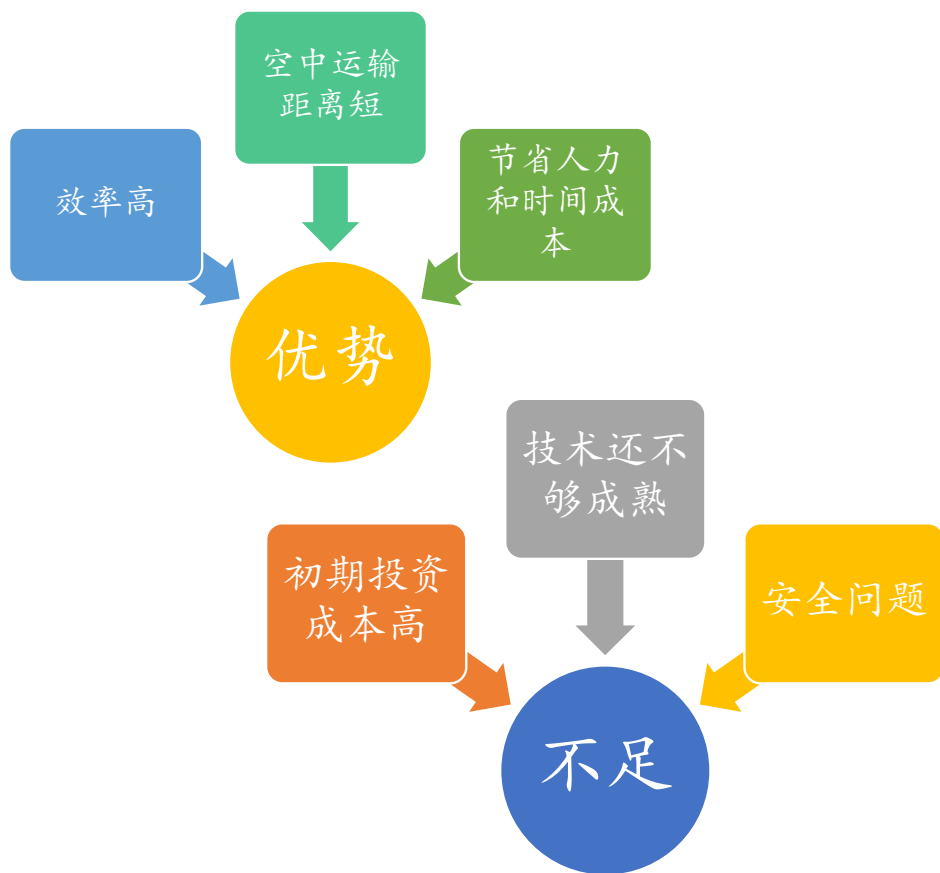


大疆多旋翼电力作业

2. 多旋翼的新应用

民用多旋翼

(3) 物流多旋翼



美团配货多旋翼



迅蚁多旋翼物流系统

2. 多旋翼的新应用

■ 民用多旋翼

(4) 载人多旋翼



2. 多旋翼的新应用

民用多旋翼

(4) 载人多旋翼



Volocopter载人多旋翼



CityAirbus载人多旋翼



Joby Aviation载人多旋翼

2. 多旋翼的新应用

■ 民用多旋翼

(5) 消防救援多旋翼

多旋翼通过图像传输设备，可在空中对复杂地形和复杂建筑结构进行火灾隐患巡查、现场救援指挥、火情侦测及防控。此外，多旋翼反应速度快、侦察范围广、风险系数低，且不受地形限制，为抗洪救灾提供强大援助。同时还能够抛投物资、支持应急通信等。



