

果园自走式弥雾喷雾机设计与仿真分析

邬圣贤, 张克平, 王久鑫

(甘肃农业大学 机电工程学院, 兰州 730070)

摘要:为解决低矮密植果园操作受限、传统大型施药设备入园困难、作业效率低和药液浪费严重等问题,设计研发了一款果园自走式弥雾喷雾机。该机具采用脉冲喷雾形式,通过高速气流提高喷雾的穿透性,增加冠层覆盖率,减少飘移,完成喷雾机整体结构和行走系统、喷雾系统、弥雾装置等关键部件设计,确定相邻两个弥雾装置喷口的垂直间距为 420 mm,夹角为 13° 。利用 ANSYS-Fluent 软件建立喷雾系统的三维流场模型,采用 Realizable $k-\epsilon$ 和 DPM 颗粒模型,仿真分析了喷雾速度变化、颗粒浓度变化和流场分布。对喷雾机作业过程进行现场试验,对比仿真结果,喷雾速度相对误差为 5.75%,喷雾距离相对误差为 7.52%,喷雾高度相对误差为 6.84%。研究结果可为果园喷雾机的结构优化提供理论支撑。

关键词:农业工程;喷雾机;脉冲式;流场仿真;湍流模型

中图分类号:S491 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)11-3762-12

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240140

Design and simulation analysis of orchard self-propelled mist sprayer

WU Sheng-xian, ZHANG Ke-ping, WANG Jiu-xin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A self-propelled orchard mist spray was designed and developed to solve the problems of limited operation in low and dense orchards, difficulty in entering traditional large-scale spraying equipment, low operating efficiency and serious waste of liquid medicine. The machine adopts the form of pulse spray, improves the penetration of spray through high-speed air flow, increases canopy coverage, reduces drift, completes the design of the overall structure of the spray machine and key components such as the walking system, spray system, and fog dispersion device, and determines that the vertical spacing between the nozzles of two adjacent fog dispersion devices is 420 mm, and the included angle is 13° . The three-dimensional flow field model of spray system is established by using ANSYS Fluent software, and the Realizable $k-\epsilon$ And DPM particle model, the change of spray velocity, particle concentration and flow field distribution were simulated and analyzed. The field test was carried out on the operation process of the spray machine. Compared with the simulation results, the relative error of spray speed was 5.75%, the

收稿日期:2024-02-03.

基金项目:甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-29);甘肃省重点研发计划项目(23YF7GA10);兰州市科技计划项目(2019-4-55).

作者简介:邬圣贤(1997-),男,博士研究生.研究方向:农业装备设计与虚拟仿真.E-mail:1304663885@qq.com

通信作者:张克平(1981-),男,教授,博士.研究方向:饲草机械及生物质复合材料.E-mail:zhangkp@gsau.edu.cn

relative error of spray distance was 7.52%, and the relative error of spray height was 6.84%. The research results can provide theoretical support for the structural optimization of orchard spray.

Key words: agricultural engineering; spray machine; pulse type; flow field simulation; turbulence model

0 引言

目前果园植保主要依赖喷施化学农药进行病虫害防治,先进的施药技术与植保机械是提升农药利用率、提高作业效率、增强防治效果的重要手段^[1,2]。但针对我国果园低矮密植种植方法特点,传统喷雾难以满足果树冠层药液附着的需求,存在大量农药飘移^[3,4]。因此,改进传统喷雾系统,对提高冠层的药液附着率和减少药液雾滴飘移具有重要作用^[5]。

