doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2023.03.010

籼粳杂交水稻多旋翼无人机辅助授粉流场特性分析^①

翁晓星②* 徐锦大③* 王建军** 王 刚* 黄 赟* 赵 晋* 林宇钢*

(*浙江省农业机械研究院 金华 321017) (**浙江省农业科学院 杭州 310022)

摘要为了解决多旋翼无人机(UAV)在籼粳杂交稻辅助授粉过程中流场特性参数难以求解的问题,提出了一种基于湍流模型的流场特性分析方法,同时给出无人机授粉飞行作业轨迹设计深入研究的相关建议。以四旋翼农用无人机为例,通过纳维-斯托克斯(N-S)方程和压力耦合方程的半隐相容(SIMPLEC)算法,利用 k-s 湍流模型,模拟四旋翼无人机在不同旋翼速度条件下旋翼风场的流场特性以及不同时刻花粉颗粒的运动轨迹。仿真结果表明,在旋翼模型处于悬停飞行状态下旋翼的最大速度位于外径边缘区域,沿四周扩散方向速度逐渐降低,靠近旋转轴的速度接近于0;在花粉模型中,当旋翼的转速增大时流场的速度也随之增大,花粉颗粒运动也加速扩散,即旋翼的转速越大,散粉的效率越高,能达到更好的授粉效果。田间实验表明,结合理论研究设计出的规划飞行路径可提高作业效率。

关键词 无人机(UAV);辅助授粉;颗粒轨迹;流场特性

0 引言

杂交水稻制种技术始创于20世纪70年代,其 中授粉环节主要依靠人工采用绳索、竹竿或木杆 振动父本和自然风力辅助授粉。南方杂交水稻制 种生态优势基地多分布在丘陵山区,先进的杂交 水稻全程机械化制种技术难以在制种基地直接应 用。随着制种过程中雇工难、劳动成本高的问题 日益显现,制种机械化势在必行^[1-2]。将农用无人 机(unmanned aerial vehicle,UAV)应用于籼粳杂交 稻制种,可克服地理环境的限制、增加授粉率、提 高机械化水平。

无人机是一种无人驾驶的远程控制的飞行器, 利用无线电遥控装置和自备的程序控制装置完成各 种指定任务^[3]。其具有作业效率高、无需专用起降 机场和低空作业等优点,且对于复杂的田间环境有 很好的适应性^[4]。美国采用了人驾小型直升飞机 进行辅助授粉的方式。自2012年,袁隆平团队开始 使用单旋翼电动和油动力无人直升机在大幅扩大父 母本行比的种植模式下,试验授粉效果^[5]。

无人机区别于其他农用机械的显著特征为旋 翼,主要集中在无人机旋翼流场的基础理论和方法 的研究。国外利用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法进行直升机旋翼流场的研 究。1987年,文献[6]运用纳维-斯托克斯方程 (Navier-Stokes equation, N-S方程)对悬停流场进行 计算求解。文献[7]通过求解 N-S方程的方法来数 值模拟悬停状态的旋翼流场。21世纪初,文献[8] 又将此方法应用于 UH-60A 模型的旋翼气动性能计 算,进一步验证方法的可行性。

相比国外,国内关于旋翼流场的研究起步较

① 浙江省重点研发计划(2019C02007)资助项目。

② 女,1986年生,硕士,高级工程师;研究方向:农业机械;E-mail:390920801@qq.com。

③ 通信作者, E-mail: why0578@163. com。

⁽收稿日期:2022-01-11)

晚。文献[9,10]提出移动式无人机农用喷洒作业 风场测试设备及测试方法。文献[11]采集无人直 升机旋翼气流在作物冠层所形成的风场相关参 数。文献[12-14]提出适用于无人机的立体风场 测量系统及零点可调的动压式风速测量装置。文 献[15]提出多旋翼无人机在高空飞行风场环境下 的仿真建模方法,讨论了空气密度改变对旋翼气 动特性的影响。文献[16]对纵列式六旋翼大载荷 无人机气动特性数值进行了模拟。综上,国内学 者主要对机体气动特性和旋翼气流的检测方法提 出了各自见解。

