doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.022

航时可延展水稻辅助授粉无人飞机设计与作业参数优选

姜　锐[1,2]　林键沁[1,3]　林宗辉[1,4]　刘爱民[5]　邓孔洪[1,3]　周志艳[1,6]

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;
3. 广东省农业人工智能重点实验室, 广州 510642; 4. 广东省农业航空应用工程技术研究中心, 广州 510642;
5. 袁隆平农业高科技股份有限公司, 长沙 410006; 6. 农业装备技术全国重点实验室, 广州 510642)

摘要: 无人飞机在杂交水稻制种辅助授粉领域得到广泛应用,但现有电动农用无人飞机续航时间短,换电频次高,难以充分利用短暂的有效授粉时间窗口,影响授粉效率。为解决无人飞机辅助授粉续航时间短的问题,同时优选作业参数以提高辅助授粉作业效果,本文设计了一种采用多电池组分时并联配电方案的航时可延展辅助授粉无人飞机,最大续航时间达到 50 min。采用基于 LBM(Lattice Boltzmann method)的数值模拟方法对样机旋翼产生的下洗风场进行了仿真,优选出飞行速度 4.5 m/s 和飞行高度 2 m(距离父本冠层)的作业参数。为验证样机辅助授粉效果和优选作业参数的有效性,设计了样机、四旋翼、六旋翼 3 种机型杂交水稻制种田间辅助授粉对比试验,并通过采集单视野平均花粉粒数、结实率、制种产量以及续航时间 4 个维度数据进行离差标准化分析。试验结果表明,样机试验续航时间(42 min)、辅助授粉作业效率(10.5 hm^2/架次)、单视野平均花粉粒数(6.98 粒,农艺上要求至少 3 粒)和制种产量(1 996.5 kg/hm^2)以及综合评分均优于另外两种对照机型。研究结果可为提高杂交水稻制种无人飞机辅助授粉效率提供参考。

关键词: 无人飞机; 杂交水稻制种; 辅助授粉; 续航时间; 风场仿真

中图分类号: S224.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)02-0229-11　　**OSID**:

Design and Operational Parameter Optimization of Endurance-extended Drone for Supplementary Pollination in Hybrid Rice Breeding

JIANG Rui[1,2]　LIN Jianqin[1,3]　LIN Zonghui[1,4]　LIU Aimin[5]　DENG Konghong[1,3]　ZHOU Zhiyan[1,6]

(1. *College of Engineering*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment*, *Ministry of Education*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
3. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural Artificial Intelligence*, *Guangzhou* 510642, *China*
4. *Guangdong Engineering Research Center for Agricultural Aviation Application*, *Guangzhou* 510642, *China*
5. *Yuan Longping High-tech Agricultural Co., Ltd.*, *Changsha* 410006, *China*
6. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology*, *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: In recent years, drones have been explored as a potential tool for pollination support in hybrid rice breeding. However, the limited flight endurance of existing electrical agricultural drones necessitates frequent battery replacements, hindering the efficient utilization of the limited effective pollination time window and reducing pollination efficiency. To address the limited endurance of drones in pollination tasks and optimize operational parameters to enhance pollination efficiency, a supplementary pollination drone was designed with extendable flight duration, utilizing a time-sharing parallel power distribution scheme with multiple battery packs, achieving a maximum flight endurance of 50 min. To improve the pollination effectiveness of the prototype, a numerical simulation of the downwash airflow generated by the rotors was conducted by using the Lattice Boltzmann method (LBM). The optimal flight parameters of the prototype were found to be a speed of 4.5 m/s and an altitude of 2 m above the male parental canopy.

收稿日期: 2024-11-20　修回日期: 2024-12-25

基金项目: 岭南现代农业实验室科研项目(NT2021009)和广东省科技计划项目(2023B10564002)

作者简介: 姜锐(1993—),男,副教授,博士,主要从事农业航空应用技术研究,E-mail: ruiojiang@scau.edu.cn

通信作者: 周志艳(1972—),男,教授,博士,主要从事农业航空应用技术研究,E-mail: zyzhou@scau.edu.cn

Field experiments were conducted to validate the prototype's pollination effectiveness and the optimal flight parameters by comparing three drones: the prototype, a quadrotor, and a hexacopter. Data were collected in four dimensions: average pollen grain count per single field of view, fruiting rate, yield, and endurance time for standardized deviation analysis. Results showed that the flight endurance (42 min), the pollination efficiency (10.5 hm^2 per flight), the averaged pollen grain count (6.98 grains per view, meeting the agronomic requirement of at least 3 grains), the yield (1 996.5 kg/hm^2) and the comprehensive score of designed drone were better than two comparison drones. The research result may serve as a reference for enhancing the efficiency of drone supplementary pollination in hybrid rice breeding.

Key words: drone; hybrid rice breeding; supplementary pollination; endurance time; wind field simulation

0 引言

杂交水稻属于非严格的自花授粉作物,仅依靠自然风进行授粉难以满足授粉需求,因此,为实现优质高产需要异花授粉[1]。异花授粉需要借助人工进行辅助授粉,以保障种子结实率和制种产量。目前人工辅助授粉方式主要有人力式与机械式[2]。人力式辅助授粉效率低、劳动强度高,难以满足规模化制种要求。机械式辅助授粉主要分为碰撞式与气力式[1],碰撞式辅助授粉操作方便但易损伤植株;气力式辅助授粉相比不可控的自然风条件,利用旋转机械(部件)可产生持续、稳定、定向的气流促进花粉传播,实际应用较为广泛。在气力式辅助授粉中,采用无人飞机对杂交水稻制种进行辅助授粉,是目前的发展趋势[3]。

近年来,无人飞机辅助授粉作业因能有效提高授粉效率、增加制种结实率和产量,同时支持更大的父本母本种植比[4],在杂交水稻制种领域得到快速发展[5-6]。目前,研究者已对无人飞机在辅助授粉中的应用展开了研究。胡炼等[7-8]开发了一套风场无线传感器测量系统对油动直升机授粉风场进行了测量;李继宇等[9-10]优选了单旋翼和多旋翼无人飞机辅助授粉时的作业参数;王玲等[11]分析了六旋翼米字形架构无人飞机风场的竖直分布特性;苏和[12]对比了四旋翼植保无人飞机、高地隙自走授粉机和人工背负式授粉机辅助授粉试验效果;文献[13-14]对气动授粉机参数进行了优化;翁晓星等[15-16]研究了多旋翼无人飞机授粉流场特性,为粳稻的机械化杂交授粉提供了理论基础;文献[17-18]在油茶和梨树上开展了无人飞机辅助授粉研究;文献[19-21]利用数值仿真研究了旋翼转速、旋翼数量与位置对下洗风场分布的影响。上述研究采用的电动机型续航时间通常只有 10~15 min 的植保无人飞机[22],而杂交水稻有效授粉时间短,持续时间长(10~15 d),父本颖花每天开放时间只有约 90 min,因此需在有效授粉时期内尽量减少无人飞机起降次数以充分利用颖花开放时间[23]。此外,植保无人飞机型号众多,风场分布差异大,不同机型用于辅助授粉最优作业参数存在较大差异。特别在杂交稻辅助授粉上,花粉分布情况与无人飞机旋翼产生的下洗风场在水稻冠层分布息息相关。因此,还需要研究特定机型旋翼风场分布规律,优选对应的作业参数以提高辅助授粉效果。

