

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.014

植保无人机旋翼下洗气流对喷幅的影响研究

杨知伦 葛鲁振 祁力钧 程一帆 吴亚奎

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 基于 XV-2 植保无人机, 利用流体仿真, 探究了该无人机旋翼下洗气流的速度分布特性。在此基础上, 分析了在下洗气流影响下的雾滴运动方式, 并进行实地测试。仿真分析说明: 旋翼下洗气流从中心向外的流速差使流场从上向下有向外的铺展效应, 使得喷幅增大, 且喷幅与飞行高度成正比; 旋翼外沿的卷扬气流使得喷幅范围内的雾滴沉积数出现 2 个峰值。试验结果表明: 当飞行高度为 6 m 时, 有效喷幅为 10 m; 飞行高度 8 m 时, 有效喷幅为 12 m。2 种飞行高度下的雾滴分布均匀性基本一致。试验结果与仿真结果基本一致。研究结果可为无人机喷雾系统设计和航空植保作业参数的选择提供参考依据。

关键词: 植保无人机; 喷幅; 流体仿真; 卷扬气流

中图分类号: S49; S252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)01-0116-07

Influence of UAV Rotor Down-wash Airflow on Spray Width

YANG Zhilun GE Luzhen QI Lijun CHENG Yifan WU Yalei

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The movement patterns of droplets on a UAV spray platform are quite different from those on a ground spray system because of its height from the target plants and the influence of the down-wash airflow. Few publications have mentioned how the UAV flying height influenced the spray width. Based on XV-2 UAV, by means of flow simulation and iteration calculation and experiments, the velocity characteristics of the rotor down-wash airflow and the movement patterns of droplets as influenced by the down-wash airflow were analyzed. The simulation results revealed that the velocity discrepancy from the middle to the outwards of the down-wash airflow led to an expanding tendency of airflow and thus an expansion of the spraying width. The spraying width was basically proportional to the flying height. The curling airflow around the rotor led to two peak values of droplet deposition within the spray width, which might also lead to an increase of spray drift. The experiment result showed that the effective spray width was 10 m at a flying height of 6 m and 12 m at a flying height of 8 m. The uniformities of deposition distribution were almost the same between each flying height. Considering the uniformities of deposition distribution, efficient spray deposition, spray drift caused by cross wind and injury of plants caused by down-wash airflow, the flying height of the UAV should be correctly chosen from a proper range based on its type and load. The experiment result was consistent with the simulation result. Therefore, the research result explained the influence of UAV rotor down-wash airflow on spray width and it can provide reference for the design of UAV spraying system and the choice of working parameters of UAV spraying.

Key words: UAV; spraying width; flow simulation; curling airflow

0 引言

植保无人机作业过程中距离作物较远, 且有旋翼下洗气流参与, 其雾滴沉积分布规律与地面喷雾

作业有很大差异。国外已有学者^[1-6]应用旋翼无人机对不同作物进行喷雾试验, 探究防治效果。国内张京等^[7]、邱白晶等^[8]、管贤平^[9]通过试验探明无人机喷雾沉积浓度、沉积均匀性等指标与飞机飞行

收稿日期: 2017-05-10 修回日期: 2017-06-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200708, 2017YFD0701400)

作者简介: 杨知伦(1991—), 男, 博士生, 主要从事现代农业装备与计算机测控研究, E-mail: yzl19910711@126.com

通信作者: 祁力钧(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业装备与计算机测控研究, E-mail: qilijun@cau.edu.cn

高度、飞行速度有直接关系。王俊伟等^[10]、杨帅^[11]比较了不同型号旋翼无人机的有效喷幅、作业效率以及适用农药剂型和应用场合。高圆圆等^[12]通过试验探究了 Af-811 小型无人机喷洒不同剂型毒死蜱时的防治效果。薛新宇等^[13]利用 N-3 型无人机探究航空施药方式对稻飞虱和稻纵卷叶螟防治效果的影响,在下洗气流的作用下,雾滴在作物上层和下层的沉积量都比传统的喷雾方式增加。张宋超等^[14]采用计算流体力学(Computational fluid dynamic, CFD)方法对作业过程中旋翼风场和农药喷洒的两相流进行模拟,模拟了实际飘移情况,对实际生产具有一定的指导意义。石强等^[15]利用 CFD 方法对小型无人机作业时的喷雾场进行模拟,指出为了减少飘移应使喷杆长度不超过旋翼直径。

