

单旋翼植保无人机翼尖涡流对雾滴飘移的影响

文 晟^{1,2} 韩 杰^{2,3} 兰玉彬^{2,3} 尹选春^{2,3} 卢玉华^{1,2}

(1. 华南农业大学工程基础教学与训练中心, 广州 510642; 2. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心, 广州 510642;
3. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 为研究单旋翼植保无人机翼尖涡流对雾滴飘移的影响特性,基于格子玻尔兹曼(Lattice-Boltzman, LBM)方法的自适应细化物理模型,对单旋翼无人机的旋翼流场进行了数值模拟。通过改变无人机喷杆的垂直距离和喷头在旋翼下方的位置,研究了不同飞行速度下,无人机翼尖涡流对雾滴飘移的影响规律。为捕获到不同粒径的雾滴在无人机下洗流场中的运动轨迹,采用基于拉格朗日离散相粒子跟踪法模拟了雾滴的运动轨迹。为验证数值模拟的准确性,进行了试验验证,研究结果表明:当无人机飞行速度大于3 m/s时,机身后方开始出现螺旋型尾涡,且飞行速度越大、飞行高度越高,尾涡向机身后方的扩散距离越远;当飞行速度为5 m/s、飞行高度为3 m时,38%的雾滴因螺旋尾涡而造成空中飘移,其中粒径小于100 μm的雾滴约占总飘移雾滴数的80%;喷杆距离主旋翼的高度对雾滴因翼尖涡流造成的飘移影响不明显,但喷头的位置越靠近主旋翼的边缘,雾滴越容易被翼尖涡流卷吸。

关键词: 单旋翼植保无人机; 翼尖涡流; 雾滴飘移; 数值模拟

中图分类号: S252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0127-11

Influence of Wing Tip Vortex on Drift of Single Rotor Plant Protection Unmanned Aerial Vehicle

WEN Sheng^{1,2} HAN Jie^{2,3} LAN Yubin^{2,3} YIN Xuanchun^{2,3} LU Yuhua^{1,2}

(1. Engineering Fundamental Teaching and Training Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China
2. National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticides Spraying Technology, Guangzhou 510642, China 3. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Plant protection drone has great application prospects in agricultural production due to its low working height, flexible operation, good adaptability to terrain, slight environmental pollution and high efficiency in pest control. However, it could cause secondary disasters with droplets drift due to wingtip vortices. To investigate the effect of wing tip vortex flow of a single-rotor unmanned aerial vehicle on droplet drift, the flow field under a single-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) was simulated numerically based on an adaptive thinned physical model of the lattice-Boltzman (LBM) method. The drift characteristics at different flight speeds of the wingtip vortex were examined for various nozzle positions and vertical distances between different spray booms. The Lagrange discrete particle tracking method was applied to capture accurately the trajectories of droplets with different particle diameters. Spray tests were conducted to verify the accuracy of the numerical simulation. It was shown that as the UAV flight speed was greater than 3 m/s, a spiral tail vortex appeared at the rear of the fuselage. The range of the tail vortex behind the fuselage became longer as the flight speed or flight altitude got higher. And 38% of the droplets was drifted by the spiral tail vortex at the flight speed of 5 m/s and the flight height of 3 m, in which 80% of the drifted droplets was smaller than 100 μm. The distance between the sprayer and the main rotor had little effect on the drop drift caused by the wingtip vortex. While the

收稿日期: 2018-03-16 修回日期: 2018-06-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200700)、广东省自然科学基金项目(2017A030310383)、广东省科技计划项目(2016A020210100、2017B010117010)、广东省教育厅重点平台及科研项目(2015KGJHZ007)和广州市科技计划项目(201707010047)

作者简介: 文晟(1974—),男,副教授,博士,主要从事植保机械和精准喷雾技术研究,E-mail: vincen@scau.edu.cn

通信作者: 兰玉彬(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事精准农业航空研究,E-mail: ylan@scau.edu.cn

nozzle was closer to the edge of the main rotor, the droplets can be more easily sucked by the wingtip vortex.

Key words: single rotor plant protection UAV; wing tip vortex; droplet drift; numerical simulation

0 引言

农用植保无人机因其具有作业效率高、防治病虫害效果较好、灵活性较高等优势,已得到越来越多的重视^[1-3]。由于植保无人机通常采用低容量或超低容量的喷施作业模式,因此雾滴在靶标区域的沉积量是评价其施药质量的重要指标之一^[4]。影响农药雾滴沉积、飘移的因素有很多^[5],如喷洒系统、风速风向和农药的理化特性等。与有人驾驶固定翼飞机相比,单旋翼植保无人机旋翼产生的风速较大、风压较高,因此旋翼下方的流场特性是影响雾滴飘移沉积的主要因素之一^[6]。

单旋翼植保无人机主旋翼的下洗气流为湍流,其流场形态复杂。为研究无人机旋翼流场对雾滴飘移与沉积的影响,张宋超等^[7]研究了 N-3 型农用无人直升机作业时所需的安全农药飘移缓冲区,通过试验与数值模拟得出侧向风是机身侧后方雾滴沉积最大影响因素,当侧向风速在 1~3 m/s 时,需要预留 8~10 m 的喷施缓冲区。王军锋等^[8]针对 FR-200 型大载荷植保无人直升机喷洒系统,基于 Fluent 软件,就飞行速度、喷杆相对位置、喷施角度等参数对雾滴流场的影响进行了研究,研究结果表明,无人机飞行速度越大、喷头位置越靠近机身下方与喷杆两端、喷施角度越大,雾滴的抗飘移能力越低。杨知伦等^[9]研究了雾滴在 XV-2 型植保无人机旋翼下洗气流的分布特性,通过理论分析与实地试验发现,无人机飞行高度是影响喷幅的主要因素,当植保无人机飞行高度为 6 m 时,喷幅约为 10 m;飞行高度为 8 m 时,喷幅约为 12 m。BAE 等^[10]研究了带有高架尾桨平衡系统无人直升机下洗流场中雾滴沉积的均匀性,发现这种尾部平衡桨农用无人机对机身左右两侧的雾滴沉积平衡有明显的改善作用。

翼尖涡流是飞机的机翼或桨叶产生正升力时,由于上、下翼(桨)面的压强差,下方的高压气流循着翼(桨)尖向上滚卷流动到较低压的翼(桨)面上侧,所形成的一种螺旋式的漩涡运动。ZHANG 等^[11]针对有人驾驶固定翼飞机(Trush 510G 型)的研究表明,在无侧向风情况下,翼尖涡流是影响其雾滴飘移的一个重要因素。单旋翼植保无人机的飞行状态与固定翼飞机相比有显著区别,在飞行过程中,其旋翼流场中产生强烈的涡流场^[12],会对雾滴的飘移与沉积产生较大影响。为研究单旋翼植保无人机

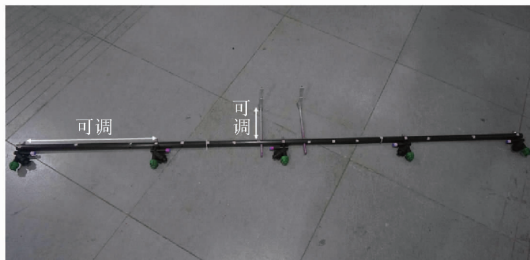
流场中翼尖涡流对雾滴飘移沉积的影响因素,本文对单旋翼植保无人机在不同的飞行速度下,产生的翼尖涡流和尾迹对雾滴飘移的影响规律进行分析,并对喷杆的垂直高度和喷头位置等喷施参数进行试验确定。利用计算流体力学方法模拟单旋翼植保无人机在不同飞行速度下的翼尖涡流及尾迹的分布情况,并基于拉格朗日离散相粒子跟踪法模拟不同粒径的雾滴在无人机下洗流场中的运动轨迹,在此基础上探寻不同粒径的雾滴附着在靶标的情况,并通过使用由深圳高科新农技术有限公司生产的单旋翼植保无人机 S-40 进行户外试验,分析户外试验与数值模拟的差异,以便于更好地指导单旋翼无人机的实践作业。

1 物理模型

电动单旋翼植保无人机如图 1a 所示,其主要参数为:外形尺寸 2.5 m×0.57 m×0.67 m,最大起飞质量 41.5 kg,药箱容积为 20 L。为研究不同喷杆高度及喷嘴位置情况下,旋翼产生气流的涡旋尾迹对雾滴飘移的影响规律,课题组自制了喷雾系统,如图 1b 所示,扇形压力喷头的喷雾角为 110°,当压力为 0.5 MPa 时,其流量为 0.76 L/min,喷头数目为 5 个,喷杆在旋翼下方的垂直高度可调,为 0.35~0.55 m,且各喷头之间的距离(旋翼下方的位置)可调,为 0.10~0.50 m。



