doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.09.020

小型植保无人机下洗气流场影响雾滴运动特性规律研究

张智泓　曾荣壕　赖庆辉　袁　烁　申思雨　杨　乐
(昆明理工大学现代农业工程学院,昆明 650500)

摘要:为了研究小型无人机下洗气流场对雾滴运动特性的影响规律,以小型无人机为基础,采用 Navier-Stokes(N-S)方程、realizable $k-\varepsilon$ 模型和 Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations 算法,对施药过程中的下洗气流场和雾滴离散运动进行了详细的数值模拟分析。研究分析无人机下洗气流的速度特性、雾滴沉积特性以及作业高度对农药沉积效果的影响。通过试验结果可知,模拟值与试验值的相对误差在 20% 以内,验证了下洗气流场数值模型的可行性。进一步模拟分析结果表明,在无人机喷药平台的影响下,下洗气流场在距离旋翼 1 m 处达到速度峰值。随着作业高度的增加,雾滴逐渐分散并扩散。雾滴主要分布在两个“气流引入区”和两个“气流导出区”,该分布特征有助于优化施药效果和提高农药的使用效率。根据分析结果,当无人机飞行作业姿态与地表保持平行,且将作业高度调整至 0.8~1.0 m 之间时,可显著提高农药沉积量,从而提高植保无人机的施药效果。本研究验证了下洗气流场数值模型的可行性,为小型植保无人机的对靶雾滴漂移及沉积研究提供了参考依据。

关键词:小型植保无人机;下洗气流场;数值模拟;雾滴沉积
中图分类号:S225.71　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)09-0208-09　　**OSID**:

Investigation of Effects of Downwash Airflow Field on Droplet Motion Characteristics of Small Plant Protection Unmanned Aerial Vehicles

ZHANG Zhihong　ZENG Ronghao　LAI Qinghui　YUAN Shuo　SHEN Siyu　YANG Le
(*Faculty of Modern Agricultural Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*)

Abstract: In an effort to investigate the influence of downwash airflow field on droplet motion characteristics of small unmanned aerial vehicles (UAVs) and enhance pesticide application efficiency, small UAVs were utilized as the basis and the Navier-Stokes (N-S) equations, realizable $k-\varepsilon$ model, and Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations algorithm were employed to detailed numerical simulations of the downwash airflow field and droplet dispersion motion during the spray process were carried out. The primary research focus encompassed the analysis of velocity characteristics of the UAV downwash airflow, droplet deposition characteristics, and the impact of operating height on pesticide deposition. By comparing simulated values with measured values, it was confirmed that the relative error between the simulation and the experiment remained within 20%, thereby verifying the feasibility of the downwash airflow field numerical model. Further simulation analysis results indicated that, under the influence of the UAV spray platform, the downwash airflow field attained its peak velocity at a distance of 1 m from the rotor. With the increase in operating height, the droplets gradually dispersed and diffused. The droplets were primarily distributed in two “airflow introduction zones” and two “airflow export zones”, which contributed to further optimization of spraying effects and enhanced efficiency of pesticide utilization. In light of the analysis results, it was substantiated that when the UAV flight operation attitude was kept flush with the ground and the operating height was adjusted to 0.8~1.0 m, pesticide deposition could be significantly increased, ultimately improving the pesticide application efficacy of plant protection UAVs. The research result verified the feasibility of the numerical model of downwash airflow field, and provided a reference for the study of the drift and deposition of target fog droplets based on small plant protection UAVs.

Key words: small plant protection unmanned aerial vehicle; downwash airflow field; numerical simulation; droplet deposition

收稿日期:2023-04-12　修回日期:2023-06-25
基金项目:国家自然科学基金项目(52065031)
作者简介:张智泓(1986—),男,副教授,主要从事机械仿生学理论与技术研究,E-mail:zzh_0822@hotmail.com
通信作者:赖庆辉(1980—),男,教授,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail:laiqinghui007@163.com

0　引言

西南丘陵地区的农业生产以高山农业为主，其中小型植保无人机因其较强的适应性和灵活性得到了广泛推广[1-2]。然而，在植保无人机作业过程中，其所处的空间环境相对于地面环境更为复杂，因此雾滴沉积问题也更加严重[3]。雾滴受喷洒参数和自然风场影响，容易发生弥漫、蒸发和漂移，从而影响喷雾效果[4-5]。研究植保无人机作业时雾滴沉积问题，对于优化植保无人机的喷雾效果和提高作业质量及效率具有重大意义[6]。

针对植保无人机下洗气流场作用下的雾滴沉积，国内外已开展了一系列研究。例如，BILANIN 等[7]和 RAFFEL 等[8]通过运用 AGDISP 软件预测直升机喷药时的颗粒运动轨迹，为直升机风场模型奠定了理论基础。KIRK 等[9]研究了无人机在不同工作参数下的雾滴沉积效果，并在恒定高度下确定了飞行速度和施药剂量的最优参数，为实际作业提供了技术支持。然而，目前国外的研究主要关注直升机和固定翼飞机[10]；而国内学者则主要采用流体力学方法研究无人机工作参数对风场和雾场特性的影响。例如，兰玉彬团队[11-14]通过数值模拟证实植保无人机作业参数对雾滴漂移和沉积具有直接影响，确定了不同类型无人机的最佳作业参数。张健等[15]研究了环境风速对无人机雾滴沉积的影响，进而确定了无人机的作业参数。王玲等[16-17]则证实了玻尔兹曼数值模拟方法能够有效地模拟植保无人机飞行过程中的非定常流动。张京等[18]利用红外热成像技术对水稻沉积规律进行验证，确定直升机航空作业最佳参数。

为了深入探讨小型植保无人机下洗气流场与雾滴沉积之间的关系，本文采用 N－S 方程、realizable $k-\varepsilon$ 模型和 SIMPLE 算法对无人机下洗气流场以及雾滴离散运动进行数值模拟。并通过与风场测速试验结果对比，验证模型的可靠性，进一步揭示下洗气流场对雾滴沉积的影响规律。

1　无人机功能验证

1.1　材料和设备

如图 1 所示，本研究采用昆明理工大学现代农业装备实验室自研的四旋翼无人机，其主要参数如表 1 所示。无人机喷雾系统主要由储水箱、水泵、水管、离心喷头以及电磁控制阀组等部件组成。喷嘴位于无人机正下方，垂直于无人机的飞行轴线。