近年来,国内外学者利用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)对果园喷雾机风场和流场开展了大量研究^[6-8]; Endalenw等^[9,10]利用CFD对穿过冠层的气流进行建模,模拟不同类型和几何结构的喷雾机出风口速度变化,证实各喷雾机的平均峰值射流速度均表现出逆线性衰减行为。Duga等^[11,12]利用计算机建模辅助分析喷雾飘移行为,用不同喷嘴布置方式的果园飘移测量结果验证了模型的正确性。Hong等^[13,14]通过建立模型并采用拉格朗日粒子运输模型对移动喷雾机作业时排出的农药液滴进行跟踪,结果表明随着树木叶片密度的增加,冠层喷雾沉降也显著增加,空中飘移和地面沉降减少。樊桂菊等^[15]分析模拟自然风、V型风速、喷雾压力对雾滴沉积中心飘移距离的影响规律,确定风速作业和优化区间。Vijay等^[16]改变几何结构进行测试,对脉冲射流的工况进行表征,揭示了可靠的脉冲射流工作需要压力峰值和燃烧事件之间进行适当的耦合。Meng等^[17]探究了脉冲燃烧的实验和理论,分析了CFD工具在脉冲燃烧过程建模中的重要作用。蒋雪松等^[18]对脉冲式弥雾装置进行了工作频率的影响研究,构建了烟雾或水雾工作频率的数学模型,结果表明实际工作频率与药液流量、燃油消耗率之间均呈负比例关系。汪东等^[19]改装脉冲式烟雾机的结构,测试喷雾前后的气流速度和喷雾工况下的雾滴粒径分布,证明了喷管中心线上的雾滴雾化充分,离中心轴线越远位置的雾滴增大越明显。基于CFD方法对于特定类型的喷雾机,经过试验数据验证的风场模型

将是一种便捷、可有效分析喷雾机外部风场的工具^[20-22]。

本研究针对果园人工喷雾劳动强度高、作业效率低、传统喷雾机穿透性弱,且对于复杂地形的行走稳定性差等问题,设计了一款果园自走式弥雾喷雾机,基于CFD技术仿真分析喷雾系统外流场分布,并通过试验验证喷雾系统可靠性,以期喷雾机具研发与改进提供技术支撑和借鉴。

1 结构设计及工作原理

1.1 整机设计

果园现代化的种植模式主推宽行矮砧密植种^[23,24],该果园作业空间较为狭小,每亩栽植密度为110~180株。本文以行距约4~5 m的高纺锤形果树为研究对象,其树高约3.5~4.0 m,株距为1.0~1.5 m。结合其农艺特点与农机适配需求,在满足植保作业标准的条件下,对自走式弥雾喷雾机整体结构及喷雾系统进行设计,并明确相应技术要求。

1.1.1 设计依据

(1)自走适应性:喷雾机行走系统采用前置后驱布置,万向联轴器的传动轴驱动安装在差动器中以分配动力到后轮,从而实现后轮驱动模式。车辆转弯时,通过转向液压杆的伸缩驱动转向连接件,使前车轮同方向转弯。整机结构紧凑、转向灵活、路面适应性强,在密植果园中具有良好的通过性。

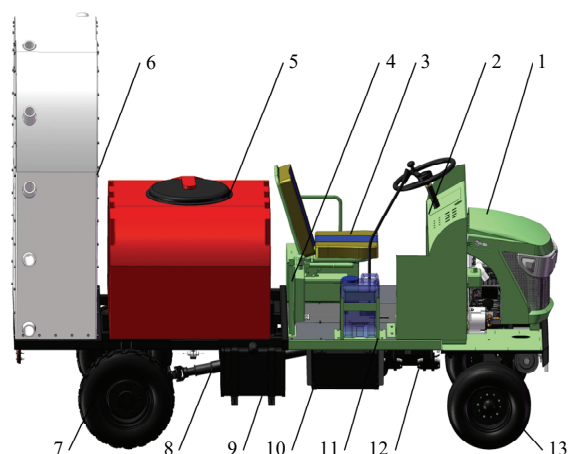
(2)喷雾方式:雾化程度是评价喷雾性能的重要参数,雾化程度差会导致叶片与果面接触药液浓度加大,药液残留形成大面积的果锈药害。为解决这一问题,选用热雾弥散的喷雾方式,提高药液雾化程度。脉冲式弥雾装置产生的高速气流,能提高药液的穿透能力,提高冠层树叶正反面药液覆盖率,并减少药液的飘失,有效提高雾滴沉积量和作业效率。

(3)喷雾系统:喷雾机的喷雾系统采用独立雾化单元,针对果园单行双侧施药的设计,弥雾装置呈对称结构挂载,其作业幅宽为6~18 m,利用驾驶室的工作台,控制作业时两侧弥雾装置不同数

