

基于无人机果树冠层卷吸效应的窄弧扇形防漂移喷嘴设计

李毅轩^{1,2,3}, 赵耀辉^{1,2,3}, 汪星星^{1,2,3}

(1. 武汉科技大学 机械自动化学院, 武汉 430081; 2. 冶金装备及其控制教育部重点实验室, 武汉 430081;
3. 机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 武汉 430081)

摘 要: 针对植保无人机对果树冠层喷洒易产生的药液漂移问题, 结合植保无人机对果树喷洒时产生的卷吸效应和扇形喷嘴雾化原理, 设计了一种窄弧扇形喷嘴结构, 并通过对不同冠层压力损失系数下的喷洒过程进行仿真分析, 得到最佳防漂移的窄弧扇形喷嘴结构参数。研究结果表明: 喷嘴内径增大, 液膜与液带结构趋于稳定, 液滴分布均匀, 沉积率先降后升趋势; 冠层压力损失系数降低, 粒径频谱宽度减小, 但沉积率总体提高; 对较厚冠层果树植保时, 选择内径 1.3 mm、狭缝宽度 0.15 mm 的喷嘴, 防漂移性能较好; 对较薄冠层果树植保时, 选择内径 1.03 mm、狭缝宽度 0.2 mm 的喷嘴, 防漂移性能较好; 采用窄弧扇形喷嘴的液滴频谱宽度 >0.7 , 沉积率 $>94.1\%$ 。

关键词: 植保无人机; 窄弧扇形喷嘴; 卷吸效应; 防漂移性能

中图分类号: S491; S220.3

文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2025)01-0079-08

DOI: 10.13427/j.issn.1003-188X.2025.01.013

0 引 言

目前, 病虫害已成为中国农业减产和农产品质量受损的重要原因。据统计, 2022 年全国农作物重大病虫害发生趋势将比 2021 年的均值增加 13.8%^[1], 虫害问题影响农作物的质量, 且造成农作物减产; 大部分农户以农药防治措施为主, 这种防治措施又会产生农产品安全、质量等问题, 降低农产品的经济效益^[2]。

近年来, 农业工作者为增大果树植保时的喷洒效率, 选择使用植保无人机对果树进行喷洒, 植保效率较高, 药液穿透叶片能力较强^[3-5]。王娟等^[6]在研究槟榔树无人机的作业高度对液滴沉积的影响时发现, 作业高度越高, 沉积量越少, 液滴受风场影响产生漂移量越大。张豪^[7-8]对无人机果树喷洒的下洗流场进行仿真和实验研究发现, 果树冠层对旋翼下风场有阻挡作用, 当植保果树的冠层从稀疏到密集时, 果树冠层的压力损失系数变大, 风场的 Z 轴方向速度减小, 旋翼下风场和冠层产生相互作用, 下风场由一般的圆柱形状逐步转变为圆锥状, 风场产生的冠层卷吸效应变得强烈。王昌陵^[9]使用 4 种多旋翼无人机对葡萄园进行喷洒, 研究发现, 旋翼流场产生的吸卷效应是影响无人机喷雾漂移的主要因素。植保无人机在对果树进行喷洒

时, 果树冠层会与旋翼下风场相互作用, 产生卷吸现象, 液滴容易受影响产生漂移。

喷嘴作为植保无人机喷洒的核心零部件, 直接影响漂移特性, 喷嘴种类不同, 其雾化角、粒径分布也不同^[10]。曾爱军^[11]研究喷嘴类型对漂移的影响发现, 小型号圆锥喷嘴比常规扇形喷嘴的漂移潜在性大。Hunter^[12]对比不同喷嘴对无人机工况环境下的漂移情况发现, 在低速状态下, 普通扇形喷嘴的覆盖率为 70% 远高于空气诱导喷嘴和涡轮空气诱导喷嘴 30%~50%。王帅^[13]研究发现, 扇形喷嘴的尖端会产生狭长的喷雾带, 造成液滴粒径较大, 受风场影响小, 不易产生漂移。与其他几种喷嘴相比, 扇形喷嘴不易受药液影响而堵塞, 且受风场影响较小, 不易产生漂移, 适合在植保无人机果树喷洒时使用。

国外诸多学者围绕扇形喷嘴结构和雾化模型开展了研究。Sayinci^[14]对不同喷嘴出口投影进行对比研究发现, 出口结构形状是改变喷嘴雾化特性的有效方法。Chen^[15]对扇形喷嘴进行建模发现, 由于喷嘴的内径和侧面 V 型切口的影响, 会改变喷嘴的雾化喷洒角度, 影响液膜结构的厚度。Zhao^[16]发现通过调节出口结构可以改变液滴尺寸, 对比了 3 种球头结构发现, 扁平型结构的出口流动性能更强。Broumand^[17]研究扇形喷嘴的雾化原理发现, 液膜结构的厚度直接影响液滴的尺寸分布。根据以上研究, 扇形喷嘴狭缝结构影响喷嘴的液膜结构, 液膜结构又会影响液滴的雾化特性。

收稿日期: 2022-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405352)

