doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.008

大载荷植保无人直升机喷雾气液两相流动数值模拟

王军锋　徐文彬　闻建龙　王晓英　罗博韬
(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为研究大载荷植保无人直升机喷雾流场特性,基于 FR-200 型大载荷植保无人直升机喷洒系统,建立 FR-200 型大载荷植保无人直升机无植物冠层三维雾滴沉降仿真模拟平台,利用 Fluent 软件的 SST $k-\omega$ 湍流模型和 DPM 离散相模型对无人直升机喷雾沉降过程进行了仿真模拟,分别研究了飞行速度、喷杆相对位置、喷施角度对喷雾流场的影响,并进行户外试验验证。试验结果表明,下洗流场垂直方向速度(Z 向)呈不对称分布,旋翼 x/R 为 0.8 处垂直方向速度(Z 向)最大;仿真模拟的雾滴沉积总量与户外试验的雾滴沉积密度基本一致,线性决定系数 R^2 为 0.999 6,无人直升机前飞速度与雾滴群抗飘移系数及沉积量呈线性关系,前飞速度 3 m/s 时,靶标上雾滴总沉积密度为 4.208 μL/cm^2,前飞速度 5 m/s 时,靶标上雾滴总沉积密度为 1.766 μL/cm^2;随着采样面的升高,雾滴群抗飘移性能增强;位于喷杆不同位置处喷头的抗飘移性能不同,主要表现在位于喷杆两端的喷头 1 和 9 受到旋翼尾涡的影响,雾滴群抗飘移性能变差,机身正下方的喷头 5 由于机身阻挡作用,造成雾滴群分散性增加,雾滴因垂直方向动能衰减而难以到达采样面;喷施角度越小,雾滴群总体抗飘移性能越好。

关键词: 无人直升机; 大载荷; 植保; 数值模拟
中图分类号: S252　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2017)09-0062-08

Numerical Simulation on Gas-liquid Phase Flow of Large-scale Plant Protection Unmanned Aerial Vehicle Spraying

WANG Junfeng　XU Wenbin　WEN Jianlong　WANG Xiaoying　LUO Botao
(*School of Energy and Power Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: In order to study the spray flow filed characteristic of large-scale plant protection unmanned aerial vehicle (UAV), based on the spray system of FR-200 large-scale plant protection UAV, the simulation platform of depositing spray droplets without plant canopy was established. The SST $k-\omega$ turbulence model and the DPM discrete phase model were adopted to simulate the deposition process of UAV spray droplets. By means of numerical Fluent simulation software, the flight speed, spray boom relative position and spraying angle impact on the spray flow field were studied, field test was done to verify the results of simulation. The vertical velocity distribution of FR-200 UAV downwash flow field was unsymmetrical. The UAV speed had linear relationships with both the droplet swarm anti-drift coefficient and deposition, the total amount of the target droplets deposition density were 4.208 μL/cm^2 when flying speed was 3 m/s, the total amount of the target droplets deposition density were 1.766 μL/cm^2 when flying speed was 5 m/s. The anti-drift coefficient was 87.5%, 93.0% and 96.4% at sampling plane height of 0 m, 0.5 m and 1.0 m when flying speed was 4 m/s, respectively. With the increase of sample surface height, the anti-drift performance of droplets was promoted. The drift phenomenon of nozzles was serious which was installed on both sides of the spray boom. The nozzles were affected by the trailing vortex which caused the droplets drift. The rotor downwash flow increased spray droplets initial kinetic energy, the spray droplets acceleration was caused by gravity and downwash flow. The dispersion of number 5 nozzle spray droplets was increased due to the blocking effect, and it was hard to reach the sample surface due to the vertical kinetic energy attenuation of droplets. The smaller the spraying angle was, the stronger the droplets total anti-drift performance became.

Key words: unmanned aerial vehicle; large-scale; plant protection; numerical simulation

收稿日期: 2016-11-20　修回日期: 2017-03-26
基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(15)1038)
作者简介: 王军锋(1975—),男,教授,博士生导师,主要从事荷电多相流研究,E-mail: wangjunfeng@ujs.edu.cn

引言

航空植保能够有效地完成病虫害防治，同时植保作业一般不受作物生长态势、地理位置的限制[1-2]。植保无人机低空施药具有作业效率高、防治效果好、农药利用率高、一次性作业面积广等优点，喷洒作业采用人药分离模式，从根本上解决植保作业过程中农药对作业人员危害的难题[3]。但是无人直升机旋翼产生的下洗流场为非定常流场，喷洒作业时雾滴的沉积和飘移受到下洗流场的影响较大，特别是无人直升机作业过程中受到旋翼尾涡的影响，雾滴在旋翼尾涡的作用下产生严重的农药飘移现象[4-10]。美国是农业航空最发达的国家，开发了多种预测雾滴沉积和飘移的计算机模型，应用最广泛的是 FSCBG 模型和 AGDISP 模型，其中 AGDISP 模型是基于拉格朗日方法求解翼尖涡，同时考虑当地风速、螺旋桨和重力等因素综合影响，可以很好地模拟真实环境下航空喷洒作业雾滴沉积和飘移情况[11-15]。RYAN 等[16]利用计算流体力学软件 ANSYS CFX，建立了 AT－802 固定翼飞机喷雾多相流数值仿真平台，研究了不同侧风对飞机尾涡结构以及雾滴运动轨迹的影响，研究表明随着侧向风速的增加，飞机尾涡变得复杂，雾滴的空间分布不均匀性增加。目前，国内一些学者也开始了无人机雾滴沉积和飘移的研究，薛新宇团队[17]对 N－3 型植保无人机的作业过程进行了模拟研究，结果表明小型植保无人机农药喷洒飘移现象只发生在侧风风向的下方，农田作业时需要预留 8～10 m 的缓冲区域，以免药液飘移造成危害。陈盛德等[18]利用 HY－B－10L 型单旋翼电动无人机通过改变不同飞行参数研究了不同喷雾参数对水稻冠层的雾滴沉积分布的影响，研究发现靶标区雾滴沉积量随着高度的增加而减小，作业高度为 1.92 m 时雾滴沉积均匀性最佳，且雾滴飘移量最少。综上所述国内外研究成果，国内学者的研究主要集中在小型植保无人机，国外学者研究主要集中在有人驾驶固定翼飞机方面，但是关于载量 30 kg 以上的大载荷植保无人直升机喷雾多相流动的研究未见报道。