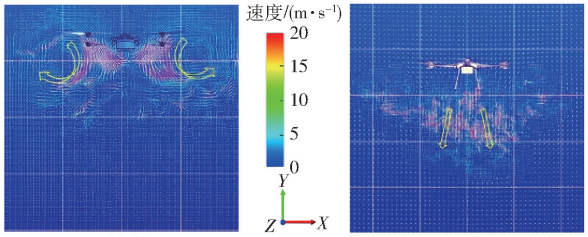
为了克服无人飞机辅助授粉续航时间短的问题,本文提出并设计一种航时可延展的辅助授粉无人飞机(后称"样机"),同时利用计算流体力学(Computational fluid dynamic,CFD)技术结合田间花粉分布试验,探究样机田间风场规律和花粉在母本厢行内的分布情况,优选可行高效的辅助授粉作业参数。最后,通过设置样机、P20 植保无人飞机、T16 植保无人飞机 3 种机型的杂交水稻田间辅助授粉对比试验,以期验证样机辅助授粉效果和优选作业参数有效性。

1 航时可延展辅助授粉无人飞机设计

1.1 整体结构设计

为了使无人飞机产生更有利于花粉传播的风场分布,结合相关研究[9-11,20],对主流六旋翼Ⅰ型(米字形)和四旋翼 X 形农用无人飞机结构进行了风场仿真对比,发现 X 形结构的无人飞机旋翼风场分布更有利于花粉悬浮与扩散(图 1),进而设计了以四旋翼 X 形机架为基础的辅助授粉无人飞机样机,结构如图 2 所示。

四旋翼无人飞机因具有强耦合欠驱动的特点,需强大稳定的飞控以降低外界干扰[24]。样机飞控系统基于大疆 A3-AG 二次开发,具有良好的自稳性与操控性,电机为 EZ80S KV115(直径 89.5 mm),电调为好盈 80A V4.1(无刷电调)。样机尺寸如图 3 所示,长、宽、高分别为 1 250、1 100、350 mm,旋翼长为 840 mm,空机质量 12 kg。



(a) 四旋翼X形　　(b) 六旋翼米字形

图 1　2 种主流机型的风场分布仿真对比

Fig. 1　Simulation comparison of wind field distribution of two typical models

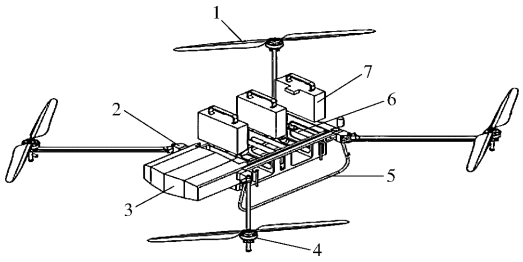


图 2　样机结构示意图

Fig. 2　Schematic of composition of prototype

1. 旋翼　2. 机臂　3. 罩盖　4. 无刷电机　5. 脚架　6. 电池卡座　7. 电池组

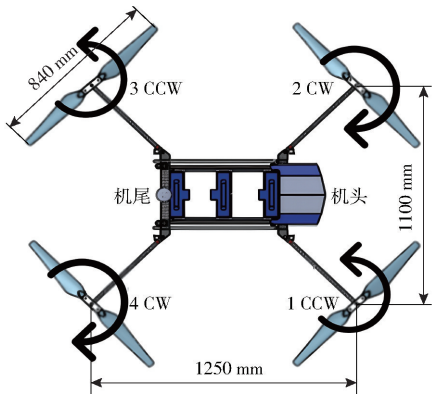


图 3　样机尺寸

Fig. 3　Size of prototype

1.2　配电系统设计

为了提高样机续航可延展性，采用多电池组（支持最大 5 组）分时并联解决方案，基于模块化设计理念，在机身腹部设计了配电电池箱，电池箱中设有多个电池卡座用于安装智能飞行锂电池（单组电池容量为 22 A·h，质量为 5 kg）。当电池箱中安装大于 1 组电池时，通过智能分时通断电路实现多电池组分时并联，电路系统原理如图 4 所示、控制流程如图 5 所示。

配电系统工作时，继电器 K1 闭合导通，其余继电器断开，样机由电池组 1 供电，当电池组 1 电压小于设定电压时，继电器 K2 闭合导通，此时电池组 1、2 均为样机供电，二极管 D1 可以防止电池组 2 与电池组 1 发生实质并联，延时 2 s 后，继电器 K1 断开，样机接由电池组 2 单独供电，以此类推。

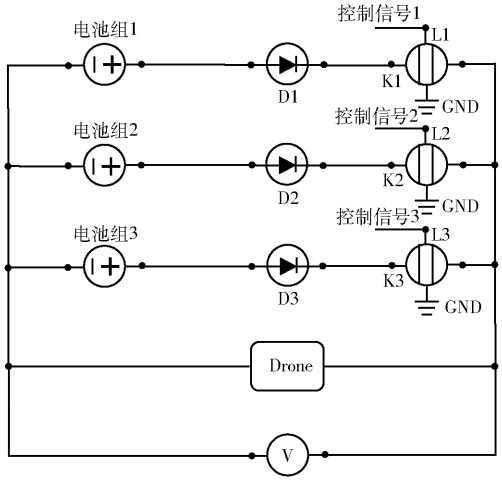


图 4　电池组并联系统原理图

Fig. 4　Schematic of battery pack parallel system

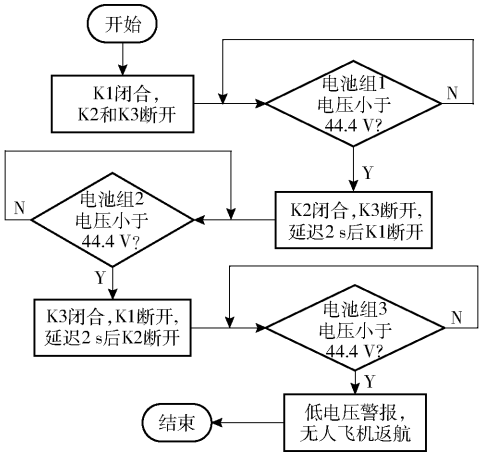


图 5　电池组并联控制流程

Fig. 5　Battery pack parallel control flowchart

1.3　样机续航测试

为了明确样机所用电池组数与实际续航时间关系，实测样机在飞行速度 4.5 m/s、飞行高度 2.5 m 作业参数下分别搭载 1 ~5 组电池的续航时间，电池组数量与续航时间关系如图 6 所示。

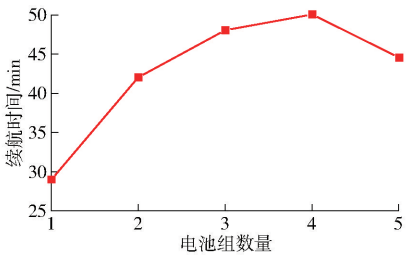


图 6　不同电池组数量续航时间

Fig. 6　Flight duration of different battery packs

从图 6 可看出，随着电池组增加，样机续航时间明显提升，但当电池组数量超过 4 组时，续航时间不增反减，其原因与样机起飞质量和功率限制有关。根据边际报酬递减率可知，电池组数与续航时间不存在持续正相关关系。样机配备 2 组电池时续航时间增量最大，同时结合电池成本因素，后续对样机研

究均在配备 2 组电池上开展。

2 旋翼产生下洗风场数值仿真与参数优化

2.1 辅助授粉原理

无人飞机在辅助授粉时,旋翼下洗风场作用下父本花粉的脱落方式包括直接作用于花粉和通过吹动茎秆间接作用于花粉 2 种[2],如图 7 所示。花粉从父本花穗上脱落后,由下洗风场中侧向风辅助悬浮输送至父本两侧的母本柱头上。