量的开启,根据矮砧密植果园果树的树形,对果树冠层进行一定高度内的调节。

1.1.2 整机结构

果园自走式弥雾喷雾机主要由主架、清水箱、行走系统、喷雾系统、工作台、液压油箱等组成,整机结构如图1所示。其中,行走系统由前脸、变速箱、万向联轴器、从动桥、驱动桥等组成,位于前脸的发动机驱动变速箱,提供动力至驱动桥使喷雾机行驶;喷雾系统主要由弥雾装置、气泵、电磁阀等组成;工作台的控制由 SIMATIC S7-200 SMART 系列 PLC 和继电器等组成,继电器线圈连接控制电路,继电器开关连接主电路,工作流程如图2所示。工作台上按钮将电流信号输入 PLC,通过 PLC 输出端将电流信号传输至继电器,使其线圈得电将继电器开关闭合,油泵打开,同理,继电器另一侧开关连接至电磁阀,将信号传输至电磁阀,水阀打开。驾驶人员可实现单独完成作业状态点火、喷雾、熄火等功能,以满足不同



1.前脸;2.工作台;3.座椅;4.液压油箱;5.药箱;6.喷雾系统;7.驱动桥;8.万向联轴器;9.油箱;10.电瓶;11.清水箱;12.变速箱;13.从动桥

图1 果园自走式弥雾喷雾机结构示意图

Fig. 1 Orchard self-propelled mist sprayer structure diagram

树冠高度下的工况作业需求,整机主要技术参数如表1所示。

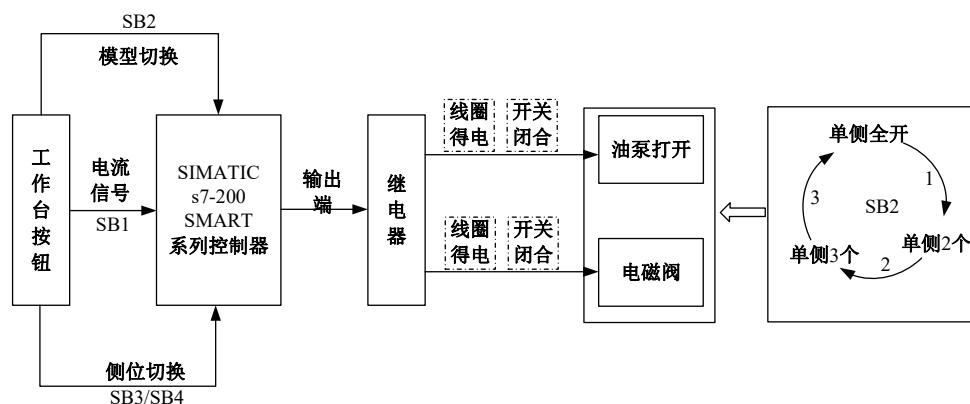


图2 工作台控制流程图

Fig. 2 Working platforms control flowchart

在图2所示的流程图中,SB1为喷雾系统开机指令;SB2为模式切换,模式分别为单侧2个,单侧3个和全开状态,其中模式以1,2,3,1,2,⋯方式循环切换;SB3为喷雾系统单侧左端开关指令;SB4为喷雾系统单侧右端开关指令。

1.2 喷雾机关键部件设计

1.2.1 喷雾系统设计

相较于传统机械喷雾方式,脉冲式弥雾具有雾化程度高、工作效率高等优点,以脉冲发动机为动力输出的弥雾装置的工作效率是同类传统喷雾方式20倍以上^[25]。设计的喷雾系统单侧结构如图3所示。

喷雾系统固定在主架的后框架上方,利用油箱供油,如图3所示,同一高度下弥雾装置以对称

结构分布在喷雾系统,药箱固定在中间框架上方,利用水泵为喷雾机提供药液传输;弥雾装置通过支撑件刚性固定在立板,喷口沿侧板圆孔处伸出;打气泵后置于弥雾装置底端发动机并固定于立板,通过马达运转从而驱动活塞进行打气,打出的气体经过气管导入喷雾机化油器,为弥雾装置发动机工作提供空气流,电磁阀连接在支撑管并对其固定于立板,使喷雾系统完成控制信号以控制开关状态,在主药液管道中安装电磁流量阀,利用工作台的PLC控制端完成调控。