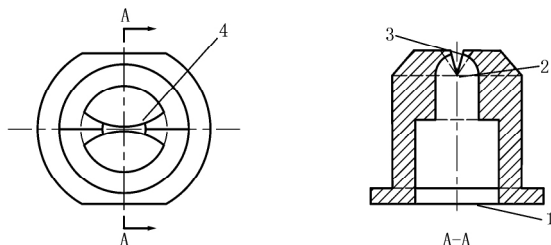
作者简介: 李毅轩(1995-), 男, 武汉人, 硕士研究生, (E-mail) 616788276@qq.com。

因此,结合喷嘴雾化原理和果树冠层卷吸现象提出一种窄弧形扇形喷嘴结构,通过设计扇形喷嘴狭缝出口结构,提高喷嘴的雾化特性,从而提高喷嘴的防漂移性能。

1 结构设计方案

1.1 窄弧扇形喷嘴工作原理

窄弧扇形喷嘴结构中,对喷嘴中心狭缝的结构进行改进,使用窄弧型狭缝替代平行的狭缝结构,喷嘴 V 型切口的宽度随狭缝切口宽度的变化而变化,雾化角包络线两侧的狭缝宽度与中心狭缝宽度相同,狭缝边界的弧度中心与喷嘴中心在同一直线上,如图 1 所示。



1. 喷嘴入口; 2. 中心点; 3. 变 V 型切槽; 4. 窄弧狭缝。

图 1 窄弧扇形喷嘴结构示意图

Fig. 1 The diagram of narrow-arc fan-shaped nozzle structure

窄弧扇形喷嘴出口处的中间液面会形成细薄均匀液膜,随着液膜结构发展,液膜厚度会逐渐增大,且中间厚度会明显小于两边厚度,扇形边缘会形成与液膜厚度相关的液带结构,整体液膜雾化产生粒子会更加均匀,如图 2 所示。

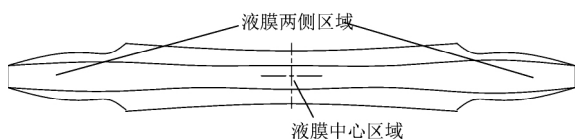


图 2 窄弧扇形喷嘴云液膜结构示意图

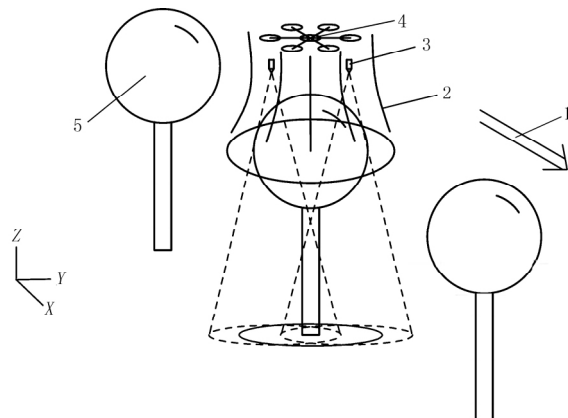
Fig. 2 The diagram of narrow-arc fan-shaped nozzle atomization structure

1.2 窄弧扇形喷嘴雾化角参数设计及计算

多旋翼植保无人机在空中与地面间形成一定的夹角,两个喷头在对称旋翼正下方,喷嘴距离为旋翼轴距。喷洒示意图如图 3 所示。

喷嘴下部的两个雾化云重叠形成的狭长椭圆雾化云,喷洒角度在理想情况下左右恰好包裹冠层区域。由于无人机的飞行方向和植株的排列方向相同,雾化云在 Y 轴方向上的长度越长,在外侧产生的漂移量越多,且旋翼的下风场会在对果树进行喷洒时产生卷吸效应,冠层顶部的旋翼风场整体会有外扩的趋势。考虑到不同冠层结构对雾化云外侧扩散的影响

不同,以单侧喷嘴为例,冠层顶部的喷嘴雾化角度示意图,如图 4 所示。



1. 飞行方向; 2. 旋翼下风场; 3. 扇形喷嘴; 4. 无人机旋翼; 5. 果树冠层。

图 3 果树植保无人机喷洒示意图

Fig. 3 The diagram of fruit tree plant protection UAV spraying

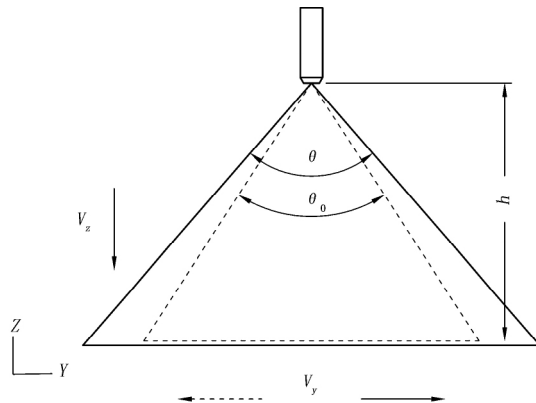


图 4 冠层顶部喷嘴雾化角示意图

Fig. 4 The diagram of canopy top nozzle atomization angle

为避免卷吸效应导致喷嘴雾化角度超出目标区域,假设喷嘴在喷洒中心,则左右两侧受到相同的径向扩散风场速度 V_y ,此时推得修正的喷洒角度 θ_0 为

$$\theta_0 = \arctan\left(\tan \frac{\theta}{2} - \frac{h}{V_z} V_y\right) \quad (1)$$