鉴于此，为了研究大载荷植保无人直升机喷雾流场的特性及喷雾场中雾滴的沉降规律，本文基于飞瑞航空科技（江苏）有限公司研发的 FR－200 型大载荷植保无人直升机，建立大载荷植保无人直升机无植物冠层三维雾滴沉降仿真模拟平台，并运用数值仿真软件（Fluent）对其气液两相流场进行模拟分析。

1　物理模型

根据 FR－200 型无人直升机实际测量尺寸和简化建模的需要，使用 CATIA 软件建立 FR－200 型无人直升机三维物理模型，无人直升机基本结构如图 1 所示。机身下方安装有 9 个 VP110－015 型扇形喷头（编号 1～9），喷头安装间距为 50 cm，当雾化压力为 0.3 MPa 时，单个喷头的流量为 480 mL/min（质量流量 0.008 kg/s），距离喷头下方 50 cm 处雾滴索泰尔平均直径为 81 μm，测试仪器采用济南维纳仪器有限公司生产的 winner318 A 型激光粒度分析仪；桨叶具体参数如下：桨叶类型为 NACA0012，桨叶半径 R 为 2.1 m，弦长 0.2 m，桨距 10°，负扭转 0°，桨叶 2 片，转速为 850 r/min，FR－200 型无人直升机最大载荷可达 80 kg，单架次起降作业面积可达 2 hm^2。

方向定义：如图 1 所示坐标系，定义无人机行进方向为 X 负方向，上升方向为 Z 正方向，机身左侧至右侧为 Y 正方向。

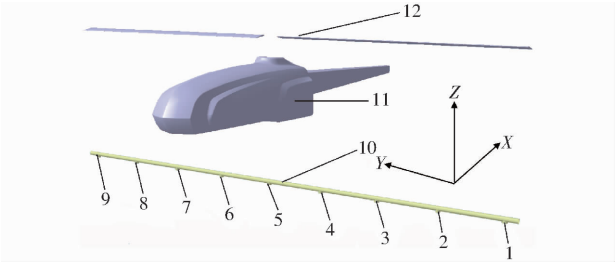


图 1　FR－200 型无人直升机基本结构

Fig. 1　Fundamental structure of FR－200 UAV

1～9. 喷头　10. 喷杆　11. 机身　12. 机翼

2　数值模拟

2.1　网格化处理

在 ICEM 中，对机身和计算域进行网格化处理。选择如图 2 所示长度为 60 m、宽为 60 m、高度为 30 m 的长方形计算域，其中旋翼距离底面（*BCGH* 面）3 m，设定旋翼中心轴为坐标原点。采用贴体坐标法生成无人机的机身曲面和计算域的网格，不同网格区域通过设置 interface 面连接，网格数为 675 万[19-20]，模拟计算区域如图 2 所示。

机身及机翼处网格分别如图 3a 和 3b 所示。

2.2　数值模拟方法

2.2.1　边界条件设定

（1）速度进口边界条件

设定无人直升机前飞速度边界为速度进口边界条件（*ABCD* 面），速度设定为 3～6 m/s，方向由前向后，见图 2 中 X 向。

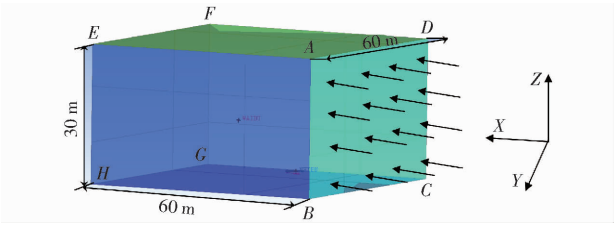


图 2 模拟计算区域

Fig. 2 Simulation area

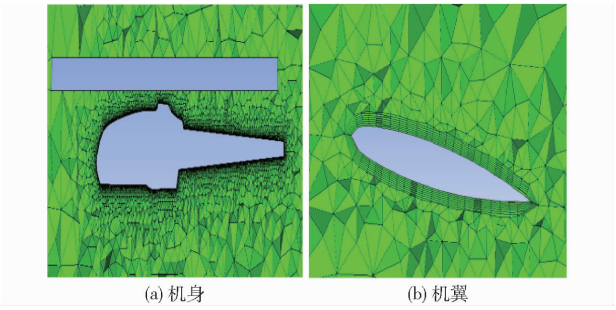


图 3 网格化处理结果

Fig. 3 Grid processing results

(2)压力出口边界条件

设定除速度进口边界条件以外的出口边界均为压力出口边界。

(3)壁面边界条件

无人直升机机身及旋翼表面设置为无滑移壁面边界条件。

2.2.2 模型选择

喷雾两相流场基于 N-S 方程中的质量、动量、能量守恒方程,选择湍流模型中 SST $k-\omega$ 湍流模型,其数学通用式为

$$\frac{\partial(\rho\psi)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u\psi)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v\psi)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w\psi)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\zeta\frac{\partial\psi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\zeta\frac{\partial\psi}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\zeta\frac{\partial\psi}{\partial z}\right)+S \quad (1)$$

