

基于仿昆虫扑翼飞行器在智慧农业中的应用研究

蒋柏毅 谢孟琪 王昱茹 黄俊程 石丽媛*

桂林学院 广西桂林 541006

摘要: 面对智慧农业精细化、低干扰作业的需求,传统的多旋翼无人机在农田环境中噪音大、机动性差、生态扰动大的问题。仿昆虫扑翼飞行器受到昆虫飞行机制的启发,具有低噪、高机动性等特点,为农业的核心场景提供^{[1][2][3]}。本文分析农业生产痛点,根据仿生学、空气动力学原理,构建扑翼飞行器技术体系,给出其在四大场景下的应用方案。又指出了它的产业化困难,并提出了五位一体的发展策略。研究发现仿昆虫扑翼飞行器可以创建空中智能作业网络,改变农业航空作业方式,有利于全球粮食安全与绿色发展。

关键词: 仿昆虫扑翼飞行器;智慧农业;集群智能;生物授粉;可持续农业

引言

面对人口增长、气候变化、资源约束等挑战,传统农业已经不能继续下去了,智慧农业成了全球的发展方向^[4]。目前主流多旋翼农业无人机存在噪音大、灵活性差、续航时间短等缺点,不能适应果园、温室等复杂或者生态敏感的环境。受到昆虫高效、低噪音、高机动性飞行特点的启发,仿昆虫扑翼飞行器由于具有低扰动、高效率、强机动性等优势而成为潜在的替代方案。但是从实验室原型到农业实际应用还存在着技术、工程和产业化等方面的诸多障碍。

一、农业现代化进程中的核心痛点与仿生技术需求

农业生产的根本目的就是高效、可持续地生产出优质农产品。但是目前的生产体系在很多重要环节上还存在着明显的瓶颈,阻碍了这一目标的实现。本章主要对这些痛点进行系统的分析,并论证加入仿昆虫扑翼飞行器这样的仿生、微型、智能作业平台的内在需求。

(一) 授粉环节:自然传粉者危机与人工替代困境

授粉是全球75%以上的农作物生产的决定性步骤,依靠的是蜜蜂等传粉昆虫。但是由于栖息地丧失、农药滥用、病害、气候变化等原因,传粉昆虫的数量急剧减少,形成“传粉者危机”,全球授粉需求为现有传粉蜂群供给能力的2.3倍,缺口严重。在温室等密闭的设施里,自然授粉更难实现。传统的人工授粉效率低、成本高(草莓生产中占比超过30%),而熊蜂授粉虽然部分有效,但是成本高、易逃逸、生态风险大、环境敏感。因此急需一种可控、高效、低成本、适应多场景的新型授

粉技术。仿生技术需求:需要可以模仿蜜蜂等昆虫飞行轨迹和访花行为的自主作业平台,具有在花朵之间准确定位、轻柔接触、高效转移花粉的能力,能够适应温室、露天果园等各种空间结构。

(二) 植保环节:粗放施药与精准治理的矛盾

病虫害防治是保证作物产量的重要手段,但是也是农业面源污染的主要来源。传统的大水漫灌式施药方法,农药利用率一般低于40%,大量的药剂飘移到非靶标区域,污染环境、杀伤天敌、增加害虫抗药性,造成农产品残留超标。虽然有人工智能识别病害并指导大型无人机进行变量喷洒的尝试,但是大型无人机下洗气流强,容易损坏幼嫩植株,在冠层茂密的果园中,药液很难穿透到中下层叶片背面(病害常发部位)。高秆作物或者设施内部大型设备难以进入。精准植保要求把适量的药剂用适当的方法送到靶标位置。仿生技术需求:需要小型、灵活的作业平台,可以贴近作物冠层飞行,甚至穿梭在植株之间,对叶片背面、茎秆等隐蔽部位进行精准施药。另外平台还要集成高精度传感器来实现病虫害的早期识别和定位。

(三) 监测与诊断环节:数据获取的时效性与精细度不足

精准农业依靠的是对农田环境(土壤、气象)以及作物本体(长势、营养、水分胁迫、病虫害)的持续、精细监测。目前卫星遥感、有人/无人驾驶航空器遥感具有大范围监测能力,但是重访周期长、空间分辨率低、受云层影响大。地面传感器网络的部署和维护成本高,不能实现高密度覆盖。人工巡检效率低、主观性强,不

能发现早期、细微的病变。作物生长模型以及精准管理决策都需要高频次、高分辨率、多维度的实时田间数据。仿生技术需求：需要能按需、高频次出动的微型传感平台，携带轻量化多光谱、高光谱、热成像或者特定气体传感器，在作物冠层水平上进行“零距离”扫描，获得叶片尺度或者亚器官尺度的生理生化信息，实现真正意义上的贴身诊断。