以往的工作主要针对无人机植保作业过程中飞行参数对雾滴沉积与飘移的影响,但飞行高度、飞行速度等参数对于喷幅影响的探索不多。喷雾幅宽是植保机械重要的作业指标,直接影响作业效率和单位面积的农药沉积量。本文拟通过流体仿真,模拟无人机旋翼下洗气流的流场分布,分析在气流作用下的雾滴运动轨迹,预测在不同飞行高度下的喷幅宽度,并进行试验验证。

1 旋翼下洗气流场仿真

1.1 建模与仿真

本文研究对象为 XV-2 型植保无人机,如图 1 所示,其主要性能参数如表 1 所示。



图 1 XV-2 型植保无人机

Fig.1 XV-2 UAV

表 1 植保无人机主要性能参数

Tab.1 Primary flight performance parameters of

XV-2 UAV

参数	数值	备注
飞行作业速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	10	安全飞行速度
作业幅宽/m	8~12	
飞行作业高度/m	5~8	
主旋翼直径/m	4.4	
最大载质量/kg	70	载药量
喷雾流量/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	4.8	
喷头数量/个	6	
雾滴粒径/ μm	150.2	

采用 Solidworks 2016 软件对 XV-2 型植保无人机旋翼建模。

下洗气流属于低速可压缩湍流,目前大多数湍流模型都是低速不可压缩的,但大量计算案例表明,不可压缩湍流模型能够较好地近似代替可压缩湍流模型^[16]。本研究计算模型选择软件内置标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,该模型假设流动形式为湍流,并忽略分子粘性的影响,适用于完全湍流的流动过程模拟。

采用 Flow Simulation 插件对下洗气流进行仿真。模拟环境选择外部流动模拟。旋翼转速设置为 14 r/s。将桨叶所有外表面设置为真实壁面,粗糙度设置为 $5\ \mu\text{m}$ 。选择压强和平均速度作为求解目标。生成计算域,并对计算域进行网格化。检查网格无误后进行运算。

1.2 仿真结果与分析

1.2.1 下洗气流仿真结果与分析

由图 2 可知,气体流线在远离桨叶中心位置的气流有向外扩展的运动趋势,从旋转中心向桨尖处,气流速度呈现增大趋势。气流速度从上到下,整体呈现递减趋势。翼尖处气流变化复杂。桨叶下,高速气流将低速气流包裹在中心。由于在桨叶下中间气流速度慢而周围气流速度快,根据伯努利原理,中间的气流有向周围流动的趋势,因此在远离桨叶中心位置,气流的流线向外弯曲,气流有向外铺展的运动趋势,该处气流将雾滴的横向铺展面增大,造成喷幅增大。此外,翼尖处的卷扬气流也将雾滴卷至旋翼的外围,雾滴下落至地面将使喷幅增加。

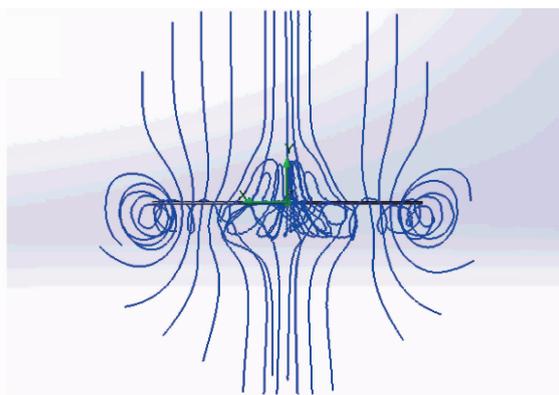


图 2 下洗气流场流线图

Fig.2 Streamlines of down-wash air flow

选取桨叶下 1.1、1.5、2.0 m 3 个不同位置的速度,生成速度分布曲线图。由图 3 可知,1.1 m 和 1.5 m 位置的曲线呈现中间凹陷、两边凸起的趋势,中间凹陷部分速度分布较为均匀。高速气流主要分布在距离旋转轴 2 m 以外的位置。翼尖下 2 m 位置处的曲线几乎无起伏,说明随着气流的向下运动,各个位置的气流速度趋向于相同。由此可见,越靠近