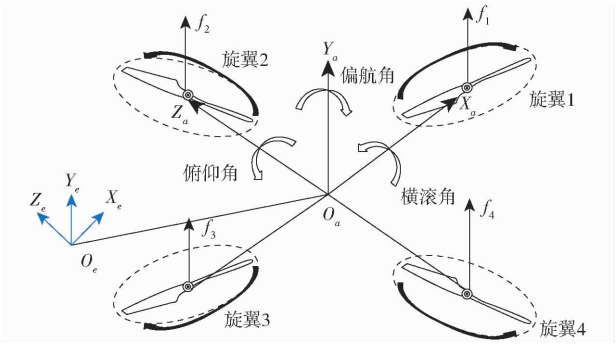

图 1　四旋翼系统运动示意图

Fig. 1　Schematic of four-rotor system motion

表 1　无人机参数

Tab. 1　Main parameters of UAV

参数	数值/型式
飞行高度/m	0～3
旋翼直径×螺距/(mm×mm)	240×170
长度×宽度×高度/(mm×mm×mm)	700×700×500
质量/kg	5(空载)～8(满载)
无刷电机型号	2312A KV800 (0～11 200 r/min)
可遥控范围半径/km	1
电压/V	12
喷幅宽度/m	1～3
雾化颗粒直径/μm	90～130
喷幅角/(°)	140
水泵额定功率/kW	0.06
水泵流量/($L\cdot min^{-1}$)	0～4

1.2　无人机飞控功能设计与验证

1.2.1　四旋翼植保无人机工作原理

本研究以小型四旋翼无人机为对象，其运动系统如图 1 所示。旋翼以 90°间隔、半径为 230 mm 的圆形布局。图 1 中 $O_aX_aY_aZ_a$ 表示四旋翼系统的自身坐标系，$O_eX_eY_eZ_e$ 表示绝对坐标系，f_1、f_2、f_3 和 f_4 分别代表 4 个旋翼旋转时产生的升力。多旋翼无人机通过调整各旋翼下方旋转电机的转速产生不同的升力，依据相应的横滚角、偏航角和俯仰角进行姿态调整，从而使其能够承载自重进行飞行。本研究主要探索无人机下洗气流场对雾滴沉积的影响，因此假设各个电机的转速一致，旋翼分为互为对称的两部分，旋翼 1 和旋翼 3 为顺时针旋转，旋翼 2 和旋翼 4 为逆时针旋转。

1.2.2　四旋翼植保无人机升力验证

本研究针对多旋翼植保无人机性能进行开发，采用了大疆创新科技有限公司 NAZA－M LITE 飞控系统，旋翼使用该企业 9450 螺旋桨。计算得到各旋翼升力

$$f_i = \frac{1}{2} C_L \rho v_L^2 S \tag{1}$$

式中　f_i——旋翼产生的升力，N

C_L——升力系数

ρ——空气密度,kg/m^3

v_L——旋翼转速,r/s

S——旋翼面积,m^2

根据图 2 所示的力臂关系求出无人机的总升力[19]。

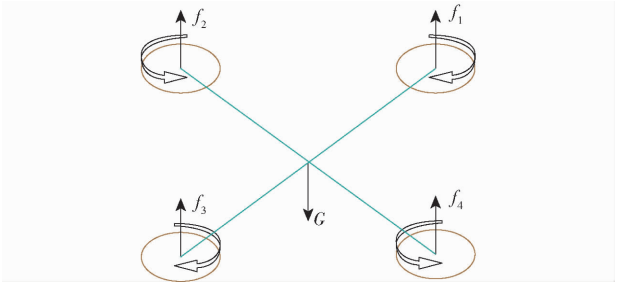

图 2 旋翼力臂关系图

Fig. 2 Diagram of moment arm relationship of rotor

2 旋翼下洗气流场仿真

2.1 数值模拟模型选择

下洗气流场被定义为低速可压缩湍流[20]。尽管 Fluent 内置的大多数湍流模型为低速不可压缩模型,但大量案例表明,Fluent 中的湍流模型能够较为准确地代替可压缩湍流模型进行数值模拟[21]。由于数值模拟过程中涉及对下洗气流场的计算,选用更适合大剪切流体流动以及检测并模拟圆孔射流的 realizable $k-\varepsilon$ 模型。

2.2 建模与计算区域的界定

为了减少计算量,本文对植保无人机模型进行了结构简化,去除了结构连接处的孔位。由于旋翼为复杂曲面,为确保仿真的可靠性,需要对旋翼进行结构提取。采用先临三维科技股份有限公司 EinScan-SP 型三维扫描仪进行三维建模(图 3),使用 EXScan 5 软件进行逆向建模后,在 SolidWorks 中完成建模,如图 4 所示。



图 3 三维扫描仪

Fig. 3 3D scanner

为确保数值模拟的准确性,本文采用有限体积法[22],将计算域定义为一个 3 m×3 m×2 m 的长方体,并将其划分为 5 个区域。动域网格被雾场区域



图 4 9450 螺旋桨三维模型

Fig. 4 3D model of 9450 rotor

网格包裹,各区域网格之间的交界面通过 interface 连接。动域由 4 个半径为 15 mm、高 10 mm 的圆柱体构成,这些圆柱体包覆着旋翼。网格模拟总计有 7.54×10^6 个网格,动域网格数量为 1.74×10^6 个。对动域中的 4 个旋翼的接触面以及雾场区喷嘴接触面的网格添加 5 层膨胀层处理,使用 refinement 指令加密并优化网格模型,以提高非结构性网格的精度。四旋翼小型植保无人机数值模拟的边界条件类型设置如下:雾场域的底面设置为“wall”,沉积区域离散相设置为“trap”;壁面为飘逸区域,将该墙面设置为压力出口“pressure-outlet”,沉积区域离散相设置为“escape”;动域网格设置采用滑移网格法“mesh action”,使其绕着圆柱体的中心轴旋转。

2.3 数值模拟计算理论方法

为探索下洗气流场对空气场从相对静止状态到运动状态过程的影响,以及流体与固体界壁间相对运动时的相互作用和流动规律,采用计算机数值模拟方法求解流体流动控制偏微分方程组,通过得到的流场及其他物理场相结合,研究流体流动现象。采用雷诺平均方程(RANS)作为基本控制方程。如图 1 所示,将坐标系与旋翼连接在一起的结构称为运动坐标系。在该坐标系下的雷诺平均方程中,为了考虑旋转带来的影响,添加了源项 $\boldsymbol{Q}$。该源项包含了无法直接参与控制方程的非稳态项、对流项和扩散项,具体方程表现形式为[23]

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint_{\partial V}\boldsymbol{W}\mathrm{d}V+\oiint(\boldsymbol{F}(\boldsymbol{W})-\boldsymbol{G}(\boldsymbol{W}))\mathrm{d}\boldsymbol{S}=\iiint_{\partial V}\boldsymbol{Q}\mathrm{d}\boldsymbol{V} \tag{2}$$