目前针对使用多旋翼无人机进行水稻制种辅助 授粉的相关研究不多。多旋翼无人机与单轴单旋翼 无人直升机相比,其结构有很大差异^[17-19]。多旋翼 无人机旋翼所产生的风场参数是否存在差异,需要 进一步探索^[19]。由于多旋翼无人机入门门槛低、容 易操作,其市场保有量更大。虽然旋翼的数量越多, 飞行稳定性也越好,但多叶片的旋翼通常效率较低。 因此综合考虑,本文选择常见的四旋翼植保无人机 进行研究。分析在不同参数条件下旋翼风场的流场 特性,有助于对辅助杂交水稻制种授粉等重要问题 的探索性研究。

1 数学模型

本文所研究的气固两相流在流动过程中没有化 学反应,物理性质稳定,符合 N-S 方程的描述范围。 由于旋翼马赫数较小,属于低速空气动力学范畴,可 假设空气为不可压缩气体,不考虑空气的黏度及温 度影响,忽略机身对计算域流场的干扰。

1.1 N-S 方程

N-S 方程是描述粘性不可压缩流体动量守恒的运动方程。粘性流体的运动方程考虑了不可压缩流体的流动,其基于"流体质点"来描述流体运动,物理意义为单位质量的流体微团的加速度同它所受到的表面压力、体积力与粘性之和相等。

假设单位质量流体微元上在各个坐标轴的 分量分别为*x*、y、z。对于不可压缩流体的 N-S 方 程^[20]:

$$\begin{cases} \frac{\mathbf{D}v_x}{\mathbf{D}t} = f_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\mathbf{D}v_y}{\mathbf{D}t} = f_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \quad (1) \\ \frac{\mathbf{D}v_z}{\mathbf{D}t} = f_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \end{cases}$$

其中,ρ为密度(kg/m³);p为压强(Pa);D/Dt为随 体导数,其矢量形式为

$$\frac{\overrightarrow{Dv}}{Dt} = \overrightarrow{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mu \nabla^2 \overrightarrow{v}$$
(2)

其中, \vec{v} 为速度矢量(m/s);t为时间变量; \vec{f} 是单位 体积流体受的外力; μ 为黏度(Pa · s); ∇ 为哈密尔 顿(Hamilton)算子,即 $\frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k_{\circ}$

1.2 k-e 湍流模型

湍流是指具有强扩散性、无序性和耗散性的有 结构流动。从结构上分析,湍流是由于不同强度和 尺度的旋转的涡相互叠加而形成的流动,其大小和 转向都是随机的、非定常的。*k-e* 湍流模型是由文 献[21]于 1972 年提出的湍流模型,是从实验现象 中总结出来的一个半经验公式。该模型的最初发展 是为了改善混合长度模型和避免复杂流动中的湍流 长度尺寸的代数表示。它主要是通过求解 2 个附加 方程 *k* 方程(*k* 为湍流动能)和 *c* 方程(epsilon,湍流 动能耗散率)来确定湍流黏性系数,进而求解湍流 应力。采用 *k-c* 模型求解湍流问题时,控制方程包 括连续性方程、动能方程、能量方程和 *k-c* 方程以及 黏性系数方程。假设单位质量流体微元上在各个坐 标轴的分量分别为 *x*, *y*, *z*。

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon$$
(3)

$$\rho \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial k}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_s} \right) \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_k} \right] + \frac{c_1 \mathcal{E}}{k} \mu_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\mathcal{E}^2}{k}$$
(4)

$$\mu_{l} = c_{\mu} \rho k^{\frac{1}{2}} l$$

$$= (c_{\mu} c_{D}) \rho k^{2} \frac{1}{c_{D} k^{\frac{3}{2}} / l} = c_{\mu} \rho k^{2} / \varepsilon$$

$$- 315 -$$

 $c_{\mu} = c_{\mu}c_{D}c_{\mu} = c_{\mu}c_{D}$ (6) 其中,k 为湍流动能(J); ε 为湍流动能耗散率(%); t 为时间变量; ρ 为流体密度(kg/m³); μ 为黏度 (Pa · s); l 为湍流长度尺度(m); 由经验公式得 k = $3/2(u_{avg}I)^{2}$,其中 u_{avg} 为平均流体速度(m/s), I 为湍 流强度; $\varepsilon = C_{\mu}^{3/4}k^{3/2}/l_{o}$