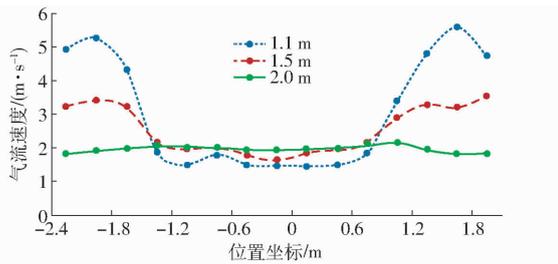
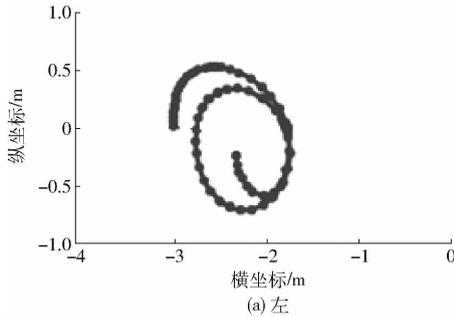
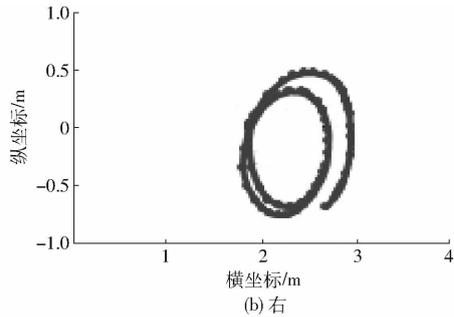


图3 桨叶下各处气流速度分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of velocity on each level



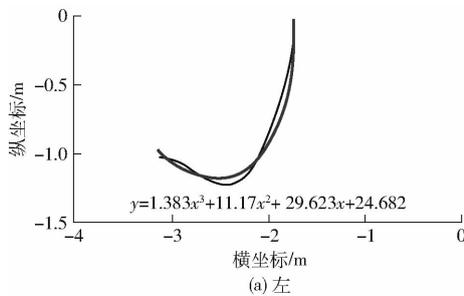
(a) 左



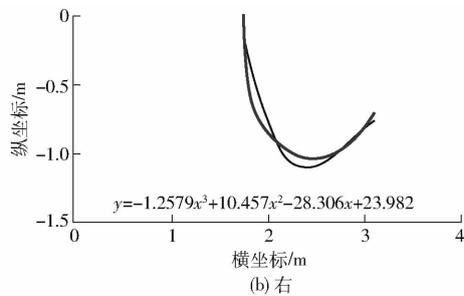
(b) 右

图4 卷扬气流特征曲线

Fig. 4 Characteristic curves of curling streamlines



(a) 左



(b) 右

图5 卷扬气流边界曲线

Fig. 5 Boundary curves of curling streamlines

用三次多项式拟合卷扬气流边界曲线,并求解曲线极值点 $y_1 = -1.057$ 。旋翼下方喷头所产生的雾滴不可避免的会被横向铺展,造成喷幅增大。

1.2.2 雾滴运动方式分析

综合下洗气流的流线和速度分布图可知,雾滴运动主要有3种方式:旋翼中心附近的雾滴竖直向下运动,旋翼外侧的雾滴被气流裹挟形成铺展运动,翼尖处部分雾滴被气流卷起形成卷扬运动。

为了便于讨论,此处可以假设雾滴形成后的最初运动轨迹与下洗气流的流线吻合,并以雾滴能覆盖的水平范围为喷幅范围,在此前提下,通过分析雾滴水平位移来判断喷幅的范围。

(1) 雾滴竖直向下运动

由前文分析可知,旋翼中心附近的雾滴竖直向下运动,且由于该位置附近气流速度较小,压力喷头产生的雾滴在纵向具有较大的速度,因此雾滴可在短时间内沿气流运动方向在旋翼下方沉积。求解两侧卷扬气流边界曲线方程与横坐标轴交点,得到竖