式中 V_z —旋翼风场的轴向速度 (mm/s);

V_y —旋翼风场的径向扩散速度 (mm/s);

h —喷嘴与冠层顶部距离 (mm);

θ —预估喷洒角度 ($^\circ$)。

不考虑旋翼外侧环境风场的影响,喷嘴的喷洒角度经过修正后,会抵消掉部分由于卷吸效应带来的 Y 轴方向的扩散影响,雾化液滴聚拢,漂移量减少。

以试验结论为设计参数^[7],植保无人机对果树植保试验中,果树冠幅为 3 000 mm,植保无人机的喷嘴间距为 1 520 mm,喷嘴置于旋翼下方高度为 300 mm,喷嘴与冠层顶部距离为 700 mm,经计算喷嘴预估角度

θ 为 $87.8^\circ \sim 93.1^\circ$ 之间, 冠层高度为 500 mm, 径向风速 V_y 取 1 000、2 500 mm/s, V_z 为 8 000 mm/s^[8]。根据修正公式 (1), 最终得到在两种不同压力系数条件下, 喷洒角度 θ_0 为 82.4° 、 86.2° 。

2 窄弧扇形喷嘴结构参数计算

窄弧扇形喷嘴的外部结构近似于中部较窄的对称三棱柱, 上表面为两边带有弧线的平面, 其结构以普通 V 型喷嘴切槽为基础, 狭缝宽度为两条弧线的间距。喷嘴尖端外部狭缝和圆柱出口球面相切, 其结构左右对称, 为方便分析, 将狭缝结构的一半提取出来, 其结构参数如图 5 所示。

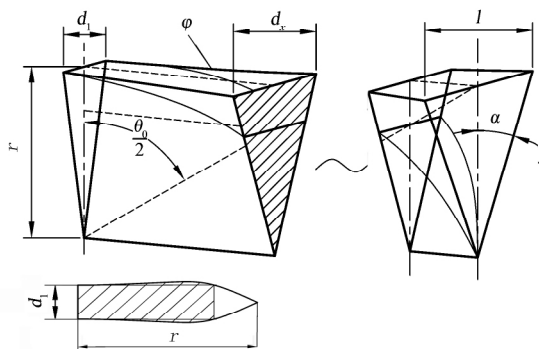


图 5 窄弧狭缝结构参数示意图

Fig. 5 The diagram of narrow-arc tip parameter

图 5 中 r 为喷嘴半径 (mm); d_1 为狭缝宽度 (mm);

$$3\cos^2 \frac{\theta_0}{2} (\tan^3 \alpha + \tan \alpha) r^3 - \left[\left(1 + \frac{3}{2} \cos^2 \frac{\theta_0}{2} + \frac{3}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \right) \tan^2 \alpha - \cos^2 \frac{\theta_0}{2} \cdot \tan \alpha + \cos^4 \frac{\theta_0}{2} + \frac{1}{\cos \frac{\theta_0}{2}} \right] d_1 r^2 + \left(\cos^2 \frac{\theta_0}{2} + \frac{3}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \right) \tan \alpha \cdot d_1^2 r - \frac{1}{4} \left(\cos \frac{\theta_0}{2} + \cos^2 \frac{\theta_0}{2} \right) d_1^3 = 0 \quad (5)$$

喷嘴入口流量取 0.5、0.85、1.2 L/min, 内部压力取 5 bar, 出口压力直接与大气连接压力为 0, 理想状态下 C_d 取 0.9, 根据上述公式进行计算, 对应不同冠层密集程度, 根据 1.2 节数据, 取冠层压力损失系数 C_{ir} 为 6.0、2.0, 喷嘴直径 $d_2 = 2r$, 得到喷嘴结构参数如表 1 所示。

3 模型构建

3.1 控制方程

研究所使用的 VOF-to-DPM 模型是模拟液体从连续相到离散相的过程, 该模型使用 VOF 方法追踪气液界面, 捕获雾化前端的自由液面, 对已经分离的液

φ 为曲率半径 (mm); d_x 为中间狭缝宽度 (mm); l 为 V 型槽宽度 (mm); θ_0 为喷洒角度 ($^\circ$); α 为 V 型槽角度 ($^\circ$)。

根据扇形设计原理^[18], 出口面积和喷嘴半径关系为

$$r = \sqrt{\frac{A_p}{\pi}} / \sin(\theta_0/2) \quad (2)$$

式中 A_p —嘴孔口过流断面面积 (mm^2);

θ_0 —喷洒角度 ($^\circ$);

r —喷嘴半径 (mm)。

喷嘴中流速和出口截面积成反比, 当出流界面稳定后, 出口扇型边界上速度保持均匀, 液膜厚度的大小由出口面积决定。为使得喷嘴的喷洒角度内液膜厚度相同, 假设中间狭缝宽度 d_x 在出口球面上的投影的宽度等于 d_1 , 根据简单几何关系得

$$d_1 = d_x \cos \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

式中 d_x —中间狭缝宽度 (mm);

d_1 —狭缝宽度 (mm)。

其中 r 与 l 的关系为

$$r = \frac{l}{2 \tan \alpha} \quad (4)$$

式中 l —V 型槽宽度 (mm);