方程引入了 3 个系数 $c_1 \ c_2 \ c_\mu \pi 3$ 个常数 $\sigma_k \ \sigma_s \ \sigma_\tau$,这 6 个经验常数一般分别取为 1.44 (1.92) 0.09 和 1.0 $(1.3) \ 0.9 \sim 1.0^{[22]}$ 。

近年来,根据大气质点扩散的物理理论提出了 多种力学模型,该理论认为花粉的重力、平均水平速 度和湍流是作用于空气中质点运动的预报因子。因 此本文是利用 *k-e* 湍流模型对杂交水稻授粉过程中 花粉运动进行分析。

2 数值计算与结果分析

2.1 物理模型与网格划分

目前应用于水稻花粉扩散方面的研究尚不多 见,无人机授粉作业的花粉量分布受到3个方向风 场的力(图1(b)),影响因素复杂。由于水稻花粉 的粒径较小,平均约为42~43 μm^[23],与大气中较 大的尘埃粒子直径相当,在气流中的移动是被动的。 近年来的研究表明,距离是决定水稻花粉浓度的主 要因素,而风向则是决定花粉扩散的方位,风速是影 响花粉扩散有效距离的重要因子。



由文献[24]可知,旋翼之间流场处于相对独立 状态,以无人机中心为轴两两对称分布,但由于旋翼 之间间距较远,存在零风速区域,该区域一直延续到 旋翼下方一段距离后才开始聚拢影响。且各个螺旋 尺寸完全相同,转速基本相同,本文将一个旋翼物理 - 316 — 模型作为研究对象(用于研究的四旋翼无人机代表 机型如图1(a)所示,其相关参数如表1所示)。N-S 方程为旋翼流场CFD计算的控制方程,划分计算域 并对计算域进行网格划分,采用 k-e 湍流模型、压力 与速度耦合方式的半隐相容(semi-implicit method for pressure linked equations consistent,SEMPLEC)算 法,分别对无人机旋翼流场和花粉扩散进行模拟分 析,有助于后期花粉扩散分析研究。

表1 用于研究分析的无人机型及参数

型号	质量/kg	旋翼直径/ mm	旋翼数量	生产厂家
3WD4-10	12.3	736.6	4	浙江智天科技 有限公司

2.1.1 旋翼模型

模拟旋翼在空气中的湍流流场,其中叶轮形状为2个叶片,此仿真通过冻结转子研究类型来实现。 在这种情况下,冻结转子解应视为流场的准稳态近 似值。使用周期性条件可以缩短计算时间,本模型 选取旋翼空间的1/4 作为计算域(图2(b))。

本文设计的旋翼分析模型,因为在螺旋桨旋转 时其根部所处位置的线速度很小,不考虑桨叶部分 所产生的升力。所选取的旋翼直径为730 mm,在此 按比例缩放为0.073 mm。计算区域定义为一个半 径为1.5 mm、高度为3 mm 的圆柱区域(图2(a)), 区域内流体为空气,其参数与表2 中连续项—空气 参数—致。



利用 Meshing 软件对流场计算域划分网格。计 算域内的网格划分采用四边形非结构网格并结合角 细化,网格划分如图 2(b)所示,网格总数为 451 241。 网格质量(图 3)显示,绘图颜色占比值越大,质量越 高;直方图越靠右,质量越高。最小单元质量为 0.1951,平均单元质量为 0.6644,此网格质量满足 要求。



2.1.2 花粉扩散模型

无人机授粉作业时旋翼产生的水平风场是由 x、y向形成的与水稻冠层面水平的风场,花粉的悬 浮输送主要来自这2个方向的风力。为了了解旋翼 作用下花粉颗粒的运动情况,将气流场内充入颗粒, 模拟短时间内的颗粒变化轨迹。