为使喷雾更为均匀和全面,设计同侧板的相邻弥雾装置的垂直高度差和夹角相等,对弥雾装置的安装需满足约束条件:

表 1 果园自走式弥雾喷雾机主要技术参数
Table 1 Orchard self-propelled mist sprayer main technical parameters

参 数	数值/形式
结构形式	自走式(前置后驱)
车身 (长×宽×高)/mm×mm×mm	3 300×1 280×1 270
喷雾系统 (长×宽×高)/mm×mm×mm	500×1 265×1 720
整机重量/kg	1 860
作业速度/(m·s ⁻¹)	3~8
药箱容积/L	880
喷雾水平射程/m	≥8
喷雾垂直射程/m	3~12(自测)
作业模式	脉冲式弥雾装置
弥雾装置数量	10
单个弥雾装置耗水量/(L·h ⁻¹)	60
单个弥雾装置耗油量/(L·h ⁻¹)	3.6
配套动力/HP	30
工作频率/Hz	1 800

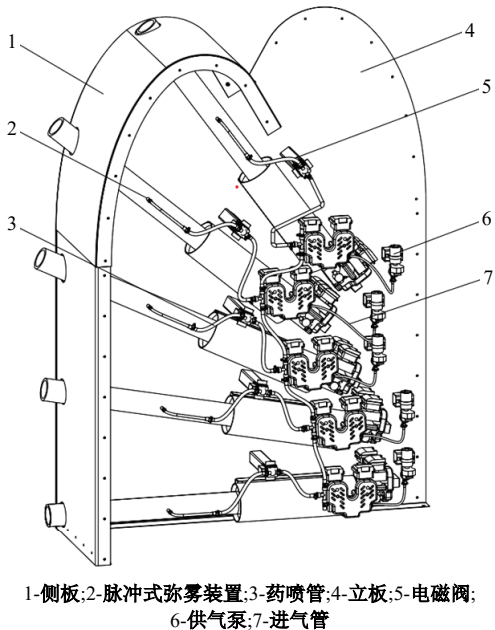


图 3 喷雾系统单侧结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the unilateral structure of the spraying system

$$\begin{cases} k_1 f'' \leq (f - x_0) \leq k_2 f'' \\ 0 < f'' - f - (\frac{L}{2} - x_0) \leq f' \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$f = h \cot(\alpha - \frac{\beta}{2}) \quad (2)$$

$$f' = h [\tan(\frac{\beta}{2} + \alpha - \frac{\pi}{2}) - \tan(\frac{\beta}{2} + \alpha - \gamma - \frac{\pi}{2})] \quad (3)$$

$$f'' = h [\tan(\frac{\beta}{2} + \alpha - \frac{\pi}{2}) + \cot(\alpha - \beta)] \quad (4)$$

式中: k_1 为最小重叠系数; k_2 为最大重叠系数; x_0 为喷头到上层中心的垂直距离,m; L 为果树上层高度,m; f 为喷头安装水平面右侧幅宽,m; f' 为舍弃喷雾,m; f'' 为单喷头喷幅,m; h 为喷头到冠层中心面的距离,m; α 为喷头与水平面夹角,°; β 为喷头标定喷雾角,°; γ 为局部喷雾角,°。

喷雾机工作时, k_1 取值 15%, k_2 取值 30%, γ 取值 5%~10%,喷头距果树冠层中心面为 50~150 mm, L 经过实际测量为 0.5~1.0 m。为保证降低不同弥雾装置的喷雾重复率,安装夹角取值为 13°,由式(1)~式(4)计算可知,相邻两个弥雾装置喷口的垂直间距取值为 420 mm。

1.2.2 脉冲式弥雾装置设计

脉冲式弥雾装置主要由燃烧室、喷管、火花塞、单向阀、化油器和药液喷嘴等部分构成,其结构如图 4 所示。工作时依靠脉冲发动机燃烧后管内气流的自激自吸形成脉冲燃烧振荡,在振荡过程中利用燃烧室内热气流的压力波动实现油箱自动吸油、化油器吸气及泵药等功能。

