

大载荷农用无人机旋翼风场扰流装置设计与试验

张文卿 赵胤伟 高荣 谢文俊 徐壬涛 张铭乐 申遂愿 陈瑜 李继宇

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要:为解决大载荷农用无人机作业过程中因旋翼下洗风场过强易损伤作物,进而导致飞行高度升高、雾滴漂移加剧的问题,设计了一种可有效降低下洗气流速度的扰流装置。以自主研发的无人机为试验平台,结合自研风速传感器与计算流体力学仿真技术(Computational fluid dynamics, CFD),对扰流装置在不同参数下的风场削弱效果进行定量测试与分析,确定了扰流装置的最优参数组合,有效验证了其在削弱旋翼下洗气流方面的工程可行性与技术优势,并针对其参数选取制定了科学、可行的技术方案。首先基于扰流装置的工作原理,结合空气动力学、动量理论及牛顿第三定律等基本物理模型,确定扰流装置的关键参数类型;其次,根据无人机工作状态时下洗风场的轨迹线云图与速度云图,明确各参数变量的梯度变化范围;然后,通过计算流体力学(CFD)仿真与正交试验相结合的方法,综合分析并优化得出各参数的最佳取值。随后,对各关键参数进行多变量耦合分析与优化设计,获得了最优参数组合;最后,通过机载飞行试验对扰流装置的稳定性和有效性进行了验证。正交试验结果表明,安装扰流装置后,风场优化效果与拉力损失率的比值约为9.7,表明该装置在有效削弱下洗气流的同时,对升力性能的影响较小。飞行试验表明,安装扰流装置后无人机拉力损失约10%,风场平均风速减小了约38.6%,风场优化效果较好。且无人机安装扰流装置后飞行稳定。

关键词: 大载荷农用无人机; 下洗气流; 扰流装置; CFD; 正交试验

中图分类号: S251

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)21-0229-11

OSID:



Design and Verification of Wind Field Damping Devices for Large-load Agricultural Unmanned Aerial Vehicles

Zhang Wenqing Zhao Yinwei Gao Rong Xie Wenjun Xu Rentao Zhang Mingle
Shen Suiyuan Chen Yu Li Jiyu

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Aiming to address the issue of crop damage caused by the strong downwash airflow from the rotors during the operation of heavy-load agricultural drones, which leads to increased flight altitude and intensified droplet drift, a turbulence device that can effectively reduce the downwash airflow velocity was designed. Based on the self-developed unmanned aerial vehicle (UAV) in the laboratory as the test platform, combined with the self-developed wind speed sensor and computational fluid dynamics (CFD) simulation technology, the weakening effect of the flow deflector on the wind field under different structural parameters was quantitatively tested and analyzed. The optimal parameter combination of the turbulence device was determined, effectively verifying its engineering feasibility and technical advantages in weakening the rotor downwash airflow. The research results can provide theoretical support and experimental basis for the practical application of the turbulence device on heavy-load agricultural UAVs, and a scientific and feasible technical solution for parameter matching and selection was formulated. Firstly, the key parameter types of the turbulence device were screened and determined based on its working principle, together with basic physical models including aerodynamics, momentum theory, and Newton's third law. Secondly, according to the trajectory line cloud map and velocity cloud map of the downwash wind field under the working state of the UAV, the gradient change range of each parameter

收稿日期: 2025-07-20 修回日期: 2025-09-01

基金项目: 广州市重点研发计划项目(2023B03J1323)和广东省现代农业装备研究所技术开发项目(H20240333)

作者简介: 张文卿(1995—),男,博士生,主要从事大型无人机研究,E-mail: 15378770939@163.com

通信作者: 李继宇(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事农用无人机研究,E-mail: lijuyu@scau.edu.cn

variable was reasonably clarified. Then through the combination of CFD simulation and orthogonal experiments, the optimal values of each parameter were comprehensively analyzed and optimized. Subsequently, by combining CFD simulation and orthogonal experiments, a multi-variable coupling analysis and optimization design of each key parameter was conducted, and the optimal parameter combination was obtained. Finally, the stability and effectiveness of the turbulence device were verified through on-board flight tests. The results of the orthogonal experiments showed that the ratio of the wind field optimization effect to the thrust loss rate after installing the turbulence device was approximately 9.7, indicating that the device effectively weakened the downwash airflow while having a relatively small impact on lift performance. Flight tests showed that after installing the flow deflector, the thrust of the UAV was increased by approximately 10.8%, and the average wind speed of the wind field was decreased by approximately 38.6%, demonstrating a good wind field optimization effect. Moreover, the UAV with the turbulence device installed flies stably and had good compatibility with the flight control system of the UAV, fully meeting the overall design requirements of agricultural operation.

Key words: large-load agricultural UAV; downwash airflow; flow deflector; CFD; orthogonal experiments

0 引言

在中国现代农业发展中,农用无人机低空低量施药技术作为一种新型航空植保作业方式,革新了传统植保手段,显著提升了农药喷洒的效率与精度,同时降低了劳动力成本及人工操作中的农药中毒风险^[1-5]。当前,农用无人机喷施技术的研究主要集中在作业参数对雾滴沉积分布的影响上,其中关键影响因素包括飞行高度与速度、旋翼风场、环境条件、药剂类型与配比及作业时间等^[6-7]。本文旨在通过优化旋翼下洗风场强度,进而降低飞行高度,从而有效减少农用无人机作业中的雾滴漂移问题。

航空喷施雾滴沉积分布的关键影响因素之一是飞机旋翼下方的风场,这一风场由旋翼产生的风场与外界环境风场共同构成,其中无人机旋翼向下推动空气形成的风场称为“下洗风场”^[8-10]。Liu等^[11]通过研究发现,无人机旋翼产生的下洗风场在竖直平面上整体呈现扩张减弱趋势,高风速区域主要集中在旋翼正下方,并随着气流向下发散逐渐减弱,这表明无人机的飞行高度越低,作物表面受到的风场作用力就会越大。Li等^[13]研究表明无人机在进行农药喷洒工作时,旋翼气流的体积大小决定了雾滴在空间的分布范围,雾滴空间运动过程主要由旋翼气流分布规律决定,并影响雾滴的沉积与飘移。同时下洗风场将与植物冠层相互作用,使植物冠层发生变形从而形成气流旋涡,此时若气流旋涡风速过大会使农作物茎秆过度弯曲而折断,造成农作物产量损失。文献[13-16]通过试验证明了在不同飞行高度下雾滴沿垂直方向上的沉积密度随着高度的升高而减少,雾滴漂移量随着飞行高度的升高而增加,作业高度是影响雾滴覆盖率的主要因素。上述研究表明,无人机喷洒作业中,飞行高度对雾滴

漂移和作物安全有显著影响:较低高度可提高药液沉积率和喷洒精度,但下洗气流过强易造成作物损伤;较高高度虽减轻机械损伤,却加剧雾滴漂移,增加环境污染和邻近作物药害风险。因此,亟需优化无人机喷洒方案,通过降低下洗风速实现低空作业,在减少雾滴漂移、提高喷洒效率的同时,避免对作物造成机械损伤,保障精准、高效、环保的植保作业。