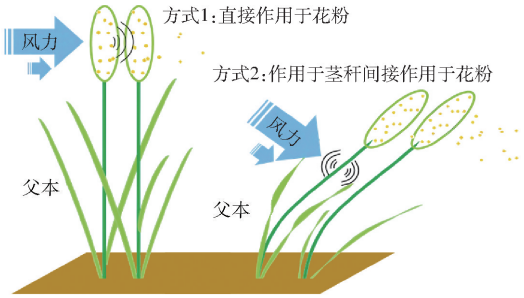


图 7 风作用于父本花粉示意图

Fig. 7 Principle of supplementary pollination under influence of wind

在实际授粉作业过程中,无人飞机需要依照设定的飞行航线,利用仿地技术方法[25]稳定保持距父本冠层一定高度并沿着父本中央飞行,每天 2 ~ 3 次。依照农机农艺相结合的管理要求,父母本厢宽之和为单次授粉作业幅宽,其计算式为

$$D = L + S \tag{1}$$

式中 D——单次授粉作业所覆盖幅宽,m

L——父本厢宽度,m

S——母本厢宽度,m

授粉作业示意如图 8 所示,在无人飞机旋翼产生的下洗风场作用下,花粉分布情况与风场在水稻冠层分布密切相关。

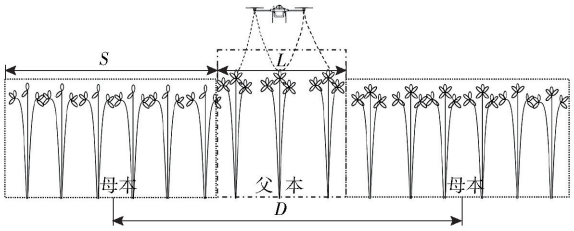


图 8 无人飞机辅助授粉作业示意图

Fig. 8 Schematic of supplementary pollination operation of drones

2.2 样机下洗风场仿真

为使样机符合授粉作业需求,提高授粉均匀性和有效性,针对性地对样机在不同飞行速度和不同高度情况下的风场分布特性进行了研究。采用计算流体力学方法对无人飞机进行流体耦合仿真较为普适[26]。为分析旋翼在高速旋转过程中的动力学问题,需要设动态网格流动方程,在传统的 CFD 软件中,动态网格处理往往需要重建网格,而这种重建网格过程往往导致负体积误差[27]。因此,格子玻尔兹曼方法(LBM)相比于其他传统 CFD 计算方法,提供了独特的碰撞操作符方案和实现,支持更高的阶数和稳定性方程[28]。XFlow 软件基于 LBM 算法,可以利用八叉树格结构处理多分辨率和自适应细化,使得动态几何图形可以一种相对简单的方式处理。基于最先进的壁面模型大涡模拟(Wall-modeled large eddy simulation ,WMLES)湍流建模和近壁处理可提供先进的湍流预测。因此采用基于 LBM 方法的 XFlow 软件对样机下洗风场进行数值模拟,分析不同飞行速度、不同飞行高度下样机下洗风场特性。

2.3 样机仿真三维建模

由于样机风场数值仿真关键部件为旋翼,为准确模拟不同飞行状态下旋翼所产生的下洗风场特性,使用三维立体扫描仪(Handy SCAN 700 型,加拿大)对样机旋翼外形扫描并得到点云数据,然后用 UG NX10.0 进行了逆工程三维重建模。样机机架、电池箱等部件则根据实际测量尺寸建立三维模型,如图 9 所示。

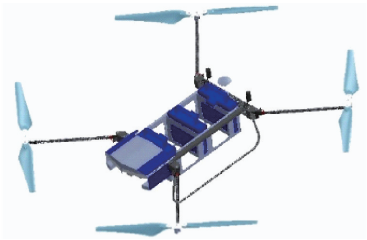


图 9 样机三维模型

Fig. 9 3D model of prototype

2.4 仿真方法

采用 XFlow 软件进行仿真模拟,基于 LBM 方法将 D3Q27 晶格模型组织成八叉树结构,如图 10 所示。与其他有限体积或 LBM 代码相比,这种结构每个离散单元具有更高的自由度,而且有利于四阶空间离散[29]。在模拟过程中,XFlow 求解器可根据标准对初始点阵结构进行修改。计算域因移动几何图形存在而改变,格点也随之动态地细化,以遵循几何

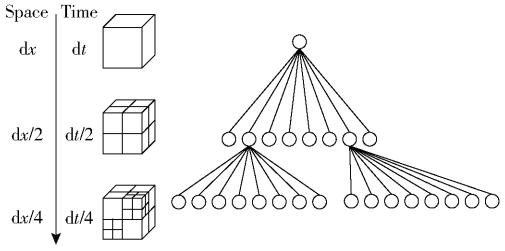


图 10 不同晶格分辨率八叉树晶格结构

Fig. 10 Octree lattice structures with different lattice resolutions

图形每一步新位置。

LBM 方程模型包含 3 个要素：流体粒子离散速度模型集合、格子结构和演化方程，它描述了具有离散速度流体粒子分布函数在一个格子的运动过程[30-31]，即

$$f_i(x+\xi_i\delta_t,t+\delta_t)-f_i(x,t)=\Omega_i(x,t) \tag{2}$$

其中

$$\Omega_i(x,t)=\frac{1}{\varphi}(f_i-\sigma_i^j) \tag{3}$$

式中　x——格子上的格点

ξ_i——流体粒子的离散速度集合

f_i——以速度 ξ_i 运动的速度分布函数

δ_t——离散时间步长

t——当前时间步长

Ω_i——碰撞算子

φ——无量纲松弛参数

σ_i^j——单粒子平衡态分布函数

2.5　湍流模型

仿真中湍流建模采用大涡模拟（Large eddy simulation，LES）方法，该方法引入一种附加粘度，称为紊流涡流粘度，用于亚网格湍流模型。在 XFlow 中使用的 LES 模型是壁面适应局部涡流（Wall-adapting local eddy-viscosity，WALE）粘度模型，该模型提供一致的局部涡流-粘度和近壁面行为[32]，计算式为

$$v_t=\frac{(\boldsymbol{G}_{\alpha\beta}^d\boldsymbol{G}_{\alpha\beta}^d)^{\frac{3}{2}}}{(\boldsymbol{S}_{\alpha\beta}\boldsymbol{S}_{\alpha\beta})^{\frac{5}{2}}+(\boldsymbol{G}_{\alpha\beta}^d\boldsymbol{G}_{\alpha\beta}^d)^{\frac{5}{4}}}\Delta_f^2 \tag{4}$$

其中

$$\boldsymbol{S}_{\alpha\beta}=\frac{\boldsymbol{g}_{\alpha\beta}+\boldsymbol{g}_{\beta\alpha}}{2} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{G}_{\alpha\beta}^d=\frac{1}{2}(\boldsymbol{g}_{\alpha\beta}^2+\boldsymbol{g}_{\beta\alpha}^2)-\frac{1}{3}\delta_{\alpha\beta}\boldsymbol{g}_{\gamma\gamma}^2 \tag{6}$$

$$\Delta_f=C_w\Delta x \tag{7}$$

式中　v_t——模拟亚格湍流涡流粘度

$\boldsymbol{G}_{\alpha\beta}^d$、$\boldsymbol{S}_{\alpha\beta}$——分辨尺度应变率张量

$\delta_{\alpha\beta}$——克罗内克尔符号

Δ_f——滤波器尺度

C_w——常数，取 0.325

Δx——单位网格尺度

$\boldsymbol{g}_{\alpha\beta}$、$\boldsymbol{g}_{\beta\alpha}$、$\boldsymbol{g}_{\gamma\gamma}$——应变率张量，可用 LBM 方法作二阶矩获得