在正常工作状态下,可燃气体进入燃烧室,由上一循环的余火或高温壁面点火燃烧。位于弥雾装置底端的发动机无需火花塞,底端发动机向其喉管注入汽油和空气,利用位于侧端发动机工作在燃烧室点火燃烧的余火再次点燃,完成更彻底的燃烧、更好的雾化效果和更强的射流动力。药液经喷嘴进入喷管后,脉动热气流的的热能和紊流动能将药液裂化破碎和蒸发,经喷口排出后遇到空气冷凝并飘浮到大气中,从而均匀弥散到农作物上。药液喷口主要由雾化管道、药液喷嘴和喷管组成,其工作原理是直流射出。弥雾装置工作时在燃烧室-喷管中周期性地产生高温气流脉动和压力波,在进行计算和分析时,需要简化成等熵、无摩擦的流体,其基本方程为:

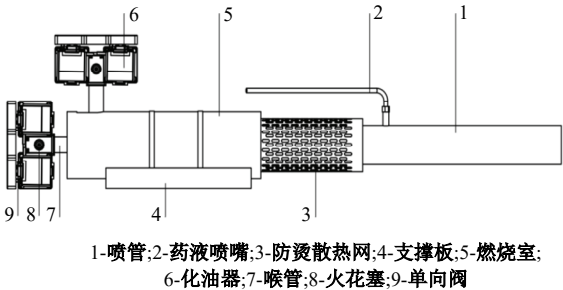


图 4 脉冲式弥雾装置结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of pulse engine structure

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0 \quad (5)$$

$$\text{动量方程: } p \frac{\partial v}{\partial t} + p v \frac{\partial v}{\partial x} = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (6)$$

$$\text{能量方程: } \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(u + \frac{1}{2} v^2 \right) + \frac{\partial}{\partial x} \rho v \left(h + \frac{2}{2} v^2 \right) \right] = r(x, t) \quad (7)$$

式中: ρ 为燃烧气体的密度; v 为速度; p 为压力值; u 为内能; h 为焓值; $r(x, t)$ 为在 t 时间内单位体积在 x 处所释放的能量值。式(6)(7)中, $v \frac{\partial y}{\partial x}$ 和 vh 为非线性的项。

2 CFD 流场建模与仿真

2.1 计算方法

本研究采用 CFD 商用软件 Fluent 2022R1 建立喷雾流场模型。建立模型时, 设置空气参数为 Fluent 默认值; 空气和水视为不可压缩的黏性牛顿流体。基于环境条件, 采用质量守恒方程、动量守恒方程和湍流方程等流体动力学控制方程。由于研究对象空气和水为不可压缩物理量, 因此, 建立式(8)所示的计算方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

N-S 方程表示流体流动条件的动量与作用力之间的平衡和转换关系, 将运动中的流体视为不可压缩物理量, 则流体在运动中的能量守恒特征关系式如公式(9)(10)(11)所示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u U) &= - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \\ &+ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v U) &= - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \\ &+ \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w U) &= - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial x} + \\ &+ \frac{\partial \tau}{\partial y} + \frac{\partial \tau}{\partial z} + F_z \end{aligned} \quad (11)$$

式中: p 为流体微元上的静压, Pa; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 等为作用在流体微元黏性应力的分量; F_x 、 F_y 、 F_z 为流体微元上的体积力。

考虑到数值计算的准确性与兼顾计算效率, 相较于 $k-\omega$ 计算模型, $k-\epsilon$ 双方程模型在预测平面

射流、浮力影响、强旋流和低雷诺数等方面都更精确, 本研究模拟整个喷雾流场情况, $k-\epsilon$ 双方程模型更具有一定的优势和准确性。其输运方程如式(12)(13)所示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ &+ G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ &+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) + G_b - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \quad (13)$$

式中: ϵ 为湍动耗散率, m^2/s^3 ; μ 为流体分子黏性, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$; G_k 为平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项; G_b 为浮力引起的湍流动能 k 的产生项; Y_M 为可压湍流中脉动扩张的影响; 对于经验常数, 取 $C_{1\epsilon}=1.44$ 、 $C_{2\epsilon}=1.92$ 和 $C_{3\epsilon}=0.99$; σ_k 和 σ_ϵ 分别是湍流动能 k 和耗散率 ϵ 对应 Prandtl 数; S_k 和 S_ϵ 为用户根据计算工况定义的源项。