α —V 型槽角度 ($^\circ$)。

联立方程得到狭缝宽度 d_1 与喷嘴半径 r 的关系为

团, 如果满足转换标准, 则转换成 DPM 粒子并进行粒子数据跟踪, 包括粒子轨迹和尺寸分布等。

表 1 喷嘴结构参数

Table 1 Nozzle construction parameter

编号	冠层压力 损失系数 C_{ir}	狭缝宽度 d_1/mm	喷嘴直径 d_2/mm
A	2.0	0.10	1.51
B		0.15	1.35
C		0.20	1.03
D	6.0	0.10	1.46
E		0.15	1.30
F		0.20	1.00

其中,VOF 模型是一种跟踪气液的体积分数的基于欧拉方程下的界面跟踪方法,其连续性方程为

$$\frac{1}{\rho_l} \left[\frac{\partial(\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l) \right] = 0 \quad (6)$$

式中 ρ_l —流体密度 (kg/mm^3);
 $\mathbf{v}_l$ —液相的速度矢量 (mm/s);
 α_l —流体体积分数。

惯性系统中的动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (7)$$

式中 F —表面张力 (N);
 $\mathbf{v}$ —液相的速度矢量 (mm/s);
 μ —流体动力粘度 (Pa/s);
 P —流体压力 (Pa);
 g —重力加速度 (mm/s^2);
 F 表达式为

$$F = \sigma_{ij} \frac{\rho k_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (8)$$

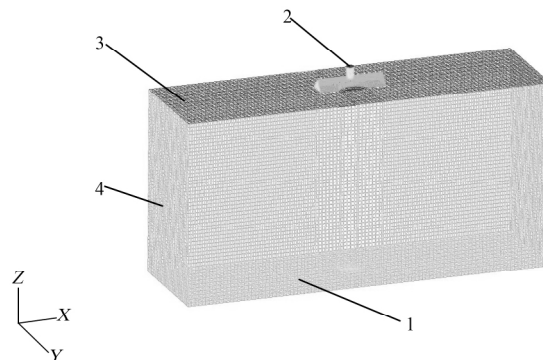
式中 σ —表面张力系数 (N/mm);
 k_i —表面曲率 (mm^{-1});
 ρ —流体密度 (kg/mm^3)。

对于 DPM 模型,液团的转换标准由两项指标组成,即液团尺寸大小是否满足要求、液团非球度是否满足要求,通过前人经验数据设置液团转换尺寸在 $0 \sim 400 \mu\text{m}$ 之间,液团非球度低于 0.7。

3.2 物理模型

本研究主要是针对喷嘴的雾化过程,把喷嘴内外流域简化成一个模型,只对单个旋翼的下端喷嘴流场进行模拟,建立的系统网格模型如图 6 所示,包括扇形喷嘴内流域和 $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的长方体型外流域。喷嘴内流场和外流场都采用结构化网格划分,出口处液体在外流域中形成细薄液膜并破碎成液滴,

需要对网格进行加密,且采用自适应网格细化技术 (Adaptive Mesh Refinement) 用于细化、粗化特定网格。本研究中的 AMR 以基于梯度的体积分数值作为细化、粗化条件。



1. 压力出口; 2. 速度入口; 3. 轴向风场入口; 4. 径向风场入口。

图 6 喷嘴内外流域网格

Fig. 6 The diagram of inner and outside nozzle zone mesh

3.3 网格无关性验证

对喷漆计算模型进行网格无关性验证,以 A 型喷嘴作为验证对象,分别使用单元数为 25 万、40 万、55 万的整体网格,以总体喷洒角度作为对比参数,结果如表 2 所示。每个喷洒角度误差范围在 5% 以内,综合考虑计算耗时和精度求解,最终选择 40 万网格。