(a) S-40型单旋翼植保无人机



(b) 喷雾系统

图1 无人机与喷雾系统

Fig. 1 UAV and spray system

为准确模拟出单旋翼无人机在不同飞行速度下的流场特性,无人机主旋翼和尾桨的物理模型通过三维立体扫描仪(VTOP208B 型,东莞市驰一三维科技有限公司)扫描所得,如图 2 所示。无人机的机体、起落架、药箱、喷杆和喷头等部件则是根据测绘的尺寸利用软件 UG NX10.0(Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.)建立三维模型。构建的电动单旋翼植保无人机完整三维模型如图 3 所示。

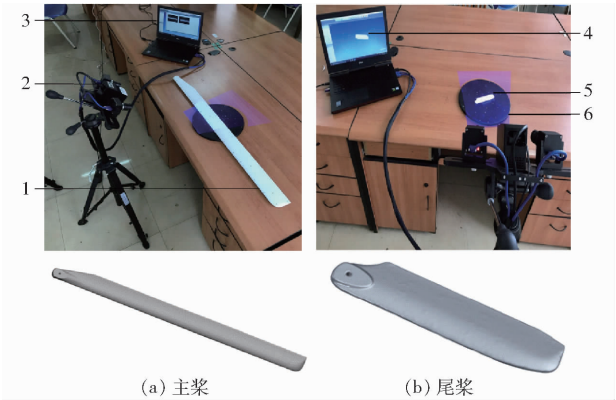


图 2 三维扫描
Fig. 2 Three-dimensional scanning

1. 主桨 2. 三维扫描仪 3. 计算机 4. 点云数据 5. 尾桨
6. 标记盘

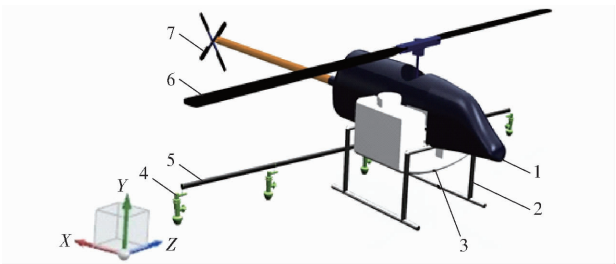


图 3 S-40 型植保无人机模型

Fig. 3 S-40 plant protection UAV model

1. 机身 2. 起落架 3. 药箱 4. 喷嘴 5. 喷杆 6. 主桨 7. 尾桨

坐标系的定义如图 3 所示,无人机前进的方向设为 X 轴负方向,无人机上升的方向设为 Y 轴正方向,无人机机身从左到右设为 Z 轴正方向。

2 数值模拟

为了分析旋翼在高速旋转运动中的流体动力学特性,商用计算流体力学软件(Computational fluid dynamic, CFD),如 Fluent(ANSYS Inc.)和 CFX(ANSYS Inc.)等,通常在动态仿真中使用动网格技术^[13-16]。但对无人机旋翼这种模型边界复杂的情况,数值模拟过程中的网格重构常常需要耗费大量的计算时间,而且极易因出现负体积而导致计算过程出错。基于格子玻尔兹曼(Lattice-Boltzman, LBM)方法的计算流体力学方法却在计算具有复

杂边界条件和非平稳运动物体的三维流场问题中具有优势^[17],并可以准确处理微观和宏观尺度上的问题^[18-19]。由于这种灵活的基于粒子的计算方法避免了传统的网格划分过程,离散化阶段效率高,计算结果准确,所以本文采用基于 LBM 方法的 XFlow(Next Limit Dynamics S. L.)软件模拟单旋翼植保无人机下洗流场分布情况。

2.1 模拟方法

XFlow 采用的 LBM 方法计算域为均匀立方体单元,单元的特征晶格结构为 D3Q27(图 4),有 27 个离散速度矢量,其中包括晶格体心的 1 个离散速度矢量为零的点,6 个从体心到晶格体面中心的离散速度矢量,12 个从体心到晶格体边中点的离散速度矢量,8 个从体心到晶格体顶角的离散速度矢量。

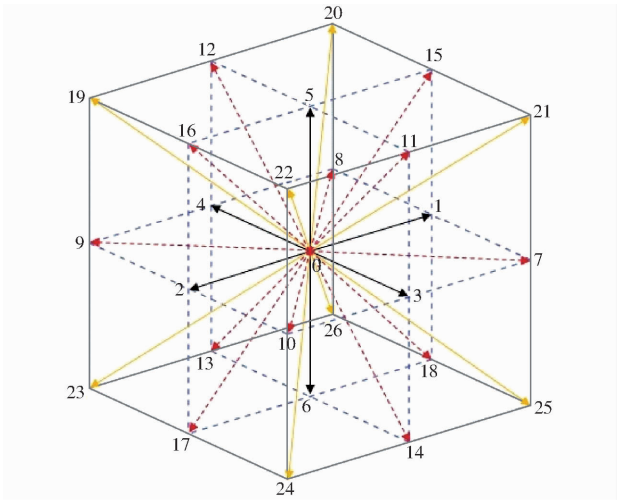


图 4 D3Q27 晶格模型

Fig. 4 Lattice of D3Q27 model

在该方法中,选取格子玻尔兹曼方程作为求解方程,格子玻尔兹曼传输方程在晶格上离散化的方程为^[20]

$$f_i(x + e_i, t + dt) = f_i(x, t) + W_i(x, t) \quad (1)$$

其中

$$W_i = \frac{1}{\tau}(f_i - f_i^e) \quad (2)$$

式中 f_i ——粒子速度分布函数

e_i ——沿着第 i 个方向的速度

dt ——时间步长

$f_i(x, t)$ —— t 时刻 x 点处 i 方向上的粒子速度分布函数

W_i ——碰撞算子

f_i^e ——单粒子平衡态分布函数

τ ——无量纲松弛参数

在引入(Bhatnagar-Gross-Krook, BGK)碰撞算子的近似简化后,方程可还原为描述流体流动的控制方程 N-S 方程,并且可以再现低马赫数的流体动力学状态^[21]。

2.2 湍流模型

为准确模拟旋翼的流场特性,使用大涡模拟 (Large eddy simulation, LES) 的壁面自适应局部涡粘度模型 (Wall adapting local eddy, WALE), 该方案提供了相同的局部涡流粘度和近壁特性^[22], 实际的执行公式为

$$v_t = \Delta_f^2 \frac{(G_{\alpha\beta}^d G_{\alpha\beta}^d)^{\frac{3}{2}}}{(S_{\alpha\beta} S_{\alpha\beta})^{\frac{5}{2}} + (G_{\alpha\beta}^d G_{\alpha\beta}^d)^{\frac{5}{4}}} \quad (3)$$

其中

$$\Delta_f = c_w \Delta \quad (4)$$

$$S_{\alpha\beta} = \frac{g_{\alpha\beta} + g_{\beta\alpha}}{2} \quad (5)$$

$$G_{\alpha\beta}^d = \frac{1}{2}(g_{\alpha\beta}^2 + g_{\beta\alpha}^2) - \frac{1}{3}\delta_{\alpha\beta} g_{\gamma\gamma}^2 \quad (6)$$

式中 v_t ——模拟亚格湍流的湍流涡流粘度
 Δ_f ——滤波器尺度
 c_w ——常数, 通常取 0.325
 Δ ——单位网格尺度
 $S_{\alpha\beta}$ 、 $G_{\alpha\beta}^d$ ——分辨尺度应变率张量
 $\delta_{\alpha\beta}$ ——克罗内克尔符号
 $g_{\alpha\beta}$ 、 $g_{\beta\alpha}$ 、 $g_{\gamma\gamma}$ ——应变率张量, 可用 LBM 方法作二阶矩获得

下角 α 、 β 、 γ 表示空间的方向, 在二维情况下, α 、 β 、 γ 可取 1、2, 在三维情况下, α 、 β 、 γ 可取 1、2、3。

2.3 边界条件

设置的计算域是在 X 、 Y 、 Z 方向尺寸为 $30\text{ m} \times 5\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的长方体, 如图 5 所示。其中, 4 个着色的边界设为固壁边界; 速度入口为进风口, 速度的方向为沿 X 轴的负方向, 设定入口处流速 $0 \sim 7\text{ m/s}$, 以模拟植保无人机的不同飞行速度。在计算域中, 无人机的主旋翼距离底面的高度为 3 m , 无人机三维模型的主要尺寸如图 6 所示。