（四）劳动力环节：结构性短缺与作业成本攀升

随着城镇化进程和人口结构变化，农业劳动力呈现老龄化、兼业化趋势，年轻、专业的农业劳动力严重短缺。在授粉、疏花疏果、采摘、巡检等需要精细操作的环节，“用工难、用工贵”问题尤为突出。人力成本已占许多经济作物生产成本的50%以上，且季节性用工波动大，管理困难。农业的可持续发展必须减少对密集人力的依赖。生技术需求：需要能够替代或辅助人类执行重复性、精细性田间作业的自主或半自主机器人系统，具备在非结构化农田环境中稳定、可靠工作的能力，并能通过集群协作提升整体作业效率。

（五）环境友好性与可持续发展要求

现代农业必须向资源节约、环境友好的方向发展。传统农业机械的燃油消耗、噪音污染、土壤压实等问题不容忽视。作业装备的生态影响日益受到关注。理想的农业作业平台应尽可能减少对农田生态系统（包括土壤微生物、节肢动物、鸟类等）的干扰，降低能源消耗与排放。仿生技术需求：仿生技术需求为低噪音、低能耗、轻量化且对土壤和作物物理干扰小的作业平台。仿昆虫扑翼飞行器由于具有静音、高效仿生飞行的特点，在这方面具有先天的优势^{[1][2][3]}。

所以，农业生产对于精细化、智能化、绿色化的要求是全方位的。这些需求催生一种新的作业模式，即由大量的、智能的、仿生的、协同的、自主的作业单元组成的农业蜂群。仿昆虫扑翼飞行器由于自身所具有的独特性能特点，是实现这一范式的重要技术载体。

二、仿昆虫扑翼飞行器的技术体系解构

（一）生物原型与仿生学原理

1) 昆虫飞行的空气动力学奥秘

在低雷诺数（ $Re < 10,000$ ）飞行领域，昆虫翅膀的高频扑动产生了复杂的非定常空气动力学效应，这是其获得高升力、高效率的关键。主要机理包括：

延迟失速：翅膀在大迎角下运动时，前缘会产生一个稳定的涡旋并附着在翼面上，延迟了气流分离，从而

在短时间内产生数倍于稳态飞行的升力。尾流捕获：在翅膀运动方向反转时，翅膀会与前一个半行程产生的涡流相互作用，从中捕获能量，增强下一个行程开始时的升力。旋转环流：翅膀在拍动的同时绕其长轴快速旋转（扭转），此旋转运动本身会产生附加的环流和升力。合拢-打开机制：部分昆虫（如胡蜂）在翅膀上拍至顶点时，双翅合拢再迅速打开，此过程能产生额外的推力。

2) 昆虫身体结构与运动控制启示

昆虫没有鸟类那样的尾翼，其飞行姿态控制完全通过精确调节左右翅膀的拍动幅度、频率、相位差以及翅膀的扭转角度来实现六自由度（前后、左右、上下、俯仰、横滚、偏航）的敏捷运动。这种将升力、推力、控制力矩高度集成的设计理念，为微型飞行器的紧凑化、轻量化设计指明了方向。

（二）核心机械结构与驱动系统

1) 仿生扑翼机构设计

仿生胸腔机构，模仿昆虫间接飞行肌驱动胸腔变形的原理，用压电陶瓷或者形状记忆合金等智能材料构成的人工肌肉单元，驱动一个轻质柔性框架做微幅高频振动。此设计将驱动和传动一体化，大大简化结构、减轻重量。柔顺关节和翅基，翅膀用具有特定刚度分布的柔性薄膜（模仿昆虫翅基的柔韧区）与胸腔相连。被动柔顺设计使翅膀在气动力的作用下产生有益的被动扭转、弯曲变形（类似昆虫翅膀的柔性），改善气动性能，又免除了复杂的主动扭转机构。翅翼构型，翅膀用超薄复合材料（聚酰亚胺薄膜上覆碳纳米管增强）制成，模仿蜜蜂翅膀的脉序结构来增强刚度和特定的变形模式。翼型经过优化，在低雷诺数下升阻比大。

2) 微小型化与轻量化集成

实现70mg级总重量（含能源、控制、传感模块）是核心技术挑战。材料选择：大量使用碳纤维复合材料、液晶聚合物、蜂窝结构超轻薄膜等先进材料。系统级芯片集成：采用定制化的微系统芯片，将微处理器、无线通信、传感器接口、电机驱动等功能集成于单一芯片，极大减少电路板面积和重量。微型能源：使用高性能微型锂聚合物电池或结合上述纳米发电技术，在能量密度与续航之间取得平衡。