翼尖,雾滴运动受气流的影响越明显,在雾滴最初形成时即被卷起或被横向铺展。

根据下洗气流场的流线图,找出可能造成雾滴横向铺展区域,并划定区域边界。分别生成卷扬气流特征曲线(图4)和边界曲线(图5)。

由卷扬气流特征曲线图可知,可能发生卷扬现象的区域在距离旋转轴 $1.8 \sim 3.0$ m 之间,垂直高度 $-0.8 \sim 0.6$ m 的范围内。

直向下运动的雾滴沉积范围应在机身左侧 1.650 m 至机身右侧 1.674 m 范围内,未超过旋翼直径范围,因此这一部分雾滴不会造成喷幅扩大。

(2) 雾滴铺展运动

根据前文所述,旋翼外侧的雾滴被气流铺展,因此,为了分析喷幅的水平范围,需要研究处于卷扬气流边界处的雾滴在水平方向能到达的最远位置。根据石强等^[15]提出的设计方法,使喷杆长度不超过旋翼直径,则本研究中单侧雾滴释放位置应在旋翼半径 2.2 m 范围内。按照雾滴此时所处流线位置的切线方向继续运动。雾滴所在流线位置的水平分速度 v_x 和垂直分速度 v_y 可分别表示为

$$v_x = V \cos(\arctan y') \quad (1)$$

$$v_y = V \sin(\arctan y') \quad (2)$$

式中 V ——气流速度, m/s

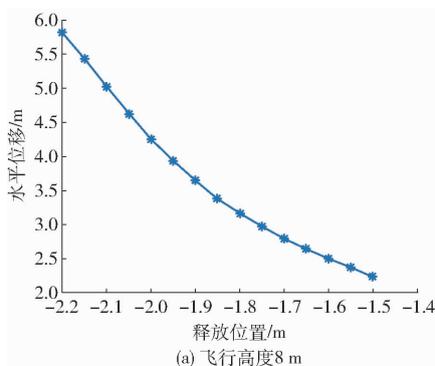
y' ——流线位置坐标导数

雾滴在一定时间内下落的距离 H 可表示为

$$H = \int v_y dt \quad (3)$$

在此时间内,雾滴水平位移 s 可表示为

$$s = \int v_x dt \quad (4)$$



利用 Matlab 7.0 计算得到左侧不同释放位置处的雾滴的水平位移,如图 6 所示。

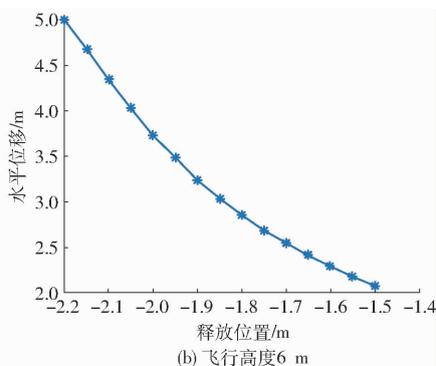


图 6 雾滴水平位移

Fig. 6 Horizontal movement of droplets

由计算结果可知,当飞行高度为 8 m 时,单侧雾滴运动最远水平位移为 5.9 m,则喷幅为 11.8 m;当飞行高度为 6 m 时,单侧雾滴运动最远水平位移为 5.0 m,则喷幅为 10.0 m。

(3) 雾滴卷扬运动

桨叶尖端处的涡旋气流将雾滴卷向空中,形成雾滴卷扬现象。航空喷雾时飞行速度较快,雾滴产生后由于惯性还会随着无人机向前运动,但受到空气阻力后速度会迅速衰减为零。雾滴所受空气阻力为^[17]