基于上述分析,本文提出一种在大载荷无人机旋翼正下方高风速区安装可绕轴旋转扰流装置的方法,利用其转动对下洗气流的扰动效应,有效降低局部风速。在低空作业条件下兼顾作物安全与喷洒精度,显著减少雾滴漂移与农药扩散,降低环境污染及药害风险,为实现高效、精准、环保的植保作业提供兼具技术可行性与生态效益的创新解决方案。

基于上述思路,首先通过翼板气动受力理论分析,确定关键结构参数;进而融合 CFD 仿真模拟与试验数据,开展参数协同优化,以实现下洗气流的有效优化;最终通过飞行试验验证优化后装置对风场特性的改善效果及其对飞行稳定性的影响。

1 扰流装置结构与工作原理

无人机旋翼快速转动时会向下推动空气形成一个风场,称之为旋翼下洗风场,且高风速区域主要集中在旋翼的正下方^[17-18]。将扰流装置放于旋翼正下方高风速区,使其轴线与旋翼中心对齐,利用风力驱动其绕轴转动,扰动气流,可降低下洗风场平均风速,实现风场优化^[19-21]。其结构如图 1 所示。

整体采用旋转对称结构,转动轴与旋翼中心对齐,安装于正下方高风速区,防止旋转构件发生动不平衡,抑制周期性振动。翼板作为主要气动受力元件,前表面呈显著弧形,后表面相对平直,依据伯努利原理,在下洗气流作用下形成前后压力差,驱动翼

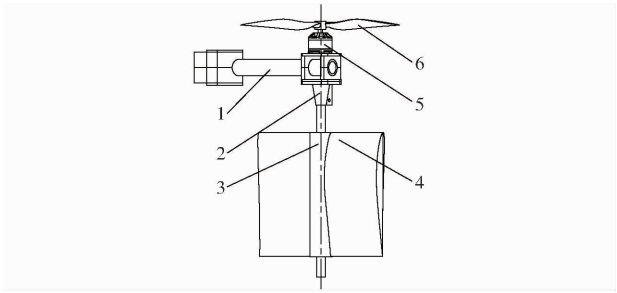


图 1 扰流装置结构及部署示意图

Fig. 1 Structure and deployment diagram of flow deflector

1. 机架 2. 转动轴 3. 翼板架 4. 翼板 5. 电机 6. 旋翼

板绕轴自转,无需外部动力输入。翼板通过翼板架固定于转动轴,转动轴连接机架并支持自由旋转。装置在气流激励下持续转动,有效扰动高流速区气流结构,降低下洗风场平均风速,改善流场分布特性。该被动式设计在实现有效气流调控的同时,兼顾结构稳定性与工程可行性。

2 扰流装置设计参数与流场响应变量分析

在旋翼下洗风场中,扰流装置的结构参数直接影响其受力特性,进而决定装置的转速及风场调控效果。为识别关键影响因素,需对其开展系统的力学分析。通过揭示各参数与受力之间的关联机制,明确影响规律,进而优化参数以实现最佳性能。

2.1 扰流装置翼板受力分析

无人机工作时,下洗风场与扰流装置相互作用,产生驱动其绕轴旋转的横向力和增加飞行负载的阻力。如图 2 所示, F_1 为伯努利效应产生的横向力, F_2 为风场冲击产生的阻力,可分解为同向的横向分力 F_3 和向下的负载阻力 F_4 。 F_1 与 F_3 之和构成总横向力,驱动装置旋转; F_4 增加飞行负载。为明确其对翼板转动的影响,需对 F_1 和 F_2 进行理论分析。

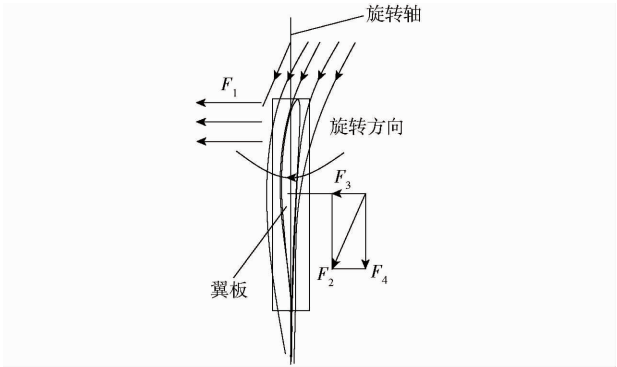


图 2 翼板风场受力分析

Fig. 2 Force analysis of wind field of wing plate

2.1.1 负载阻力受力分析

翼板在风场中所受阻力 F_2 由翼板表面受到气流的冲击效应和表面摩擦产生,其可分解为横向阻力分力 F_3 和负载阻力 F_4 ,在风场中受力如图 3 所示。

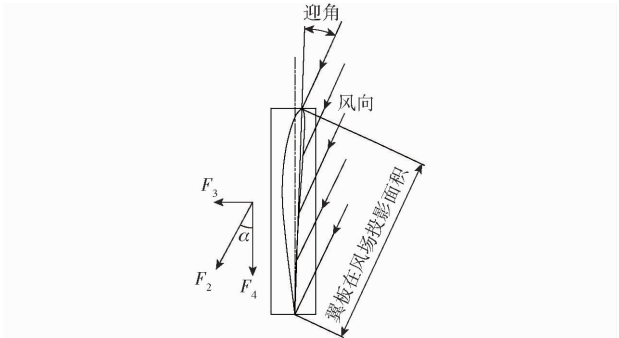


图 3 翼板受冲击阻力示意图

Fig. 3 Schematic of impact drag on wing plate

根据空气动力学的基本原理,翼板在风场中所受负载阻力计算公式为

$$F_4 = \frac{1}{2} C_d S \rho v^2 \quad (1)$$

式中 C_d ——阻力系数

ρ ——空气密度, kg/m^3

v ——风速, m/s

S ——机翼平面投影面积, m^2

S 计算公式为

$$S = b c \cos \alpha \quad (2)$$

式中 b ——翼板宽度, mm

c ——翼板弦长, mm

α ——翼板迎角, $(^\circ)$

将式(2)代入到式(1)中可得负载阻力的计算公式为

$$F_4 = \frac{1}{2} C_d b c \cos \alpha \rho v^2 \quad (3)$$

同理横向阻力分力 F_3 的计算公式为

$$F_3 = \frac{1}{2} C_d b c \sin \alpha \rho v^2 \quad (4)$$

2.1.2 横向受力分析

翼板在风场中所受横向力由两部分组成,阻力 F_2 的分力 F_3 和翼板表面的压力差 F_1 。根据伯努利原理,翼板所受横向力可类比固定翼升力,其计算公式为

$$F_1 = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad (5)$$

式中 C_L ——升力系数

V ——相对于空气的速度, m/s

式(5)中空气密度 ρ 为固定值, C_L 、 V 、 S 为变量值,需要对变量值逐一分析。其中升力系数 C_L 经验计算公式为

$$C_L = C_{L_0} + C_{L_\alpha} (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (6)$$