如图 4 所示,花粉颗粒(离散相材料)从进口进 入,经过一段时间旋翼旋转作用后,从出口出。进口 条件设置为速度边界(velocity-inlet),出口条件为压 力边界(pressure-outlet),流体(连续相材料)设置为 空气。根据设计域建立结构模型并将自由网格划分 为三角形网格;设定设计域为求解域;采用狄利克雷 边界条件(Dirichlet boundary condition);设定求解时 间并选择直接求解器。



文献[25]研究显示,80%的花粉沉降在距离花 粉源30m以内,而文献[26]采用同心圆设计来实 现转基因水稻研究,在此将分析范围设计为圆形。 旋转域与静止域之间设置为交界面,根据设计域建 立结构模型并将自由网格划分为三角形网格,网格 划分完成后的效果如图4(b)所示,网格的总数为 2528,此网格质量满足要求。

2.2 边界条件

空气气流作为连续相处理,使用雷诺平均方程 求解,旋翼的进气边界采用质量进口边界,具体数值 可通过以下公式计算^[27]。

$$M = \pi R^2 \rho v_1 \tag{7}$$

$$\nu_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{G/\pi R^2}{2\rho}}$$
(8)

其中,*G* 为旋翼无人机质量(kg);*R* 为旋翼半径 (m);ρ 为空气密度(kg/m³),v₁为入流速度(m/s)。 表 2 中数据除空气的温度、粘度和密度及花粉的温 度、质量和密度外,其他均为软件默认数值。施加流 动连续性边界条件,使旋转域中的速度场与稳态域 中的速度场相符。选择旋转机械,在稳态域和旋转 域之间自动创建对边界。

表 2 模拟实验流体的各物理参数

连续相——	空气	离散相—花粉颗粒		
温度/K	293	温度/K	293	
粘度/Pa・s	1.225	质量/kg	1e-06	
密度/(kg/m ³)	1.22e-05	密度/(kg/m ³)	2200	

2.3 仿真结果与分析

2.3.1 旋翼模型

本文把处于悬停飞行状态下,转速达到 60 r/s 时的孤立旋翼作为研究对象,不受机体和其他旋翼 流场的干扰。如图 5 所示,旋翼的最大速度位于外 径边缘区域,从四周扩散方向速度逐渐降低,靠近旋 转轴的速度接近于 0。当 2 个旋翼叶片运动时,将 形成相对于旋转轴对称分布的速度圆环,此仿真结 果与陈明^[28]研究结果类似,在旋翼叶片的外沿处, 靠近旋翼桨片处的气流增强。旋翼旋转时产生的吸 附作用,使得周围气流带到旋翼下洗流场;下洗流场 中最大速度集中在旋翼叶片中部的正下方。其现象 是由于旋翼叶片边缘处的压力产生变化,上表面的 压力为负,下表面为正,压力差形成旋翼的升力。

由上述旋翼模型结果分析可知,旋翼速度流场 中最大值区域位于旋翼叶片附近。目前旋翼叶片的 流场分析不多,下一步将对花粉颗粒在旋翼作用下 的运动轨迹和流场进行分析。

— 317 —



2.3.2 花粉扩散模型

本文设置3个进口,颗粒模拟花粉随着连续流 场通过入口进入建模域。流体连续性、k和 e 残差 收敛标准均设定为1e-3。对于每个释放入口,颗粒 的释放初始速度等于流体速度,旋翼以83 r/s 的恒 定角速度按逆时针方向旋转。

旋翼的存在使得无人机可以在田间垂直起降, 旋翼旋转与空气的互相作用为机尾机体提供必要升 力,且产生作用在作物冠层的旋翼气流。旋翼气流 呈现出涡旋的典型特征。在旋翼授粉作业中,花粉 也受到气流涡旋影响,呈现与自然风作用不同的授 粉效果。为便于观察花粉在旋翼作用下的运动规 律,模拟3个不同方向(图4(b))上释放颗粒运动 轨迹。图6分别为t=0.5s,t=1s,t=2s,t=3s时, 花粉颗粒和旋翼的运动状态。旋翼逆时针旋转,当 花粉到达旋翼风场,受到气流影响改变初始的运动 状态,从右侧进入的花粉向上扫掠,从左侧进入的花 粉在旋转叶片作用下向下扫掠,从下端进入的花粉向 右扫掠。颗粒在空气和旋翼旋转的共同作用下.3 s 后3种不同方向花粉颗粒分散分布在建模域内。可 见通过旋翼的旋转作用,花粉可在短时间内扩散到四 周,有助于提升杂交水稻的授粉效果。