亿航消防多旋翼

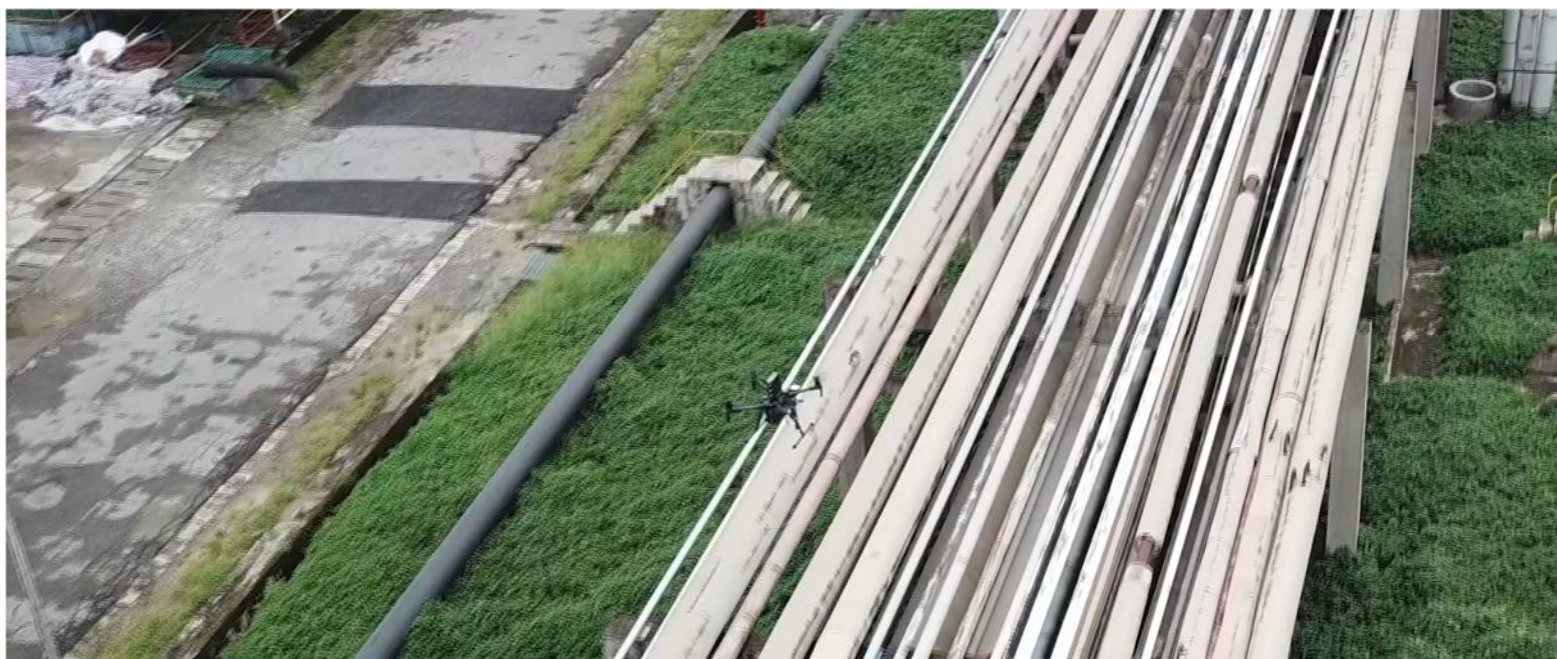
2. 多旋翼的新应用

民用多旋翼



(6) 测绘勘探多旋翼

多旋翼气体监测系统在面对室内有害气体泄漏场景中，可对泄漏情况进行快速检测，便于工作人员及时疏散人群，确保安全。在管道巡检场景中，可使用多旋翼搭载相关设备在更近的距离内实现对管道泄漏点的精准检测。



大疆多旋翼与可飞科技大气移动监测设备搭配

2. 多旋翼的新应用

■ 民用多旋翼

(6) 测绘勘探多旋翼

具有超声定位和视觉定位等功能的多旋翼，搭载监测设备对水电站竖井内人工不可到达的部位进行检查，可以及时监测和准确研判竖井病害，迅速开展修缮工程，稳定竖井结构，增加其使用年限。



ExynAero勘探多旋翼



2. 多旋翼的新应用

民用多旋翼

(6) 测绘勘探多旋翼

SPH Engineering公司的多旋翼和探地雷达集成系统，可对土壤，岩石，冰或淡水进行精准探测。该系统不仅可以替代人员去勘探危险和人员不便勘探的地形，还可以最大程度地减少人工勘探时发生的测量误差。



SPH Engineering探地多旋翼



2. 多旋翼的新应用

■ 民用多旋翼

(6) 照明多旋翼

照明多旋翼通常采用系留方式，在多旋翼上搭载高功率探照灯，为地面提供长时间的照明。传统照明需要提前布线且照明地点固定，通常受限于光照范围广、可移动和环境适应性强等优势，适合野外长时间照明。