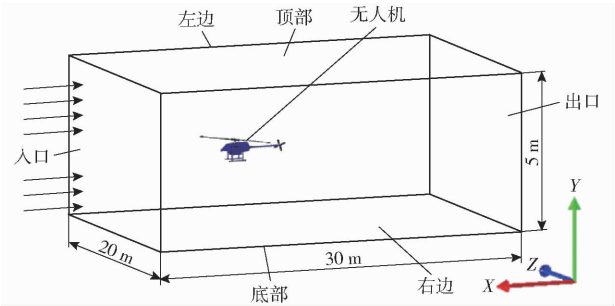


图 5 计算区域示意图
Fig. 5 Schematic diagram of computational domain

为准确求取旋翼的流场参数, 还需要提高计算域的空间和时间分辨率, 以获得所有不规则的流动湍流尺度。由于模拟的细化重点在于旋翼表面、机身表面以及下洗流场尾迹部分, 为节省计算资源, 虚拟风洞的全局空间细化分辨率尺寸设定为 0.2 m 。

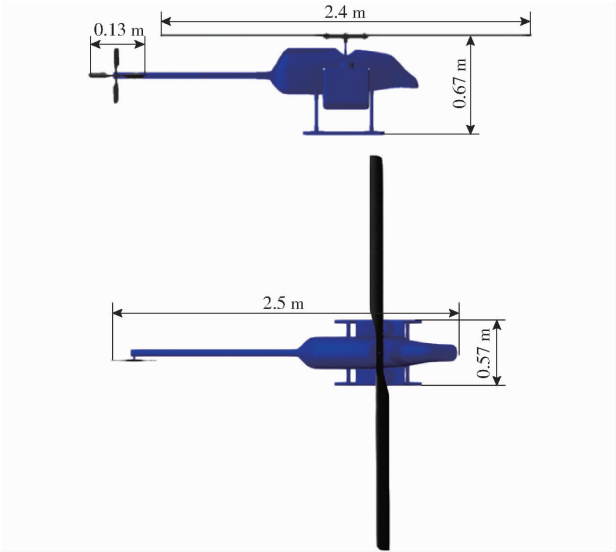


图 6 无人机尺寸
Fig. 6 Size of UAV

机身、主旋翼、尾翼表面细化算法设定为自适应方法, 机身细化分辨率尺寸设定为 0.05 m , 主旋翼与尾翼的细化分辨率尺寸设定为 0.025 m 。为了能够捕捉到下洗流场尾迹的特性, 将下洗流场尾迹的细化分辨率尺寸设定为 0.0125 m , 尾迹细化阈值设定为 $5 \times 10^{-5}\text{ m}$ 。参数设定后自动离散化的效果图如图 7 所示。

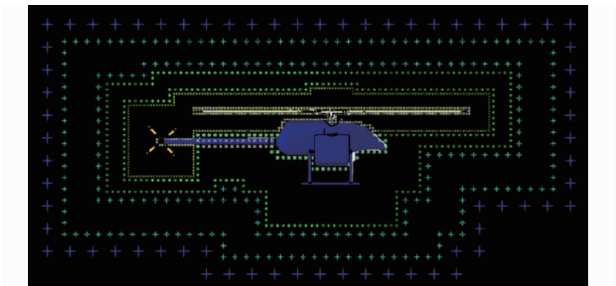


图 7 计算区域的离散划分
Fig. 7 Discrete division of computing regions

设定主旋翼与尾翼的运动特性分别为绕各自坐标系的 Y 、 Z 轴转动。主旋翼与尾翼转速比为 $1:5$ 。

3 流场模拟结果分析

3.1 翼尖涡流分布情况

为了获取单旋翼植保无人机翼尖涡流对雾滴飘移影响的规律, 针对单旋翼植保无人机悬停状态下的数值模拟进行分析。由于直升飞机的主旋翼在转动过程中会产生翼尖涡流^[23-26], 为捕捉到这种翼尖涡流, 选取无人机在悬停状态下的模拟云图 (图 8) 进行分析。图 8a 是单旋翼植保无人机在飞行速度为 0 m/s (悬停状态) 下的等涡量云图, 其中 ψ 是尾迹涡龄角, 即旋翼旋转过的角度所对应的翼尖涡环。从图中可知, 本次模拟捕捉到涡龄角 540° 左右的旋

翼翼尖涡流,其中前行侧涡龄角为 360° 的翼尖涡流因受到涡龄角为 540° 的翼尖涡流的诱导影响,相比于后行侧在 Y 方向上的位移有明显的加快趋势,是导致雾滴在无人机下洗流场非对称分布的一个重要因素。图 8b 是无人机在悬停状态下的三维涡量云图,由于直升机主旋翼翼尖涡流的一个重要特性是收缩畸变^[27],受下方尾迹涡的诱导作用,旋翼翼尖涡流离开旋翼后会迅速收缩。从图中可知,当涡龄角 ψ 增大至 540° 后,翼尖涡流的收缩量减小,而在这之后翼尖涡流开始出现非规则畸变,相邻的翼尖涡之间出现相互耦合现象,从而导致旋翼涡系发生破坏并最终形成紊流状态。这也是雾滴在无人机下洗流场作用下沉积不均匀的关键原因。

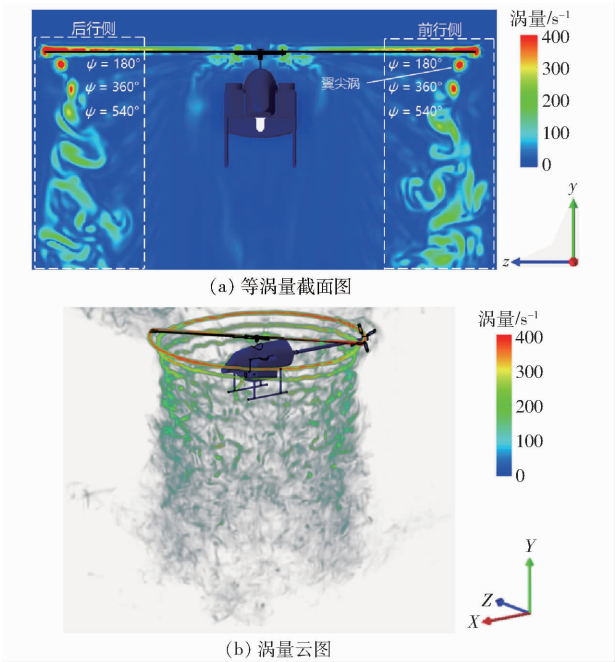


图 8 无人机悬停状态下的涡量分布

Fig. 8 Vorticity distribution diagram of UAV hovering state

图 9 为无人机飞行速度为 $2 \sim 7 \text{ m/s}$ 状态下的

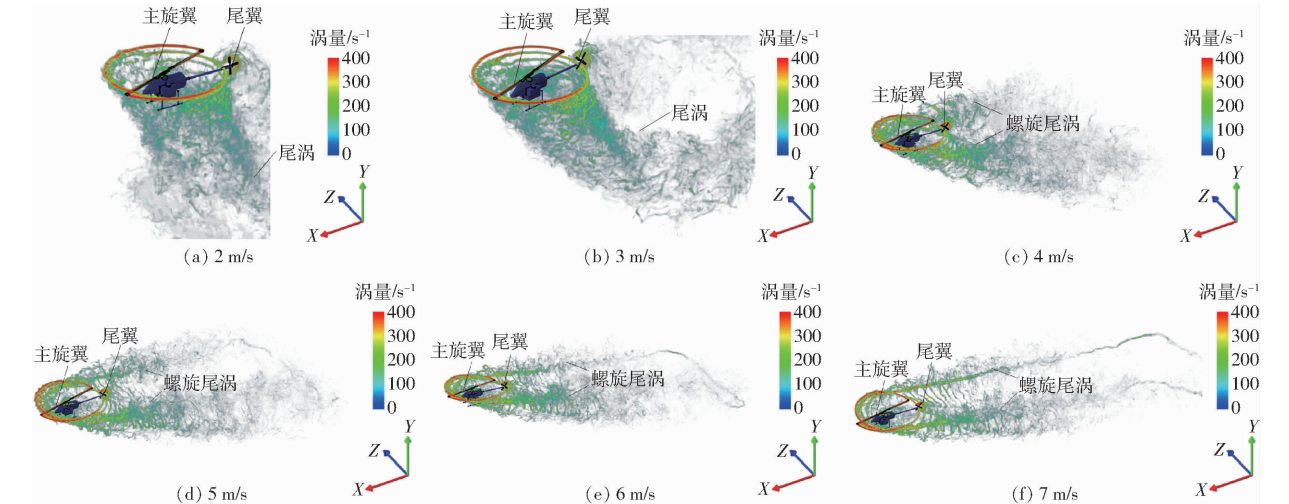


图 9 无人机不同飞行速度下的涡量分布

Fig. 9 Vorticity distribution of UAV at different flight velocities

涡量分布图。从图 9 可知,当单旋翼植保无人机飞行速度小于等于 3 m/s 时,尾涡飘向机身下方未形成螺旋形尾涡。但当无人机飞行速度大于 3 m/s 后,机身下方的旋翼翼尖涡在前方来流与尾翼气流的作用下,形成 2 个逐渐向后旋转扩散的螺旋形尾涡,且飞行速度越快,螺旋形尾涡的高度也会随之增高,旋翼流场变得越复杂。显然,该螺旋形的尾涡将诱导机身下方雾滴产生向上的运动,从而使雾滴产生飘移。