由图 7(a)可以发现,颗粒受到气流和旋翼的共同作用,在低转速的情况下可以到达旋翼表面;如 图 7(b)所示,在高转速作用下颗粒无法到达旋翼表面,被旋翼的高转速气流早早改变初始运动方向,旋 翼附近形成了"空心圆",此区域内几乎没有花粉。 由于模型设计局限,如图 6(c)所示,颗粒到达设计边 界后反弹,反弹后的颗粒仍受到旋翼的影响二次扩 散,而"空心圆"始终存在。图 6(b) 与图 7(b) 对比可 知,当 *t* =1 s 时旋转速度为 83 r/s 的颗粒分散距离比 旋转速度为 70 r/s 更远。此与文献[24]记载类似,



即风速对水稻基因漂流影响较为明显,二者之间有 正相关作用,最大风速越大,最大基因漂流率越大, 最大基因漂流距离也越长。图8为t=3s状态下旋 转速度为20r/s、70r/s和83r/s(飞行速度分别约 为1m/s、3.5m/s和4m/s)的速度分布图,可以看 出旋翼的速度相对于旋转中心均呈对称分布,由于 此研究对象是孤立螺旋桨,其流场分布不受机体以 及其他旋翼流场的干扰。旋翼速度最大值位于靠近 外径边缘的区域,在最外端处速度下降,总体呈现先 增大后减小的趋势,同时旋翼转速增大,在建模域内 旋翼附近的速度场数值明显提升,这与前期理论研 究结果相符。



图 7 t=1s时花粉颗粒运动情况

当大气层结稳定时,花粉大多落在花粉源附近; 而大气层结不稳定时,花粉会随着风扩散较远的距 离。图9为旋翼作用下的 x-y 平面压力气场情况, 当 t=3 s 时旋翼的压力相对于旋转中心呈对称分 布,且明显大于外围压力场,使得颗粒受力随之运 动,此时对大气的影响相对减弱,更多是受到旋翼旋



图8 t=3 s 时的速度分布情况

转流场的影响。因此无人机辅助授粉应选择在大气层结稳定、近地面风速小的天气情况下作业。



通过上述建模仿真结果分析可得以下结论。

(1)文献[25,27]研究显示,90%的花粉沿主风 向扩散,该方向的花粉扩散距离是其他方向的4~ 50倍。文献[29,30]发现,风速增加14%~37%,最 大花粉浓度将增加24%~39%,花粉扩散距离将增 加33%。仿真结果表明,当无人机旋翼转速增加, 周围的流场速度随之增加,花粉扩散的速度受到流 场的影响。当无人机近地面的流场作用于花粉,大 部分花粉将沿主风向扩散,有利于辅助授粉。但气 流速度不是越大越好,当增大到一定值后花粉传播 的距离将超过母本区域范围(以四旋翼为例,飞行速 度大于1.2 m/s 时,风场宽度达3 m 以上;父本与母本 行距0.23 m,父本行间距0.5 m),轻则造成花粉浪 费,降低授粉效率,重则引起水稻倒伏。

(2)水稻花粉扩散模型表明,在花粉源附近,当 大气层结稳定时,花粉扩散率较稳定,与花粉源距离 的增大,将会导致花粉扩散率迅速下降;大气层结不 稳定时花粉扩散率的衰减速度相对缓慢,花粉也因 此扩散较远的距离。鉴于稻花粉的平均生命只有 3~5 min 左右,实际上只有活的花粉,也就是花粉扩 散 5 min 内才会对基因漂流起到作用。而仿真模拟 颗粒运动情况发现,通过无人机旋翼的旋转作用,花 粉可在短时间内迅速扩散,达到区域内的均匀分布, 从而避免花粉扩散不均匀,结实率不理想的现象。 2.3.3 授粉实验