考虑到雾滴相互碰撞和聚合, 仿真实验采用 DPM 离散相模型, 模拟在外界流场中, 在空间内喷头射流的雾滴随气流流动和弥散的情况, 涉及空气和雾滴两相流动, 由于单个弥雾装置喷射的气流速度较高, 同时伴随着雾滴与气流间的相互影响, 将空气视为连续介质, 将雾滴视为离散相, 对气液两相流进行非稳态数值计算, 采用完全耦合的方法计算气体和雾滴的相互作用。

针对雾滴颗粒的运动轨迹与气液两相的相互作用, 通常采用拉朗日法描述离散相的运动轨迹受到流场作用力或是湍流扰动等的影响^[26]。在求解离散相运动方程, 可以追踪单个颗粒速度、受力等参数模拟颗粒在流场中的运动轨迹, 其计算方程如下:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = m_p \frac{(u - u_p)}{\tau_r} + m_p \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (14)$$

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_D Re} \quad (15)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A (u - u_p)^2 \quad (16)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (17)$$

$$C_D = \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{Re} + \frac{\alpha_3}{Re^2} \quad (18)$$

式中: m_p 为雾滴颗粒的质量, g; u_p 为雾滴颗粒速度, m/s ; u 为气流速度, m/s ; μ 为连续相黏性系数, Pa;

ρ_p 为雾滴颗粒密度, kg/m^3 ; d_p 为雾滴颗粒粒径, μm ; C_D 为曳力系数; Re 为雷诺数; g 为重力加速度, m/s^2 ; F 为雾滴颗粒受到的附加力, N ; F_D 为雾滴颗粒单位质量曳力, N ; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为量纲常数。

求解不可压缩流场的方法称为 SIMPLE (Semi-implicit method for pressure linked equations), 即求解压力耦合方程的半隐方法^[27]。其计算步骤为: 先假定一个速度分布和压力场, 逐步求解两个动量方程和压力修正值方程; 其次, 利用优化后的速度值计算速度场, 并通过源项物性等与速度场耦合的变量进行求解, 若变量不影响流场, 则速度场收敛后再进一步求解。最后, 通过改进后的速度场重新计算动量离散方程的系数, 并采用改进后的压力场作为下一层次迭代计算的初值, 重复以上步骤直至获得收敛的解。建立的流场模型中, 喷雾机出风口域管道和流场域四周均设置为壁面, 壁面粗糙高度 $k_s=0$, 壁面粗糙度常数 $C_s=0.5$, 湍流强度 $I=5\%$, 水力直径设置为 60 mm 。

2.2 边界条件与网格划分

由于喷雾系统呈空间对称结构, 模型可简化为单侧 5 个喷口, 所建立的模型如图 5 所示, 模型计算域长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $20\text{ m} \times 5\text{ m} \times 10\text{ m}$ 。计算域分为空气域和弥雾装置喷口, 根据喷雾系统结构参数构建仿真模型, 其中喷口直径为 60 mm , 最低弥雾装置喷口距地面的高度为 745 mm 。将模型中的左侧面边界条件设置为速度入口, 计算域四周壁面及顶面设置为压力出口, 其初始压力值设置为 0, 地面设置为无滑移壁面^[28]。

李雪等^[29]研究表明: 根据喷口雾滴粒径试验颗粒级配曲线, 采用 Rosin-Rammler 分布模型的边界条件对离散相雾滴进行设置, 结论表明该模型能较好地反映试验条件下的雾滴分布特性, 故本研究同样采用该模型, 并将喷射源类型采用面