式中 u、v、w——x、y、z 方向上的速度矢量分量

ψ——通用变量 ζ——广义扩散系数

S——广义源项 ρ——流体密度

选取 9 个扇形喷头的扁平喷口所在位置为雾滴释放口,设定雾化模型为平板扇形雾化喷头模型,其各项参数根据实测结果以及理论计算得出,喷口位置及扇叶向量根据实际工况确定,喷雾半角为 55°,喷嘴等效宽度为 0.1 mm,扩散角度为 6°。

2.2.3 模拟研究

FR-200 型植保无人直升机田间植保作业过程中旋翼与农作物的垂直距离一般为 2~7 m,因此为了模拟雾滴在农作物上的沉积分布情况,选取如图 4 所示 0、0.5、1.0 m 平面为雾滴采样面,对所模拟工况进行雾滴采样,采样步长为 0.01 s,采样步数

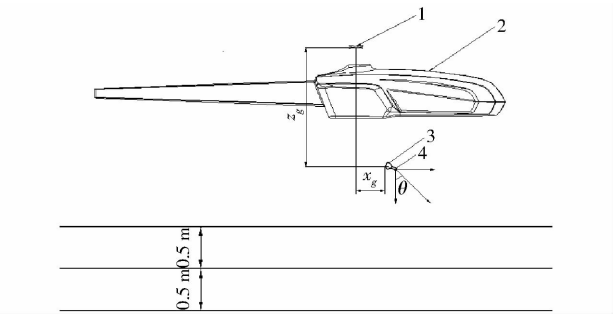


图 4 喷杆相对位置及喷施角度示意图

Fig. 4 Sketch of relative position of spray boom and spraying angle

1. 机翼 2. 机身 3. 喷杆 4. 喷头

10 步。本文通过统计雾滴到达采样面的质量,定量评估雾滴沉积和飘移特性。雾滴到达作物冠层实现雾滴沉积,故穿过采样面的粒子记为雾滴沉积。雾滴沉积质量 m_d 计算式为

$$m_d=\sum_{i=1}^{N}\rho_s\frac{4}{3}\pi r_i^3 n_i \quad (2)$$

式中 N——通过采样面沉积的粒子包个数

ρ_s——液滴的密度,kg

n_i——第 i 个粒子包中粒子个数

r_i——第 i 个粒子包中粒子半径,m

雾滴群抗飘移系数 η 定义为

$$\eta=\frac{m_d}{M}\times 100\% \quad (3)$$

式中 M——喷头在采样时间段内释放的液滴质量,kg

在 CFD 中定义雾滴收集平面,采用 CFD 中 DPM 模型的 DEFINE_DPM _OUTPUT 宏统计流过目标平面的所有粒子包以及粒子包的信息。所收集粒子包的信息包括 x、y、z 坐标,粒子包内的粒子个数,直径等。

(1)旋翼与喷头水平相对位置 x_g 对喷雾流场的影响

固定旋翼转速,旋翼与喷杆垂直距离 $z_g=1$ m,喷施角度 $\theta=0°$,对前飞速度 v 为 3、4、5、6 m/s,水平距离 x_g 为 0、0.25、0.50 m 的工况进行模拟。

(2)旋翼与喷头垂直相对位置 z_g 对喷雾流场的影响

固定旋翼转速,水平距离 $x_g=0$ m,喷施角度 $\theta=0°$,对前飞速度 v 为 3、4、5、6 m/s,垂直距离 z_g 为 1.00、1.25、1.50 m 的工况进行模拟。

(3)喷施角度 θ 对喷雾流场的影响

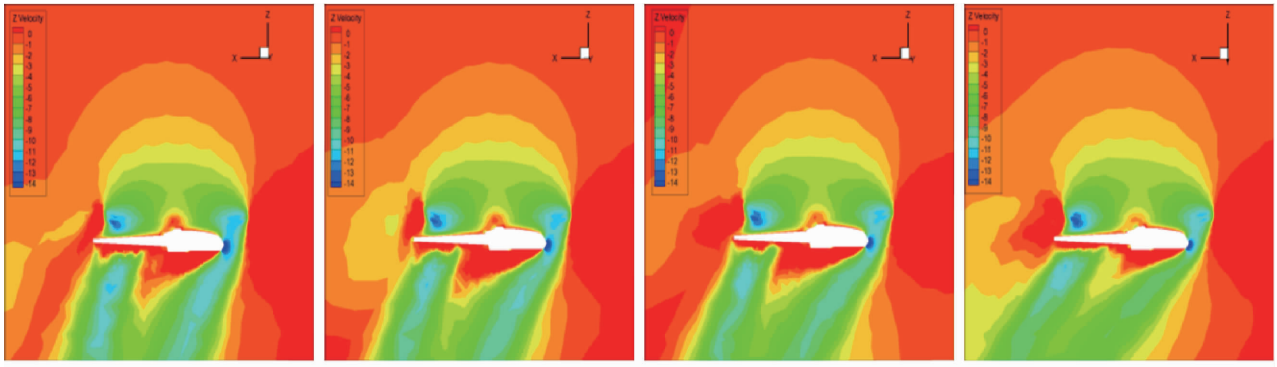
固定旋翼转速,水平距离 $x_g=0$ m,垂直距离 $z_g=1$ m,对前飞速度 v 为 3、4、5、6 m/s,喷施角度 θ 为 0°、15°、30°的工况进行模拟。