在实际实验中,以3WD4-10 无人机为例,飞行 速度设置为3.5 m/s(此时旋翼转速在70 r/s 左右, 与仿真设计值相近),辅助授粉每天需进行2~3 次,每次授粉时间控制在 30~40 min 内。同时为了 避免流场"空心圆",在规划无人机飞行轨迹时不将 其直接作用于父本行之上,而偏离父本行一定距离, 使得旋翼旋转气流更好地作用于父本花粉。在田边 缘处的父本,飞行轨迹更靠近父母本中央,减少花粉 的损失。而当旋翼与杂交水稻垂直距离过大时,旋 翼气场变得复杂,且无人机的气流作用变小,所以此 飞行高度设置不超过2m。为了避免边界转弯耗能 (转弯过程中经历降速与加速,由上述仿真可知在很 短的时间内实现速度流场的转变,产生一定耗能),相 较于螺旋式的作业方式,往复式的飞行路线耗能更低 (图 10(b)),沿父本行偏离其约为旋翼臂长度的距离 进行飞行。

实验田块面积长度为 300 m,宽为 60 m。无人机 以上述参数进行辅助授粉,与人工拉绳效果进行比 较。(1)由表 3 可知,在花粉密度、母本异交结实率和 最终的产量上数值差异不大,授粉效果相当,但前者 节约了人力成本,辅助授粉效率是人工的 10 倍以上。 (2)当无人机速度提升,不仅转速随之提升,花粉的密 度以及扩散面积也随之增大,分别增加了 23% 和 27%。但在低空飞行高度不超过 2 m 的情况下,飞行 速度不宜过大,否则影响母本生长。(3)如图 10(a) 所示,图中横坐标 1 和 2 是无序飞行的花粉收集情 况,而 3 和 4 为规划飞行的花粉收集情况。在相同作 业时间内,无人机无序飞行与规划飞行时收集的花粉 密度有明显差异。规划路径的情况下花粉密度分布 更加均匀,且授粉率高于无序飞行的 1 倍以上。



图 10 授粉实验效果

表 3 在 2 种辅助授粉方式下花粉与结实率统计

授粉方式	结实率/%		花粉统计/(个/视野)			
无人机授粉	37.20	23.57	22.18	121	108	58
	19.40	31.52	39.30	108	110	65
	25.47	22.99	21.45	101	121	66
人工授粉	22.70	27.70	25.94	148	64	68
	34.17	25.59	20.60	153	57	70
	41.53	32.88	18.99	155	68	66

实验结果表明,利用无人机进行辅助授粉是可行的。在无人机型号的选择上,需根据田块和水稻品种的特点,一般宜选择中低速的无人机作为辅助授粉工具,飞行高度维持在2m左右(低空飞行)。由于籼粳杂交水稻的形态变化,开花期平均高度达到1.2m,叶面积指数达到8,杆高叶密对风有较大的削弱作用。 无人机辅助授粉属于气力式授粉,通过旋翼产生的风力作用在父本上,花粉沿着作用力的方向扩散。在旋翼风场下,杂交水稻的植株茎秆、花穗等也受到影响, 杆高叶密影响变弱,有助于花粉的扩散。

3 结论

目前旋翼无人机的旋翼气流研究并不多,旋翼 作业效果的分析对田间作业研究具有基础性意义。 本文实验结果表明,多旋翼无人机可以实现杂交水 稻辅助授粉,且效果与人工授粉相当。同时采用 k- ~ 湍流模型及压力与速度耦合方式的半隐相容算 法,对无人机旋翼流场进行仿真分析。依据四旋翼 无人机的飞行时旋翼所处的空气气流状态,建模仿 真发现:(1)采用圆柱作为计算域,速度场中数值最 大的区域位于旋翼叶片附近,转轴周围速度接近于 0,叶片外沿处的速度由高峰逐渐降低。实验中,规 划路径时考虑流场"空心圆",将飞行距离偏离父本 约旋翼臂的长度。在相同作业时间,无人机无序飞 行与规划飞行时收集的花粉密度有明显差异。规划 路径的情况下花粉密度分布更加均匀。(2)基于旋翼 模型分析结果,模拟旋翼附近的花粉扩散规律。花粉 受到旋翼流场的作用下可在短时间内迅速扩散,达到 区域内的均匀分布。因此旋翼的转速越大,散粉的效 率越高,能达到更好的授粉效果。此结论与实验相 似,当无人机速度提升,不仅转速随之提升,花粉的密 度以及扩散面积也随之增大。而当旋翼下方流场超 过一段距离,多个旋翼侧向气流叠加,相互干扰,流场 变得复杂,需要考虑更多因素,有待进一步研究。