其中

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ \rho w\\ \rho E\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{F}(\boldsymbol{W})=\begin{bmatrix}\rho(q_n-q_b)\\ \rho u(q_n-q_b)+p\hat{n}_x\\ \rho v(q_n-q_b)+p\hat{n}_y\\ \rho w(q_n-q_b)+p\hat{n}_z\\ \rho E(q_n-q_b)+pq_b\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{W})=\begin{bmatrix}0\\ \tau_{xx}\hat{n}_x+\tau_{yx}\hat{n}_y+\tau_{zx}\hat{n}_z\\ \tau_{xy}\hat{n}_x+\tau_{yy}\hat{n}_y+\tau_{zy}\hat{n}_z\\ \tau_{xz}\hat{n}_x+\tau_{yz}\hat{n}_y+\tau_{zz}\hat{n}_z\\ \phi_x\hat{n}_x+\phi_y\hat{n}_y+\phi_z\hat{n}_z\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}0\\ \rho w\Omega\\ 0\\ -\rho w\Omega\\ 0\end{bmatrix}$$

式中　$\boldsymbol{W}$——守恒变量矢量

$\boldsymbol{S}$——单元的法向面积，m^2

$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{W})$、$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{W})$——无黏通量、黏性通量

p——压强，Pa

u、v、w——流体速度的 3 个方向分量，m/s

E——单位流体内能，J/(kg·K)

$\hat{n}_x$、$\hat{n}_y$、$\hat{n}_z$——控制面的法向矢量分量

V——流体计算域体积，m^3

Ω——旋翼旋转速度，m/s

q_n、q_b——流体速度和网格运动速度沿网格面法向的分量

t——时间，s

τ_{xx}、τ_{xy}、τ_{xz}、τ_{yx}、τ_{yy}、τ_{yz}、τ_{zx}、τ_{zy}、τ_{zz}、ϕ_x、ϕ_y、ϕ_z 为黏性项。

2.4　离散相运动方程

在植保作业中，雾滴受施药参数和自然风场的影响，会发生弥漫、蒸发和漂移现象。在本文的数值模拟研究中，为了便于建立液滴运动的数学模型，假设雾滴为球形粒子，并忽略液滴在空气中运动过程中的蒸发和变形现象。雾滴在模拟区域内的沉积受到多种外力影响，包括重力场、虚拟质量力[24]、萨夫曼升力[25]和气压梯度力[26]等约束。根据牛顿运动方程，雾滴在受气流影响下的离散运动方程可表示为[27]

$$m_p\frac{\sigma \boldsymbol{v}_{pj}}{\sigma t}=\frac{\pi\mu_f d_p C_d R_{ej}}{4C_e}(\boldsymbol{v}_{fj}-\boldsymbol{v}_{pj}) \tag{3}$$

$$C_d=24R_e^{-1}+3.73R_e^{-0.5}-\frac{4.83\times10^{-3}R_e^{-0.5}}{1+3\times10^{-6}R_e^{1.5}}+0.49 \tag{4}$$

其中

$$R_e=\frac{d_p\rho_f}{\mu_f}(v_f-v_p) \tag{5}$$

$$\frac{\sigma \boldsymbol{v}_{pj}}{\sigma t}=g\frac{\rho_{pj}-\rho}{\rho_{pj}}+F_D(\boldsymbol{v}-\boldsymbol{v}_{pj})+F_M+F_{pj} \tag{6}$$

$$F_D=\frac{3\mu}{\rho_p d_p^2}\frac{C_d R_e}{4} \tag{7}$$

$$F_M=\frac{1}{2}\frac{\rho}{\rho_p}\frac{\mathrm{d}(\boldsymbol{v}-\boldsymbol{v}_p)}{\mathrm{d}t} \tag{8}$$

$$F_P=\frac{\rho}{\rho_p}\left(\sum_i \boldsymbol{v}_{pi}\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial x_i}\boldsymbol{e}_i\right) \tag{9}$$

式中　m_p——雾滴质量，g

d_p——雾滴直径，μm

ρ_p——雾滴密度，kg/m^3

$\boldsymbol{v}_{pj}$——雾滴在 $j(x、y、z)$ 方向的速度矢量，m/s

$\boldsymbol{v}_{pi}$——第 i 个雾滴速度矢量，m/s

ρ_f——空气摩擦阻力系数，取 9.8 $N\cdot s^2/m^4$

$\boldsymbol{v}_{fj}$——气流在 $j(x、y、z)$ 方向的速度矢量，m/s

μ_f——动力粘滞系数，Pa·s

F_D——黏性力系数

C_d——阻力系数

R_e——相对于流场运动的雷诺数

F_M——流体与雾滴颗粒相互冲击产生的力，N

F_P——压力梯度力产生的作用力，N

e_i——方向矢量　　μ——黏性系数

由旋翼旋转产生的气流不仅影响喷雾颗粒的运动，而且对大气场也有影响。然而，大气场对该流体存在负反馈作用，会减弱喷雾颗粒的运动效果，而喷雾颗粒与流场之间存在动量交换。基于 N－S 方程，将式(2)拆解为 5 个等式：第 1 个等式为质量守恒方程；第 2～4 个等式基于动量守恒原理；第 5 个等式基于能量守恒原理。式(3)～(9)基于欧拉-拉格朗日定理对离散相运动方程进行求解。假设流体计算域 V 内，在时刻 k 共有 Z 个雾滴，将所有雾滴颗粒对流场产生的动量总和[28-29]，以源项 $\boldsymbol{Q}$ 的形式存在，有

$$S_{Mi}=-\frac{1}{V}\sum_{i=1}^{Z}\left[F_{di}(v-v_{pi})+F_{Mi}+F_{pi}\right]m_{pi} \tag{10}$$

并且因为在不同的时刻，液滴的速度是不同的，它所受到的力是不一样的。因此，液滴的运动模型是可变加速的。运动模型是可变加速的，液滴的三维加速模型为

$$\alpha_{pj(k+1)}=\frac{\pi\mu_f d_p C_d R_{ej(k+1)}}{4C_e m_p}(v_{fj}-v_{pj(k+1)})k \tag{11}$$