下角标 α、β、γ 表示空间方向，二维条件下可取值 1、2，三维条件下可取值 1、2、3。

对于有限体积法和单元法，应变率张量是一种空间导数，需要从相邻节点计算应变率张量，而邻节点需要访问内存以获取，效率低于 LBM 方法。

2.6　边界条件

设置计算域为长方体，X、Y、Z 向尺寸分别为 6、4、15 m，其中 Z 向为飞行方向，Y 向为纵向，即高程方向，X 向为横向，即飞行方向左右两侧，如图 11 所示。计算域入口设置为进风口，速度方向沿着 Z 正方向。参考无人飞机辅助授粉常规作业参数，仿真模拟中样机飞行速度分别设为 3.5、4.5、5.5 m/s 沿着 Z 方向正方向飞行。此外，在计算域内样机 3、4 号旋翼位置距离地面高度设置为 3.5 m，俯仰角设置为 7°。

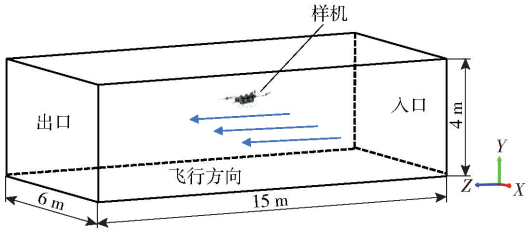


图 11　计算域示意图

Fig. 11　Schematic of computational domain

为减少仿真计算量，使用壁面函数来估计距离壁面最近的节点的速度。在 XFlow 中采用不利压力梯度和有利压力梯度的广义壁面函数模拟了边界层。该壁面函数考虑曲率和压力梯度的影响，可以精确地求解湍流边界层。壁面函数估算速度计算式[33]为

$$\frac{U}{u_c}=\frac{\tau_w u_\tau}{\rho u_\tau^2 u_c}f_1\left(y^+\frac{u_\tau}{u_c}\right)+\frac{\mathrm{d}p_w/\mathrm{d}x}{|\mathrm{d}p_w/\mathrm{d}x|}\frac{u_p}{u_c}f_2\left(y^+\frac{u_p}{u_c}\right) \tag{8}$$

式中　y^+——格点到壁面的法向距离

u_p——逆壁面压力梯度的特征速度

τ_w——湍流壁面剪应力

$\mathrm{d}p_w/\mathrm{d}x$——壁面压力梯度

u_τ——壁面摩擦速度

U——到壁面给定距离处平均速度

ρ——流体密度　　u_c——u_p 与 u_τ 之和

设计算域内流体为空气，其温度为 288.15 K，密度为 1.115 kg/m^3，动力粘度系数为 $1.789\,4\times10^{-5}$ Pa·s，全局空间细化分辨率设为 0.05 m。机身、旋翼表面采用自适应细化算法，细化分辨率设为 0.012 5 m。为准确地捕捉到旋翼产生的风场尾迹特性，尾迹细化分辨率同样设为 0.012 5 m，尾迹细化阈值设为 0.005 m，当局部无量纲涡量大于此阈值时，软件会自动激活尾迹细化功能。

2.7　仿真结果

经过仿真，得到样机旋翼所产生的下洗风场特性，图 12 为样机飞行速度为 4.5 m/s 时 $X-Z$ 平面的速度风场图，可见 1 号和 2 号旋翼产生的风场到达 3 号和 4 号旋翼下方位置时向两侧偏移。图 13 为样机飞行速度 4.5 m/s 时 $Y-Z$ 平面的速度风场

图,当 1 号和 2 号旋翼产生的风场与 3 号和 4 号旋翼产生的风场接触时,两股风场汇集在一起会形成卷扬效应。

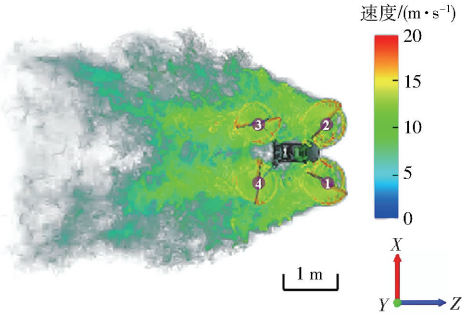


图 12 样机飞行速度 4.5 m/s 时 $X-Z$ 平面的速度风场图

Fig. 12 Velocity wind field of prototype at 4.5 m/s flight speed on $X-Z$ plane

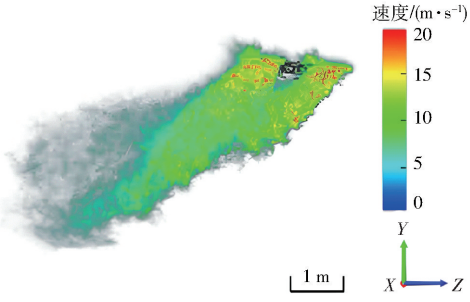


图 13 样机飞行速度 4.5 m/s 时 $Y-Z$ 平面的速度风场图

Fig. 13 Velocity wind field of prototype at 4.5 m/s flight speed on $Y-Z$ plane

图 14 为样机搭载 2 组电池时不同飞行速度下 $X-Y$ 平面的速度风场图,样机旋翼产生的下洗风场呈膨胀-收缩-膨胀趋势,并且风场强度随着远离旋翼而逐渐减弱。由于 4 个旋翼产生的风场相互耦合,加上前进时计算域内环境气流对风场的影响,样机两侧旋翼产生的风场由相离到结合再到分离,形成了中间风场气流速度小、两侧风场气流速度大的现象。旋翼所产生的下洗风场风向除 Y 方向外,还有 X 和 Z 方向,并且飞行速度越快,旋翼产生的下洗风场向 X 正负方向扬起越明显,距离也有所增加,Y 方向风场传播距离随着飞行速度的增加而缩短。因此,在样机辅助授粉时,适当地提升飞行速度可以弱化 Y 方向风场对花粉下压的影响,提高花粉在 X 方向两侧的扩散距离。

通过上述风场分布仿真,得到了样机下洗风场分布规律,为进一步量化风场分布情况,还需进行风场宽度以及风场速度数值仿真。胡达明[34-35]研究结果表明,能够维持杂交水稻花粉悬浮的参考风速为 1.095 ~ 1.120 m/s,将风场速度大于 1 m/s 的分布范围定义为花粉悬浮风场宽度。而在实际授粉作业中,能使花粉从父本脱粉风速为悬浮速度的 2 ~ 3 倍,即 2.19 ~ 3.36 m/s。因此,为确保能够使得花粉

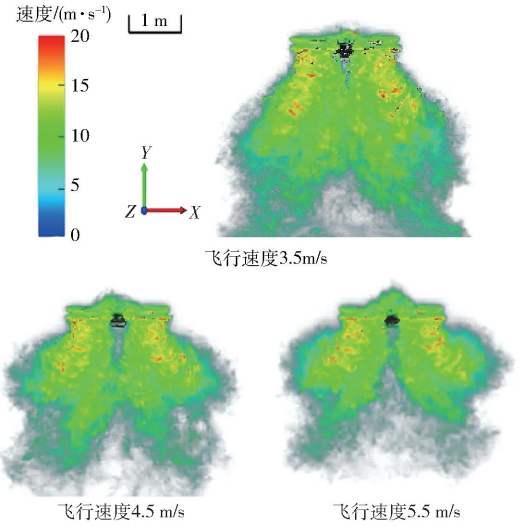


图 14 样机不同飞行速度时 $X-Y$ 面速度风场图

Fig. 14 $X-Y$ surface velocity wind field of prototype at different flight speeds