通过田间实验可知,在选择机型和飞行速度时, 需考虑田块和水稻品种的特点。当低空飞行(飞行 高度 <2 m)时,宜选择中低速的无人机作为辅助授粉 工具。当田块无障碍物时,在规划飞行轨迹时应均匀 完整地覆盖作业区域,为了避免边界转弯耗能,宜选 择往复式的飞行路线,沿父本行偏离其约旋翼臂长度 的距离进行飞行。而存在电线杆等障碍物时需考虑 回避障碍物、绕过潜在飞行危险区域等要求,建议运 用多算法融合等方法,提高飞行路径设计的精准度。

综上所述,通过流体仿真分析模拟花粉的运动 轨迹及各时段的旋翼流场特性是可行的,结合田间 实验情况,尝试探索飞行参数(离地高度、飞行速度 等)与花粉空间运动状态的关系,有助于旋翼无人 机飞行轨迹及参数的规划,为精准辅助授粉提供条 件,切实提高旋翼无人机的作业效果。同时上述研 究成果为构建农用无人机辅助授粉效果预测模型提 供了理论基础,有助于后续籼粳杂交水稻制种授粉 等重要问题的探索性研究。

参考文献

- [1] 姜元华. 甬优系列籼粳杂交稻生产力优势与相关生理 生态特征研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2015:13-25.
- [2] 陈惠哲, 毛一剑, 朱德峰, 等. 杂交水稻机械化制种 技术初步研究[J]. 杂交水稻, 2012, 27(5): 34-36.
- [3] 杨陆强,果霖,朱加繁,等.我国农用无人机发展概况与展望[J].农机化研究,2017,39(8):6-11.
- [4] LAN Y B, CHEN S D, FRITZ B K. Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies
 [J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2017, 10(3): 1-17.
- [5] 刘爱民,张海清,廖翠猛,等.单旋翼农用无人机辅助杂交水稻制种授粉效果研究[J].杂交水稻,2016, 31(6):19-23.

- [6] CHEN C L, CROSKEY W J. Numerical simulation of helicopter multi-bladed rotor flow [J]. AIAA Journal, 1988, 20(6): 198-202.
- [7] SRINIVASAN G R, BAEDER J D. Flowfield of lifting rotor in hover: a Navier-Stokes simulation [J]. AIAA Journal, 1992, 30(10): 2371-2378.
- [8] WAKE B E, BAEDER J D. Evaluation of a Navier-Stokes analysis method for hover performance prediction [J]. Journal of the American Helicopter Society, 1996, 41(1): 7-17(11).
- [9] 梁建, 薛新宇, 周立新, 等. 移动式无人机农用喷洒 作业风场测试设备及测试方法: 101718615A [P]. 2010-06-02.
- [10] 薛新宇, 屠康, 兰玉彬, 等. 无人机高浓度施药对水 稻品质的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12):94-98.
- [11] 胡炼,周志艳,罗锡文,等.无人直升机风场无线传 感器网络测量系统设计与试验[J].农业机械学报, 2014,45(5):221-226.
- [12] 李继宇,姚伟祥,林晋立,等.一种适用于无人机的 立体风场测量系统及其使用方法:201610973681.9 [P].2017-05-17.
- [13] 李继宇,林晋立,兰玉彬,等.无人机旋翼下方风场 测量平台及采用该平台的风场测量方法: 201710151904.5[P].2017-08-18.
- [14] 李继宇, 黄聪, 兰玉彬, 等. 一种零点可调的动压式 风速测量装置: 201610983366.4[P]. 2017-04-19.
- [15] 李诚龙. 多旋翼无人机高空飞行稳定控制问题研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016:13-54.
- [16] 杨璐鸿. 纵列式六旋翼大载荷无人机气动特性数值模 拟及其优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015;31-61.
- [17] 刘羽峰, 宁媛. 六轴旋翼碟形飞行器控制系统设计 [J]. 现代机械, 2010, 19(5): 56-58.
- [18] 杨成顺,杨忠,张强.一种新型多旋翼飞行器的建模 与反演控制[J].济南大学学报:自然科学版,2013, 27(1):52-58.