式中 C_{L_0} ——零迎角时的升力系数

C_{L_α} ——升力斜率,表示每单位迎角变化引起的升力系数变化量

α_1 ——风场与旋转轴间的夹角, (°)
 α_2 ——翼板与旋转轴间的夹角, (°)
迎角、翼板倾角和风场倾角的对应关系如图 4 所示。

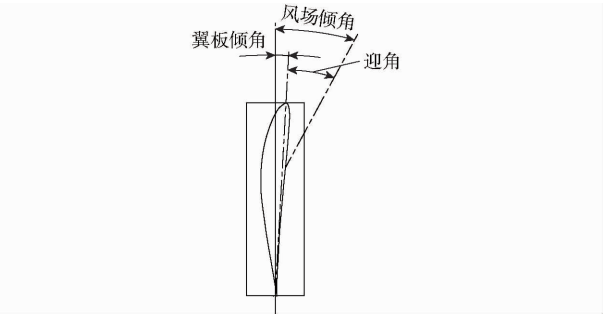


图 4 翼板迎角示意图
Fig. 4 Schematic of wing angle of attack

式(5)中,相对空气速度 V 为翼板前缘所在下洗风场位置的平均风速,通过对翼板前缘曲线积分后除以其长度得到。根据动量理论,螺旋桨产生的风场内某区域的平均风速可以使用公式进行估算,即

$$V = \frac{\int_b \frac{T}{2\rho A} \left(1 - \frac{z}{H}\right) \left(1 - \frac{r}{H}\right) d\sigma}{b} \quad (7)$$

式中 z ——与桨叶的垂直距离,mm
 r ——与轴线的径向距离,mm
 T ——螺旋桨产生的总推力,N
 A ——桨叶面积,m²
 H ——诱导区高度,通常为旋翼直径的几倍

式(5)中参考面积 S 为翼板的投影面积,其计算公式为

$$S = cb \quad (8)$$

将式(4)、(6)、(7)、(8)代入到式(5)中可得翼板个数为 x 的总横向力为

$$F_x = \frac{x}{2\rho} \frac{\left[\int_b \frac{T}{2\rho A} \left(1 - \frac{z}{H}\right) \left(1 - \frac{r}{H}\right) d\sigma \right]^2}{b} c [C_{L_0} + C_{L_\alpha} (\alpha_1 - \alpha_2)] + xF_3 \quad (9)$$

综上所述,扰流装置所受横向力和负载阻力主要取决于翼板结构参数和安装参数。由公式(3)、(9)可知影响扰流装置受力的主要参数为:翼板数量 x 、安装距离 z 、翼板宽度 b 、弦长 c 、翼板倾角 α_2 和升力系数。其中升力系数与翼型相关,不能直接调控,故选取翼型 w 作为后续试验参数。参数关系如图 5 所示。

2.2 扰流装置参数取值范围确定

上述公式分析已明确扰流装置的关键受力参数,其取值范围需进一步确定。首先通过对照试验验证 CFD 仿真准确性,继而利用仿真获取旋翼工作

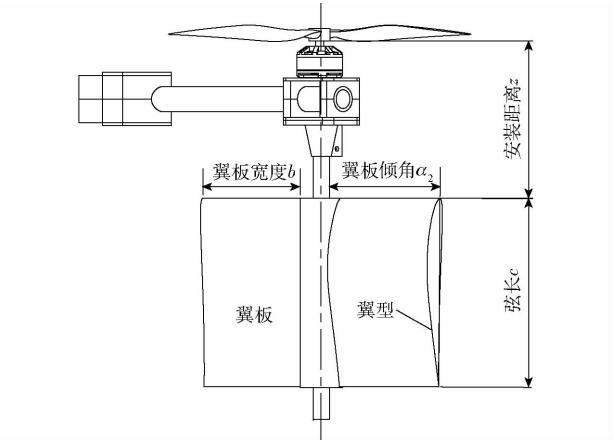


图 5 扰流装置安装与结构参数示意图
Fig. 5 Schematic of installation structure parameters of flow deflector

状态下的风速云图与流线分布。结合风场高值区范围及气流倾斜角度,对装置的结构与安装参数取值进行分析与界定。

2.2.1 旋翼风场仿真可靠性验证

首先,通过试验对 CFD 仿真结果的准确性进行验证。已知无人机质量约 2 kg,因此悬停状态下单个旋翼至少需提供 5 N 拉力的要求。地面拉力测试确定旋翼工作转速约为 5 550 r/min。基于试验数据建立 CFD 数值仿真模型,求解旋翼下洗流场,获取相应的气动响应特性。

随后,通过风场风速测量试验获取流场速度分布数据。试验采用风速传感器,在桨叶稳定运行状态下,测量距桨叶中心 10、20、30、40、50、100 cm 处的流场风速,对连续 10 s 数据取平均以减小瞬时波动误差。将实测风速与 CFD 仿真结果对比,评估数值模型对流场速度分布的预测精度。试验结果如图 6 所示。

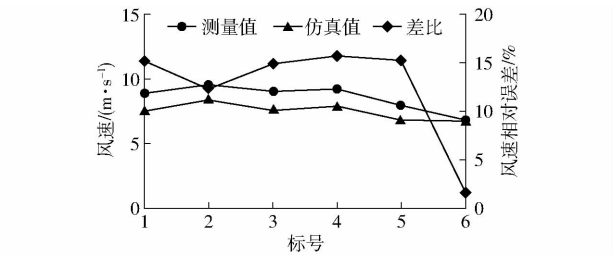


图 6 传感器与仿真结果对应曲线
Fig. 6 Curves of sensor data and simulation results

图中横坐标标号 1~6 依次对应距旋翼中心 10、20、30、40、50、100 cm 测点;风速相对误差表征同一位置仿真风速与实测风速的相对误差,用于定量评判数值模型预测精度。试验数据显示,风速实测与 CFD 仿真最大相对误差为 15%,在工业流体设备 10%~20% 的可接受范围内,表明模型具有工程可靠性。

2.2.2 扰流装置参数变量值确认

基于 2.2.1 节验证结果,分析仿真结果可得旋翼工作状态时下洗流场的速度云图与轨迹线分布,如图 7 所示。

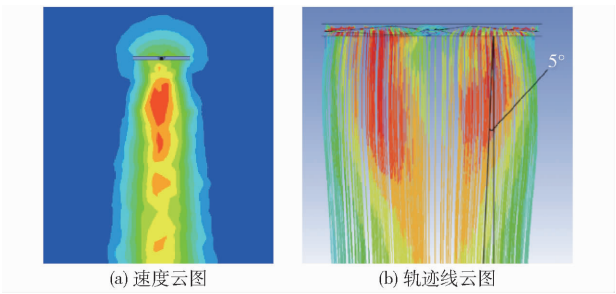


图 7 旋翼风场仿真结果

Fig. 7 Simulation results of rotor wind field

图 7a 显示,高风速区域的宽约为 120 mm、上边界距离桨叶约为 170 mm,竖直方向长度约为 240 mm。为充分验证扰流装置在风场内不同区域分布时的作用情况,翼板宽度设置为 100、110、120、130、140 mm。安装距离为 150、160、170、180、190 mm。翼板弦长度为 100、110、120、130、140 mm。为防止出现翼板结构重叠,翼板个数为 2、3、4 和 5。