3　模拟结果与分析

3.1　下洗气流分布情况

选取计算区域内 $y=0$ m 剖面为观察面，图 5 给出了 $y=0$ m 观察面上旋翼气相流场的垂直方向速度（速度显示范围为 $-14\sim0$ m/s，负值代表速度方向向下）。观察旋翼下洗气流可知：在旋翼正下方 $y=0$ m 时，由于受到机身阻挡的作用，机身下方的速度较为紊乱，$y=0$ m 处喷头 5 的垂直方向的速度方向朝上，对于雾滴的沉降有阻碍作用。

图 6 表示喷杆固定在旋翼正下方 $z_g=1$ m，$x_g=0$ m 时，喷杆位置处垂直方向速度分布，可知 Y 轴左右两侧的速度呈现不对称分布，由于机身阻挡作用，$y=0$ m 处速度最大值为 4 m/s（方向朝上）。在旋翼 $x/R=0.8$ 位置处下洗流场垂直方向速度最大，最大值为 -12 m/s，在 y 为 $-2.1\sim2.1$ m 范围内随着 y 值的增大，呈现先减小后增大再减小再增大的趋势。



(a) 3 m/s　(b) 4 m/s　(c) 5 m/s　(d) 6 m/s

图 5　$y=0$ m 处气相流场垂直方向分速度

Fig. 5　Vertical speed of gas phase flow field at $y=0$ m

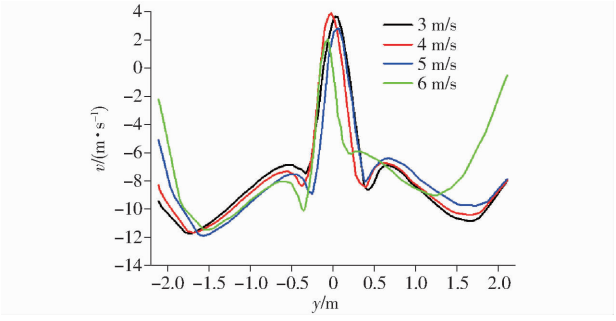


图 6　喷杆位置处垂直方向速度分布

Fig. 6　Vertical speed distribution of spray boom

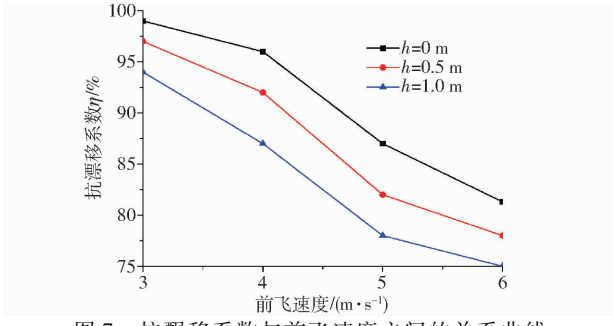


图 7　抗飘移系数与前飞速度之间的关系曲线

Fig. 7　Relationship between droplets deposition and speed of UAV

统计 3 个采样面上雾滴沉积情况，根据式(3)得到雾滴群抗飘移系数 η，利用 Origin 得出数据散点趋势线，如图 7 所示。由图 7 可知，无人直升机前飞速度与抗飘移系数呈线性关系，当前飞速度 v 为 3、4、5、6 m/s 时，$h=1.0$ m 采样面上抗飘移系数依次为 94.2%、87.5%、76.5%、75.0%，表明随着前飞速度的增大，雾滴群抗飘移性减弱。当前飞速度一定时，随着采样面的升高，雾滴群抗飘移性能增强。

3.2　水平相对位置 x_g 对雾滴沉积分布的影响

对几种工况进行采样，采样结束后将采样面沿水平方向分为 17 个区间，区间正值代表雾滴位于喷口的顺自然风方向，负值代表位于其逆自然风方向。

图 8 表示喷杆垂直距离 $z_g=1$ m，喷施角度 $\theta=0°$，水平距离 x_g 为 0、0.25、0.50 m 时，采样面 $h=0$ m 上雾滴分布情况。当前飞速度 $v=3$ m/s，$x_g=0$ m 时，雾滴主要沉积在 0.6～1.0 m 范围内，雾滴沉积质量最大值为 1.7 g，当 $x_g=0.25$ m 时，雾滴主要沉积在 0.4～0.8 m 范围内，雾滴最大沉积量为 1.5 g；而当前飞速度 $v=5$ m/s，$x_g=0$ m 时，雾滴主要沉积在 1.0～1.6 m 区间范围内，雾滴最大沉积量为 1.5 g，当 $x_g=0.25$ m 时，雾滴主要沉积在 0.6～1.4 m 范围内，雾滴最大沉积量为 1.0 g，对比可知无人机飞行速度 v 增加，雾滴主要沉积区间范围扩大，区间内雾滴沉积质量最大值减小，同时喷杆位置前移造成雾滴沉积总量减小。