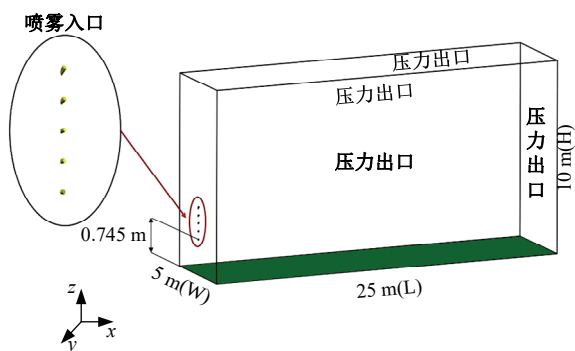


图 5 外流场仿真几何模型

Fig. 5 External flow field simulation geometric model

射源, 喷射材料设为水液体。查阅《农业机械设计手册》^[30], 弥雾装置工作时喷射的雾滴直径范围在 $100 \sim 150\text{ }\mu\text{m}$, 结合实际工作中的环境因素, 将最小颗粒直径设置为 $100\text{ }\mu\text{m}$, 最大颗粒直径为 $200\text{ }\mu\text{m}$, 分散系数为 3.5, 通过实际测量和计算, 计算域左侧喷雾入口设置气流速度为 38 m/s 的边界条件, 喷雾流量率为 0.0015 kg/s , 并拟定喷射速度与气流速度大小一致。

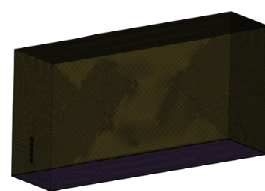
采用 Fluent-meshing 将计算域划分为四面体非结构网格, 在喷口处对网格进行加密处理, 局部网格尺寸设置为 0.005 m , 生成面网格总数为 258 706 个, 网格偏度为 0.50, 边界层层数设置为 5 层, 过渡比和增长值选用系统默认值, 最大网格单元长度设置为 0.06 m , 生成体网格总数为 6 835 193 个, 网格正交质量为 0.20, 满足网格划分质量要求, 具体网格划分细节如图 6 所示。

2.3 仿真结果与分析

本文通过对 Realizable $k-\epsilon$ 、BLS $k-\omega$ 、RNG $k-\epsilon$ 、SST $k-\omega$ 、Standard $k-\omega$ 、Standard $k-\epsilon$ 6 种湍流模型进行初步仿真并对结果进行分析, 发现与 $k-\omega$ 相比, $k-\epsilon$ 模型能在较短时间内获得更高精度 (残差值较低), 在监控各项数据时能更快达到稳定 (保持周期性水平震荡) 状态, 其中 Realizable $k-\epsilon$ 对旋转均匀剪切流、自由流动和圆孔射流问题模拟效果较好, 同时能预测轴对称射流和平面射流的扩散率效果更佳, 后续仿真实验将选用 Realizable $k-\epsilon$ 模型。

2.3.1 风速结果与分析

气流场面选取 y 方向正中心的截面, 速度分布情况的等值线如图 7 所示。从图 7 中能观察到



(a) 计算域网格划分



(b) 网格细节与加密区域

图 6 流场网格划分及细节处理

Fig. 6 Flow field meshing and detail processing

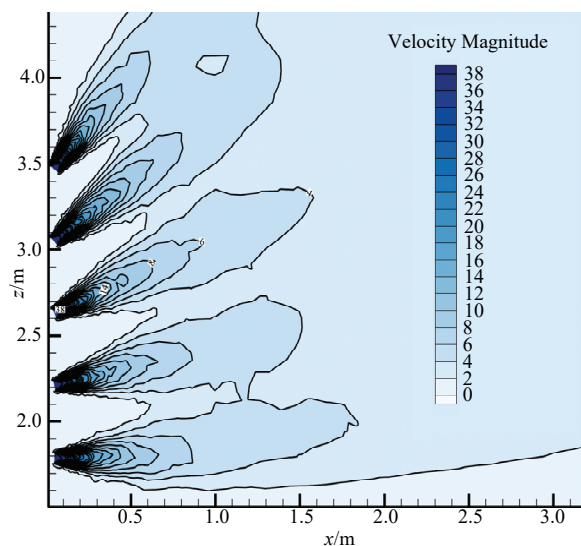
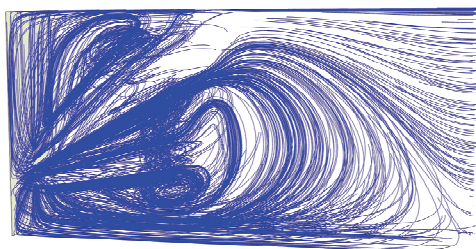