图 10 为无人机飞行速度 7 m/s 时不同时刻下,尾流结构变化的速度云图。从图中可知,当 $t = 0.1 \text{ s}$ (图 10a) 时,涡量分布呈同心圆状向后扩展,当 $t = 0.2 \text{ s}$ (图 10b) 时,旋翼下方的翼尖涡环中有横向环状涡开始逃逸。当 $t = 0.3 \text{ s}$ (图 10c) 时,可以看到机身后方翼尖涡环被尾桨剪断,环状涡向后扩大,螺旋形尾涡开始形成。当 $t = 0.4 \text{ s}$ (图 10d) 时,2 个螺旋形尾涡已经形成,并有向后扩散的趋势。所以无人机机身后方的螺旋形尾流是在前方来流与尾翼的共同作用下形成的。

为进一步研究单旋翼植保无人机飞行高度对螺旋形尾涡的影响规律,对无人机飞行速度为 5 m/s ,飞行高度为 $2 \sim 5 \text{ m}$ 4 种情况进行数值模拟。图 11 为无人机飞行高度 $2 \sim 5 \text{ m}$ 时机身后方螺旋型尾涡截面图。由图可知无人机飞行高度为 $2, 3, 4, 5 \text{ m}$ 时分别对应的螺旋型尾涡向机身后方的扩散距离为 $4, 8, 12, 12 \text{ m}$ 。由图 11d 可知,机身后的 2 个螺旋形尾涡并不保持在一条水平直线上,而是从靠近旋翼下方逐渐下降到地面。此外,2 个螺旋形尾涡呈现出不对称分布。

图 12 为飞行高度 5 m 时,无人机机身后方不同截面上的螺旋形尾涡速度分布图,机身后的截面依次为第 1、2、3、4 截面。由图可知,第 1、2 截面速度

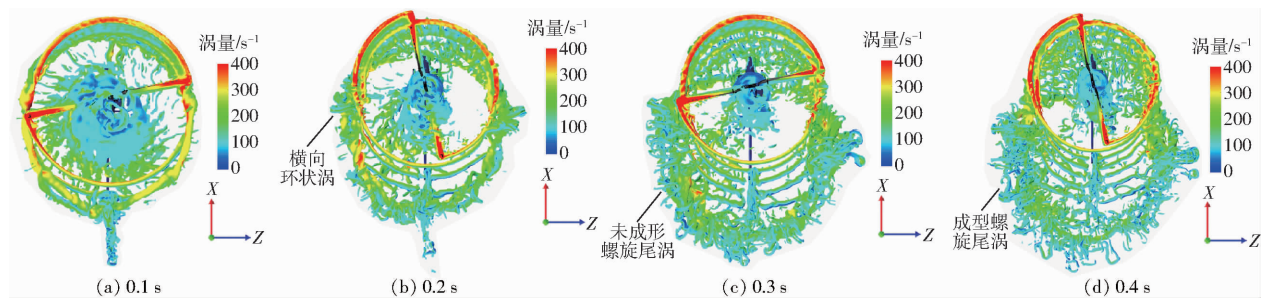


图 10 飞行速度 7 m/s 时涡量瞬态变化

Fig. 10 Vorticity transient changes at flight speed of 7 m/s

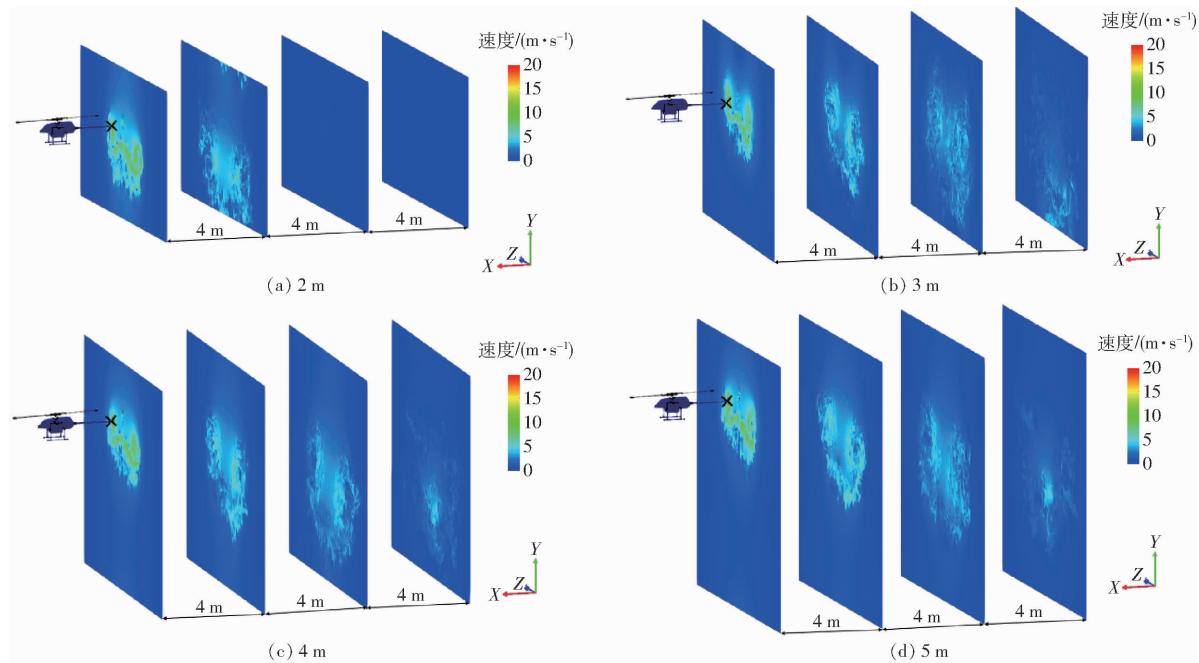


图 11 不同飞行高度机身后方螺旋型尾涡分布

Fig. 11 Distribution of spiral vortices behind fuselage at different flight heights

曲线走势呈 M 型,因此在这 2 个截面上螺旋尾涡的诱导速度最大值 9 m/s 出现在涡核处,表明该处对雾滴有较强的卷吸能力。而在第 3、4 截面上的螺旋型尾涡速度在 1 ~ 2 m/s 之间波动,表示截面上的 2 个螺旋型尾涡对雾滴的卷吸能力减小。并且 1 ~ 4 截面的速度依次减小,表明距离机身后方越远,螺旋型尾涡的诱导速度就越小。因此,在机身附近螺旋尾涡对雾滴诱导影响较大,更容易造成雾滴飘移与沉积不均匀。

上述研究表明:①单旋翼植保无人机下洗流场中的紊流使下洗流场变得复杂,是雾滴沉积不均匀的重要原因。②无人机飞行速度大于 3 m/s 时,机身后方会产生螺旋型尾涡,且速度越大,螺旋型旋涡在空中存在的时间就越长。③无人机机身后方螺旋型尾涡形成的两个重要原因是前方来流的大小与尾翼的作用。④无人机飞行速度不变,在一定范围内飞行高度的增加会导致螺旋型尾涡向机身后方扩散距离增大。⑤机身后方的 2 个螺旋型尾涡呈不对称分布,且距机身越远其诱导速度越小。

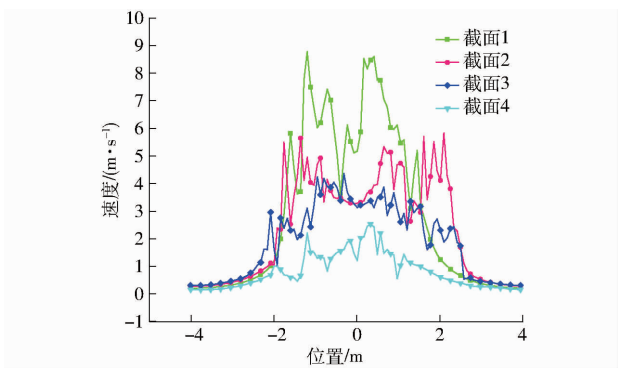


图 12 飞行高度 5 m 时不同截面上的速度

Fig. 12 Speed at different cross sections at flight height of 5 m

3.2 喷杆不同位置处对雾滴飘移的影响

为了研究喷头位于无人机下洗流场中不同位置处,所喷出的不同粒径雾滴因无人机翼尖涡流造成的飘移情况,在无人机需要安装喷杆的位置处放置 5 条速度检测线,如图 13 所示,5 条检测线的长度为 4 m,其中 P_1 点的坐标为检测坐标原点,由于实际的喷杆长度为 2 m,故喷杆的中点为 $Z = 2$ m 处。考虑到单旋翼植保无人机的旋翼结构和药箱位置,实际