有效脱离,在模拟环境中风场作用的父本区域,设定旋翼产生的下洗风场速度大于 3.36 m/s[35]的风速范围定义为有效授粉风场宽度。由于父本厢行宽度一般在 1.5 ~ 2.0 m 之间,因此样机旋翼产生的 X 方向有效授粉风场宽度建议大于 3.0 m。

参考常规无人飞机辅助授粉飞行高度,分析样机在计算域内距离冠层高度 1.5、2.0、2.5、3.0 m 风场宽度以及风场速度分布情况。在计算域内分别设置 4 根对应高度的速度检测线,速度检测线在距离样机机头位置前方 0.5 m 处,与 $X-Y$ 平面平行,每根速度检测线长 6 m,用于检测不同时刻该位置的风场速度情况。在每根速度检测线端点 P_1 到端点 P_2 之间设置 31 个检测点,点间距为 0.2 m,如图 15 所示。

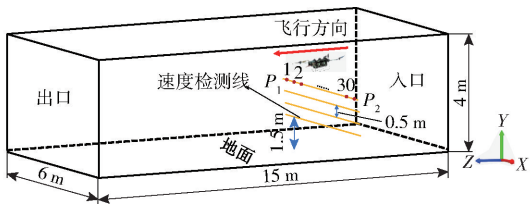


图 15 速度检测线位置示意图

Fig. 15 Distribution of speed detection line

仿真期间,每个仿真模拟时间为 1.066 7 s,采集频率为 300 Hz,共采集 320 个风场数据。由于样机辅助授粉时风场变化[36-37],分析每个检测点峰值速度。由表 1 可知,样机在速度 4.5 m/s 飞行时,4 根速度检测线所测 3 个方向的平均峰值速度 V_x、V_y、V_z 分别为 3.2、4.2、3.0 m/s,此时 $V_y > V_x > V_z$。

由于杂交水稻制种父本的花粉需要散落在其两侧母本柱头上以完成授粉,而样机辅助授粉时 X 方向的风场是从父本传送到两侧母本的,因此,样机 X

表 1　样机仿真风场宽度与速度

Tab. 1　Results of wind field width and speed of prototype simulation

仿真序号	飞行速度/(m·s⁻¹)	飞行高度/m	X 方向风场				Y 方向风场				Z 方向风场			
			宽度/m		峰值风速/(m·s⁻¹)	平均峰值风速/(m·s⁻¹)	宽度/m		峰值风速/(m·s⁻¹)	平均峰值风速/(m·s⁻¹)	宽度/m		峰值风速/(m·s⁻¹)	平均峰值风速/(m·s⁻¹)
			>1 m/s	>3.36 m/s			>1 m/s	>3.36 m/s			>1 m/s	>3.36 m/s		
1	3.5	1.5	4.6	3.0	10.6	4.5	5.6	3.6	14.5	6.0	4.2	3.6	11.6	4.8
2	3.5	2.0	4.8	3.6	8.7	3.9	5.6	2.8	12.0	5.6	4.8	4.2	8.7	4.2
3	3.5	2.5	5.0	3.2	7.0	3.6	5.0	3.6	9.1	4.6	4.6	2.8	6.3	2.8
4	3.5	3.0	4.6	1.6	6.2	2.4	3.4	1.6	5.7	2.1	3.6	0.2	3.6	1.5
5	4.5	1.5	4.4	3.0	8.5	3.7	5.6	3.4	13.6	5.9	4.4	3.6	8.4	4.2
6	4.5	2.0	5.2	3.4	9.4	3.8	5.6	3.4	9.6	4.8	4.6	3.0	7.7	3.5
7	4.5	2.5	4.4	2.2	6.7	2.9	4.8	3.0	8.5	3.9	4.2	2.8	5.7	2.9
8	4.5	3.0	4.2	2.0	5.7	2.4	3.2	1.8	6.3	2.2	3.8	0.2	4.5	1.5
9	5.5	1.5	4.6	3.6	8.6	3.7	5.4	3.6	11.4	4.9	4.4	3.4	7.7	3.7
10	5.5	2.0	4.2	2.4	7.3	2.9	5.4	2.8	8.3	3.9	4.0	3.2	7.1	3.0
11	5.5	2.5	4.0	0.8	5.1	2.0	3.4	1.2	5.8	2.0	3.6	0.8	6.0	1.9
12	5.5	3.0	1.6	0.0	1.2	0.7	1.0	0	1.4	0.3	1.2	0	1.2	0.5

方向有效授粉风场宽度和平均峰值风速在适当范围内越大越好。

因为 *Y* 方向风场会下压水稻茎秆，即使水稻茎杆的固有回弹运动有利于花粉从植株上脱落进入悬浮状态，但是过大的下压风场会使花粉向下传播，难免部分花粉会被压到泥面上，不利于花粉传播，甚至造成植株倒伏，所以该方向风速应该尽可能小[7]。根据园艺学家的建议，*Y* 方向速度不宜大于 10 m/s。*Z* 方向风场有利于父本花粉脱粉，所以 *Z* 方向风速越大越好。

根据风场宽度及风速仿真结果，在满足授粉要求前提下，为提高授粉效率，飞行速度需尽可能快。当样机飞行速度为 5.5 m/s、飞行高度为 1.5 m 时，所有检测点 *X* 方向平均峰值风速为 3.7 m/s（≥3.36 m/s），满足有效授粉风场宽度的要求，但是 *Y* 方向峰值速度为 11.4 m/s，不符合授粉风速 10 m/s 以内的要求。样机在飞行速度 3.5 m/s、飞行高度 2.5 m 时 *X* 方向以及 *Y* 方向平均峰值风速均符合要求，但辅助授粉效率不高。当样机飞行速度为 4.5 m/s 时，3 种飞行高度下平均峰值风速最大值为 3.8 m/s，满足有效授粉风场宽度的授粉要求。在飞行高度 2 m 下，*Y* 方向峰值风速为 9.6 m/s，符合 *Y* 方向风速 10 m/s 内的要求。

为进一步分析样机在飞行速度 4.5 m/s、距离父本冠层飞行高度 2 m 下旋翼所产生的下洗风场分布情况，*X*、*Y* 和 *Z* 方向风场速度分布如图 16 所示。*X* 方向风场呈波浪形的正负两个趋势，表明 *X* 方向风场两侧均有分布，有利于花粉从父本传播到两侧的母本柱头上。

从图 16 可以看出，*Y* 方向风场速度分布呈 U 形，两侧对称于样机飞行航线，主要为 *Y* 负方向，即为垂直于地面向下，且在旋翼下方两侧有局部极大值，该方向风场不利于花粉悬浮和传播。据图中蓝色曲线，*Z* 方向风场呈 W 形，负方向居多，主要原因是样机前进时，机体前倾形成向后的气流。综上所述，风场仿真优选出的样机优选辅助授粉飞行参数为：飞行速度 4.5 m/s，距离父本冠层飞行高度 2 m。