表 2 网格无关性验证

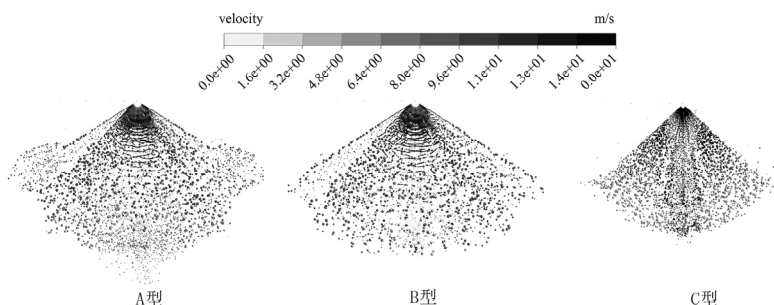
Table 2 Grid independence verification

最终网格数单元	喷洒角度/(°)
71 385	83.81
86 593	85.55
97 311	86.67

4 计算结果及分析

4.1 窄弧扇形喷嘴雾化过程分析

对表 1 的 6 种窄弧扇形喷嘴的雾化过程进行对比,等值面取体积分数为 0.3,区域粒子 scale 比例为 3,其速度云图如图 7 所示。



(a) $C_{ir} = 6.0$ 的 A、B、C 型喷嘴雾化云图

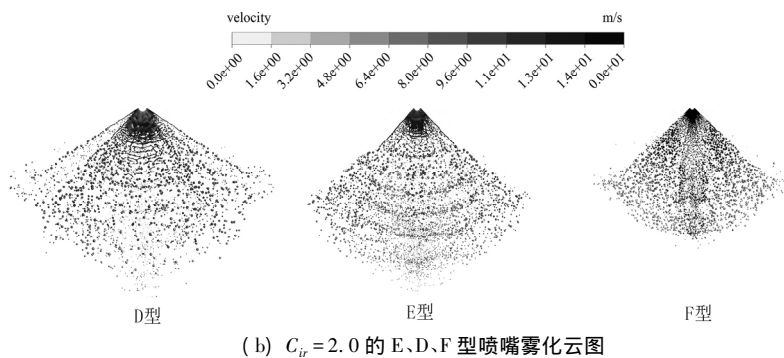
(b) $C_{ir} = 2.0$ 的 E、D、F 型喷嘴雾化云图

图 7 窄弧扇形喷嘴雾化过程云图

Fig. 7 Atomization process diagram of the narrow-arc fan-shaped nozzle counter

由图 7 可知: 喷嘴液膜结构稳定区域随狭缝宽度的变大而变小, 液膜中部区域受到窄弧狭缝挤压产生细长狭小的细带, 与设计目标相同; A、B、C 型喷嘴随着狭缝宽度 d_1 减小, 液带速度逐渐增大, 在狭缝宽度不大于 0.15 mm 时, 液带的速度由 1 200 mm/s 增加到 1 400 mm/s, 液带从两侧逐渐破裂成大粒径的液滴, 其外侧液滴速度进行二次破碎速度逐渐减小, 中部液滴速度最大, 中部液滴破碎更加彻底; 当狭缝宽度为 0.20 mm 时, 出口面积过大, 阻力降低, 液膜速度增大到 1 600 mm/s, 液膜中部形成的液带长度变短, 迅速断裂形成小粒径的液滴。C、E、F 型喷嘴总体趋势和 A、B、C 型喷嘴相同, 但由于径向速度较小, 雾化

云结构更加稳定, 且粒子分布更加均匀。

A、B、D 型喷嘴的外侧对比 C、E、F 型产生了额外的液带区域, A、B、D 型喷嘴直径大于 1.3 mm, 液膜角度范围超过目标值区域, 在液膜边缘两侧的液带区域与主液膜区域之间产生了一定的细小雾化粒子, 外侧粒子分布较为不稳定, 产生的液滴较小, 且受到风场的影响较大。其中, E、F 型喷嘴的整体雾化性能较好。