根据图 7b 显示,风场倾斜角度约为 5°。由式(3)可知,当翼板倾角为 5°时翼板受到的负载阻力值最小,此时翼板迎角为 0°。为使翼板在 0°迎角时获得较大横向力,需其最大升阻比 C_L 对应的迎角接近 0°。使用 Profili 软件查询可知 Clark Y、NACA 2412、Eppler 387 和 Gottingen 7K 翼型最大升阻比对应迎角接近 0°,如图 8 所示。

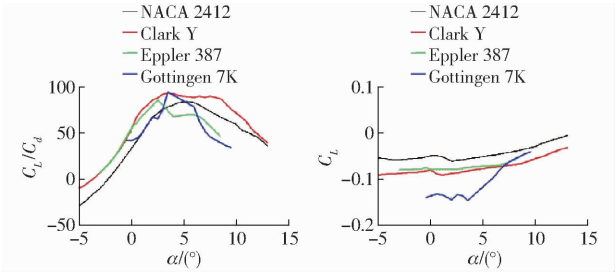


图 8 升阻比与迎角关系曲线

Fig. 8 Corresponding diagram of lift-drag ratio and angle of attack

为防止翼板出现负迎角,避免流动状态恶化及增加湍流和分离现象,翼板的最大倾转角度设定为 5°。同时翼板倾角为 2°时翼板迎角为 3°,接近升阻比的最大值。因此翼板倾斜角度参数取为 -1.0°、0.5°、2.0°、3.5°和 5.0°。

综上所述,扰流装置各项参数的取值如表 1 所示。

表 1 扰流装置参数水平值

Tab.1 Level values of spoiler structural parameters

翼板宽度/mm	安装距离/mm	弦长/mm	翼板个数	翼板类型	翼板倾角/(°)
100	150	100	2	Clark Y	-1.0
110	160	110	3	NACA 2412	0.5
120	170	120	4	Eppler 387	2.0
130	180	130	5	Gottingen 7K	3.5
140	190	140			5.0

3 扰流装置参数设计

无人机喷药作业中,扰流装置的风场优化效果主要取决于其结构与安装参数。为兼顾气动性能提升与负载增加,需开展不同参数下的气动效果与负载影响试验分析。基于表 1 参数分析,若全面开展正交试验需 10 000 次,资源消耗巨大。为优化资源配置、提升研究效率,本研究首先针对扰流装置的 6 个关键参数,依据式(1)和式(3)中的变量项,对影响同一变量的参数进行关联性分析并组合为参数组;进而通过影响性分析评估各参数组对结果的影响程度,对高影响性参数组开展正交试验,对低影响性参数组采用正交仿真试验。

3.1 扰流装置参数影响性与关联性分析

首先对式(5)和式(9)的变量项进行影响性分析,其中翼板面积 S 与升力系数 C_L 以单次方的形式出现,相对速度 V 取平方值。因此对影响 S 和 C_L 值的参数组,采用正交仿真试验;对于影响相对速度 V 的参数组,进行正交试验。

然后对扰流装置的参数进行关联性分析。根据式(8),翼板面积 S 由翼板宽度 b 与翼板弦长 c 决定,这两个参数具有较强的关联性,设置为宽度-弦长参数组。依据式(6),升力系数 C_L 取决于翼板倾角 α_2 及翼型 w ,设置为翼型-倾角参数组。根据上述影响性分析要求,分别对这两个参数组进行正交仿真试验。根据式(7),相对速度 V 由翼板个数 x 、翼板宽度 b 和安装距离 z 3 个参数确定,进一步分析表明,翼板宽度 b 的变化梯度仅为 10 mm,翼板个数 x 变化时对总宽度的影响至少为 100 mm,因此设置个数-距离参数组作为影响相对速度 V 的关键关联因子。

3.2 试验方案与结果分析

为实现风场优化与旋翼拉力损失的最小化,需对扰流装置关键参数进行系统优化。基于 3.1 节的参数分组结果,对“宽度-弦长”和“翼型-倾角”参数组开展正交仿真试验,对“个数-距离”参数组进行正交试验。通过两阶段试验评估不同参数组合的综

合性能,最终确定最优配置方案。因素水平设计见表 2。

表 2 正交试验因素水平
Tab.2 Level of orthogonal test factors

水平	宽度/ mm	弦长/ mm	翼型	倾角/ (°)	安装距 离/mm	翼板 个数
1	100	100	Clark Y	-1.0	150	2
2	110	110	NACA 2412	0.5	160	3
3	120	120	Eppler 387	2.0	170	4
4	130	130	Göttingen 7K	3.5	180	5
5	140	140		5.0	190	

3.2.1 正交仿真试验方案

开展仿真试验前,首先基于 Solidworks 建立包含桨叶与扰流装置的三维仿真模型,并对非关键特征进行合理简化^[22-23]。构建 CFD 计算域,为保证试验条件一致,湍流模型及旋翼转速等参数设置均与 2.2.1 节仿真模型保持一致,模型结构如图 9 所示。

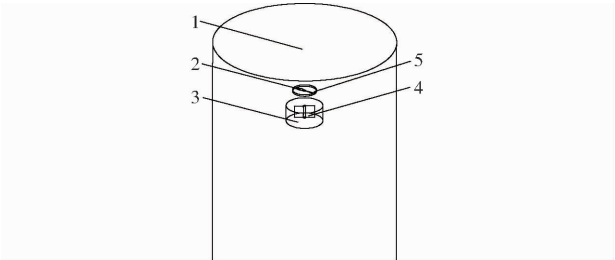


图 9 CFD 仿真模型
Fig.9 CFD simulation 3D model

1. 静域 2. 旋翼 3. 扰流装置动域 4. 扰流装置 5. 旋翼动域

3.2.1.1 仿真试验方案设计

基于上述仿真模型,首先进行宽度-弦长正交仿真试验,其余参数初始条件为:倾角 2°、Clark Y 翼型、安装距离 150 mm、翼板 2 个。基于表 2 给定参数,以翼板宽度和弦长作为自变量,共包含 2 因素 5 水平共计 25 次正交试验方案。通过分析宽度-弦长正交仿真试验的结果,选择评价标准达到最大值时对应的宽度和弦长作为扰流装置的优化参数值。

随后开展翼型-倾角正交仿真试验,采用前阶段确定的最佳弦长与宽度,保持其他参数不变。依据表 2 设计,以倾角(5 水平)和翼型(4 类型)为变量,共 20 组工况。通过分析结果,选取评价指标最大时对应的倾角与翼型作为进一步优化的参数值。