3) 智能感知、导航与集群控制系统

单个飞行器的智能是基础，集群协同才是其发挥农业应用威力的关键。

4) 自主导航与避障

自主导航与避障多传感器融合，微型MEMS惯性测量单元、光流传感器、超宽带定位模块、微型单目/双目视觉相机。改进A*算法：针对农业环境的特点（规则的作物行、动态障碍物），对传统的A*路径规划算法进行优化。用障碍率加权启发函数来动态调整搜索策略，在障碍密集区扩大搜索保证安全，在开阔区快速导向目标，大幅度降低规划时间与路径冗余。利用贪心平滑算法对路径进行优化对路径进行平滑优化，满足飞行器的运动学约束。基于图像的振动抑制：用机载相机图像，通过光流法、图像矩分析来实时识别并补偿由于机体振动造成的图像模糊、定位误差，提高在复杂气流（田间风）中作业的稳定性的。

5) 集群协同控制（核心创新）

改进蜂群算法：模仿自然界蜂群觅食行为中分工、通信的机制，提出适用于扑翼飞行器集群的资源调度、任务分配算法。该算法把农田作业任务（如某片区域的授粉）分解成子任务，并动态分配给集群中的个体。分布式组网控制：采用自组织网络技术，个体之间通过低功耗无线通信（Zigbee、LoRa）交换位置、状态及感知数据。不需要中央控制器给每个个体发指令，集群通过局部交互就出现全局有序的行为，比如保持队形、覆盖搜索、协同搬运（模拟花粉传递）。

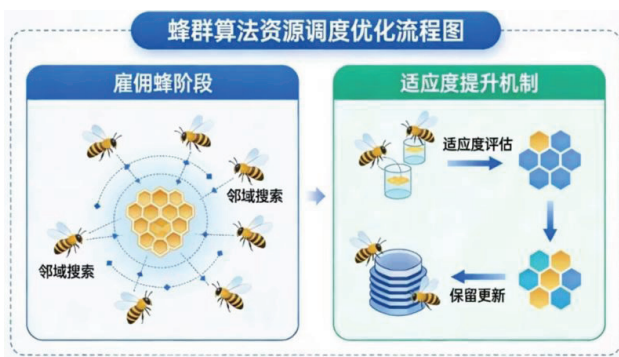


图1 蜂群算法资源调度优化流程图

三、农业特定功能集成

数据链与回传：通过加密数据链，将采集的图像、多光谱数据、作业状态等信息实时回传至地面站或云平台。

四、技术优势总结

与传统的旋翼无人机相比，仿昆虫扑翼飞行器在农业应用场景中具有以下优势：极致隐蔽，低干扰，体积小，噪音低，近距离观察动植物不引起应激反应，适合生态监测、授粉等敏感作业^{[1][2]}。

超凡机动与适应性：可以悬停、侧飞、倒飞，在枝叶茂密、结构复杂的温室、果园、林下等空间自由穿梭，实现“叶片级”精细作业。集群智能与高覆盖：依靠大批量低成本个体的协同作业，达成作业面积、效率和鲁棒性指数级增长，理论上可以无限扩大。高气动效率和潜在长续航：仿生扑翼在低雷诺数下气动效率比旋翼高，加上能量回收技术，可以实现更好的能耗表现，为长续航提供可能。安全性高：安全性能好，重量轻、动能小，即使发生碰撞，人员、作物、设备受到的损害远远小于大型无人机。

结论

仿昆虫扑翼飞行器因为低扰动、高机动、集群化、生态友好等独特优势^{[1][2][3]}，给解决农业授粉危机、精准植保、精细化监测提供了一种新的技术途径。虽然续航、成本、规模化应用还存在挑战，但是依靠跨学科技术融合、产业生态协同，可以成为智慧农业新一代空中作业平台，推动农业生产向高效、智能、可持续方向转型。

参考文献

[1] 孟冉, 张卫平, 王晨阳, 等. 面向毫克级仿昆虫扑翼微飞行器的力-力矩传感器[J]. 半导体光电, 2020, 41(02): 247-251.

[2] 吴彬彬, 张卫平, 邹阳, 等. 仿昆虫扑翼微飞行器电磁驱动电路设计与制造[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(01): 64-68.

[3] 胡楠, 张卫平, 吴凡, 等. 仿昆虫扑翼飞行器三维整体设计及制造[J]. 机械设计与制造, 2016, (10): 107-109.

[4] 董凌. 低空经济下无人机助力智慧农业发展[J]. 河北农机, 2025, (13): 43-45.