无人直升机喷洒作业时，喷雾受到下洗气流的影响，下洗气流分布的不均匀性造成在喷杆不同位置处喷头沉积量有较大的区别。由图 9 可知，喷杆垂直距离 $z_g=1$ m，喷施角度 $\theta=0°$，水平距离 $x_g=0.5$ m，前飞速度 $v=3$ m/s，喷头 1 和 9 雾滴群抗飘移系数分别为 40% 和 25%，数值远小于其他喷头的抗飘移

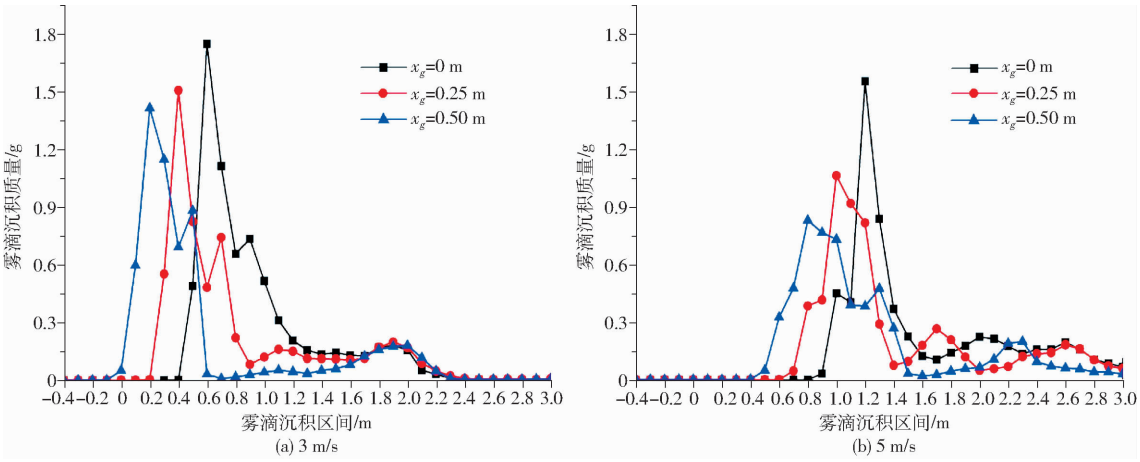


图 8 不同水平距离时采样面的雾滴沉积分布

Fig. 8 Droplets deposition distributions under different horizontal distances

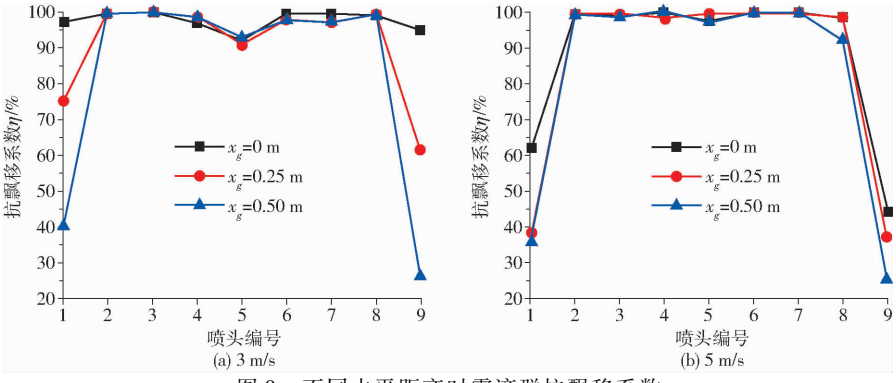


图 9 不同水平距离时雾滴群抗飘移系数

Fig. 9 Droplet swarm anti-drift coefficient under different horizontal distances

系数,主要原因是喷头 1 和 9 位于旋翼尾涡附近,在旋翼尾涡的作用下雾滴被卷吸并出现上扬现象,造成沉积到采样面需要更长的时间从而减少了雾滴的沉积量,雾滴群整体抗飘移性能减弱。位于喷杆不同水平位置处的喷头抗飘移系数也存在一定的差别。

3.3 垂直相对位置 z_g 对雾滴沉积分布的影响

对几种工况进行采样,图 10 表示喷杆水平距离 x_g = 0 m,喷施角度 θ = 0°,垂直距离 z_g 为 1.00、1.25、1.50 m 时,h = 0 m 采样面上雾滴分布情况。由图 10 可知,雾滴分布的峰值区间沿逆风方向向前移动,整个采样面上雾滴的分散程度随着垂直距离的增大而减小。前飞速度 v = 3 m/s 时,雾滴沉积分布基本上一致,不同垂直高度 z_g 雾滴的沉积量在 0.2 ~ 0.6 m 区间内上升,在 0.6 m 以后的区间沉积量逐渐下降。前飞速度 v = 5 m/s 时,雾滴的沉积量主要集中在 0.8 ~ 1.6 m 范围内,表明前飞速度 v 增