作业时喷杆配置在旋翼和无人机脚架之间的区域,5 条检测线依次位于无人机主旋翼下方的 0.35、0.4、0.45、0.5、0.55 m 处,在水平方向上距离主旋翼的转轴 0.32 m,与实际的喷杆位置保持一致。

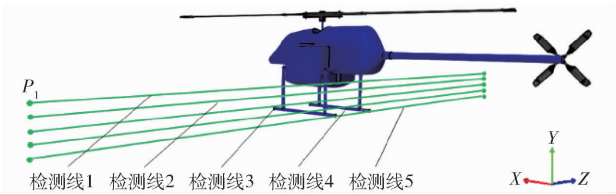


图 13 速度检测线位置示意图

Fig. 13 Sketch of speed detection line position

因为无人机下洗流场中 Y 方向的诱导速度是造成雾滴卷吸的关键因素,因此对无人机不同飞行速度下,喷杆处于主旋翼下方不同位置处 Y 方向速度进行取样。图 14 为无人机飞行速度 1 ~ 7 m/s 时,喷杆位置处 Y 方向速度分布曲线。由图可知飞行速度并不影响纵向速度突变点,速度突变位置发生在喷杆两端点外侧附近以及机身下方附近,但在机身下方速度突变的幅值较小,对雾滴卷吸能力不强,因此雾滴发生卷吸现象的主要位置在喷杆的两端点外侧附近。当无人机飞行速度大于 3 m/s 时,随着无人机飞行速度的增大,喷杆上纵向诱导速度

的最大值逐渐减小,且速度的脉动幅度也随之变大,雾滴容易发生飘移。纵向诱导速度最大值位于喷杆端点附近,左右两侧的速度呈现出不对称分布,飞行速度越大机身两侧速度差异越明显,这是雾滴沉积不均匀的重要因素。喷杆距离主旋翼越远,纵向诱导速度越小,无人机飞行速度越大,不对称分布现象越明显。

上述研究表明,对于单旋翼植保无人机而言,喷杆的垂直高度位置并不能对减少雾滴的飘移起到明显的作用。无人机的飞行速度对其下洗流场造成了较大的影响,随着飞行速度的不断增大,其下洗流场越不稳定。由于主旋翼的转向与飞行速度的影响,导致无人机的下洗流场纵向诱导速度呈现不对称分布,容易导致机身两侧的雾滴飘移量不同。

3.3 雾滴粒径的分布情况

研究表明^[28-29],雾滴粒径是影响雾滴飘移的一个关键因素,当雾滴粒径小于 200 μm 时容易产生雾滴飘移。为研究不同粒径雾滴在单旋翼无人机下洗流场的分布规律,先对课题组自制喷雾系统中压力喷头的雾滴谱进行试验测定。测量仪器为珠海欧美克仪器有限公司生产的 DP-02 型激光粒度仪,其量程范围为 1 ~ 1 500 μm 。图 15 为扇形压力喷嘴的

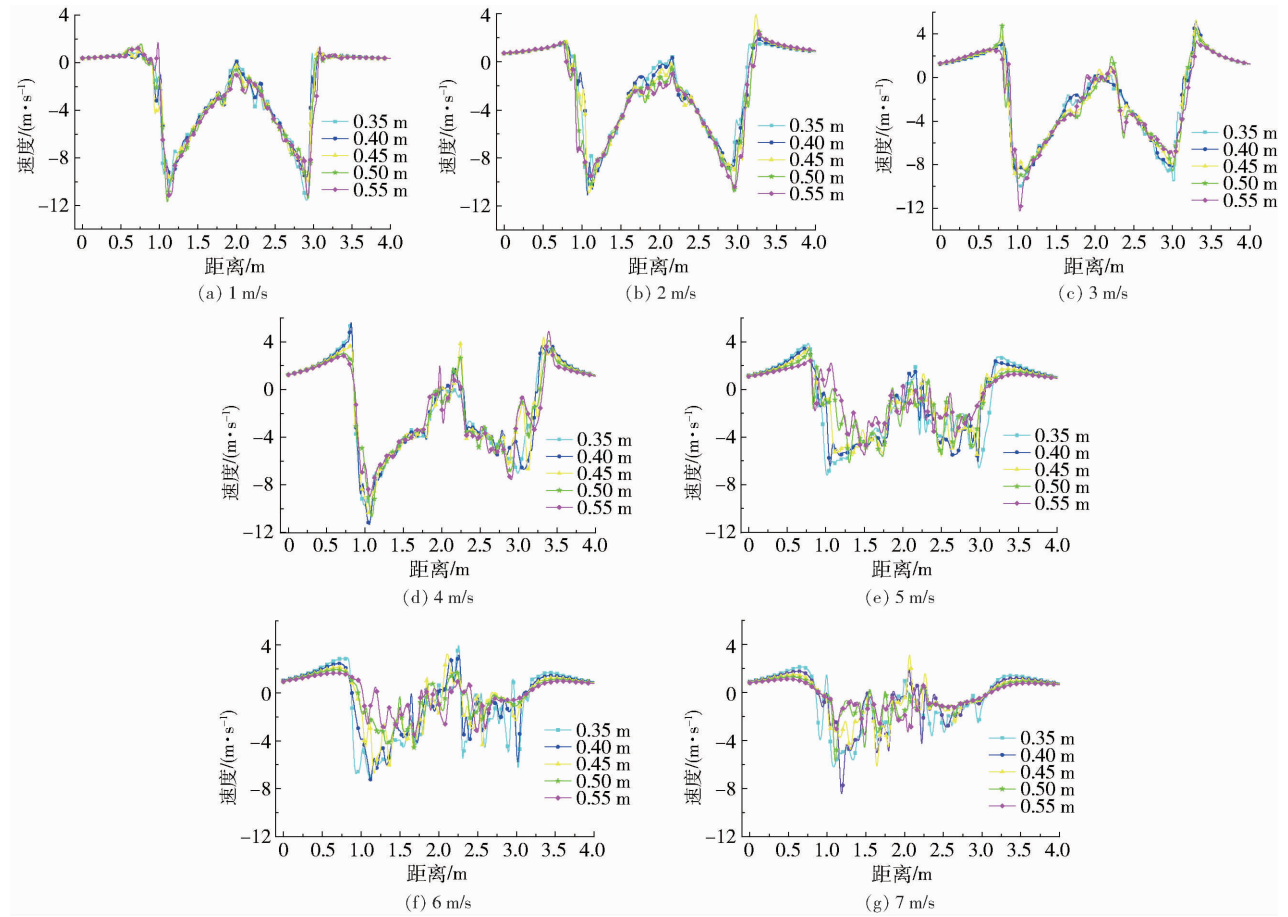


图 14 喷杆位置处 Y 轴方向的速度

Fig. 14 Spindle position Y -axis speed

雾滴谱分布图。为准确模拟出不同粒径的雾滴在旋翼风场作用下的飘移和沉积规律,按照图 15 所示雾滴粒径的分布百分数来设置不同粒径的数量,并利用离散相粒子跟踪法模拟在无人机下洗流场中雾滴的运动轨迹。