其中

$$v_{pj(k+1)}=v_{pj(k)}+\alpha_{pj(k)}\Delta t \tag{12}$$

式中　S_{Mi}——雾滴颗粒对流场产生的动量和

F_{di}——第 i 个雾滴的黏性力，N

F_{Mi}——第 i 个雾滴与流体相互冲击产生的力，N

F_{pi}——下洗气流场下压强差对第 i 个雾滴产生的力，N

$\alpha_{pj(k+1)}$——雾滴在 $k+1$ 时刻、$j(x、y、z)$ 方向的加速度，m/s^2

$v_{pj(k+1)}$——雾滴在 $k+1$ 时刻、$j(x、y、z)$ 方向的速度，m/s

C_e——漂移修正系数

3　下洗气流场特性分析与验证

3.1　下洗气流场空间特性分析

当雾滴粒径小于 200 μm 时，雾滴的运动范围主要分布在下洗区域的中心[30]。本文采用的离心式雾化喷头的雾化效果在 90～130 μm 范围内[31]，雾

滴沉积效果主要集中于下洗气流场。在本研究中，假定空气为理想空气，雾滴假设为球形粒子，并忽略了液滴在空气运动过程中的蒸发与变形现象。下洗气流场对雾滴颗粒的沉积以及雾滴飘逸量具有重要意义。为了研究颗粒受气流下洗作用后的空间分布，本研究将计算域界定为 3 m×3 m×2 m 的长方体，大气场的温度界定为 25℃，相对湿度设置为 66%，大气压强设置为 79.7 kPa，其余参数默认为标准大气参数。无人机位于正中心点，距地面高度为 1.5 m，旋翼转速为 100 r/s 进行模拟仿真，并选取了图 5 中旋翼下方的 7 个等高线平面进行数据提取，分别位于 0、0.25、0.50、0.75、1.00、1.25、1.50 m。

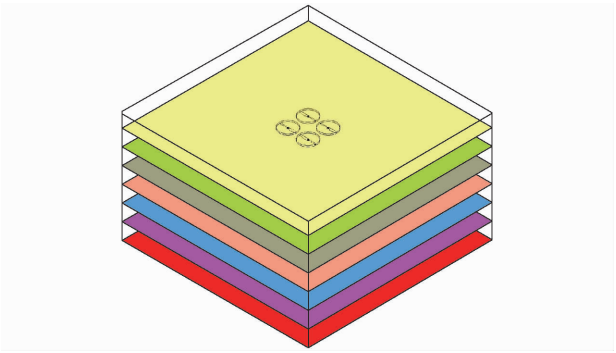

图 5 旋翼下方云图平面

Fig. 5 Plane of cloud below rotor

将无人机正下方区域按图 6 所示进行划分，即 1 个中心区、2 个系统引入区、2 个气流导出区、4 个旋翼区。图 7 展示了旋翼下方 7 个切面的速度云图。在图 7a 中，距离旋翼下方 0 m 时，动域处的风速最大，但下洗气流对下方空气的渗透范围主要集中在半径为 0.4 m 的圆内的中心区域。在图 7b、7c

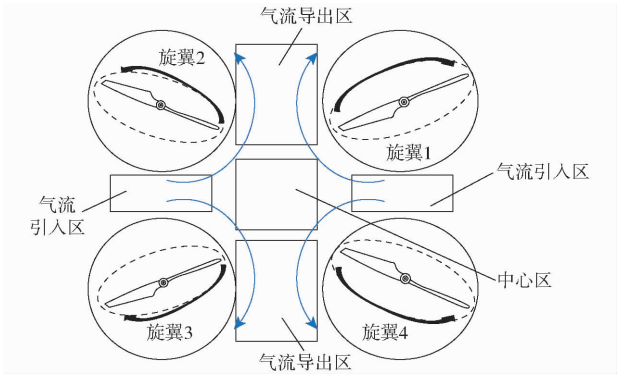

图 6 无人机气流引入导出区示意图

Fig. 6 Schematic of UAV's airflow inlet zones and outlet zone

中，当离旋翼高度在 0.25～0.50 m 时，受喷药装置的影响，下洗气流无法穿透机构，导致中心区域出现速度空白区，呈现绕流现象。此时，3～10 m/s 的高速洗气流主要集中在气流引入区和导出区。图 7d～7f 显示，在 2.5～10 m/s 范围内，速度流线集中于中心位置的 1.2 m×0.8 m 长方形区域，位于旋翼正下方。

结合图 8 和图 9，下洗气流在离旋翼下方 0.25 m 处受到无人机喷药机构阻挡下的绕流影响后，在离旋翼下方 0.6 m 处呈现向中心汇聚的现象。此外，旋翼作用下的气流运动至地面时与地面涡流相互作用，导致中心区域风速呈现稳步上升趋势，在距离旋翼 1 m 处的正中心区域达到速度峰值 3.82 m/s。通过观察图 7d、7f、7g 可以发现下洗气流的速度场随着离旋翼高度的增大而扩大，流线速度逐渐减小[32]。在图 7g 中，靠近地面时，风场速度减小至零。下洗气流的特性随着离旋翼高度的变化而