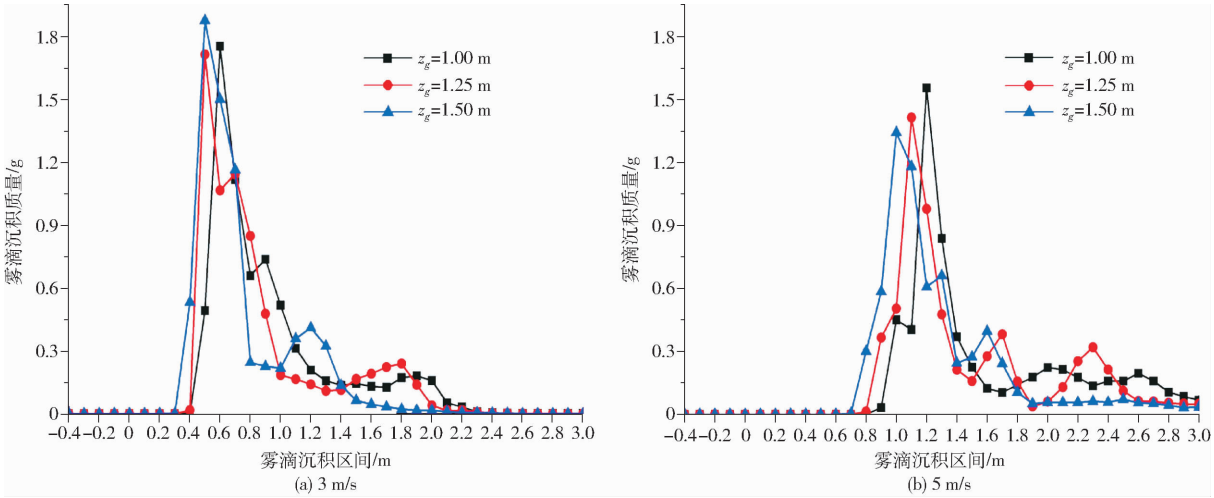


图 10 不同垂直距离时采样面的雾滴沉积分布

Fig. 10 Droplets deposition distributions under different vertical distances

加了雾滴水平方向上的初始动能，使得雾滴沉积到更远的区域，造成一定的飘移，同时垂直距离 z_g 为 1.00、1.25、1.50 m 时，雾滴最大沉积量分别为 1.5、1.4、1.3 g，雾滴沉积总量分别为 6.1、6.3、6.5 g，表明随着喷杆垂直距离的增加，雾滴沉积分布均匀性增加。

图 11 表示在 $h=0$ m 采样面，喷杆水平距离 $x_g=0$ m，喷施角度 $\theta=0°$，垂直距离 z_g 为 1.00、1.25、1.50 m 时雾滴群抗飘移系数。前飞速度 $v=5$ m/s，垂直距离 z_g 为 1.00、1.25、1.50 m 时，喷头 1 和 9 雾滴群抗飘移系数分别为 61.7% 和 44.5%、72.9% 和 59.8%、84.2% 和 65.1%，因此随着垂直距离 z_g 的增加，喷头 1 和 9 雾滴群抗飘移系数增加，抗飘移性能增强，主要原因是喷杆垂直距离增加，旋翼尾迹对喷头 1 和 9 的影响减小，旋翼尾涡对雾滴的卷吸作用降低，使得雾滴的沉积量增加。

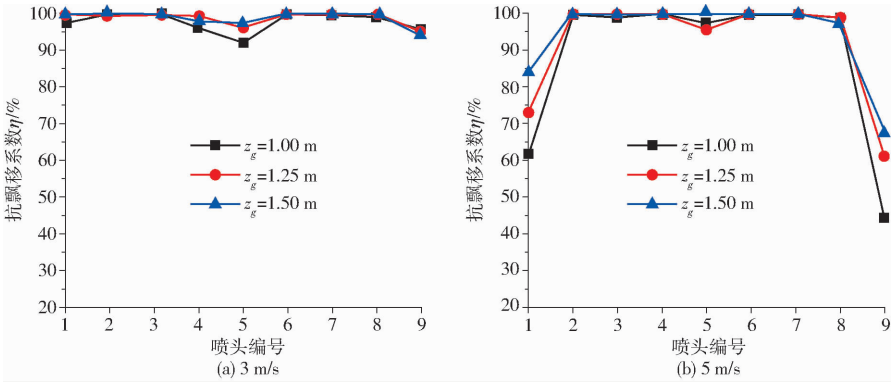


图 11　不同垂直距离时雾滴群抗飘移系数

Fig. 11　Droplet swarm anti-drift coefficient under different vertical distances

3.4　喷施角度 θ 对雾滴沉积分布的影响

图 12 表示喷杆水平距离 $x_g=0$ m，垂直距离 $z_g=1$ m 时，喷施角度 θ 为 0°、15°、30°，$h=0$ m 采样面上雾滴群抗飘移系数。前飞速度 $v=5$ m/s 时，喷施角度 θ 为 0°、15°、30°，喷头 5 抗飘移系数分别为 96.2%、70.6% 和 63.5%，不同喷施角度下机身正下方喷头 5 抗飘移系数变化较大，主要是旋翼产生的下洗气流受到机身的阻挡作用，机身正下方流场分布紊乱，垂直方向速度朝向 Z 轴正方向，使得雾滴群分散性增加，同时由于空气对雾滴的运动存在阻力，雾滴向下运动直至到达采样面的过程伴随着垂直方向动能的衰减，由于机身正下方雾滴群分散性增加，其垂直方向动能衰减难以到达采样面，从而造成雾滴群抗飘移系数减小，抗飘移性能变差。喷施角度越大，雾滴群总体抗飘移系数越小，抗飘移性能越差，主要原因是喷施角度越大，雾滴垂直方向初始速度越小，造成雾滴垂直方向初始动能越小，到达采样面需要更长的时间。