4.2 喷嘴雾化性能分析

根据 4.1 节雾化结果对外流域内生成的 DPM 雾化粒子液滴进行统计, 如图 8 所示。

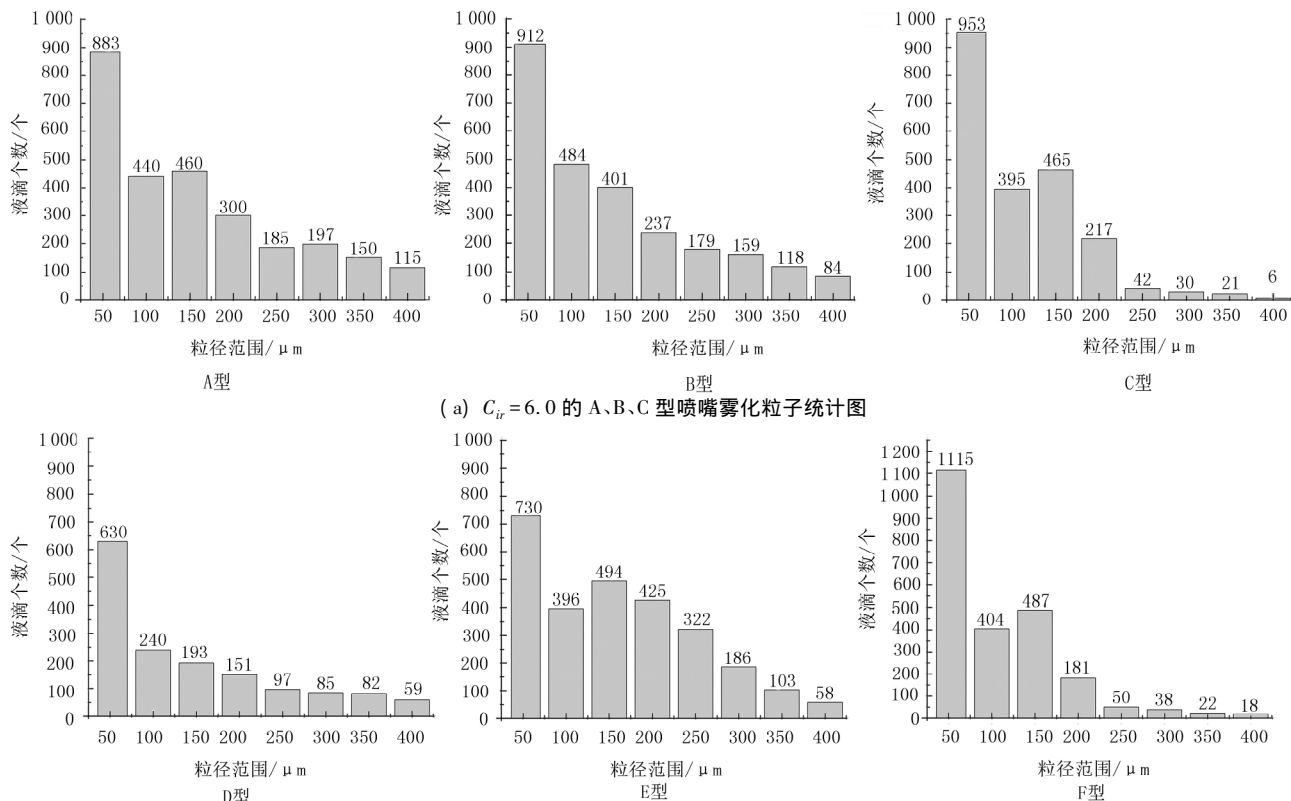
(b) $C_{ir} = 2.0$ 的 D、E、F 型喷嘴雾化粒子统计图

图 8 窄弧扇形喷嘴雾化粒子统计图

Fig. 8 Atomization statistics diagram of the narrow-arc fan-shaped nozzle

由图 8 可知: A、B、E 型喷嘴的 250~400 μm 的大液滴个数比其他几组喷嘴的液滴个数多; D、E 型喷嘴小于 100 μm 的小液滴粒径比其他几组喷嘴的液滴个数少; C、F 型喷嘴的大于 250 μm 的液滴极少, 雾化程度更加彻底; 而 C、E、F 型喷嘴的粒径在 150 μm 处有集中的趋势, 粒径尺寸分布相对稳定。通过粒径频谱宽度 S 计算方法^[19] 对统计数据进行计算, 如图 9 所示。

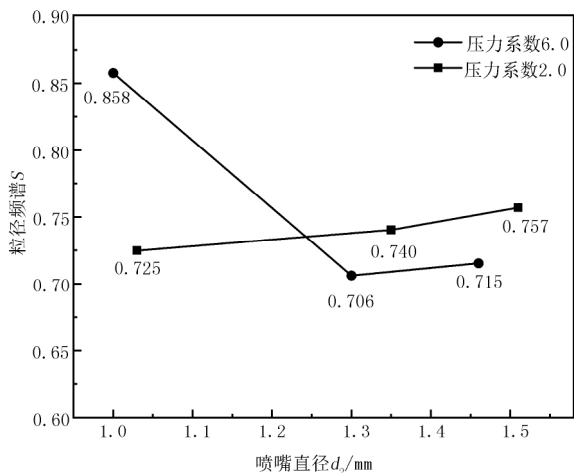


图 9 不同喷嘴直径的喷雾频谱宽度对比图

Fig. 9 Diagram of spectrum width of spray with different nozzle

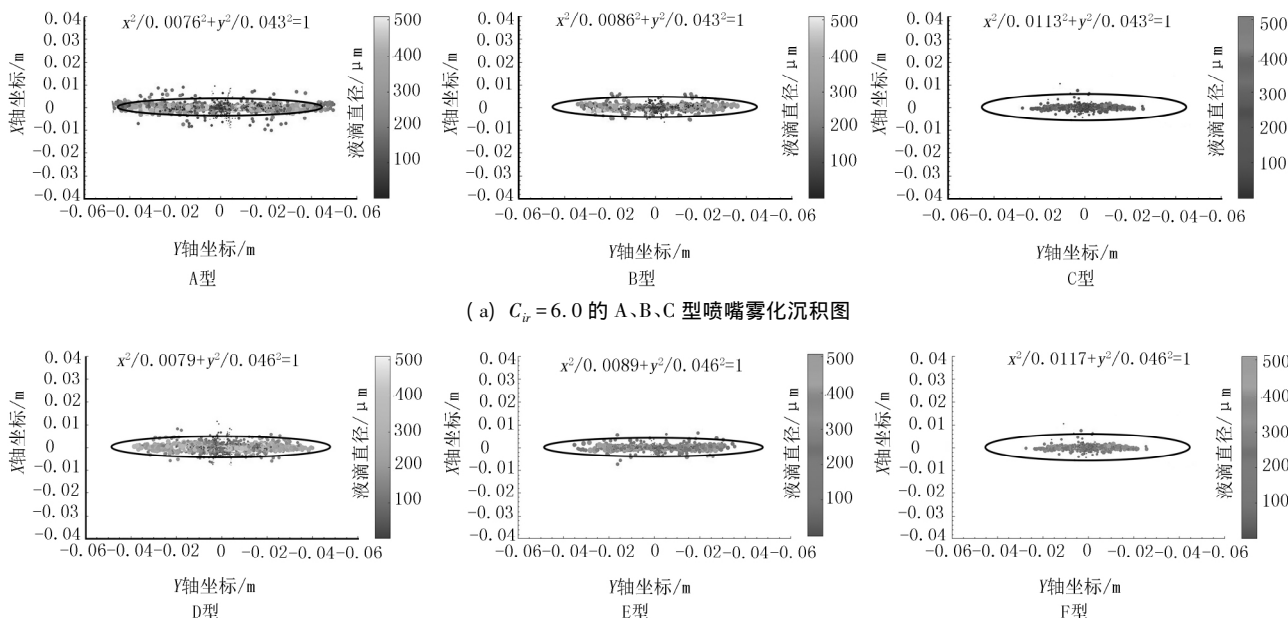
在果树冠层压力损失系数较大的工况情况下, A、B、C 型喷嘴随内径增大, 其液滴粒径的频谱宽度 S 逐