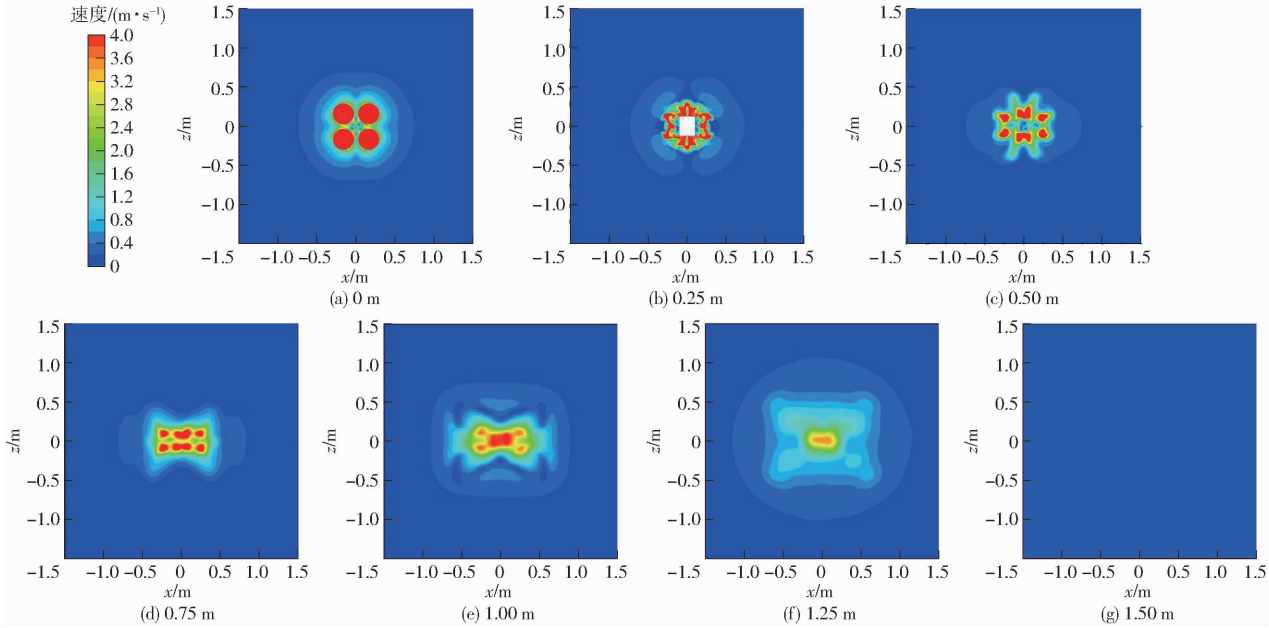

图 7 旋翼下洗气流场切片速度分布图

Fig. 7 Section velocity profiles of downwash airflow under rotor

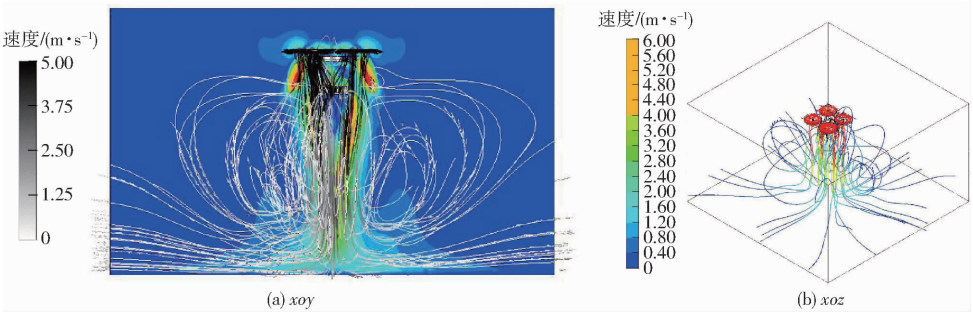

图 8　速度流线图

Fig. 8　Velocity flow diagram

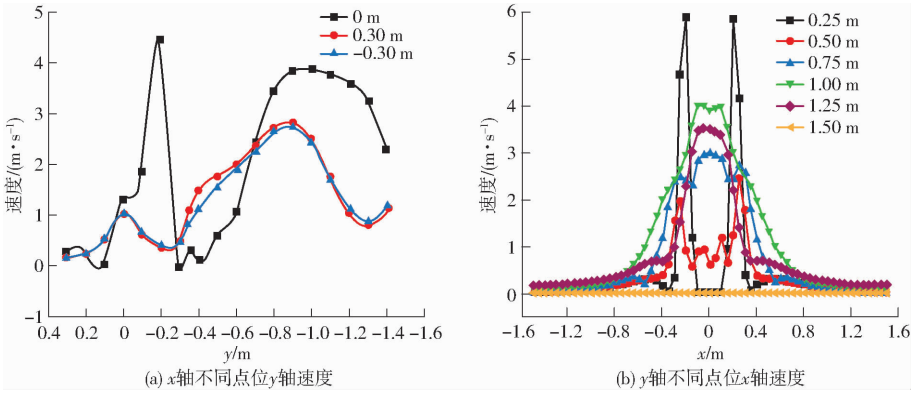

图 9　不同区域风速变化曲线

Fig. 9　Downwash airflow field's velocity variation curves in different regions

呈现出不同的表现。

3.2　下洗气流场风速验证试验

小型四旋翼植保无人机的下洗气流场是影响植保无人机施药作业的主要因素之一。为了研究无人机下洗气流场对雾滴沉积特性的影响，需要确保实际风场数值与数值模拟风速相匹配。本文首先进行数值模拟，确定风场范围，避免冗余数据采集。测点分布情况如图 10a 所示。其中，“旋翼下方区”测量点位于旋翼中心下方，其他区域的测量点布置在该区域的下方。竖直方向上，两相邻测速点的距离为 10 cm。图 10c 所使用的 AT816 型风速仪，为 SMART SENSOR 公司生产，测量范围为 0.3 ~ 30.0 m/s，测量精度为 ±5%。将 AT816 固定在可伸缩三脚架上，叶轮与地面平齐放置，确保风速仪的迎风面朝上，如图 10b 所示。旋翼转速稳定后，将测速台架移至图 10a 的测量点处进行测速。每个测量点测速 1 s，重复 3 次并取平均值。通过数值模拟和试验获得测速点风速数据，数值模拟风速与试验结果的相对误差可以表示为

$$e = \frac{|v_t - v_s|}{v_t} \times 100\% \tag{13}$$

式中　v_s——数值模拟风速，m/s

v_t——试验风速，m/s

根据图 11 所示，模拟值与试验值的趋势基本一致。然而，模拟值与试验值之间的差异来源于风速仪精度较低导致实测值失真。具体数值差异如图 11 所示，在距离旋翼 1.0 ~ 1.2 m 的测速点，试验值大部分小于模拟值（平均绝对误差约为