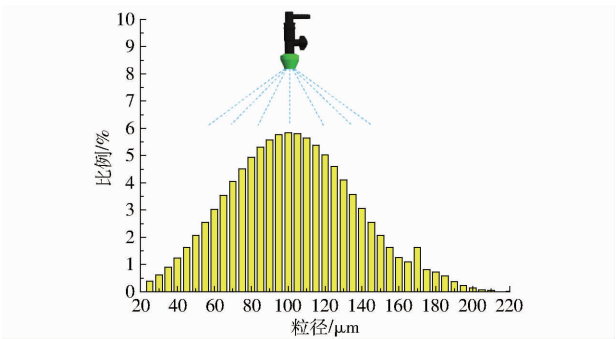


图 15 雾滴粒径分布图

Fig. 15 Droplet particle size distribution

3.4 雾滴离散的流线追踪

图 16 为单旋翼植保无人机在不同飞行速度下雾滴的运动轨迹,其中不同的颜色代表不同粒径雾滴的运动轨迹。其中图 16a ~ 16c 中的喷杆距离主旋翼的垂直距离为 0.35 m,喷头之间的距离为 0.5 m。图 16a 为悬停状态下,不同粒径雾滴的迹线图,从图中可知,当无人机处于悬停状态时,其机身下方的雾滴没有出现飘移现象,而是在重力作用下,随着主旋翼的下洗流场直接飘落到地面。此外在旋翼流场的边缘处,有部分雾滴因翼尖涡流的收缩畸变而向流场的中间区域飘落,这也导致无人机的喷幅略有减小。图 16b 为无人机飞行速度 2 m/s 时其雾滴迹线图,由图可知,机身下方 70% 左右的雾滴在重力的作用下直接飘落到地面上,有 30% 左右的雾滴因受到翼尖涡流的影响,在喷杆两端点外侧附近形成两个螺旋状的雾滴迹线,并在重力与翼尖涡流的作用下飘移到机身后方,且 2 个螺旋状雾滴迹线并不对称,导致无人机的喷幅略有增大。图 16c 为无人机飞行速度 5 m/s 时,机身后方雾滴迹线图,由图可知,机身下方有 38% 左右的雾滴被翼尖涡流卷起上扬,在机身左右形成 2 个不对称的螺旋状雾滴迹线,此时雾滴已经被卷吸到空中,且一些细小雾滴长时间悬浮在空气中,容易在更远的距离引起飘移,其中被卷吸的雾滴中粒径小于 100 μm 的雾滴约占总雾滴的 80%。图 16d 为无人机飞行速度 5 m/s、喷杆距离主旋翼 0.55 m、喷头之间的距离 0.5 m 情况下的雾滴运动轨迹,此时约 37% 的雾滴因翼尖涡流的诱导作用而向上方卷扬,对比图 16c 可知喷杆位置的降低可以减小雾滴受到翼尖涡流的卷吸量。图 16e 为无人机飞行速度 5 m/s、喷杆距主旋翼 0.35 m、喷头之间距离 0.1 m 时的雾滴运动迹线,由

图可知,34% 左右的雾滴被卷吸至喷杆上方,所以减小喷头之间的距离也能够减小因翼尖涡流造成的雾滴飘移。显然无人机飞行速度越大,喷幅也会略有增大,雾滴飘移量也随之增大,且喷杆垂直距离的改变对雾滴因翼尖涡流的卷吸造成的飘移影响并不明显,喷头的位置越靠近旋翼翼尖,翼尖涡流对雾滴的卷吸量越大。

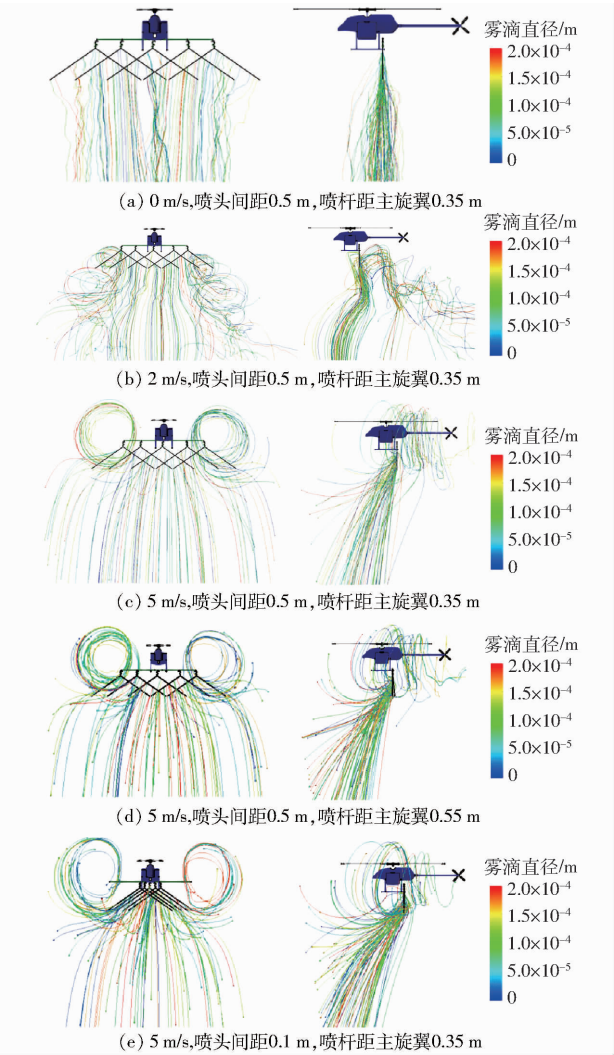


图 16 无人机不同飞行速度下雾滴卷吸情况

Fig. 16 UAV droplets flying at different flying speed suction situations

4 试验

4.1 试验方法

为了研究在不同条件下单旋翼植保无人机翼尖涡流对雾滴飘移的影响,对单旋翼植保无人机的雾滴飘移进行了室外试验验证。试验地点位于广东省深圳市大鹏新区高科新农有限公司的无人机试验基地(北纬 22°35'57"、东经 114°29'55"),天气晴朗,空气湿度 52.7%,温度 12.5 ~ 15.8℃。如图 17 所示,试验场地长 34 m、宽 32 m。为了收集飘失在空气中和落在地面的雾滴,利用聚乙烯线与水敏纸作为收

集物。地面雾滴飘移检测区设置 5 条采集带,每条采集带长 32 m,相邻采集带之间间距 5 m,水敏纸布置在距离地面 0.5 m 处。每条采集带放置 15 张水敏纸,以无人机航线与采集带的交点为坐标原点,0~4 m 内每隔 1 m 放置一张水敏纸,4~16 m 内每隔 4 m 放置一张水敏纸,水敏纸水平放置。空中雾滴飘移检测框架位于采集带 5 的后方,无人机飞行速度 2、5、7 m/s 时雾滴飘移检测框架的位置距离采集带 5 分别为 2、8、14 m。雾滴空中飘移测试框架左右两侧布置聚乙烯线,单侧共布置 5 条聚乙烯线,每条线之间相距 1 m。图 18 为户外试验现场照片,无人机从采集带 1 开始以设定速度飞行,在采集带 5 开始喷施质量浓度为 5 g/L 罗丹明 B 溶液,飞过框架关闭喷头。试验共分为 5 个架次,第 1、2、3 架次,无人机的喷头之间距离为 0.5 m,喷杆的垂直高度为 0.35 m,飞行速度依次为 2、5、7 m/s,第 4 架次无人机飞行速度为 5 m/s,喷头之间的距离为 0.1 m,喷杆的垂直高度为 0.35 m,第 5 架次无人机飞行速度为 5 m/s,喷头之间的距离为 0.5 m,喷杆的垂直高度为 0.55 m,且每个架次重复 3 组试验。

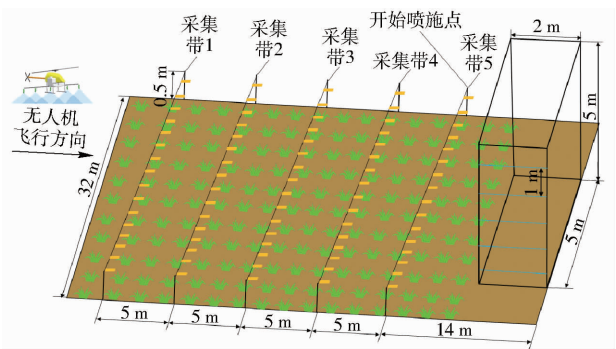


图 17 无人机喷施试验示意图

Fig. 17 UAV spray test diagram



图 18 现场试验照片

Fig. 18 Photo of field test

无人机每完成一个架次,等无人机停稳后立即使用专业手套收集水敏纸与聚乙烯线并放置在试验前标记好的试验袋中,试验袋密封并放置在便携式冰盒中,试验完成后将所有水敏纸与聚乙烯线带回

实验室进行数据分析。水敏纸利用扫描仪扫描,并对扫描出的图像用 DepositScan(美国农业部)软件分析。聚乙烯线用蒸馏水洗脱 3 遍,得到稀释罗丹明 B 溶液,再利用由天津港东科技发展有限公司生产的 F-380 型荧光分度计检测溶液荧光值。通过对水敏纸与聚乙烯线分析的数据得出无人机在不同条件下雾滴的地面与空中飘移情况。