$$F = \frac{1}{2} C_{\rho} S v^2 \quad (5)$$

式中 F ——雾滴所受空气阻力, N

ρ ——空气密度, kg/m^3

S ——迎风面积, m^2

v ——雾滴运动速度, m/s

C ——阻力系数,取 0.5

雾滴速度衰减为零的时间为

$$t = \frac{v}{\frac{F}{m}} \quad (6)$$

式中 m ——雾滴质量, g

当雾滴粒径为 $150 \mu\text{m}$,无人机前进速度 $8 \text{ m}/\text{s}$ 时,可计算得到 $t = 0.077 \text{ s}$,即雾滴产生后的极短时间内在无人机前进方向上的速度衰减为零,而无人机仍以 $8 \text{ m}/\text{s}$ 的速度沿着前进方向运动,据此判断雾滴与无人机在前进方向上形成位置滞后。滞后的雾滴在脱离了下洗气流影响之后,在空气中依靠惯性运动,假设雾滴不蒸发,在水平方向上,受空气阻力的雾滴运动的动力学方程可表示为

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = \frac{1}{2} C_{\rho} S \left(\frac{ds}{dt} \right)^2 \quad (7)$$

解方程可得 s 关于时间 t 的关系式

$$s(t) = \frac{2m}{C_{\rho} S} \ln \left(\frac{C_{\rho} S v_x}{2m} t + 1 \right) \quad (8)$$

代入数据计算,结果均为 10^{-3} 数量级,水平运动距离极小,可以忽略不计。因此可以近似地认为,在无风条件下,发生卷扬运动的雾滴在脱离下洗气流影响后的运动为竖直向下运动。由卷扬气流的流线形态可知,雾滴沉积的位置为机身两侧距离旋转中心 $1.8 \sim 3.0 \text{ m}$,这将造成该处雾滴沉积量增大,喷幅范围内的沉积分布变异系数增大。

在竖直方向上,雾滴在空气中下落,直至重力与空气阻力平衡时速度达到稳定,根据斯托克定律^[18]可算得速度临界值

$$v_i = \frac{gd^2 \rho_1}{18\eta} \quad (9)$$

式中 v_i ——末速度, m/s

d ——雾滴直径, μm

g ——重力加速度, m/s^2

ρ_1 ——雾滴密度, kg/m^3

η ——空气粘度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$

当速度超过临界值时,雾滴会减速达到临界值。仍然以雾滴粒径为 $150 \mu\text{m}$ 为例,由式(9)计算可得临界速度为 $0.69 \text{ m}/\text{s}$,而桨叶附近受下洗气流作用的雾滴运动速度远大于临界值,因此在雾滴下落过程中垂直分速度 v_y 将会呈现减小趋势。由前文计算可知,空气阻力对雾滴速度衰减的作用时间极短,因此可忽略此过程,以临界速度近似代替全过程的雾滴垂直分速度。当无人机飞行高度为 H_0 时,雾滴下落时间 t_0 可近似计算得到

$$t_0 = \frac{H_0}{v_i} \quad (10)$$

当飞行高度 H_0 为 6 m 时,下落时间 t_0 约为 8.7 s ;当飞行高度 H_0 为 8 m 时,下落时间 t_0 约为 11.6 s 。

作业过程中,在这一部分雾滴会明显受到侧风影响,造成雾滴沉积变异系数增大,也会造成雾滴飘移。

2 喷幅测试

2.1 试验材料

取样装置为水敏试纸,用于收集雾滴;用清水代替农药作为喷雾试验介质;环境监测装置采用 Harvesting NK4500 型便携气象站,用于测试环境中的风速和风向。飞行作业平台为 XV-2 型植保无人机。

2.2 试验步骤

试验步骤包括采样点布置、环境参数监测、测试过程、雾滴数统计。

2.2.1 采样点布置

采样点布置如图 7 所示,每个圆圈代表一个试验支架,间隔 1 m,横跨 18 m,满足测试喷幅所需的宽度。支架上固定一张水敏试纸。按照预定的飞行参数进行喷雾,试验现场如图 8 所示。喷雾结束后,统计每张水敏试纸上单位面积的雾滴数(个/cm²)。