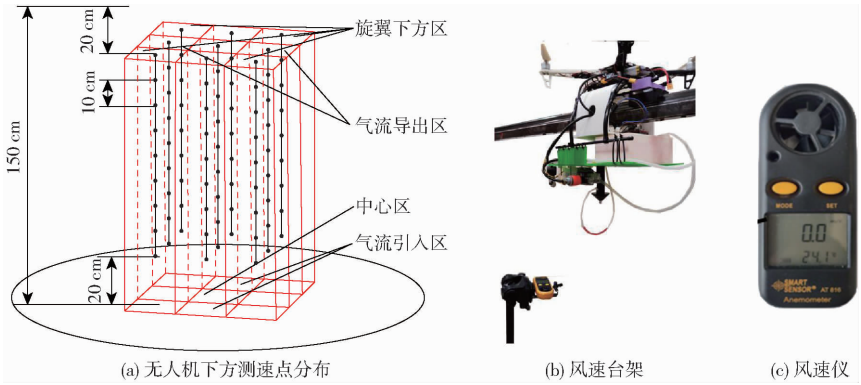

图 10　测风试验

Fig. 10　Velocity tests

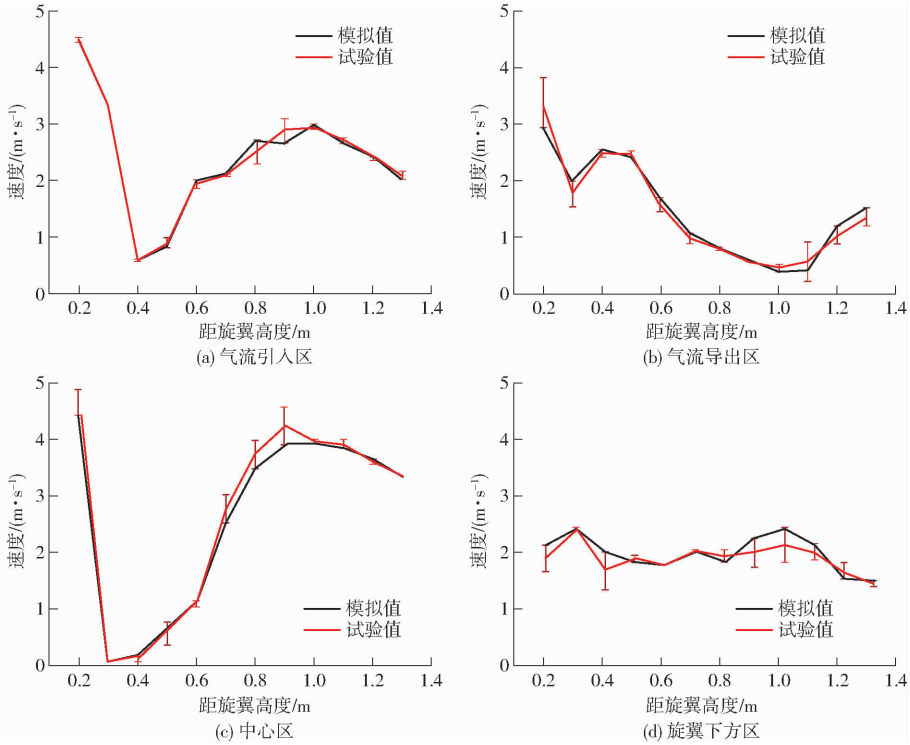

图 11 下洗气流场速度模拟值与试验值

Fig. 11 Simulation and experimental values of downwash airflow velocity

16.77%),而在其他测速点,试验值基本大于模拟值(平均绝对误差约为 15.85%)。通过对比分析,试验值相对于模拟值偏大的原因主要如下:首先,在靠近旋翼的测速点,由旋翼旋转产生的复合风场,试验值比模拟值更大;其次,在靠近地面的测速点,由于地面涡流效应形成对流,试验值也较模拟值大。然而,由于空气阻力等外部环境条件的影响,距离旋翼 1.0 ~ 1.2 m 的实测值小于模拟值。在图 11c 中,距离旋翼 0.4 m 处的模拟值风场速度为 0 m/s。这一现象的原因在于试验平台与模型存在差异。为了提高计算效率,数值模拟模型简化了载物平台的结构,在模拟计算中,该点处无流体域(简化为实体平台),因此模拟值为 0。通过分析误差来源,可找到试验值相对于模拟值偏大的原因,并验证了该风场模型的可靠性。

4 下洗气流场对雾滴运动分布的影响

本文选用的喷嘴为离心雾化喷嘴,喷嘴喷雾角为 140°,喷嘴流量为 0.4 L/min,喷雾颗粒大小为 90 ~ 130 μm。喷嘴位置设置在距离旋翼垂直位置 300 mm 的正中心处。采用离散随机模型(DPM)模拟颗粒在空气中的离散运动,待雾滴在下洗气流场作用下的沉积规律趋于稳定时停止计算。图 7、12 展示了雾滴在下洗气流场沉积切面规律。一方面,药液通过离心雾化喷嘴的雾化盘高速旋转,通过锯齿端面喷出形成雾滴,具有沿锯齿端面向的初始速度。另一方面,旋翼高速旋转产生的下洗气流场对雾滴具有向下的作用力以及绕下洗气流场中心的旋转运动,形成一个复合工况。如图 12a ~ 12c 所示,雾滴运动轨迹并未呈抛物线趋势四处散开,而是形成一个类似空心柱体的形状,雾滴粒子主要分布在外圈。结合图 7b、7c 可知,雾滴经喷嘴电机甩出后在计算中达到横向位移最大后,在旋翼下洗气流场影响下部分雾滴粒子发生转向,具有反向运动的趋势。从图 12b、12c 可见,在两个截面中,x 轴的负半轴以及 z 轴的负半轴粒子飘移距离均大于正半轴。结合图 6 以及图 7 可观察到以下现象:相邻旋翼转向不同,存在互相干扰现象,气流引入区的速度略高于气流导出区,气流引入区的流线更加密集,该处风场对雾滴的反馈作用更加明显。

图 12d ~ 12g 展示了在下洗气流稳定后,距离旋翼 0.4、0.7、1.0、1.5 m 处的雾滴粒子浓度 *xoz* 切面云图。图 12d 呈现了雾滴刚被甩出的情况,结合图 7c 可知,雾滴刚被甩出时初速度远大于风场风速,因此下洗气流场对雾滴的反馈作用不明显,导致雾滴四周均匀散布。结合图 7d 和图 8a,雾滴在下洗气流场和周向黏附力的作用下呈螺旋状下降运动。随着距离旋翼高度的增加,雾滴浓度分布由均匀分布变为集中于两个气流引入区。图 12e ~ 12g 验证了雾滴在下洗气流场影响下的最大横向位置为0.6 m,且随着高度增大,雾滴群逐渐散开,分布更加分散。雾滴主