3.2.1.2 仿真试验评价指标

确定试验方法后,需建立科学的评价标准以评估扰流装置对下洗风场的优化效果及其负载影响^[24]。鉴于国内尚无统一的无人机下洗风场评价标准,本文提出两项指标:以装置上下方平面平均风速差定义风场优化效果 U ,反映气流衰减程度;以升

力损失率 F 表征对无人机负载的影响。通过实测 U 与 F ,综合评判装置性能,指导最优参数选取^[25]。具体评价定义详见图 10。

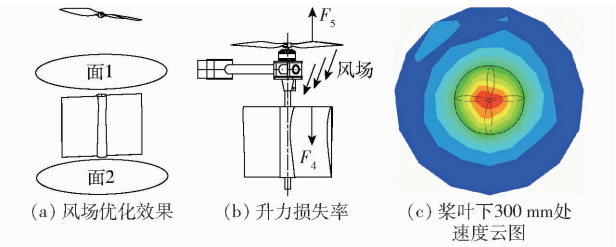


图 10 评价标准示意图
Fig.10 Schematics of evaluation criteria

风场优化效果 U 定义见图 10a,面 1 为桨叶下方 100 mm 处,对应为扰流装置上方,面 2 为桨叶下方 300 mm 处,对应为扰流装置下方。依据国家颁布的《风力等级》标准,风速大于等于 0.3 m/s 状态定义为有风。图 10c 为 2.2.1 节中仿真结果中旋翼下方 300 mm 处横截面的局部速度分布云图,计算可知旋翼下方 300 mm 处风速大于 0.3 m/s 的区域集中在半径为 360 mm 的圆内,因此定义风场优化效果为桨叶下方 100 mm 处和 300 mm 处半径为 360 mm 的圆面内的平均风速差。

升力损失率 F 定义见图 10b,桨叶高速旋转时向下压缩空气,根据牛顿第三定律,空气对桨叶产生大小相等、方向向上的反作用力,即升力。升力损失率是指扰流装置受到的负载阻力 F_4 与桨叶拉力 F_5 的比值。

综上所述,升力损失率 F 越小,旋翼升力损失越小;风场优化效果 U 越大,风场削弱效果越显著。因此,定义综合评价指标为二者比值,表达式为

$$M = \frac{U}{F} \tag{10}$$

式中 M ——仿真结果综合评价指标

3.2.2 正交试验方案

最后进行个数-距离正交试验,采用上述两阶段试验得出的最佳宽度、弦长、倾角和翼型值。依据表 2 设计,以翼板数(4 水平)和安装距离(5 水平)为自变量,共开展 20 组试验。正交试验分两步实施:升力损失率测试与风场优化效果测试。

3.2.2.1 升力损失率测试方案

测试拉力设备为灵翼飞航 LY-30KGF 型无人机动力系统测试台。测试未安装扰流装置时,油门开度 22% 对应电机拉力约 4.8 N,转速约 5 579 r/min,与仿真设定基本一致。随后,按翼板数量与安装距离的正交组合安装装置,保持油门开度 22%,待装置稳定转动后记录拉力值。试验过程如图 11 所示。

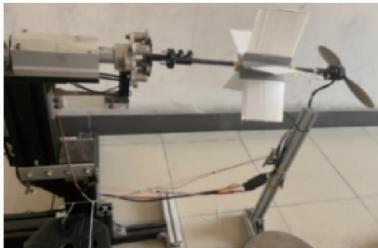


图 11 拉力损失率正交试验图

Fig. 11 Orthogonal test diagram of thrust loss rate

3.2.2.2 风场优化效果测试方案

风场优化效果测试试验所使用的阵列式风速传感器为实验室自研压差式风速传感器^[26],按照 5 × 5 分布式排放,传感器阵列安装高度为 1.6 m,桨叶安装在传感器阵列中心。油门开度设为 22%,首先测量无扰流装置时桨叶下方 100 mm 和 300 mm 处的平均风速;随后按翼板数量与安装距离的正交组合安装扰流装置,逐组测量相同位置的风速。传感器布局及试验现场如图 12 所示。

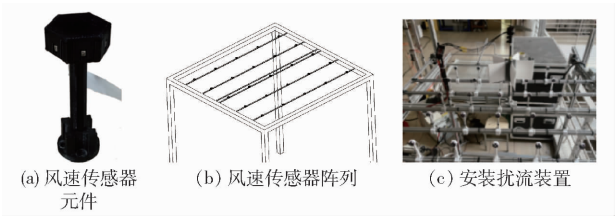


图 12 风场优化效果正交试验图

Fig. 12 Orthogonal test diagrams of wind field optimization effect

3.2.3 试验结果分析

根据 3.2.1 节中提出的试验方案,以评价标准作为结果值,对试验数据进行了系统分析,最终得到的试验结果如表 3 所示。

表 3 为依据上述试验方案开展的多阶段正交仿真结果,其中变量 A 在不同阶段分别代表弦长、倾角或安装距离,变量 B 分别代表翼板宽度、翼型或翼板数。评价标准值分别记为 M_1 、 M_2 、 M_3 ,在表中后 3 列分别列出了弦长-宽度、倾角-翼型以及距离-个数 3 个阶段的试验结果,通过这种方法系统地评估了各参数对扰流装置性能的影响。

利用 Minitab 软件对正交试验结果进行方差分析和均值分析,得到各组试验的方差分析表和均值响应表^[27]。然后采用 Z 轴作为评价标准, X 轴为因素 A , Y 轴为因素 B 绘制响应面图。分析结果如图 13 和表 4 所示。

3.2.3.1 弦长-宽度仿真结果分析

根据表 4 可知,弦长的 F 值为 21.19 ($P < 0.001$),宽度 F 为 6.66 ($P = 0.002$),二者的 P 值均小于 0.05,表明两者对最终评价结果具有显著影

表 3 试验结果
Tab. 3 Experimental results

序号	A (弦长/ 倾角/ 距离)	B (宽度/ 翼型/ 个数)	M_1 (弦长- 宽度)	M_2 (倾角- 翼型)	M_3 (距离- 个数)
1	1	1	5.53	5.41	5.54
2	2	1	4.99	6.24	3.71
3	3	1	5.73	4.81	9.70
4	4	1	5.07	5.59	5.55
5	5	1	4.06	5.22	0.94
6	1	2	5.41	5.83	0.95
7	2	2	5.25	5.29	3.38
8	3	2	5.74	5.45	4.02
9	4	2	4.60	5.03	3.21
10	5	2	4.24	4.57	2.30
11	1	3	3.28	5.95	2.13
12	2	3	4.22	4.25	2.19
13	3	3	3.13	5.74	1.85
14	4	3	3.01	5.54	0.21
15	5	3	2.67	4.35	1.14
16	1	4	4.04	3.94	2.85
17	2	4	4.71	4.18	1.86
18	3	4	4.51	4.69	0.88
19	4	4	3.89	3.79	1.18
20	5	4	4.03	3.69	0.92
21	1	5	4.50		
22	2	5	4.38		
23	3	5	4.01		
24	4	5	3.39		
25	5	5	3.75		