根据 MH/T 1050—2012《飞机喷雾飘移现场测量方法》规定,计算出喷雾飘移沉积量与喷雾飘移量分别为^[30]

$$\beta_{dep} = \frac{(\rho_{smpl} - \rho_{blk}) F_c V_d}{\rho_{spray} A_c} \quad (7)$$

$$\theta_{dep} = \frac{10\,000\beta_{dep}}{\beta_v} \quad (8)$$

式中 β_{dep} ——喷雾飘移沉积量, $\mu\text{L}/\text{cm}^2$

ρ_{smpl} ——样品荧光计读数

ρ_{blk} ——不含罗丹明 B 的空白采样器的荧光计读数

F_c ——校准系数, $\mu\text{g}/\text{L}$

V_d ——溶解罗丹明 B 的稀释溶液体积, L

ρ_{spray} ——喷头处采样喷雾液中罗丹明 B 含量, g/L

A_c ——收集喷雾飘移的投影面积, cm^2

θ_{dep} ——喷雾飘移量, %

β_v ——喷施量, L/hm^2

雾滴分布均匀度用雾滴覆盖密度的变异系数表示,由各个采样点的雾滴覆盖密度计算得出。变异系数越小,雾滴分布越均匀,其表达式为^[31]

$$C_v = \frac{S_D}{\lambda} \times 100\% \quad (9)$$

其中
$$S_D = \sqrt{\frac{\sum \lambda_i^2 - (\sum \lambda_i)^2 / n}{n - 1}} \quad (10)$$

式中 S_D ——样本标准差

C_v ——变异系数, %

λ ——试验重复喷雾沉降量平均值

λ_i ——每个采集点喷雾沉积观测值

n ——采样点的数量

4.2 试验结果与分析

空中雾滴飘移测试框架使用喷雾飘移量表示雾滴在空中飘移的情况,图 19 是不同试验参数下的喷雾飘移量,该值越大表示雾滴飘移量越大。为了验证雾滴的空中飘移与翼尖涡流有关,采用自下而上雾滴累积飘移量占总飘移量 90% 时所对应的高度作为飘移高度。结果表明,在喷杆高度与喷嘴之间距离不变的情况下,无人机飞行速度为 2、5、7 m/s 时所对应的雾滴飘移高度分别为 2.922、3.541、

3.627 m,从中可知,无人机飞行速度越大,雾滴向无人机上方的飘移距离也越大,但当飞行速度大于5 m/s时雾滴飘移高度增长较为缓慢。当无人机飞行速度为5 m/s,分别改变喷头之间的距离为0.1 m、喷杆距离主旋翼的高度为0.55 m时所对应的雾滴飘移高度为3.396、3.480 m,因此,降低喷杆的高度,减小喷头之间的距离均可以减小雾滴向上飘移的距离。

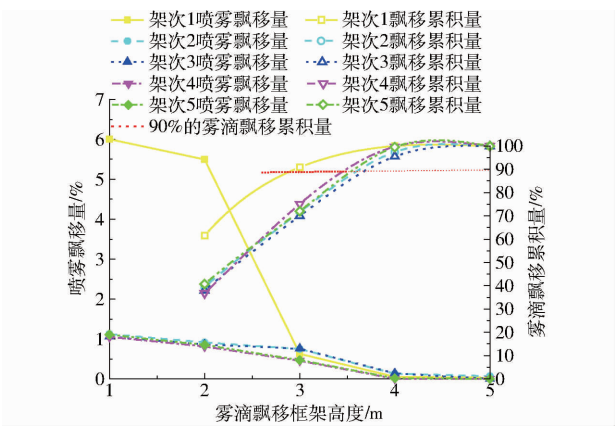


图 19 垂直距离雾滴飘移率

Fig. 19 Vertical distance droplet drift rate

由于雾滴空中飘移的影响因素主要为无人机主旋翼翼尖涡流的卷吸作用,取雾滴飘移累积量与飞行速度、喷杆垂直高度、喷嘴之间的距离进行相关性分析与回归分析,得到标准回归方程为: $y' = 0.945x'_1 - 0.026x'_2 + 0.11x'_3$,且所对应的相关系数为0.95、0.06、0.175,说明雾滴飘移累积量在显著水平 $\alpha = 0.05$ 的条件下,与无人机飞行速度呈显著正相关($P < 0.05$),而与喷嘴之间的距离($P > 0.05$)、与喷杆距主旋翼的距离($P > 0.05$)无显著性相关。雾滴的垂直向上飘移距离的相关性因素的由大到小依次为飞行速度、喷嘴之间的距离、喷杆垂直高度。

因翼尖涡流造成的雾滴飘移主要影响因素是飞行速度,选取喷杆距离主旋翼0.35 m、与喷嘴之间距离0.5 m,飞行速度为2、5 m/s机身后方采集带上不同粒径雾滴占该采集带总雾滴的百分比表示不同粒径雾滴在机身后方的飘移距离。从图20a可知无人机飞行速度2 m/s时,在机身后方10 m处粒径小于100 μm 的雾滴占总飘移雾滴数的99%,而在机身后5 m处仅占37%,说明在机身后5~10 m内粒径大于100 μm 的雾滴已经全部沉降到地面,而一些极少且极小的雾滴可以飘移到机身10 m以后或更远的地方。图20b为无人机飞行速度为5 m/s时机身后方不同粒径雾滴占该采集带上雾滴总数的百分比。在机身后方15 m处98%的雾滴粒径小于100 μm ,而在机身后10 m处有55%的雾滴粒径小于100 μm ,表明粒径大于100 μm 的雾滴在机身后

方10~15 m内已经全部沉降到地面,而粒径小于100 μm 的雾滴可以飘移至机身后方15 m以外的地方。对无人机飞行速度(V)与粒径小于100 μm 雾滴的飘移距离(M)进行线性拟合,得出关系式为: $M = 0.51V - 2.8$ 。由此可知无人机飞行速度越大,细小雾滴因受到主旋翼翼尖涡流的螺旋形尾涡的卷吸作用造成的飘移距离就越远,这与数值模拟的结果基本一致。

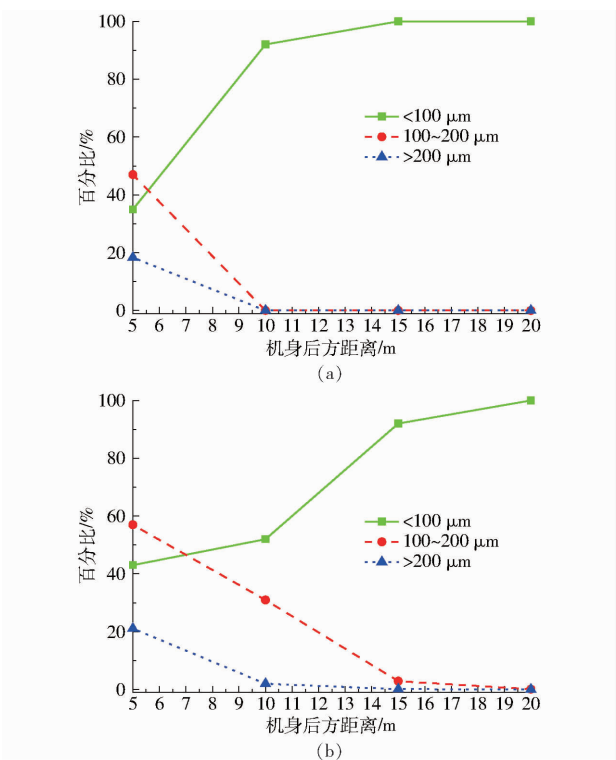


图 20 机身后方不同粒径的雾滴所占百分比

Fig. 20 Percentage of droplets with different particle sizes behind fuselage

5 结论

- (1)单旋翼植保无人机的翼尖涡流在形成螺旋型尾涡后,对雾滴的飘移影响较大。当无人机的飞行高度为3 m,且飞行速度在2~5 m/s时,随着速度的增大,翼尖涡流在机身后方形成的螺旋型尾涡的高度越高。此外,当无人机的飞行速度不变时,随着飞行高度的增加,螺旋型尾涡向后方的扩散距离越大。并且2条螺旋型尾涡呈不对称分布,飞行速度越大,飞行高度越高,尾涡在空中存在的时间越长。
- (2)数值模拟与户外试验验证表明,单旋翼植保无人机的飞行速度对雾滴飘移的影响较明显。当飞行速度大于5 m/s时,机身后方的雾滴飘移量较大。
- (3)喷杆距离主旋翼的垂直距离越大,其纵向诱导速度越小,且在飞行速度为5 m/s时,喷杆的垂直距离对雾滴飘移的作用不明显,而喷头在旋翼下方的位置越靠近机身处,翼尖涡流对雾滴的飘移影

响就越小。

(4) 综合比较无人机的飞行速度、喷头在旋翼下方的位置和喷杆垂直高度 3 个因素,其中无人机的飞行速度对雾滴飘移有较大影响。所以,单旋翼植保无人机在实际作业中应该综合各种因素确定其飞行参数,以减少雾滴飘移,提高农药利用率。

参 考 文 献

1 张东彦, 兰玉彬, 陈立平, 等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10):53 – 59. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141009&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.009.