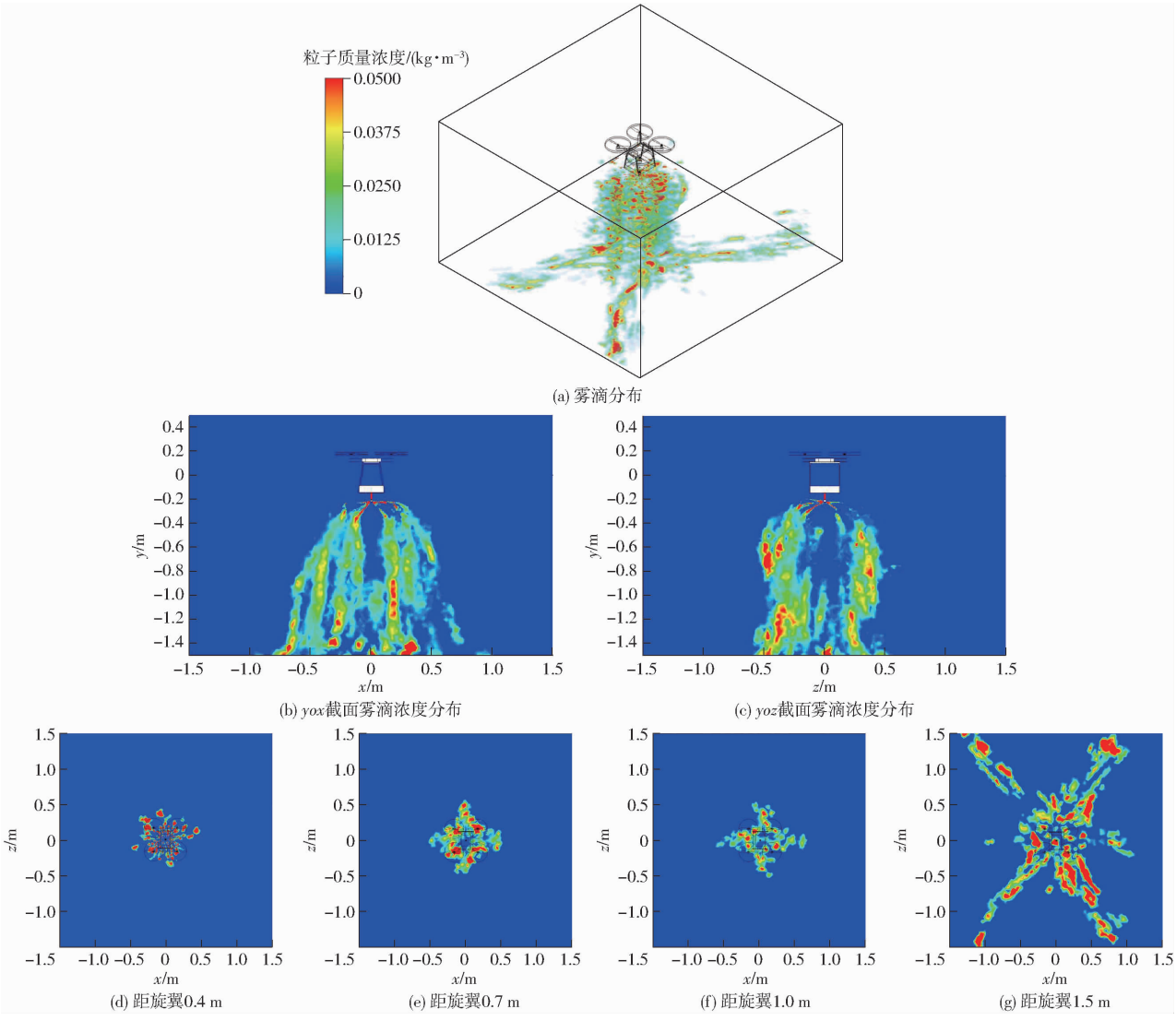

图 12　雾滴浓度分布

Fig. 12　Droplet mass concentration

要分布区并不在旋翼正下方，而是在旋翼之间（两个气流引入区和两个气流导出区）。其中，气流引入区的浓度及分布范围均高于气流导出区。而在中心区，由于雾滴沿锯齿端面运动，以及下洗气流场影响下的反向运动颗粒较少和地面涡流带动的粒子反向运动，导致中心区的沉积量较少。图 12g 显示液滴在四周扩散沉积，这是因为该切面处于接地面，液滴在地面发生沉积，并在下洗气流场的带动下向外扩散。为保证雾滴汇聚于中心区，防止雾滴飘移离散，将作业飞行高度设定在 0.80 ~ 1.00 m 之间。

5　结论

（1）通过建立三维模型，研究了小载荷无人机的下洗气流场雾滴沉积的关系，为该领域的发展提供了理论基础。

（2）构建了小型四旋翼植保无人机在 2 kg 载荷情况下的下洗气流场数值模拟模型，并进行了下洗气流场 y 轴风速验证。试验值与模拟值的误差在 20% 以内，证实了数值模型的可靠性。

（3）针对四旋翼植保无人机的雾场特性，建立了植保无人机喷药状态下的离散运动模型（DPM）。通过定量分析得到了雾滴运动轨迹在该下洗气流场的最大横向距离为 0.6 m，雾滴群呈螺旋式下降，先收缩后扩散的趋势，雾滴主要沉积在两个气流引入区和两个气流导出区。

（4）在实际作业中，为降低雾滴飘移量，提高农药使用率，建议小型植保无人机作业方向与地表方向平行，作业高度设定在 0.80 ~ 1.00 m 之间。

参　考　文　献

[1]　张荣琴，陈泽励，王雪丽，等. 无人机在云南农业中的应用及前景展望[J]. 云南农业科技，2022(1)：119 - 124.
[2]　王龙，周涵宇，田立超. 植保无人机在重庆园林植物养护中的应用前景探讨[J]. 绿色科技，2021，23(17)：77 - 80.

[3] 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]. 农业机械学报,2014,45(10):53 - 59.
ZHANG Dongyan, LAN Yubin, CHEN Liping, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(10):53 - 59. (in Chinese)

[4] 郑永军,陈炳太,吕昊暾,等. 中国果园植保机械化技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报,2020,36(20):110 - 124.
ZHENG Yongjun, CHEN Bingtai, LÜ Haotun, et al. Research progress of orchard plant protection mechanization technology and equipment in China[J]. Transactions of the CSAE,2020, 36(20): 110 - 124. (in Chinese)

[5] LAN Y B, CHEN S, BRADLEY K F. Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3): 1 - 17.

[6] 张海艳,兰玉彬,文晟,等. 植保无人机水稻田间农药喷施的作业效果[J]. 华南农业大学学报,2019,40(1):116 - 124.
ZHANG Haiyan, LAN Yubin, WEN Sheng, et al. Operational effects of unmanned helicopters for pesticide spraying in rice field [J]. Journal of South China Agricultural University,2019,40(1):116 - 124. (in Chinese)

[7] BILANIN A J, TESKE M E, BARRY J W, et al. AGDISP: the aircraft spray dispersion model, code development and experimental validation[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(1): 327 - 334.

[8] RAFFEL M, RICHARD H, EHRENFRIED K, et al. Recording and evaluation methods of PIV investigations on a helicopter rotor model[J]. Experiments in Fluids, 2004, 36(1): 146 - 156.

[9] KIRK I W, HOFFMANN W C. Operational factors influence spray drift and deposition from helicopters[R]. ASAE Paper No. 02 - AA06, 2002.

[10] ORCHARD R D,NEISESS J, MOUNTS J, et al. Evaluation of the bell 205a - 1 turbojet helicopter and spray system for forest application of insecticide[R]. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture, 1974.