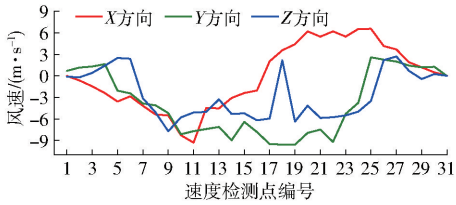


图 16　当飞行速度为 4.5 m/s、高度为 2 m 时三维风速分布图

Fig. 16　Velocity curves in three-dimensional at flight speed of 4.5 m/s and altitude of 2 m

3　样机田间辅助授粉试验

3.1　田间试验方法

辅助授粉试验场地位于湖南省武冈市邓元泰袁隆平农业高科技股份有限公司杂交水稻制种基地（26.68°N，110.54°E），制种组合为：4001 S/黄莉占。为配合机械化插秧、收割及无人飞机辅助授粉作业，父本母本采用 6∶35 的大行比种植，其中父本厢宽为 1.8 m，母本厢宽为 7.5 m。样机在田间辅助授粉试验现场如图 17a 所示。

选取长势比较好的一厢父本及两边两厢母本作为核心测试区，在两厢母本区域内布置 20 m 等间距 A、B、C 3 个重复小区，每个小区设置等间隔 14 个垂直于父本厢的花粉密度采集点，母本厢区域内共设



(a) 辅助授粉中的样机 (b) 飞行航线 (c) 花粉收集装置

图 17 样机田间辅助授粉试验

Fig. 17 Field supplementary pollination test of prototype

置 42 个采集点,按 3 行 14 列的形式排列,其中行序号以 A、B、C 命名,列序号以 1 ~ 14 命名,如图 18 所示。在设置采集点位置上布设与母本穗层等高的采集装置,同时利用 T 形夹将涂有凡士林的载玻片水平固定于采集装置上,并且载玻片与母本雨穗层平齐,如图 17c 所示,用于捕获花粉颗粒。

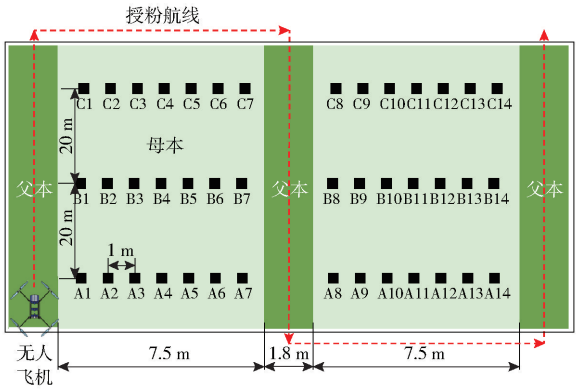


图 18 花粉数据采集点设置示意图

Fig. 18 Distribution of pollen data collection point

在与样机相同的试验设置下,开展了极飞 P20(广州极飞科技股份有限公司)和大疆 T16(深圳市大疆创新科技有限公司)两种对比机型辅助授粉试验,3 种机型主要参数如表 2 所示。

表 2 3 种机型主要参数

Tab. 2 Three drones for supplementary pollination operations

参数	样机	P20	T16
尺寸/(m×m×m)	1.25×1.10×0.35	1.38×1.35×0.44	1.8×1.51×0.72
空机质量/kg	12	13.1	18.5
电池质量/kg	5	5	6.1
电池容量/(A·h)	22	18	17.5

根据苏和[12]对四旋翼无人飞机辅助授粉研究,杂交水稻制种辅助授粉飞行速度为 3.5 ~ 4.5 m/s 适宜。样机风场仿真优化飞行速度 4.5 m/s、飞行高度 2 m 满足要求。因此,在实际田间辅助授粉试验中,样机采用优化的作业参数沿着父本厢中央自主飞行,如图 17b 所示。一般情况下,根据花粉量不同每天需进行 2 ~ 3 次辅助授粉作业,单架次授粉时间不少于 30 min,架次间隔在 15 ~ 20 min 区间。样机每日授粉任务完成后,将载玻片回收进托盘。参照周志艳等[38]观察花粉的方法,将回收后的载玻片(用 8% 的 I - IK 溶液染色)置于显微镜下(江南 XSP - 16A,南京乐陶光电仪器有限公司),放大 10×10 倍观察并计数每个视野内花粉颗粒数评估授粉效果,如图 19 所示(采集授粉期内的花粉数据)。

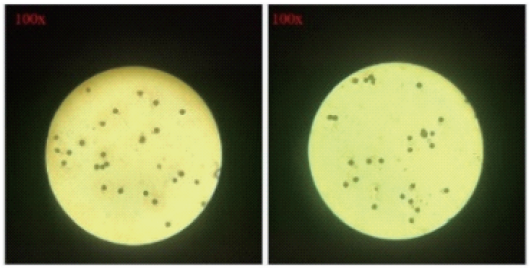


图 19 显微镜 100 倍放大后着色的花粉颗粒

Fig. 19 Stained pollen grains after 100× microscope magnification

3.2 田间试验结果与分析

在田间辅助授粉试验中,选取 4 d 盛花期的两厢母本花粉密度数据进行分析,如图 20 所示。

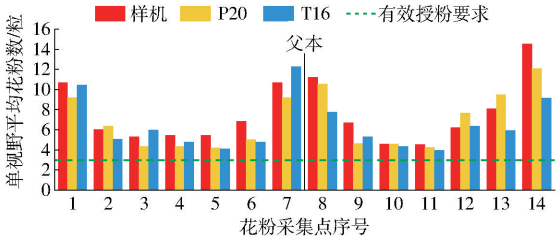


图 20 3 种机型辅助授粉平均花粉数分布图

Fig. 20 Average pollen density distribution of three drones

样机在辅助授粉后各采集点平均花粉密度结果显示,第 1 列、第 7 列、第 8 列和第 14 列单视野平均花粉数均大于 9 粒,而其他列平均花粉数相对少一些,在单厢母本中呈中间少、两边多的情况,这是因为第 1 列、第 7 列、第 8 列和第 14 列采集点靠近父本,而母本厢中间距离父本(花粉源)较远。此外,距离父本最远处的第 4 列与第 11 列的单视野平均花粉数分别为 4.9 粒和 4.2 粒。根据易著虎等[39]研究结果可知,母本稻穗花柱头上要求至少有 3 粒花粉,才能满足杂交水稻结实最低需求,其中单视野平均花粉大于 3 粒(平均单视野大于 6 粒为充分授粉)的有 42 个花粉密度采样点,占比 100%。另外单视野平均花粉大于 6 粒(平均单视野大于 6 粒为充分授粉)的有 20 个采样点,占比 47.62%。此外,样机与两种对照机型(P20、T16)采集的花粉单视野平均数分别为 6.98、5.62、5.69 粒,3 种机型均能满足授粉要求。

经过后期对不同机型花粉采样区域的结实率和产量分析，样机试验区平均结实率为 47.66%，而 2 种对照机型试验区平均结实率为 48.12%（P20）和 39.54%（T16）。样机授粉后制种产量为 1 996.5 kg/hm^2，对比两种机型授粉后制种产量为 1 887.0 kg/hm^2（P20）和 1 704.3 kg/hm^2（T16）。

在辅助授粉作业效率方面，当飞行速度为 4.5 m/s、飞行高度为 2 m 时，从无人飞机起降次数上考虑，单次授粉时间在 30 min 以上（作业面积约 7.5 hm^2）时，样机只需起降一次，期间无需更换电池，而对照机型 1（P20）与对照机型 2（T16）均需要更换两次电池，一次起降与电池更换需 2 ~ 3 min，具体时长与起降点位置、飞机 RTK（Real - Time Kinematic）搜星的情况有关。其中，P20 植保无人飞机单电池空载续航约 11 min，T16 植保无人飞机单电池空载续航约 10.5 min。因为减少了起降次数和电池更换频率，样机在相同时间内能够完成更大面积的辅助授粉作业。按一次起降节省 2.5 min 计算，样机单架次授粉面积比对照机型增加约1.25 hm^2。