渐增大, 液滴粒径分布逐渐均匀; 在冠层压力损失系数较小的工况下, E、D 型喷嘴的粒径频谱宽度的变化规律相同, 但对比 A、B 型喷嘴的粒径频谱宽度 S 较小, 其均匀度接近 0.6, 雾化均匀度相比较差; F 型喷嘴的频谱宽度 S 为 0.857 6 较接近于 1, 根据粒径分布规律^[20], 液滴的粒径分布更加均匀, 结合图 8F 型的粒径分布图可知, 主要是由于液滴粒径尺寸主要集中在小于 200 μm 的范围, 总体液滴粒径尺寸偏小。

4.3 喷嘴沉积图分析

在喷嘴喷洒稳定后, 增加一个喷嘴循环周期为 0.005 s 喷洒时间, 对外流域底端喷嘴出口面上通过的液滴进行捕获, 沉积面边线公式以椭圆出口的投影几何关系确定, 其喷嘴在两种不同压力系数的条件下粒子沉积如图 10 所示。

由图 10 可知: A、D 型喷嘴的沉积形状呈哑铃形, 中间区域沉积的小粒径液滴较多, 漂移出沉积范围的液滴粒径较大, 主要分布在中间部分; B、E 型喷嘴的沉积面形状为细长椭圆形, 在沉积面外的液滴较多, B 型喷嘴漂移液滴粒径较大, 分布在沉积面的左右两侧, 防漂移效果较差; E 型喷嘴的中部漂移小粒径液滴较多, 在无人机飞行速度较快时可能会产生前后部的漂移; C、F 型喷嘴的沉积形状呈短长条型, 沉积量较为密集。



(a) $C_{ir} = 6.0$ 的 A、B、C 型喷嘴雾化沉积图

(b) $C_{ir} = 2.0$ 的 D、E、F 型喷嘴雾化沉积图

图 10 窄弧扇形喷嘴雾化沉积图

Fig. 10 The diagram of the narrow-arc fan-shaped nozzle atomization deposition

结合 Wang^[19] 对扇形喷嘴在不同风场下的漂移特性实验研究结果发现(见图 11): 粒径频谱宽度范围在

1.03~1.51 之间, 径向风速为 1 000 mm/s 的情况下, 准确沉积率最低为 90%, 窄弧扇形喷嘴的粒径频谱宽

度范围在 0.706~0.858 之间,沉积率在 94.1% 以上,防漂移效果较好,符合设计目标要求。

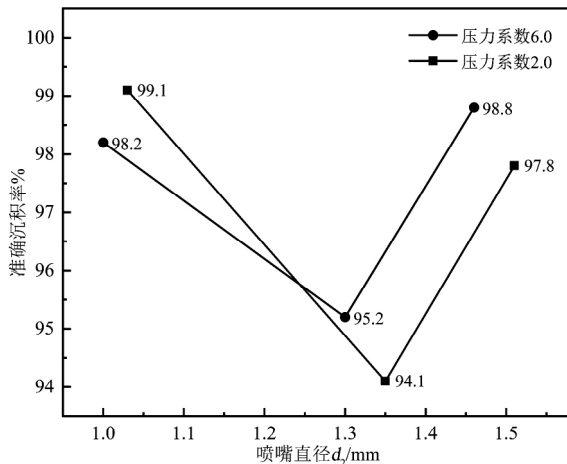


图 11 不同喷嘴直径液滴沉积率图

Fig. 11 Diagram of deposition of spray with different nozzle

5 结 论

1) 结果表明: 所有喷嘴沉积率在 94.1% 以上, 沉积效果显著; 粒径频谱均大于 0.7, 粒径分布均匀, 狭缝结构对于漂移性能有显著提升。

2) 喷嘴内径增大时, 液膜与液带结构趋于稳定, 沉积率呈先降后升趋势; 冠层压力损失系数降低, 粒径频谱宽度减小, 但沉积率总体提高。

3) 综合多种喷嘴雾化特性进行比较, 在较厚冠层果树植保过程中, 喷嘴直径取 1.30 mm、狭缝宽度取 0.15 mm 时, 防漂移性能较好; 在较薄果树冠层植保过程中, 喷嘴直径取 1.03 mm、狭缝宽度取 0.20 mm 时, 防漂移性能较好。

参考文献:

- [1] 刘杰, 姜玉英, 黄冲, 等. 2021 年全国粮食作物重大病虫害发生趋势预报 [J]. 中国植保导刊, 2021, 41(1): 37-39, 42.
- [2] 谢文杰. 农业有害生物防治中减量控害增效技术的应用 [J]. 农业开发与装备, 2019(4): 83.
- [3] 郑瑞华. 果树病虫害防治中的农药污染及治理途径创新 [J]. 现代园艺, 2019(5): 152-153.
- [4] 姜业元, 曹佃龙, 高磊, 等. 果园精准施药技术的现状与发展趋势分析 [J]. 南方农机, 2021, 52(15): 44-46.
- [5] 柳琪. 无人机在果园植保中越来越成熟 [J]. 农机市场, 2021(7): 23-25.
- [6] 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.
- [7] 张豪, 祁力钧, 吴亚垒, 等. 无人机果树施药旋翼下洗气流场分布特征研究 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 44-54.
- [8] 张豪, 祁力钧, 吴亚垒, 等. 基于 Porous 模型的多旋翼植保无人机下洗气流分布研究 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 112-122.
- [9] 王昌陵, 何雄奎, 曾爱军, 等. 基于仿真果园试验台的植保无人机施药雾滴飘移测试方法与试验 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 56-66.
- [10] 何勇, 肖舒裴, 方慧, 等. 植保无人机施药喷嘴的发展现状及其施药决策 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 113-124.
- [11] 曾爱军, 王昌陵, 宋坚利, 等. 风洞环境下喷头及助剂对植保无人飞机喷雾飘移性的影响 [J]. 农药学报, 2020, 22(2): 315-323.
- [12] HUNTER J E, GANNON T W, RICHARDSON R J, et al. Coverage and drift potential associated with nozzle and speed selection for herbicide applications using an unmanned aerial sprayer [J]. Weed technology, 2020, 34(2): 235-240.
- [13] 王帅. 扇形喷嘴的雾化特性研究及粒径试验分析 [D]. 镇江: 江苏大学, 2021: .
- [14] SAYINCI B. Effect of strainer type, spray pressure, and orifice size on the discharge coefficient of standard flat-fan nozzles [J]. Turkish journal of agriculture and forestry, 2015, 39(5): 692-704.
- [15] CHEN C, LI S, WU X, et al. Construction of a theoretical model for fan nozzles with precise atomization angles for plant protection [J]. Chemosphere, 2022, 287: 132017.
- [16] ZHAO C, ZHANG C, BO C, et al. Design and optimization of fan-shaped nozzle structure based on CFD [C]//2020 3rd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA). IEEE, 2020: 145-149.
- [17] BROUMAND M, ASGARIAN A, BUSSMANN M, et al. Spatio-temporal dynamics and disintegration of a fan liquid sheet [J]. Physics of fluids, 2021, 33(11): 112109.
- [18] 张晓东, 董志国, 郝鹏飞, 等. 扁平扇形喷嘴设计及试验研究 [J]. 机械设计与研究, 2008(1): 89-92.
- [19] WANG J, LIANG Q, ZENG T, et al. Drift potential characteristics of a flat fan nozzle: a numerical and experimental study [J]. Applied sciences, 2022, 12(12): 6092.
- [20] 许童羽, 于丰华, 曹英丽, 等. 粳稻多旋翼植保无人机雾滴沉积垂直分布研究 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 101-107.

Design of Narrow-arc Fan-shaped Anti-drift Nozzle Based on Entrainment Effect of Fruit Tree Canopy of UAV

Li Yixuan^{1 2 3}, Zhao Yaohui^{1 2 3}, Wang Xingxing^{1 2 3}

(1. College of Mechanical Automation Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology of Ministry of Education, Wuhan 430081, China; 3. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan 430081, China)

Abstract: Aiming at the problem of liquid drift caused by plant protection UAV spraying fruit tree canopy, a narrow arc fan nozzle structure is designed by combining the entrainment effect and fan nozzle atomization principle when plant protection UAV sprays fruit tree canopy, through the simulation analysis of the spraying process under different canopy pressure coefficients, the structural parameters of the narrow-arc fan-shaped nozzle with the best anti-drift were obtained. The results show that as the inner diameter of the nozzle increases, the structure of the liquid film and liquid belt tends to be stable, the distribution of droplets is uniform, and the deposition rate first decreases and then increases; the canopy pressure loss coefficient decreases, and the width of the particle size spectrum decreases, but the overall deposition rate improvement. For thick canopy fruit tree planting, choose a nozzle with an inner diameter of 1.30 mm and a slit width of 0.15 mm, with a particle size spectrum width of 0.706 and a deposition rate of 95.2%. For plant protection of thin canopy fruit trees, choose an inner diameter of 1.03 mm and a slit width of 0.20 mm, the nozzle has a particle size spectrum width of 0.858 and a deposition rate of 98.2%. The droplet spectrum of the narrow-arc fan-shaped nozzle is greater than 0.7, and the deposition rate is greater than 94.1%.

Key words: plant protection UAV; narrow-arc fan-shaped nozzle; entrainment effect; anti-drift performance

(上接第 78 页)

Abstract ID: 1003-188X(2025) 01-0072-EA

Design and Experiment of SCARA-based Flexible Grape Picking Robot Arm

Yang Yulu, Li Changyong

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Ürümqi 830047, China)

Abstract: To address the problems of today's small grape growing environment, complex environment and less flexibility of space movement and weaker obstacle avoidance ability of common articulated robotic arms. Also to adapt to the characteristics of grape plants with fewer branches, fewer obstacles in the lower layer and more branches, more obstacles in the upper layer, design and manufacture a flexible robotic arm based on SCARA robotic arm with SCARA robotic arm in the bottom and flexible robotic arm part. Also develop its human-computer interaction system. Determine the end space position of the robot arm and the kinematic relationship of the robot arm by analyzing the mechanical structure and working principle of the robot arm, and draw its working space by using MATLAB. At the same time, the upper computer system and the lower computer system cooperate with each other to realize the position motion control of SCARA robotic arm and flexible robotic arm.

Key words: picking; flexible robotic arm; movement space; kinematic solving; SCARA robot arm; grape