响。进一步地,弦长因素的极差为 1.813,大于宽度因素的极差 0.959,说明弦长对结果的影响大于宽度。

结合图 13a 的主效应图分析,响应变量均值随弦长增加呈先升后降趋势,而随宽度增加则呈先降后升,表明二者对性能的影响机制不同。弦长在水平 2 时响应最优,水平 1 与 3 接近;宽度在序号 1 时最佳,序号 2 亦表现良好。因此,综合极值可能出现在这些优势水平的组合中。

结合图 13b 的响应面分析可知,弦长与宽度对评价指标 M_1 具有显著的非线性耦合效应,响应面呈现多峰特征。其中,弦长水平 3 (120 mm) 与宽度水平 2 (110 mm) 交汇处为全局最大值点,表明该组合下 M 值最优,为最佳参数配置。

最优参数(弦长 120 mm,宽度 110 mm)下的仿真结果如图 13c 所示,装置下方气流呈均匀外扩趋势,截面平均风速降至 1.07 m/s,较上方降低 9.4%,拉力损失增加 1.6%,综合评价指标 M_1 达 5.74,表明单位拉力代价下的风速衰减效果为基准值的 5.74 倍,优化效率显著。

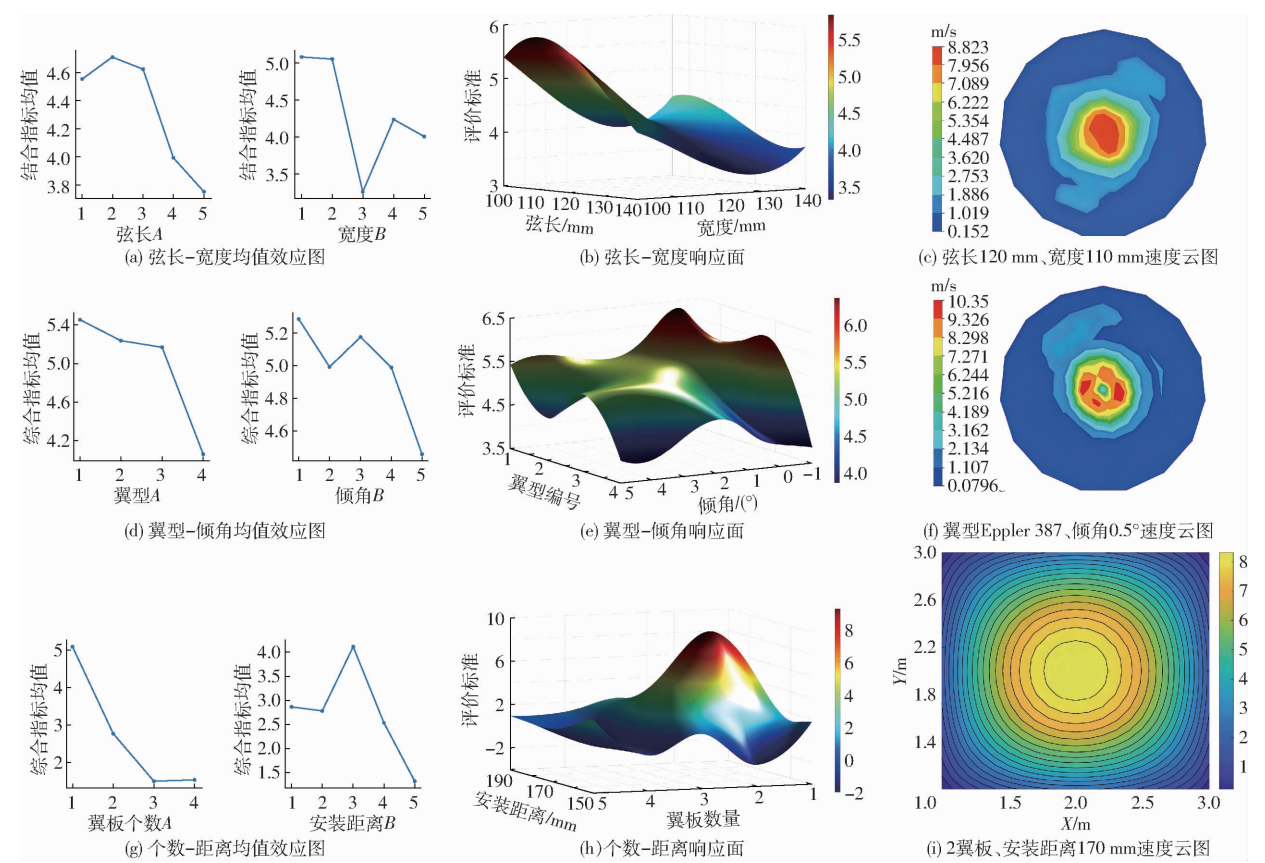


图 13 方差及响应面

Fig. 13 Variance and response surface

表 4 宽度-弦长回归分析

Tab. 4 Width-chord length regression analysis

来源	<i>F</i>	<i>P</i>	极差 <i>R</i>	排位
弦长	21.19	< 0.001	1.813	1
宽度	6.66	0.002	0.959	2
翼型	6.51	0.007	1.395	1
倾角	1.34	0.311	0.827	2
个数	4.69	0.022	3.585	1
距离	1.30	0.323	2.785	2

3.2.3.2 翼型-倾角仿真结果分析

由表 4 可知,翼型的 F 值为 6.51 ($P=0.007$), 倾角的 F 值为 1.34 ($P=0.311$), 这表明翼型对最终评价结果有较为显著的影响,而倾角变量对最终评价结果的影响则不明显。

具体而言,图 13d 显示响应变量均值在翼型序号 1 处最大,并随序号增加逐渐下降,而倾角则先减小后增大,表明翼型和倾角对结果的影响机制不同。翼型序号 1 的响应变量均值显著高于其他序号,但倾角的响应变量均值波动较大,难以确定明确趋势。因此,仅能初步确定评价标准的极大值可能出现在翼型序号为 1 时。

结合图 13e 响应面分析,整体呈现出复杂的非线性特征,具有多个波峰和波谷,显示出参数间相互作用的高度敏感性及存在多个局部最优解。响应面

显示,最大波峰值对应于翼型序号 1 (Eppler 387) 与倾角序号 2 (0.5°), 这表明在此特定组合条件下可获得最高的评价标准值 M , 从而实现最佳性能优化。

最优参数下的仿真结果如图 13f 所示,选用翼型 Eppler 387 及倾角 0.5° 时,扰流装置下方速度云图显示气流均匀外扩。此配置下,截面平均风速降至 1.06 m/s , 相比上方减少了 8.5% , 拉力损失增加 1.4% , 综合评价指标 M_2 为 6.24。这表明单位拉力损失带来的风速衰减效果是基准值的 6.24 倍, 显示出显著的优化效果和高效的扰流性能。