AF-L100 系留无人机

2. 多旋翼的新应用

■ 军用多旋翼



“Bug”微型多旋翼



“Songar”武装多旋翼

无人机具有低成本、低损耗、零伤亡、高机动、起降方式多样和可重复使用等诸多优势。世界上许多国家已经将无人机应用于侦察、监视、通信中继、电子对抗、制导、战果评估和对地（海）攻击等领域。

3. 反无人机技术

无人机探测技术



无人机探测技术综合利用各种传感器来“发现”目标，利用测量目标无人机的物理属性（如光学特性、热学特性、声学特性）达到识别目的。

反制技术	主要优势/特点	主要不足
雷达	探测距离远，可探测处于无线电静默的无人机	耗电多，存在近距离盲区，漏警率高，难以探测“低慢小”无人机
光电/红外	能摄像取证 能探测无线电静默无人机	受环境和能见度影响较大
无线电侦察	不受低慢小目标特性影响，探测成功概率高	对无线电环境要求较高

3. 反无人机技术

■ 无人机反制技术



无人机反制技术主要有**软杀伤**和**硬杀伤**两大类。

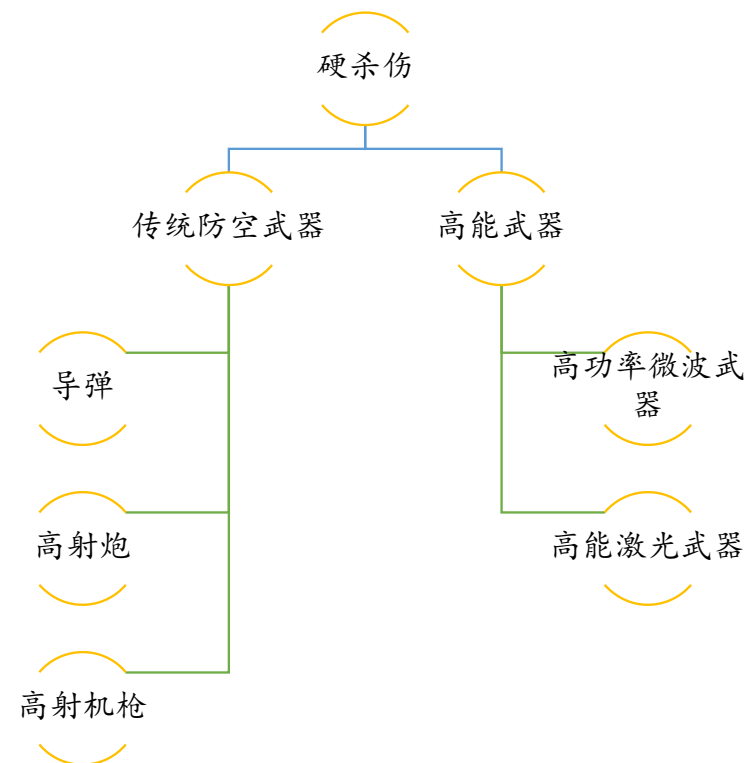
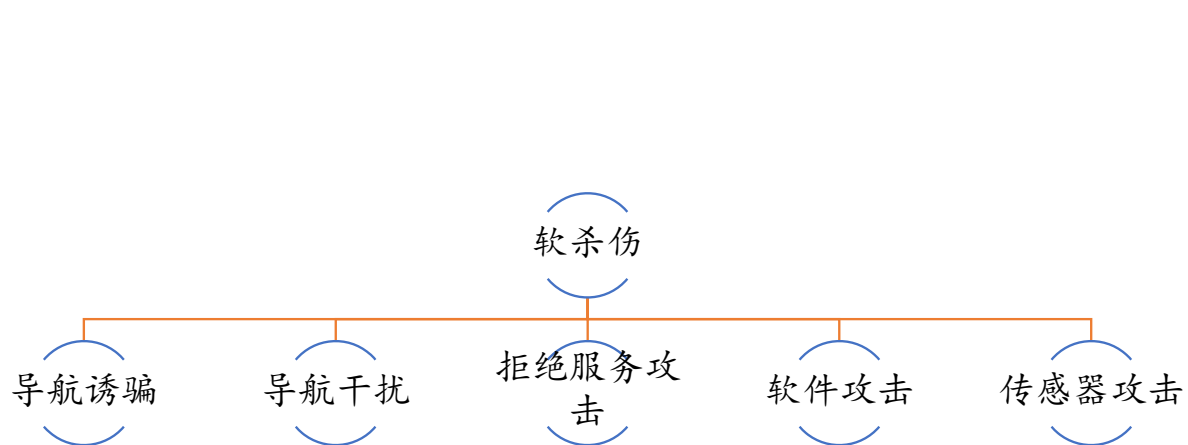
- 软杀伤主要通过干扰数据通信和卫星导航定位系统以及接管飞行控制系统等手段，使目标无人机的电子元件失去作用，致使其无法执行任务，达到削弱战斗能力的目的。
- 硬杀伤主要运用导弹、高炮（高射机枪）、高能激光、高功率微波等手段，直接摧毁目标无人机。