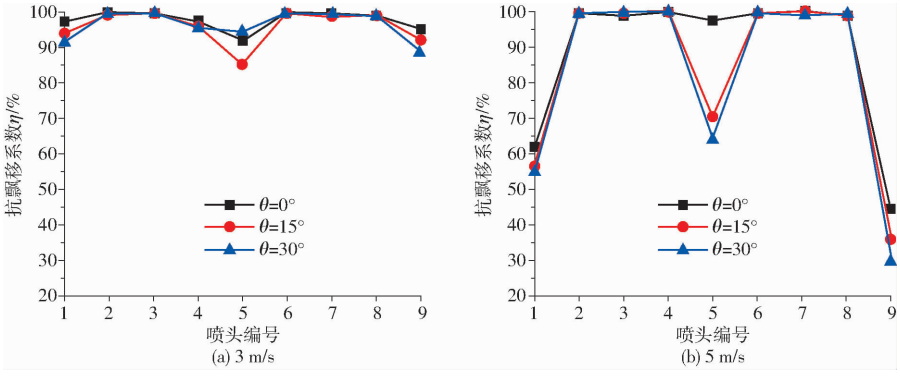


图 12　不同喷施角度时雾滴群抗飘移系数

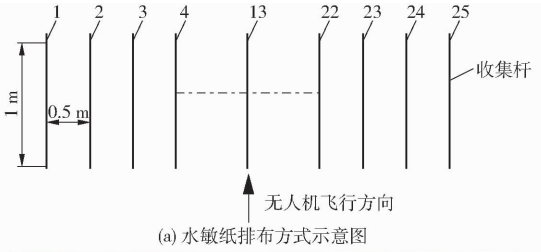
Fig. 12　Droplet swarm anti-drift coefficient at different spray angles

4　试验

4.1　无人直升机喷雾沉积试验

为了检验无人直升机喷雾沉积特性，对 FR－200 型无人直升机进行了雾滴沉积试验，喷杆水平距离 $x_g=0$ m，垂直距离 $z_g=1$ m，喷施角度 $\theta=0°$，户外试验在江苏省镇江航空航天产业园进行，试验主要研究无人直升机不同飞行速度下雾滴的沉积分布规律，主要围绕速度参数进行试验设计。飞行速度为 3、4、5、6 m/s，飞行高度为 3 m，试验区域长 12 m，区域内 25 张水敏纸 0.5 m 水平间隔安放在收集杆上收集雾滴，收集杆高度为 1 m，水敏纸排布方式如图 13a 所示，重复试验 3 次，图 13b 为喷洒试验现场。

每次试验完成后，将收集的水敏纸进行扫描，并



(a) 水敏纸排布方式示意图



(b) 喷洒试验现场

图 13 喷洒试验

Fig. 13 Spray test

用 Deposition Scan 软件进行分析,得到不同作业参数下雾滴的密度、沉积量及覆盖率。

为了描述试验中各采集点之间的雾滴沉积均匀分布性,本文采用变异系数来衡量各个采集点之间的雾滴沉积均匀性,变异系数表达式为

$$C_V = \frac{S}{\overline{w}} \times 100\% \tag{4}$$

其中

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (w_i - \overline{w})^2 / (n-1)} \tag{5}$$

式中 S——试验中样本标准差,μL/cm^2

w_i——各个采集点沉积浓度,μL/cm^2

$\overline{w}$——采集点沉积密度平均值,μL/cm^2

n——试验采集点个数

4.2 试验结果分析

无人直升机喷雾试验结果如图 14 所示,随着前飞速度的增加,靶标区雾滴总沉积密度逐渐减小,分别为 4.208、3.124、1.766、1.255 μL/cm^2,平均沉积分布为 0.168、0.093、0.071、0.062 μL/cm^2,平均雾滴数为 151、126、92、53 个/cm^2,且靶标中心位置处

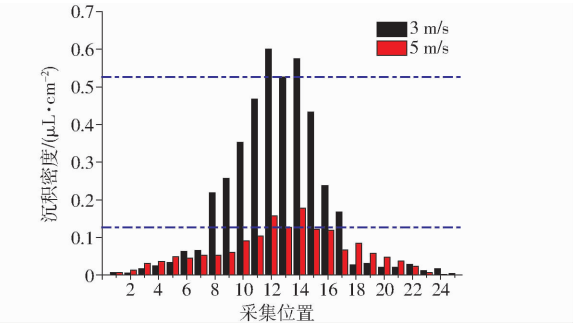


图 14 雾滴沉积分布

Fig. 14 Droplets deposition distribution

靶标 13(对应喷头 5)小于靶标 12(对应喷头 4)和靶标 14(对应喷头 6)雾滴沉积密度。对仿真模拟雾滴沉积总量及实测雾滴沉积密度进行线性拟合分析,结果如图 15 所示,仿真模拟雾滴沉积总量与实测雾滴沉积密度之间呈线性关系,拟合线性方程 $y = -10.30 + 2.144x$,其决定系数 $R^2 = 0.9996$,说明仿真模拟雾滴沉积总量与实测雾滴沉积密度基本一致,基本符合农田现场测量情况。

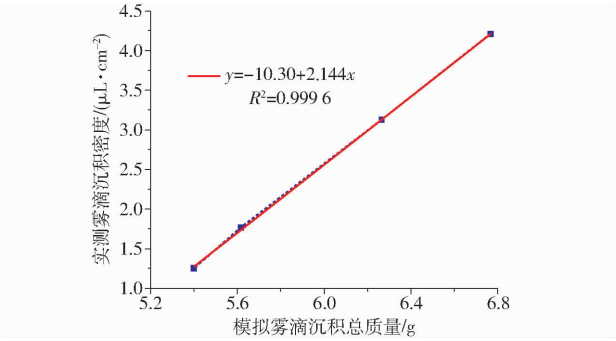


图 15 数值模拟值与田间测量值线性回归分析

Fig. 15 Linear regression analysis of simulated and measured values

5 结论

(1)旋翼左右两侧的速度呈现不对称分布,旋翼 $x/R = 0.8$ 位置处下洗流场垂直方向速度最大,可达 -12 m/s。

(2)通过不同飞行速度下沉积量模拟值与试验值对比可以看出,无人直升机前飞速度与抗飘移系数及沉积量呈直线关系,前飞速度越大,雾滴群的抗飘移性越差,采样面上雾滴沉积量越小;随着采样面高度的增加,雾滴群抗飘移性能增强。