- [19] 潘俊,杨成顺,周宾.一种新型多旋翼飞行器的建模 与反演控制[J].佳木斯大学学报:自然科学版, 2012,30(4):540-544.
- [20] POMIN H., WAGNER S. Navier-Stokes and helicopter rotor aerodynamics in hover and forward flight[J]. Journal of Aircraft, 2001, 39(5): 812-821.
- [21] FU S, LAUNDER B E, LESCHZINER M A. Modeling strongly swirling recirculating jet flow with Reynolds-stress transport closures [C] // In 6th Symposium on Turbulent Shear Flows. Toulouse: Springer, 1987:216-221.
- [22] 杨利霞, 葛德彪, 赵跃华, 等. 基于直接离散方式的 磁化铁氧体材料电磁散射的时域有限差分方法分析 [J]. 物理学报, 2008, 5: 2936-2940.
- [23] 王建伟. 无人机风场下的水稻花粉运动规律的研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016:25-32.
- [24] 廉琦. 六旋翼植保无人机下洗气流变化机理及喷头安 装位置的研究[D]. 大庆:黑龙江八一农业大学, 2019:51-77.
- [25] KANYA J I, KINYAMARIO J I, AMUGUNE N O, et al. Dispersal distance of rice (Oryza Sativa L.) pollen at the Tana River delta in the coast province, Kenya [J]. African Journal of Biotechnology, 2009, 8(10): 2265-2270.
- [26]何美丹,徐立新,尹昭坤,等.籼、粳型转基因水稻花粉 源基因飘流差异研究[J].南方农业学报,2021,43 (5):559-565.
- [27] JAZAYERI S A, XIANGUO L I. Nonlinear instability of plane liquid sheets [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 406: 281-30.
- [28] 陈明. 四旋翼植保无人机的总体设计及其气动特性分析[D],河北:河北工业大学,2017:42-62.
- [29] 李继宇, 兰玉彬, 施叶茵. 旋翼无人机气流特征及大 田施药作业研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (12): 104-112.
- [30] SONG Z P, BAO R L, CHEN J K. Pollen flow of cultivated rice measured under experimental conditions [J]. Biodiversity and Conservation, 2004, 13(3): 579-590.

Research on pollination field characteristics of multi-rotor agricultural unmanned aerial vehicle in indica-japonica hybrid rice seed production

WENG Xiaoxing^{*}, XU Jinda^{*}, WANG Jianjun^{**}, WANG Gang^{*}, HUANG Yun^{*}, ZHAO Jin^{*}, LIN Yugang^{*}

(*Zhejiang Academy of Agricultural Machinery, Jinhua 321017)

(** Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310022)

Abstract

To solve the flow field characteristic parameters of multi-rotor unmanned aerial vehicel (UAV) in the supplementary pollination process of indica-japonica hybrid rice, a flow field characteristic analysis method based on the turbulence model is proposed, and suggestions for further study on a UAV pollination flight trajectory design are given. By solving Navier-Stokes(N-S) equations and the pressure-linked equation using the semi-implicit method for pressure-linked equation consistent(SIMPLEC) algorithm, the k- ε turbulence model is used to simulate the flow of the rotor wind field and the pollen particle trajectory at different time of the quadrotor UAV under different rotor speeds. Simulation results show that when the rotor model is hovering, the maximum velocity of the rotor is located at the edge of the outer diameter, and the velocity decreases gradually along the surrounding diffusion direction and approaches zero near the rotation axis. In the pollen model, when the rotor speed increases, the velocity of the flow field also increases. The movement of pollen grains is also accelerated. That is, the greater the rotor speed, the higher the spreading efficiency of the powder, and the higher the effect of pollination. Field experiments show that the planned flight path designed based on the theoretical research can improve the operation efficiency.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV), supplementary pollination, particle trajectory, field characteristic