3. 反无人机技术

无人机反制技术



1. 软杀伤



3. 反无人机技术

反无人机装备

1. 干扰阻断类型



美国海军陆战队轻型防空综合系统（LMADIS）



俄罗斯“Sapsan-Bekas”机动式反无人机系统



Dronekiller手持式反无人机武器

3. 反无人机技术

反无人机装备

2. 直接摧毁类型



洛克希德马丁公司的先进高能激光设备（ATHENA，The Advanced Test High Energy Asset），是一种地面机动式激光武器。在获得无人机航迹后，通过指挥控制系统引导操作人员操作激光武器完成转向、获取、跟踪并击落无人机。



3. 反无人机技术

反无人机装备

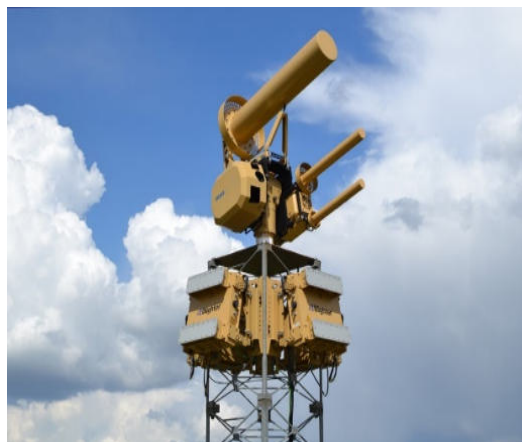
2. 直接摧毁类型



紧凑型激光武器系统（CLWS）



雷神公司的高能激光武器系统（HELWS）



反无人机防御系统（AUDS）



电磁脉冲武器系统



“无人机子弹”（DroneBullet）

3. 反无人机技术

反无人机装备

2. 直接摧毁类型



Fortem DroneHunter拦截型无人机



金雕捕捉无人机

3. 反无人机技术



反无人机技术目前主要呈现出如下发展特点：

- 从概念向工程转变；
- 从面杀伤到点杀伤；
- 加大对反无人机蜂群的研制力度。

3. 反无人机技术

■ 无人机网络安全



信息物理系统（Cyber-Physical Systems, CPS）是一个集综合计算、网络 and 物理过程的综合系统。无人机网络属于信息物理系统。无人机通信主要基于无线网络。同时，为保证无人机的自主控制，传感器会向系统控制器持续地发送数据。

在实际飞行中，网络控制系统将直接暴露与外界，给恶意网络攻击提供了机会。为实现无人机的广域应用和良性发展，无人机的网络安全不容忽视。

3. 反无人机技术

■ 无人机网络安全



常见的网络攻击模式

重放攻击

拒绝服务攻击

虚假数据注入攻击

无人机安全保密关键技术

无人机网络抗干扰技术

无人机网络密钥管理技术

无人机安全组网技术

4. 多旋翼的新发展



多旋翼的发展已进入成熟稳定期，但技术的推陈出新让人们对于多旋翼提出了更高的要求，主要体现在以下几个方面。

安全性

自主性

集群性

有序性

多样性

4. 多旋翼的新发展

安全性



安全性

安全性正从硬件可靠性发展到软硬件适航性。多旋翼属于小型的复杂系统，应该从系统工程的角度设计，保障飞行的安全。

基于模型的系统工程的定义：基于模型的系统工程是对系统工程活动中建模方法应用的正式认同，使建模方法支持系统要求、设计、分析、验证和确认等活动，这些活动从概念性设计阶段开始，贯穿了整个寿命周期阶段。