3.2.3.3 个数-距离试验结果分析

根据表 4 的分析结果,翼板个数的 F 值为 4.69 ($P=0.022$), 表明其对最终评价结果有显著影响; 而安装距离的 F 值为 1.30 ($P=0.323$), 显示其影响不明显。

具体而言,图 13g 显示响应变量均值在翼板个数序号 1 处最大,并随序号增加逐渐下降; 安装距离的结果则先增后减。这证明了二者对结果的影响机制不同。翼板个数序号 1 的响应变量均值显著高于其他序号,同时安装距离序号 3 的响应变量均值也优于其他 4 组数据。因此,评价标准的极大值可能出现在翼板个数序号为 1 和安装距离序号为 3 的组合中。

结合图 13h 的响应面分析,响应面存在多个波峰和波谷,表明评价标准值 M 随翼板个数和安装距离的变化呈现出复杂的非线性关系。响应面显示的最大波峰值对应于翼板个数序号 1(2 个)和安装距离序号 3(170 mm)。这意味着在此特定组合条件下,可以获得最高的评价标准值 M_3 ,实现最佳性能优化。

基于 Matlab 插值处理风速数据得到的风速分布云图 13i 所示^[28],气流由中心向外均匀扩散。与无扰流装置状态相比,目标区域平均风速降低 11%,拉力损失增加 1.1%,综合评价指标 M_3 达 9.7,表明单位拉力代价下的减速效果为基准值的 9.7 倍,验证了显著的优化效果与高效扰流性能。

综上,结合正交仿真试验及其结果分析,确定扰流装置最优参数组合,如表 5 所示。

表 5 扰流装置参数

Tab.5 Parameters of the flow deflector

翼型	翼板宽度/ mm	弦长/ mm	倾斜角度/ (°)	翼板 数	安装距离/ mm
Eppler 387	110	120	0.5	2	170

4 飞行验证试验

4.1 试验条件

为验证扰流装置对无人机风场优化效果、拉力损失及飞行稳定性的影响,本文开展了机载飞行试验^[29-30]。试验于 2025 年 2 月 28 日在广州市华南农业大学华山区运动场展开;气象条件:天气晴、气温 26.2℃、风速 0~3 m/s。

采用实验室组装无人机作为载机,可实现定点飞行、规划路线飞行等功能。其他主要设备包括风速传感器阵列、扰流装置和安装机架等。试验现场如图 14 所示。



图 14 机载试验现场

Fig. 14 Field scene of airborne test

传感器阵列架设高度约为 1.6 m,仅采集风速大于 0.3 m/s 的有效数据。试验时,无人机在无扰流装置状态下,通过定点定高功能悬停于阵列上方

1.2 m 处,待飞行状态稳定后,以 1 s 间隔连续记录 5 s 的油门开度及风速数据;安装扰流装置后,在相同工况下重复上述测试流程,获取对比数据。

4.2 试验结果与误差分析

安装扰流装置后,无人机飞行过程中姿态稳定,未出现明显波动,表明该装置对飞行控制影响甚微。试验以 1 s 为间隔,采集 5 s 内风速传感器阵列中大于等于 0.3 m/s 的有效数据,计算其平均值作为该时段平均风速;油门开度亦采用相同方法取均值。试验结果如图 15 所示。

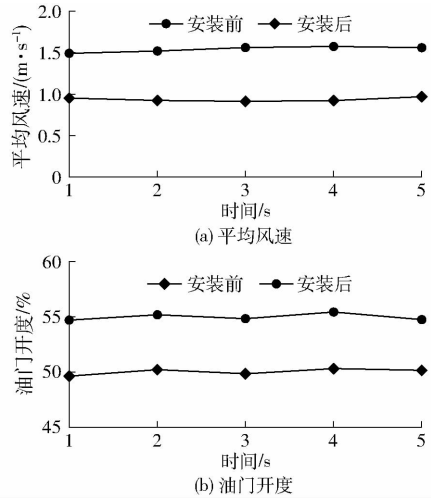


图 15 飞行试验结果

Fig. 15 Flight test results

试验结果表明,安装扰流装置后,下洗风场平均风速由 1.53 m/s 降至 0.94 m/s,降幅达 38.6%;同时,为维持稳定飞行,油门开度平均值从约 50% 增至 55%,增幅约 10%。由于难以直接测量旋翼拉力,本次试验以油门开度变化作为拉力损失的间接评价指标,据此计算得风场优化效果与拉力代价之比(评价标准值 M)为 3.86,表明扰流装置在显著削弱风场的同时具备良好的综合性能。

对比飞行试验与“翼板个数-安装距离”正交试验结果, M 值相差 5.84,差异主要源于拉力损失的评估方法不同:正交试验基于拉力直接测量,而飞行试验通过油门开度间接推算,受电机-旋翼系统非线性响应影响;此外,3D 打印支架及起落架增重导致旋翼负载增加、转速升高,偏离理想工况,引入额外系统误差。尽管存在偏差,飞行试验仍验证了扰流装置在真实飞行条件下对下洗风场的有效调控能力,其 M 值达 3.86,证明该装置在降低风速与控制气动代价之间实现了良好平衡。

5 结论

(1) 本文针对大载荷无人机因下洗风场过强需提高作业高度,导致雾滴漂移的问题,提出在高速

区设置扰流装置以降低风场强度的方法。该方案可实现低空安全喷洒,有效减少雾滴漂移,避免作物损伤,提升施药精准性与作业效率。

(2)本文以自研无人机为平台,设计了确认扰流装置最优参数的试验方案。基于空气动力学等理论确定关键参数,通过关联性与影响性分析对参数分组筛选,明确主要影响因素,有效降低试验成本,

提升研究可行性。

(3)最终飞行试验结果表明,安装扰流装置后,无人机下洗风场平均风速降低约 38.6%,拉力损失约为 10%,且飞行过程中姿态稳定,未出现明显波动。该装置有效削弱了近地强风影响,使无人机可在更低安全高度作业,显著降低雾滴漂移与作物机械损伤风险,提升了喷洒精准度和作业效率。

参 考 文 献

[1] 王月华. 农用植保无人机在玉米主要病虫害防治中的应用[J]. 特种经济动植物, 2025, 28(1): 143 – 144, 147.
Wang Yuehua. The application of agricultural plant protection drones in the control of major pests and diseases of corn[J]. Special Economic Animal and Plant, 2025, 28(1): 143 – 144, 147. (in Chinese)

[2] 宋灿灿,王国宾,韩金钢,等. 农用无人机播撒装置与技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 110 – 122.
Song Cancan, Wang Guobin, Han Jin'gang, et al. Review of research progress on agricultural UAV spreading devices and technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 110 – 122. (in Chinese)

[3] 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 – 216,226.
Zhang Zhihong, Zeng Ronghao, Lai Qinghui, et al. Research on influence law of downwash airflow field of small plant protection UAV on droplet motion characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 208 – 216,226. (in Chinese)

[4] 陈盛德,兰玉彬,Bradleyk F,等. 多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 105 – 113.
Chen Shengde, Lan Yubin, Bradleyk F, et al. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 105 – 113. (in Chinese)