ZHANG Dongyan, LAN Yubin, CHEN Liping, et al. Status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):53 – 59. (in Chinese)

2 XIONGKUI H, BONDS J, HERBST A, et al. Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3):18 – 30.

3 周志艳, 臧英, 罗锡文, 等. 中国农业航空植保产业技术创新发展战略[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24):1 – 10.

ZHOU Zhiyan, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Technology innovation development strategy on agricultural aviation industry for plant protection in China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24):1 – 10. (in Chinese)

4 文晟, 兰玉彬, 张建桃, 等. 农用无人机超低容量旋流喷嘴的雾化特性分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20):85 – 93.

WEN Sheng, LAN Yubin, ZHANG Jiantao, et al. Analysis and experiment on atomization characteristics of ultra-low-volume swirl nozzle for agricultural unmanned aviation vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20):85 – 93. (in Chinese)

5 周志艳, 明锐, 臧禹, 等. 中国农业航空发展现状 & 对策建议[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20):1 – 13.

ZHOU Zhiyan, MING Rui, ZANG Yu, et al. Development status and countermeasures of agricultural aviation in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20):1 – 13. (in Chinese)

6 SONGCHAO Z, XINYU X, ZHU S, et al. Downwash distribution of single-rotor unmanned agricultural helicopter on hovering state[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(5):14 – 24.

7 张宋超, 薛新宇, 秦维彩, 等. N-3 型农用无人直升机航空施药飘移模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3):87 – 93.

ZHANG Songchao, XUE Xinyu, QIN Weicai, et al. Simulation and experimental verification of aerial spraying drift on N-3 unmanned spraying helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3):87 – 93. (in Chinese)

8 王军锋, 徐文彬, 闻建龙, 等. 大载荷植保无人直升机喷雾气液两相流动数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9):62 – 69. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170908&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.008.

WANG Junfeng, XU Wenbin, WEN Jianlong, et al. Numerical simulation on gas-liquid phase flow of large-scale plant protection unmanned aerial vehicle spraying[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9):62 – 69. (in Chinese)

9 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/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1):116 – 122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180114&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.014.

YANG Zhilun, GE Luzhen, QI Lijun, et al. Influence of UAV rotor down-wash airflow on spray width[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1):116 – 122. (in Chinese)

10 BAE Y, KOO Y M. Flight attitudes and spray patterns of a roll-balanced agricultural unmanned helicopter[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2013, 29(5):675 – 682.

11 ZHANG B, TANG Q, CHEN L, et al. Numerical simulation of wake vortices of crop spraying aircraft close to the ground[J]. Biosystems Engineering, 2016, 145:52 – 64.

12 叶舟, 徐国华, 史勇杰. 旋翼桨尖涡生成及演化机理的高精度数值研究[J]. 航空学报, 2017, 38(7):43 – 53.

YE Zhou, XU Guohua, SHI Yongjie. High-resolution numerical research on formation and evolution mechanism of rotor blade tip vortex[J]. Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica, 2017, 38(7):43 – 53. (in Chinese)

13 MNASRI C, HAFSIA Z, OMRI M, et al. A moving grid model for simulation of free surface behavior induced by horizontal cylinders exit and entry[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2010, 4(2):260 – 275.

14 MARGOT X, HOYAS S, FAJARDO P, et al. A moving mesh generation strategy for solving an injector internal flow problem[J]. Mathematical & Computer Modelling, 2010, 52(7):1143 – 1150.

15 SRIKANTH C, BHASKER C. Flow analysis in valve with moving grids through CFD techniques[J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(3):193 – 201.

16 SONG X, CUI L, CAO M, et al. A CFD analysis of the dynamics of a direct-operated safety relief valve mounted on a pressure vessel[J]. Energy Conversion & Management, 2014, 81(2):407 – 419.

17 SHANGGUAN Y, WANG X, LI Y. Large-scaled simulation on the coherent vortex evolution of a jet in a cross-flow based on lattice Boltzmann method[J]. Thermal Science, 2015, 19(3):977 – 988.

- [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 102–108. (in Chinese)
- 13 潘强,施卫东,张德胜,等. 泵站用轴流泵鱼友好型设计及鱼类存活率预测[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(1):42–49.
PAN Qiang, SHI Weidong, ZHANG Desheng, et al. Axial-flow pump fish-friendly design and prediction of fish survival rate in pumping station[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(1): 42–49. (in Chinese)
- 14 赵文龙,周大庆,林奇峰. 基于鱼类友好理念的水轮机改型及特性分析[J]. 中国农村水利水电,2017,4(3):177–180.
ZHAO Wenlong, ZHOU Daqing, LIN Qifeng. Hydraulic turbine modification and characteristics analysis based on fish friendly concept[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, 4(3): 177–180. (in Chinese)
- 15 李成,王煜. 水轮机转轮结构与过机幼鱼受压强损伤相关性研究[J]. 水力发电学报,2017,36(10):110–120.
LI Cheng, WANG Yu. Study on correlation between turbine runner structure and pressure injury of juvenile [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(10): 110–120. (in Chinese)
- 16 李成,王煜. 轴流式水轮机流道内压力分布对幼鱼影响研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2015,37(6):65–69.
LI Cheng, WANG Yu. Study on the influence of pressure distribution on juvenile fish in Kaplan turbines passage[J]. Journal of Sanxia University(Natural Science Edition), 2015, 37(6): 65–69. (in Chinese)
- 17 THOMAS C C, HECKER G E, FADHER H B, et al. Development of a more fish tolerant turbine runner advanced hydropower turbine project[R]. Massa Chusetts; Alden Research Laboratory, 1997.
- 18 国际电工委员会. 60193–1999 水轮机 IEC 国际标准译丛(一)(水轮机部分)[S]. 北京:中国标准出版社,1999.
- 19 ESCH B P M V. Fish injury and mortality during passage through pumping stations[J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(7):3412–3427.
- 20 AMARAL S V, HECKER G E, DIXON D A. Designing leading edges of turbine blades to increase fish survival from blade strike [R]. Palo Alto, USA: Electric Power Research Institute, 2011.
- ~~~~~

(上接第 137 页)

- 18 MIGUEL A F. Non-Darcy porous media flow in no-slip and slip regimes[J]. Thermal Science, 2012, 16(1):167–176.
- 19 JOURABIAN M, FARHADI M, RABIENATAJ D A A, et al. Lattice Boltzmann simulation of melting phenomenon with natural convection from an eccentric annulus[J]. Thermal Science, 2013, 17(3):877–890.
- 20 ALKSHAISH J A, ESFAHANI J A. Lattice Boltzmann simulation of turbulent natural convection: enclosure heated from below [J]. Journal of Thermophysics & Heat Transfer, 2017, 31(4):1–10.
- 21 CAO N, CHEN S, JIN S, et al. Physical symmetry and lattice symmetry in the lattice Boltzmann method[J]. Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics, 1997, 55(1):21–24.
- 22 MEN Y, LAI Y, DONG S, 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, 52:202–214.
- 23 BHAGWAT M J, LEISHMAN J G. Correlation of helicopter rotor tip vortex measurements[J]. AIAA Journal, 2000, 38(2): 301–308.
- 24 RAMASAMY M, LEISHMAN J G. Benchmarking particle image velocimetry with laser doppler velocimetry for rotor wake measurements[J]. AIAA Journal, 2007, 45(11):2622–2633.
- 25 BAUKNECHT A, EWERS B, SCHNEIDER O, et al. Blade tip vortex measurements on actively twisted rotor blades[J]. Experiments in Fluids, 2017, 58(5):49–64.
- 26 BAUKNECHT A, MERZ C B, RAFFEL M, et al. Blade-tip vortex detection in maneuvering flight using the background-oriented schlieren technique[J]. Journal of Aircraft, 2014(6):1–13.
- 27 魏鹏,史勇杰,徐国华. 复杂旋翼流场的耦合欧拉-拉格朗日数值方法[J]. 航空学报,2013,34(7):1538–1547.
WEI Peng, SHI Yongjie, XU Guohua. Coupled Eulerian–Lagrangian method for complicated rotor flow field prediction[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2013, 34(7):1538–1547. (in Chinese)
- 28 DUGA A T, DELELE M A, RUYSEN K, et al. Development and validation of a 3D CFD model of drift and its application to air-assisted orchard sprayers[J]. Biosystems Engineering, 2017, 154:62–75.
- 29 HILZ E, VERMEER A W P. Spray drift review: the extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction[J]. Crop Protection, 2013, 44(1):75–83.
- 30 中国民用航空总局运输管理司. 飞机喷雾飘移现场测量方法:MH/T 1050—2012[S]. 北京:中国民用航空局,2012.
- 31 中国民用航空总局运输管理司. 农业航空作业质量技术指标:MH/T 1002—1995[S]. 北京:中国民用航空局,1995.