(3)位于喷杆不同位置处喷头的抗飘移性能不同,主要表现在位于喷杆两端的喷头 1 和 9 受到旋翼尾涡的影响,雾滴群抗飘移性能变差,机身正下方的喷头 5 由于机身阻挡作用,造成雾滴群分散性增加,雾滴因垂直方向动能衰减而难以到达采样面,雾滴群抗飘移系数减小。

(4)喷施角度越大,雾滴垂直方向初始速度越小,造成雾滴垂直方向初始动能越小,到达采样面需要更长的时间,抗飘移性能越差。

(5)无论是飞行速度、喷杆相对位置还是喷施角度,对大载荷无人直升机喷雾雾滴沉积和飘移都产生了影响,因此无人直升机的下洗流场是影响无人直升机航空植保作业中雾滴沉积和飘移的重要因素。在植保无人直升机设计中,需要充分考虑飞行参数、喷杆相对位置、喷施角度的设计,充分利用无人直升机的下洗气流增加雾滴的沉积量,综合各个因素将雾滴的飘移量降到最低。

参 考 文 献

1 薛新宇,梁建,傅锡敏. 我国航空植保技术的发展前景[J]. 中国农机化,2008(5): 72 - 74.
XUE Xinyu, LIANG Jian, FU Ximin. Prospect of aviation plant protection in China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2008(5): 72 - 74. (in Chinese)

2 薛新宇,屠康,兰玉彬,等. 无人机高浓度施药对水稻品质的影响[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(12):94 - 98,79. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20131216&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.016.
XUE Xinyu, TU Kang, LAN Yubin, et al. Effects of pesticides aerial applications on rice quality[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(12):94 - 98,79. (in Chinese)

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/OL]. 农业机械学报,2014,45(10):53 - 59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20141009&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.009.
ZHANG Dongyan, LAN Yubin, CHEN Liping, et al. Current 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)

4 FRITZ B K. Role of atmospheric stability in drift and deposition of aerially applied sprays-preliminary results[C]// 2004 ASAE Annual Meeting. ASAE Paper 041031,2004.

5 KIRK I W, FRITZ B K. Aerial methods for increasing spray deposits on wheat heads[C]// 2004 ASAE Annual Meeting. ASAE Paper 041029,2004.

6 秦维彩,薛新宇,周立新,等. 无人直升机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(5):50 - 56.
QIN Weicai, XUE Xinyu, ZHOU Lixin, et al. Effects of spraying parameters of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 50 - 56. (in Chinese)

7 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)

8 HUANG Y B, THOMSON S J, HOFFMANN W C, et al. Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2013, 6(3):1 - 10.

9 王昌陵, 何雄奎, 王潇楠,等. 基于空间质量平衡法的植保无人机施药雾滴沉积分布特性测试[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24):89 - 97.
WANG Changling, HE Xiongkui, WANG Xiaonan, et al. Distribution characteristics of pesticide application droplets deposition of unmanned aerial vehicle based on testing method of spatial quality balance[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 89 - 97. (in Chinese)

10 秦维彩, 薛新宇, 张宋超,等. 基于响应面法的 P20 型多旋翼无人机施药参数优化与试验[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2016, 37(5):548 - 555.
QIN Weicai, XUE Xinyu, ZHANG Songchao, et al. Optimization and test of spraying parameters for P20 multi-rotor electric unmanned aerial vehicle based on response surface method[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2016, 37(5):548 - 555. (in Chinese)

11 薛新宇,兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(5):194 - 201. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130534&flag=1. DOI: 10.60 41/j.issn.1000-1298.2013.05.034.
XUE Xinyu, LAN Yubin. Agricultural aviation applications in USA[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(5):194 - 201. (in Chinese)

12 THISTLE H W, TESKE M E, DROPPO J G, et al. AGDISP as a source term in far field atmospheric transport modeling and near field geometric assumptions[C]// 2005 ASAE Annual Meeting. ASAE Paper 051149,2005.

13 HEWITT A J, MABER J, PRAAT J P. Drift management using a GIS system[C]// Proceedings of the World Congress of Computer in Agriculture and Natural Resources, 2002: 290 - 296.

14 TESKE M E, THISTLE H W. Aerial application model extension into the far field[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(1): 29 - 36.

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

16 RYAN S D, GERBER A G, HOLLOWAY A G L. A computational study on spray dispersal in the wake of an aircraft[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(3): 847 - 868.

17 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)

18 陈盛德,兰玉彬,李继宇,等. 小型无人直升机喷雾参数对杂交水稻冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(17):40 - 46.
CHEN Shengde, LAN Yubin, LI Jiyu, et al. Effect of spray parameters of small unmanned helicopter on distribution regularity of droplet deposition in hybrid rice canopy[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 40 - 46. (in Chinese)

19 任玉新,陈海昕. 计算流体力学基础[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

20 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.