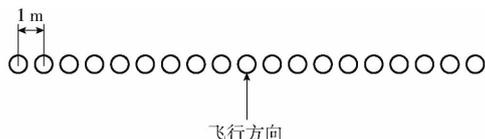


图 7 采样点布置示意图

Fig.7 Sketch of test point



图 8 试验现场图

Fig.8 Test site

2.2.2 环境参数监测

测试场地的温度为 11℃,空气相对湿度 68%,风速为 1.9~4.2 m/s。

2.2.3 测试过程

飞行作业速度设定为 10 m/s。该无人机载质量较大,根据以往测试经验,若飞行高度过低,则下洗气流会使作物倒伏,给作物造成不可逆的伤害。若飞行高度过高,则会造成雾滴大量蒸发和飘移,达不到防治效果。综合考虑,将此次喷雾试验的飞行高度设定为距离地面 6 m 和 8 m。飞行作业过程由操控手全程操作,并配有地面站实时监测。监测人员

通过对讲机将飞行高度和速度实时报给操控手,以便随时调整飞行参数,保证整个过程的可靠性。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

各采样点雾滴分布如图 9 所示。

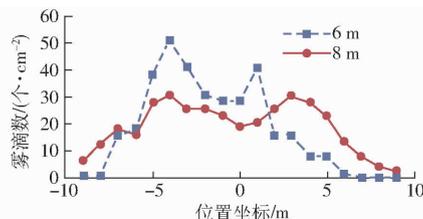


图 9 雾滴数分布图

Fig.9 Distribution of droplet numbers

3.2 结果分析

3.2.1 有效喷幅判定

由图 9 可知,雾滴的分布呈现出中间多两侧少的形态,且在中间集中分布的区域出现 2 个高峰值,整体呈现出类似 M 形的分布。当飞行高度增加时,仍然呈现 M 形,但峰值有明显下降,宽度有明显增加。本研究采用雾滴密度判定法来判定有效喷幅,根据 MH/T 1002—1995《农业航空喷洒作业质量技术指标》的规定:在飞机进行超低容量的农业喷洒作业时,作业对象的雾滴覆盖密度达到 15 个/cm² 以上的范围即可视为有效喷幅^[19]。由图 9 可知,飞行高度 6 m 时,喷幅约为 10 m;飞行高度 8 m 时,喷幅约为 12 m。喷幅范围约为喷杆长度的 2~3 倍,超出此范围的雾滴则视为飘移。

3.2.2 雾滴沉积分布均匀性分析

雾滴沉积分布均匀度采用变异系数 C_v 作为度量^[20]

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \times 100\% \quad (11)$$

式中 X_i ——各采样卡单位面积雾滴数

\bar{X} ——采样卡单位面积平均雾滴数

n ——采样卡总数

经计算,在有效喷幅范围内,飞行高度 6 m 时的变异系数为 33.88%,8 m 时的变异系数为 33.21%。该植保无人机处于不同飞行高度时,雾滴沉积分布均匀性基本一致。

4 讨论

4.1 雾滴数分布呈 M 形

旋翼外沿处存在雾滴卷扬现象,卷扬气流将喷幅外侧的部分雾滴卷到内侧,与喷幅内侧原有的雾

滴叠加,造成喷幅范围内的雾滴数分布出现 2 个峰值,与前文理论推断结果基本一致。飞行高度 6 m 时,沉积量分布呈现较为明显的 M 形,且左侧峰值高于右侧。可能的原因是,旋翼沿着顺时针的方向旋转,当无人机向前飞行时,左桨叶向前运动,与空气的相对速度为桨叶线速度加飞行速度;而右桨叶向后运动,与空气的相对速度为桨叶线速度减飞行速度,此时左桨叶产生的下洗气流强度高于右桨叶,左桨叶翼尖处的卷扬气流较右桨叶尖端处更强,因此会有更多雾滴被搬运到内侧,使得雾滴沉积量的左侧峰值高于右侧。随着飞行高度的增加,雾滴沉降到靶标的时间被延长,雾滴的运动轨迹更容易受到环境中侧风的影响,使得地面沉积情况被重新排布,造成飞行高度 8 m 时 M 形分布的峰值明显下降。应当尽量选择无风的天气进行喷雾作业,以此减少雾滴飘移,保证沉积效果。

造成雾滴数 M 形分布是无人机旋翼自身的气流特性造成的。在无法改变无人机设计的情况下,欲改善雾滴分布均匀性,则需改进喷雾系统设计。可尝试将不同型号的喷头搭配使用,将大喷头安装在喷杆中间位置,将小喷头安装在喷杆外侧,或在喷杆中间加装喷头,以改善喷幅中间雾滴沉积数量不足的情况。