当统一按照飞行速度 4.5 m/s、飞行高度 2 m 进行辅助授粉作业时，样机效率为 10.5 hm^2/架次、P20 效率为 5.5 hm^2/架次、T16 效率为 5.25 hm^2/架次，可见，相同作业面积下，样机能够更快速地完成辅助授粉作业。

辅助授粉效果如表 3 所示，利用试验结果对续航时间、单视野平均花粉数、结实率以及制种产量 4 个维度进行离差标准化，4 个维度分别占比为 20%、30%、25% 和 25%，总分设置为 10 分。经过四维度离差标准化，总分最高为样机（9.98 分），最低分为 T16（7.13 分）。从 4 个维度来看，四旋翼机型比六旋翼机型辅助授粉效果好，同为四旋翼机型样机授粉效果优于 P20 植保无人飞机。

表 3　四维度离差标准化

Tab.3　Standardized result of four dimensional deviation

机型	续航时间/min		单视野平均花粉数/粒		结实率/%		制种产量/(kg·hm^{-2})		总分
	处理前	离差标准化	处理前	离差标准化	处理前	离差标准化	处理前	离差标准化	
样机	42	2.00	6.98	3.00	47.66	2.48	1 996.5	2.50	9.98
P20	11	0.52	5.62	2.42	48.12	2.50	1 887.0	2.36	7.80
T16	10.5	0.50	5.69	2.45	39.54	2.05	1 704.3	2.13	7.13

4　结论

（1）续航时间试验结果表明，当样机搭载 2 组电池以速度 4.5 m/s 飞行（飞行高度 2 m）时，续航时间可达 42 min，满足杂交水稻制种辅助授粉对无人飞机单架次作业 30 min 以上的需求。

（2）根据仿真结果优选的样机飞行高度与飞行速度的优化组合，当样机距离父本冠层高度 2 m，飞行速度 4.5 m/s，搭载 2 组电池情况下进行杂交水稻制种辅助授粉，其 X 方向峰值风速、平均峰值风速分别为 9.4、3.8 m/s，Y 方向峰值风速、平均峰值风速分别为 9.6、4.8 m/s，均符合辅助授粉作业要求。

（3）基于优选作业参数，在授粉时间 30 min 的条件下，相比 2 种对照机型，样机减少 2 次起降换电次数，辅助授粉效率为 10.5 hm^2/架次，而 P20 的辅助授粉效率为 5.5 hm^2/架次，T16 辅助授粉效率为 5.25 hm^2/架次，样机能够更快速地完成授粉作业，提高了辅助授粉效率。

（4）从续航时间、花粉密度分布、结实率和制种产量 4 个维度综合评价，样机杂交水稻制种辅助授粉效果优于对比机型，总分为 9.98 分，对照机型 1（P20）辅助授粉效果优于对照机型 2（T16）。

参　考　文　献

[1] 汤楚宙，王慧敏，李明，等. 杂交水稻制种机械授粉研究现状及发展对策[J]. 农业工程学报，2012，28(4)：1 - 7.
TANG Chuzhou，WANG Huimin，LI Ming，et al. Study status and developmental strategies of mechanical pollination for hybrid rice breeding[J]. Transactions of the CSAE，2012，28(4)：1 - 7.（in Chinese）

[2] 李中秋. 杂交水稻制种气力碰撞组合式授粉参数与特性研究[D]. 长沙：湖南农业大学，2015.
LI Zhongqiu. Parameters and characteristics on pneumatic and collision combined pollination of hybrid rice seed production [D]. Changsha：Hunan Agricultural University，2015.（in Chinese）

[3] 李中秋，汤楚宙，王慧敏，等. 气流作用位置对杂交水稻制种气力式授粉花粉分布的影响[J]. 农业工程学报，2012，28(26)：107 - 113.
LI Zhongqiu，TANG Chuzhou，WANG Huimin，et al. Effects of location of airflow on pollen distribution for pneumatic pollination in hybrid rice breeding[J]. Transactions of the CSAE，2012，28(26)：107 - 113.（in Chinese）

[4] 刘爱民，肖层林，龙和平，等. 杂交水稻全程机械化制种技术研究初步进展[J]. 杂交水稻，2014，29(2)：6 - 8.
LIU Aimin，XIAO Cenglin，LONG Heping，et al. Preliminary progress in the research on whole-process mechanization

technology of hybrid rice seed production[J]. Hybrid Rice, 2014, 29(2): 6 - 8. (in Chinese)
[5] 潘竹栋,朱孔志,陈锦珠,等. 农用植保无人机辅助杂交水稻制种授粉效果研究[J]. 江苏农机化, 2022(3): 26 - 29.
PAN Zhudong, ZHU Kongzhi, CHEN Jinzhu, et al. Study on pollination effect of agricultural plant protection drone assisted hybrid rice seed production[J]. Jiangsu Agricultural Mechanization, 2022(3): 26 - 29. (in Chinese)
[6] 姜宽舒,高菊玲,刘永华,等. 基于北斗导航- RTK 的农用无人飞机辅助授粉技术应用研究[J]. 农业装备技术, 2021, 47(1): 23 - 25.
JIANG Kuanshu, GAO Juling, LIU Yonghua, et al. Application research on auxiliary pollination technology of agricultural unmanned aircraft based on Beidou navigation - RTK[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2021, 47(1): 23 - 25. (in Chinese)
[7] 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.
HU Lian, ZHOU Zhiyan, LUO Xiwen, et al. Development and experiment of a wireless wind speed sensor network measurement system for unmanned helicopter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 221 - 226. (in Chinese)
[8] 汪沛,胡炼,周志艳,等. 无人油动力直升机用于水稻制种辅助授粉的田间风场测量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 54 - 61.
WANG Pei, HU Lian, ZHOU Zhiyan, et al. Wind field measurement for supplementary pollination in hybrid rice breeding using unmanned gasoline engine single-rotor helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 54 - 61. (in Chinese)
[9] 李继宇,周志艳,兰玉彬,等. 旋翼式无人机授粉作业冠层风场分布规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 77 - 86.
LI Jiyu, ZHOU Zhiyan, LAN Yubin, et al. Distribution of canopy wind field produced by rotor unmanned aerial vehicle pollination operation[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 77 - 86. (in Chinese)
[10] LI J Y, LAN Y B, WANG J W, et al. Distribution law of rice pollen in the wind field of small UAV[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(4): 32 - 40.
[11] 王玲,张旗,侯启航,等. 六旋翼植保无人机风场竖直分布特性数值模拟与验证[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 2): 75 - 83.
WANG Ling, ZHANG Qi, HOU Qihang, et al. Vertical distribution law of six-rotor plant protection UAV based on multi-feature parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 75 - 83. (in Chinese)
[12] 苏和. 不同授粉机械辅助杂交水稻制种授粉效果的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019.
SU He. Study on pollination effect by using different pollination mechanics to product the seed of hybrid rice[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[13] XI T, FENG H Q, WANG Y W, et al. Optimizing the working parameters of pneumatic pollinators based on the kinematic properties of rice panicles[J]. Journal of the ASABE, 2023, 66(1): 65 - 74.
[14] JIANG Q J, WANG Y W, CHEN J, et al. Optimizing the working performance of a pollination machine for hybrid rice[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106282.
[15] 翁晓星,徐锦大,赵晋,等. 多旋翼无人机辅助籼粳杂交稻制种授粉研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(9): 24 - 29.
WENG Xiaoxing, XU Jinda, ZHAO Jin, et al. Study on seed production and pollination of *Indica-japonica* hybrid rice assisted by multi-rotor UAV[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(9): 24 - 29. (in Chinese)
[16] 翁晓星,徐锦大,王建军,等. 籼粳杂交水稻多旋翼无人机辅助授粉流场特性分析[J]. 高技术通讯, 2023, 33(3): 314 - 321.
WENG Xiaoxing, XU Jinda, WANG Jianjun, et al. Research on pollination field characteristics of multi-rotor agricultural unmanned aerial vehicle in *Indica-japonica* hybrid rice seed production[J]. Chinese High Technology Letters, 2023, 33(3): 314 - 321. (in Chinese)
[17] 胡淑芬,曹昕奕,邓勇杰,等. 植保无人机飞行参数对油茶授粉雾滴分布及坐果率的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20): 92 - 100.
HU Shufen, CAO Xinyi, DENG Yongjie, et al. Effects of the flight parameters of plant protection drone on the distribution of pollination droplets and the fruit setting rate of camellia[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(20): 92 - 100. (in Chinese)
[18] 徐陶,李雪,祁雁楠,等. 水平棚架式梨树多旋翼无人机液体授粉试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 136 - 141.
XU Tao, LI Xue, QI Yannan, et al. Experiment on liquid pollination of pear tree with horizontal scaffolding based on multi-rotor UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 136 - 141. (in Chinese)
[19] CHANG K, CHEN S D, WANG M M, et al. Numerical simulation and verification of rotor downwash flow field of plant protection UAV at different rotor speeds[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 13:1087636.
[20] 周川川,李傲梅. 多旋翼无人机旋翼风场分布情况研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(11): 183 - 189.
ZHOU Chuanchuan, LI Aomei. Research on the distribution of rotor wind field in multi-rotor UAV[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(11): 183 - 189. (in Chinese)
[21] CHANG K, CHEN S D, WANG M M, et al. Numerical simulation and experimental verification of rotor airflow field based on finite volume method and Lattice Boltzmann method[J]. Drones, 2024, 8(11): 612.
[22] 林晋立,兰玉彬,欧阳帆,等. 多旋翼农用无人机功率能耗模型构建与试验验证[J]. 农机化研究, 2020, 42(5): 143 - 149.