基于模型的系统工程拟在利用先进的系统建模语言代替自然语言，从而消除不确定性、歧义性和不可计算性等。

4. 多旋翼的新发展

自主性



自主性

自主性集中体现在以GNSS为主的程序控制发展到以视觉感知为主的**自主智能控制**。

近年来，多旋翼的视觉系统伴随着深度学习理论及机载计算芯片得到了极大的发展，主要用于识别、跟踪、环境地图感知、位置获取等方面，极大地提高了无人机的**自主能力**。通过智能自主感知，多旋翼可以在无卫星导航环境下跟踪目标或躲避障碍物，提高安全性。同时，可以降低对操控人员水平的要求和减少工作量。

等级	描述	决策	感知	控制	典型场景
4	实时避障/事件检测, 路径规划	危险规避, 实时路径规划与再规划, 事件驱动决策, 任务改变的鲁棒响应	感知障碍、危险、目标能力, 环境变化检测, 实时建图	期望具有精确、鲁棒三维轨迹跟踪能力	可以利用摄像机（无卫星导航设备）远距离飞行且能自动返航。四旋翼一个电机故障时, 可以安全着陆
3	故障/事件自适应	健康诊断, 有限适应, 机载保守和低级别决策, 执行预编程的任务	大多数健康和状态感知, 软硬件故障检测	鲁棒飞行控制器, 针对故障、任务和环境变化的重构或自适应控制	可以评估自身健康状态, 分析故障产生原因。六旋翼一个电机故障时, 可以返航
2	与外部系统独立的导航（无卫星导航设备）	同等级1	自身传感和状态估计（无外部系统参与）。具有健康评价能力, 能提前感知故障并进行失效保护。感知和态势认知由飞控手判断	同等级1	靠摄像机（无卫星导航设备）完成悬停, 着陆和跟踪。提前报告故障如遥控器故障, 传感器故障和动力系统故障等
1	自动飞行控制	预编程或上传飞行计划（航路点、参考轨迹等）。由地面站或飞控手进行分析、规划和决策。简单的失效保护	大部分传感和状态估计由多旋翼完成。简单的健康传感。感知和态势认知由飞控手判断	由飞控系统计算控制指令	利用卫星导航设备, 可以悬停、跟踪目标。可以检测遥控器故障、卫星导航设备、电子罗盘故障或电池电量高低。可以通过模式切换实现安全着陆
0	遥控	所有制导功能大都是由飞控手完成的	基本的传感可能由多旋翼完成; 所有数据由飞控手处理分析	由飞控手给出控制指令	可以由飞控手控制完成悬停、着陆和跟踪目标任务

4. 多旋翼的新发展

集群性



集群性

集群性体现在从多人操控单机发展到单人操控多机。集群性是一种化整为零的问题解决思路，极大提高了任务解决的可靠性和设备的可维护性。

多无人机通常是具有相同结构的飞行器，在执行任务过程中，即使部分无人机损毁也不会导致任务失败，因为飞行器同构，维修替换也相对容易。通过调整无人机的数量来适应不同的任务，因此集群无人系统可扩展性较强。

4. 多旋翼的新发展

有序性



有序性

有序性体现在个体无序飞行到集群\有序的交通管控。通过对整个低空的无人机运行的安全和风险进行评估，并对低空的无人机进行有效规划，保证它们合理有序飞行，从而促进无人机行业健康发展。

为了适应新发展，世界各国针对低空无人机空中交通管理开发了新框架。

- 美国：无人机系统交通管理框架（UTM, Unmanned Aircraft System Traffic Management）
- 欧洲航空安全局：公共无人机飞行系统（U-Space）
- 中国：无人机运行管理（UOM, UAS Operation Management）系统

4. 多旋翼的新发展

多样性



多样性

多样性体现在从单一形态的多旋翼发展到多功能多形态的多旋翼，以适应不同的应用需求。多样化的一个重要条件是载荷和接口的标准化。

- 美国：《Standardization Roadmap for Unmanned Aircraft System》
- 中国：《GB/T 38058-2019 民用多旋翼无人机系统试验方法》

本讲小节



(1) 多旋翼的新设计

介绍多旋翼的多种构型。

(2) 多旋翼的新应用

多旋翼的应用场景越来越多，而且还在不断扩展。

(3) 反无人机技术

介绍反无人机技术，罗列各国反无人机装备。目前，反无人机技术最大的挑战是反无人机蜂群。

(3) 多旋翼的新发展

主要体现在安全性、自主性、集群性、有序性、多样性。



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



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