旋翼下洗气流可以在作业过程中使作物叶片翻转,进而使雾滴沉积到叶片背面,增强雾滴在作物冠层的穿透性。本次试验使用铁支架将水敏试纸固定,在下洗气流作用下水敏试纸无法实现翻转,因此靶标背面的雾滴沉积情况尚未知。

4.2 飞行高度对幅宽的影响

由计算可知,飞行高度由 6 m 增加到 8 m 时,喷幅由 10 m 增加到 11.8 m。试验也验证了当飞行高度增加时,喷幅随之增大。在合理作业高度范围 6~8 m 内,当喷杆长度相同时,无人机喷雾的喷幅约为地面植保机械喷幅的 2~3 倍,是由于旋翼外沿下洗气流的铺展效应而造成的结果。铺展运动可分解为竖直分运动和水平分运动,随着飞行高度增加,

竖直分运动过程延长,水平分运动过程也随之延长,因此造成喷幅增大。用线性关系拟合喷幅(W/m)与飞行高度(H_0/m)的关系为

$$W = 0.9H_0 + 4.6 \quad (12)$$

喷幅增大可以提高无人机的作业效率,但受到其他因素,如飘移、分布均匀性、单位面积沉积量等的限制。由雾滴沉积数据可知,当飞行高度增加到 8 m 时,沉积曲线位置明显下降,即单位面积上的雾滴数减少。若飞行高度过高,则会造成各个采样点的雾滴沉积数据均小于 15 个/ cm^2 ,达不到国家标准,则视为无效作业。其次,过高的作业高度会因环境中的风而造成雾滴大量飘移^[21],导致环境污染。但也不能为了减少飘移而使飞行高度过低。研究表明,使用小型四旋翼无人机进行喷雾作业时,若飞行高度小于 1 m,则雾滴沉积效果相对变差^[22]。对于单旋翼无人机,为其提供升力的旋翼只有一个,当载质量相同时,单旋翼无人机的下洗气流场比多旋翼无人机的下洗气流场更强,距离作物太近容易使作物形成倒伏现象,对作物造成不可恢复的损伤。因此,在使用单旋翼无人机进行喷雾作业时,应选择合理的作业高度。

5 结论

(1)单旋翼无人机产生的下洗气流从旋转中心向外气流呈现依次增大的阶梯分布,形成向外铺展的形态,胁迫雾滴使得喷幅扩大。

(2)计算和试验均表明,飞行高度是影响喷幅大小的重要因素,植保无人机当飞行高度为 6 m 时,喷幅约为 10 m;飞行高度为 8 m 时,喷幅约 12 m。实测结果与理论计算基本吻合。不同飞行高度时,有效喷幅内的雾滴沉积分布均匀性基本一致。

(3)造成雾滴分布不均匀(M 形)的原因是旋翼外沿处的卷扬气流将一部分雾滴卷到内侧。可将不同型号的喷头组合使用、在喷杆中间加装喷头等进行改进。

参 考 文 献

- 1 THISTLE H W, WHITE J A, BACKER D M, et al. A buffelgrass aerial spraying pilot project: spray application and deposition [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2014, 30(1):17-24.
- 2 GOUS S, RAAL P, WATT M S. The evaluation of aerially applied triclopyr mixtures for the control of dense infestations of wilding *Pinus contorta*, in New Zealand [J]. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2015, 45(1):1-4.
- 3 VIRET O, SIEGFRIED W, HOLLIGER E, et al. Comparison of spray deposits and efficacy against powdery mildew of aerial and ground-based spraying equipment in viticulture [J]. *Crop Protection*, 2003, 22(8):1023-1032.
- 4 KGORI P M, MODO S, TORR S J. The use of aerial spraying to eliminate tsetse from the Okavango Delta of Botswana [J]. *Acta Tropica*, 2006, 99(2-3):184-199.
- 5 RUKTANONCHAI D J, STONECIPHER S, LINDSEY N, et al. Effect of aerial insecticide spraying on West Nile virus disease-north-central Texas, 2012 [J]. *American Journal of Tropical Medicine & Hygiene*, 2014, 91(2):240-245.
- 6 TSAI M Y, KAI E, YOST R M G, et al. The Washington aerial spray drift study: modeling pesticide spray drift deposition from an