LIN Jinli, LAN Yubin, OUYANG Fan, et al. Construction and experimental verification of power consumption model for multi rotor agricultural UAV[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(5): 143 - 149. (in Chinese)

[23] LIU A M, ZHANG H Q, LIAO C M, et al. Effects of supplementary pollination by single-rotor agricultural unmanned aerial vehicle in hybrid rice seed production[J]. Agricultural Science & Technology, 2017, 18(3): 543 - 547.

[24] 张园,郑鸿基,刘海涛,等. 基于自适应 RBF 神经网络具有模型不确定性的四旋翼无人机指定时间预设性能控制方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 64 - 73.
ZHANG Yuan, ZHENG Hongji, LIU Haitao, et al. Adaptive RBF neural networks for appointed-time performance control of quadcopter UAVs with model uncertainty[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 64 - 73. (in Chinese)

[25] 沈跃,张念,孙志伟,等. 基于多速率卡尔曼滤波的植保无人机仿地飞行方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 190 - 197.
SHEN Yue, ZHANG Nian, SUN Zhiwei, et al. Terrain following flight for plant protection UAV based on multi-rate Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 190 - 197. (in Chinese)

[26] 张智泓,曾荣壕,赖庆辉,等. 小型植保无人机下洗气流场影响雾滴运动特性规律研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 208 - 216.
ZHANG Zhihong, CENG Ronghao, LAI Qinghui, et al. Investigation of effects of downwash airflow field on droplet motion characteristics of small plant protection unmanned aerial vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 208 - 216. (in Chinese)

[27] ZHOU D, LU Z L, GUO T Q. A rotating reference frame-based lattice Boltzmann flux solver for simulation of turbomachinery flows[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2017, 83(7): 561 - 582.

[28] WEN S, HAN J, NING Z H, et al. Numerical analysis and validation of spray distributions disturbed by quad-rotor drone wake at different flight speeds[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: 105036.

[29] 文晟,韩杰,兰玉彬,等. 单旋翼植保无人机翼尖涡流对雾滴飘移的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 127 - 137, 160.
WEN Sheng, HAN Jie, LAN Yubin, et al. Influence of wing tip vortex on drift of single rotor plant protection unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 127 - 137, 160. (in Chinese)

[30] DADVAND A, SARAEI S H, GHOREISHI S, et al. Lattice Boltzmann simulation of natural convection in a square enclosure with discrete heating[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2021, 179: 265 - 278.

[31] 郭照立,郑楚光. 格子 Boltzmann 方法的原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[32] MEN Y Z, LAI Y Y, DONG S Z, et al. Research on CO dispersion of a vehicular exhaust plume using Lattice Boltzmann method and Large Eddy simulation[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 52(Part A): 202 - 214.

[33] SHIH T H, POVINELLI L, LIU N S, et al. Turbulent Surface Flow and Wall Function[C]//35th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1999.

[34] 胡达明. 不同授粉方式的花粉密度分布与结实效应研究[J]. 杂交水稻, 1996,11(6): 21 - 23.
HU Daming. Distribution of pollen density and seed setting efficacy under different pollinating methods[J]. Hybrid Rice, 1996,11(6): 21 - 23. (in Chinese)

[35] 胡达明. 杂交稻制种授粉花粉悬浮速度测定与应用研究[J]. 杂交水稻, 1996,11(1): 11 - 13.
HU Daming. Studies on the measurement and use of pollen suspended velocity in hybrid rice seed production[J]. Hybrid Rice, 1996,11(1): 11 - 13. (in Chinese)

[36] 李继宇,周志艳,胡炼,等. 圆形多轴多旋翼电动无人机辅助授粉作业参数优选[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 1 - 9.
LI Jiyu, ZHOU Zhiyan, HU Lian, et al. Optimization of operation parameters for supplementary pollination in hybrid rice breeding using round multi-axis multi-rotor electric unmanned helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11): 1 - 9. (in Chinese)

[37] 李继宇,周志艳,胡炼,等. 单旋翼电动无人直升机辅助授粉作业参数优选[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 10 - 17.
LI Jiyu, ZHOU Zhiyan, HU Lian, et al. Optimization of operation parameters for supplementary pollination in hybrid rice breeding using uniaxial single-rotor electric unmanned helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 10 - 17. (in Chinese)

[38] 周志艳,钟伯平,刘爱民,等. 涵道风扇式高地隙杂交水稻制种授粉机设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 1 - 8.
ZHOU Zhiyan, ZHONG Boping, LIU Aimin, et al. Design of ducted-fan pollination machine based on high-clearance chassis for hybrid rice[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 1 - 8. (in Chinese)

[39] 易著虎,吴升高,肖层林,等. 杂交水稻父本制种特性研究进展[J]. 湖南农业科学, 2009(7): 17 - 19,21.
YI Zhuhu, WU Shenggao, XIAO Cenglin, et al. Research advance on seed-production characters of male parent of hybrid rice[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2009(7): 17 - 19,21. (in Chinese)