[11] 王娟,兰玉彬,姚伟祥,等. 单旋翼无人机作业高度对槟榔雾滴沉积分布与飘移影响[J]. 农业机械学报,2019,50(7):109 - 119.
WANG Juan, LAN Yubin, YAO Weixiang, et al. Effects of working height of single-rotor unmanned aerial vehicle on drift and droplets deposition distribution of areca tree[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(7):109 - 119. (in Chinese)

[12] 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)

[13] 谢英杰,王国宾,王宝聚,等. 植保无人机喷施除草剂喷头选择及参数优化[J]. 中国农机化学报,2021,42(4):61 - 69.
XIE Yingjie, WANG Guobin, WANG Baoju, et al. Selection of nozzle type and parameter optimization in herbicide spraying process of plant protection UAV[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(4):61 - 69. (in Chinese)

[14] 张海艳,兰玉彬,文晟,等. 植保无人机旋翼风场模型与雾滴运动机理研究进展[J]. 农业工程学报,2020,36(22):1 - 12.
ZHANG Haiyan, LAN Yubin, WEN Sheng, et al. Research progress in rotor airflow model of plant protection UAV and droplet motion mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(22):1 - 12. (in Chinese)

[15] 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 downwash airflow and droplet deposition for six-rotor UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(8):74 - 81. (in Chinese)

[16] 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(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(2):75 - 83. (in Chinese)

[17] 王玲. 多旋翼植保无人机低空雾滴沉积规律及变量喷施测控技术[D]. 北京:中国农业大学,2017.
WANG Ling. Research on low-attitude droplets deposition and technologyof variable spraying measurement and control system based on multi-rotor crop protection UAV[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[18] 张京,何雄奎,宋坚利,等. 无人驾驶直升机航空喷雾参数对雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报,2012,43(12):94 - 96.
ZHANG Jing, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Influence of spraying parameters of unmanned aircraft on droplets deposition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(12):94 - 96. (in Chinese)

[19] 臧英,何新刚,周志艳,等. 电动多旋翼植保无人机升力特性综合测评方法[J]. 农业工程学报,2018,34(14):69 - 77.
ZANG Ying, HE Xin'gang, ZHOU Zhiyan, et al. Comprehensive evaluation method for lifting characteristics of electric multi-rotor UAV for plant protection[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(14):69 - 77. (in Chinese)

[20] 肖威. 可压缩气固两相湍流边界层/射流的直接数值模拟研究[D]. 杭州:浙江大学, 2021.
XIAO Wei. Direct numerical simulation of compressible gas-solid two-phase turbulent boundary layer and transverse jet[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)

[21] 高歌, 闫文辉, 吴俊宏. 计算流体力学:典型算法与算例[M]. 北京:机械工业出版社, 2015.

(下转第 226 页)

1(3): 200 - 204.
[21] ELKOTB M M. Fuel atomization for spray modelling[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 1982, 8(1):61 - 91.
[22] WOOTAE K, MITRA S K, LI Xianguo, et al. A predictive model for the initial droplet size and velocity distributions in sprays and comparison with experiments[J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2003, 20(2):135 - 149.
[23] DUMOUCHEL C, BOYAVAL S. Use of the maximum entropy formalism to determine drop size distribution characteristics[J]. Particle & Particle Systems Characterization, 1999, 16(4):177 - 184.
[24] FU F. Experimental characterization of sprays from an air-blast annular research nozzle[D]. University of Waterloo,2003.
[25] MITRA S K, Breakup process of plane liquid sheets and prediction of initial droplet size and velocity distributions in sprays [D]. University of Waterloo, 2001.
[26] HOSSEINALIPOUR S M, KARIMAEI H, MOVAHEDNEJAD E. Droplets diameter distribution using maximum entropy formulation combined with a new energy-based sub-model[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2016, 24(11):6.
[27] 赵芳,徐兵兵,符澄,等. 旋流式气泡雾化喷嘴喷雾特性实验研究[J]. 实验流体力学,2022,36(6):28 - 35.
ZHAO Fang, XU Bingbing, FU Cheng, et al. Experimental study on the characteristics of swirl effervescent atomizer[J]. Journal of Experimental in Fluid Mechanics,2022,36(6):28 - 35. (in Chinese)
[28] 郭金海. 喷射器内液滴粒径分布的实验研究与模型预测[D]. 青岛:青岛科技大学,2012.
GUO Jinhai. Model prediction and experiment study on spray droplet size distribution in jet reaction[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology,2012. (in Chinese)
[29] 许晏铭,刘建河,李星光. 液体物性对静电喷雾雾化性能的试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2019,37(9):793 - 798.
XU Yanming,LIU Jianhe,LI Xingguang. Study of liquid properties on electrostatic spray atomizing performance[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2019,37(9):793 - 798. (in Chinese)
[30] LI Xianguo, LI Meishen. Droplet size distribution in sprays based on maximization of entropy generation[J]. Entropy, 2003, 5(5):417 - 431.

(上接第 216 页)

[22] 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)
[23] ROBERTS T W, MURMAN E M. Solution method for a hovering helicopter rotor using the Euler equations[C]// 23rd Aerospace Sciences Meeting, 1985:436.
[24] 孔祥伟,林元华,何龙,等. 一种考虑虚拟质量力的两相压力波速经验模型[J]. 力学季刊,2015,36(4):611 - 617.
KONG Xiangwei, LIN Yuanhua, HE Long, et al. An empirical pressure wave velocity model for two-phase flow by considering virtual mass force[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2015,36(4):611 - 617. (in Chinese)
[25] 薛元. 细颗粒在流动与温度边界层中的运动规律研究[D]. 北京:清华大学,2002.
XUE Yuan. Study on the movement of fine particles in the flow and temperature boundary layer[D]. Beijing: Tsinghua University, 2002. (in Chinese)
[26] 李兴良,陈德辉,沈学顺. 不同垂直坐标系对垂直速度计算的影响[J]. 热带气象学报,2005,21(3):265 - 276.
LI Xingliang,CHEN Dehui,SHEN Xueshun. Impact study on the calculation of vertical velocity in different vertical coordinates [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2005,21(3):265 - 276. (in Chinese)
[27] 牛钰森. 自弹式发射内弹道流场特性研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.
NIU Yuseng. Research on internal ballistic flow filed characteristics of self-eject launch[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
[28] WANG Ling, CHEN Du, ZHANG Mengchao,et al. CFD simulation of low-attitude droplets deposition characteristics for UAV based on multi-feature fusion[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(17): 648 - 653.
[29] ZHU Yaozong, GUO Qiwei, TANG Yu,et al. CFD simulation and measurement of the downwash airflow of a quadrotor plant protection UAV during operation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 201: 107286.
[30] 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 Luzhen, 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)
[31] 王金星,王震,张菡,等. 低量低空小型植保无人机变量喷药参数优化试验[J]. 江苏农业科学,2018,46(17):215 - 219.
WANG Jinxing,WANG Zhen,ZHANG Han, et al. Optimal experiment of variable spraying parameters for UAV with low volume and low altitude[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018,46(17):215 - 219. (in Chinese)
[32] YOON S, DIAZ P V, JR D, et al. Computational aerodynamic modeling of small quadcopter vehicles[C]// American Helicopter Society (AHS) 73rd Annual Forum Fort Worth, Texas, 2017.