- aerial application[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(33):6194-6203.
- 7 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/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(12):94-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121217&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.017.
- ZHANG Jing, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Influence of spraying parameters of unmanned aircraft on droplets deposition[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(12):94-96. (in Chinese)
- 8 邱白晶,王立伟,蔡东林,等. 无人直升机飞行高度与速度对喷雾沉积分布的影响[J]. *农业工程学报*, 2013,29(24):25-32.
- QIU Baijing, WANG Liwei, CAI Donglin, et al. Effects of flight altitude and speed of unmanned helicopter on spray deposition uniform[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013,29(24):25-32. (in Chinese)
- 9 管贤平. 无人机作业参数对喷雾沉积的影响[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(3):678-680.
- GUAN Xianping. Effects of operating parameters for unmanned aerial vehicles on spraying deposition[J]. *Hubei Agricultural Sciences*,2014, 53(3):678-680. (in Chinese)
- 10 王俊伟,贾峰勇,张梁. 3种旋翼无人机飞行作业参数测定及农药剂型比较[J]. *中国植保导刊*, 2014(增刊1):55-58.
- 11 杨帅. 无人机低空喷雾雾滴在作物冠层的沉积分布规律及防治效果研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2014.
- YANG Shuai. Spray droplet deposition and distribution inside crop canopy and control efficiency applied by unmanned aerial vehicle[D]. Beijing:China Academy of Agriculture Sciences Dissertation,2014. (in Chinese)
- 12 高圆圆,张玉涛,赵西城,等. 小型无人机低空喷洒在玉米田的雾滴沉积分布及对玉米螟的防治效果初探[J]. *植物保护*, 2013, 39(2):152-157.
- GAO Yuanyuan,ZHANG Yutao,ZHAO Youcheng,et al. Primary studies on spray droplet distribution and control effects of aerial spraying using unmanned aerial vehicle (UAV) against the corn borer [J]. *Plant Protection*, 2013, 39(2):152-157. (in Chinese)
- 13 薛新宇,秦维彩,孙竹,等. N-3型无人直升机施药方式对稻飞虱和稻纵卷叶螟防治效果的影响[J]. *植物保护学报*, 2013, 40(3):273-278.
- XUE Xinyu, QIN Weicai, SUN Zhu, et al. The influence of control effect of aerial spray drift on N-3 unmanned spray helicopter on rice planthopper and rice leaf roller[J]. *China Plant Protection*, 2013,40(3):273-278. (in Chinese)
- 14 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)
- 15 石强,管贤平,孙宏伟. 基于CFD的小型植保无人直升机喷雾场数值模拟[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(9):360-364.
- 16 高歌. 计算流体力学[M]. 北京:机械工业出版社, 2015.
- 17 周雨青,叶兆宁,吴宗汉. 球类运动中空气阻力的计算和分析[J]. *物理与工程*, 2002, 12(1):55-59.
- 18 MATTHEWS G A. Pesticide application methods[M]. London: Longman, 1979.
- 19 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,1995:11.
- 20 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. Testing method of spatial pesticide spraying deposition quality balance for unmanned aerial vehicle[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(24):89-97. (in Chinese)
- 21 王玲,兰玉彬,HOFFMANN W Clint,等. 微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016,47(1):15-22. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160103&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.003.
- WANG Ling, LAN Yubin, HOFFMANN W Clint, et al. Design of variable spraying system and influencing factors on droplets deposition of small UAV [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1):15-22. (in Chinese)
- 22 张盼,吕强,易时来,等. 小型无人机对柑橘园的喷雾效果研究[J]. *果树学报*, 2016,33(1):34-42.
- ZHANG Pan, LÜ Qiang, YI Shilai, et al. Evaluation of spray effect using small unmanned aerial vehicle (UAV) in citrus orchard [J]. *Journal of Fruit Science*,2016,33(1):34-42. (in Chinese)