[5] 秦维彩,陈盼阳,孙丽娜. 植保无人飞机喷施叶面肥作业参数对枇杷冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 中国南方果树, 2023, 52(6): 119 – 123.
Qin Weicai, Chen Panyang, Sun Lina. The influence of operation parameters of unmanned aerial vehicles for plant protection on the deposition and distribution of spray droplets in the canopy of loquat trees when applying foliar fertilizer[J]. South China Fruits, 2023, 52(6): 119 – 123. (in Chinese)

[6] 李宏泽. 基于 CFD 理论的植保无人机喷洒系统优化设计与雾滴运动特性研究[D]. 长春:吉林大学, 2021.
Li Hongze. Optimization design of spraying system for agricultural aerial spraying unmanned aerial vehicle based on CFD theory and research on droplet movement characteristics[D]. Changchun:Jilin University, 2021. (in Chinese)

[7] 王林惠. 农用无人机稻田空区变量喷雾及雾滴沉积检测技术研究[D]. 广州:华南农业大学, 2020.
Wang Linhui. Research on variable spray and droplet deposition detection technology for agricultural unmanned aerial vehicles in rice fields[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[8] 吴剑坚. 植保无人机喷施雾滴沉积分布规律及评价方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2022.
Wu Jianjian. Research on the distribution pattern and evaluation method of spray droplet deposition by agricultural drone spraying[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2022. (in Chinese)

[9] 陆宗明. 植保无人机雾滴飘移测试试验台设计及飘移性能分析[J]. 南方农机, 2024, 55(7): 70 – 72.
Lu Zongming. Design of the droplet drift test platform for agricultural drones and analysis of drift performance[J]. South Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 70 – 72. (in Chinese)

[10] 符伊晴. 多旋翼植保无人机下洗风场和喷雾场的运动规律研究[D]. 广州:广东技术师范大学, 2023.
Fu Yiqing. Research on the motion laws of the downwash field and spray field of multi-rotor agricultural spraying unmanned aerial vehicles[D]. Guangzhou: Guangdong Polytechnic Normal University, 2023. (in Chinese)

[11] Liu Z, Gao R, Zhao Y, et al. Study on the characteristics of downwash field range and consistency of spray deposition of agricultural UAVs[J]. Agriculture, 2024, 14(6): 931.

[12] 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)

[13] Li J, Long B, Wu H, et al. Rapid evaluation model of endurance performance and its application for agricultural UAVs[J]. Drones, 2022, 6(8): 186.

[14] Wu H, Liu D, Zhao Y, et al. Establishment and verification of the UAV coupled rotor airflow backward tilt angle controller [J]. Drones, 2024, 8(4): 146.

[15] 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 – 118.
Li Jiyu, Lan Yubin, Shi Yeyin. Research progress on airflow characteristics and field pesticide application system of rotary-wing UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 104 – 118. (in Chinese)

[16] 李仁凤,韩顺凯,杨风波. 耦合风场四旋翼植保无人机下洗流与雾滴分布研究[J]. 中国农机化学报,2024, 45(7): 81 – 86.
Li Renfeng, Han Shunkai, Yang Fengbo. Research on downwash flow and droplet distribution of four-rotor plant protection UAV coupling with wind field[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(7): 81 – 86. (in Chinese)

[17] 张健,张超,陈青,等. 环境风速对六旋翼无人机下洗气流和雾滴沉积影响研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 74 – 81.
Zhang Jian, Zhang Chao, Chen Qing, et al. Effect of ambient wind speed on down wash airflow and droplet deposition for six-rotor UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 74 – 81. (in Chinese)

[18] 杨知伦,葛鲁振,祁力钧,等. 植保无人机旋翼下洗气流对喷幅的影响研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 116 – 122.
Yang Zhilun, Ge Luzhan, Qi Lijun, et al. Influence of UAV rotor down-wash airflow on spray width[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 116 – 122. (in Chinese)

[19] 李雪,徐陶,王伟,等. 八旋翼植保无人机下洗气流对雾滴运动与分布特性的影响[J]. 农药学学报, 2023, 25(3): 689 – 699.
Li Xue, Xu Tao, Wang Wei, et al. Effect of downwash airflow of 8-rotor unmanned aerial vehicle on droplet motion and spatial distribution[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2023, 25(3): 689 – 699. (in Chinese)

[20] Wei X, Li J, Long B, et al. Method for vortex shape retrieval and area calculation based on convex hull algorithm[J]. IEEE Access, 2021, 9: 2706 – 2714.

[21] Hu X, Li Y, Wu H, et al. A YOLOv3-based rice vortex detecting system using dual collaborative UAVs[J]. Journal of the ASABE, 2022, 65(5): 1133 – 1140.

[22] 张亚辉. 多旋翼植保无人机悬停下洗气流及大豆冠层对雾滴运动规律影响研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2021.
Zhang Yahui. Research on the influence of multi-rotor agricultural spraying unmanned aerial vehicle’s suspended airflow and soybean canopy on the movement law of droplets[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[23] 田志伟,薛新宇,徐阳,等. 植保无人机下洗气流对作物冠层作用规律研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 40 – 48.
Tian Zhiwei, Xue Xinyu, Xu Yang, et al. Effect of plant protection UAVs downwash on crop canopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 40 – 48. (in Chinese)

[24] 王国宾. 植保无人机喷雾质量评价及影响因素分析[D]. 广州:华南农业大学, 2019.
Wang Guobin. Evaluation of spray quality by agricultural drone and analysis of influencing factors[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[25] 刘鑫. 单旋翼植保无人机旋翼流场下洗气流速度分布规律研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2019.
Liu Xin. Research on the distribution law of airflow speed in the downwash area of the rotating blades of single-rotor agricultural drone[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[26] 黄聪,李继宇,兰玉彬,等. 一种风压转换近地风速检测装备设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(1): 100 – 106.
Huang Cong, Li Jiyu, Lan Yubin, et al. Design and experiment of a wind speed detection equipment with wind pressure conversion near ground[J]. Journal of South China Agricultural University, 2018, 39(1): 100 – 106. (in Chinese)

[27] Tolba M, Shirinzadeh B, El-bayoumi G, et al. Adaptive optimal controller design for an unbalanced UAV with slung load[J]. Autonomous Robots, 2023, 47(3): 267 – 280.

[28] Dong S J, Gui Q H, Zhu L, et al. CFD-based pesticide selection for a nozzle used in a six-rotor UAV in hover mode for tea spraying[J]. Pest Management Science, 2023, 79(5): 1963 – 1976.

[29] Liu Z, Fan G, Ye S, et al. Flight parameter—wind vortex characteristic control model of a four-multirotor unmanned aerial vehicle operating in pesticide spraying of rice[J]. Agriculture, 2023, 13(4): 892.

[30] Tang Y, Fu Y, Guo Q, et al. Numerical simulation of the spatial and temporal distributions of the downwash airflow and spray field of a co-axial eight-rotor plant protection UAV in hover[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 206: 107634.