图 7 realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型风场速度分布云图

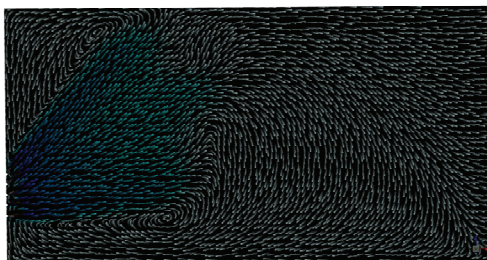
Fig. 7 realizable $k-\varepsilon$ turbulence model wind field velocity distribution cloud map

气流在不同距离和高度下的速度变化情况。可以看出,喷雾机在射程方向上速度衰减程度递减,并在喷雾过程中部分区域呈现紊流。由图 7 可知,水平距离 2 m 之外均未出现高于 2 m/s 的速度气流,针对现阶段矮砧种植模式的果树行距小于 4 m,在机具作业时受到的外界自然条件下的影响较小。同时,远距离存在的气流速度能增加雾滴弥散时间和扩散范围,提高药液的利用率。

图 8 为气流速度分布迹线图 and 速度定向线积分卷积图。如图 8 所示,喷雾机作业过程中流场会产生少数涡流现象,从而导致涡流产生的区域



(a) 气流速度分布迹线图



(b) 速度定向线积分卷积图

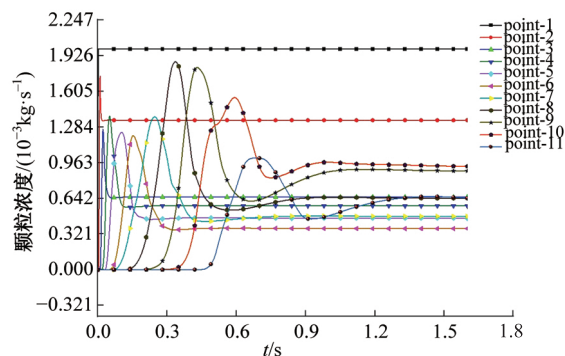
图 8 气流运动轨迹示意图

Fig. 8 Schematic diagram of airflow trajectory

速度较其他区域低,原因是流体中存在速度差异或流体层间存在着相对运动,涡流的产生也会导致该区域气流速度相较于其他区域更低。另一方面,涡流的产生会增加流动阻力和扰流程度,使后续的喷雾速度和方向发生一定的改变。由图 8(a)可知,最底端喷口下方区域的气流强度较高,该现象有利于增强壁面边缘、地面和喷雾方向的雾滴扰动,促使雾滴在整个流场中进行飘浮和弥散。

2.3.2 颗粒浓度变化与分析

图 9(a)为仿真中设置相邻间距为 20 cm 的 11 个采样点,监测颗粒浓度随时间变化的曲线,由图可知,最靠近喷雾出口的监测点 point-1 颗粒浓度一直维持在 $2 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ 的稳定状态, point-8 在 0.3 s 左右颗粒浓度最大,其值为 $1.926 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ 。总体来看,除 point-1 外的其他监测点均呈现短时间内跳跃性增长,随后迅速下落的趋势,最终形成趋于稳定的山峰状曲线。观察各点稳定状态可知,颗粒浓度并不会随着喷雾距离的增加而降低,结合图 9(b)分析,部分原因可能是在喷雾过程中,由于喷口上方气流速度快,压力小,喷口下



(a) 颗粒浓度变化示意图



(b) Z-坐标下颗粒跟踪示意图

图 9 DPM 颗粒浓度变化和运动示意图

Fig. 9 Schematic diagram of DPM particle concentration change and movement

方的压力大于上方,导致颗粒被抬升,造成中间部分检测浓度较低的现象;另一方面原因可能是上方喷口喷出的部分颗粒提前出现了沉降,在远端的监测点中含有上方沉降的颗粒,从而造成颗粒浓度增加。

2.3.3 仿真流场分布情况与分析

流场的分布情况是评价实验结果和喷雾空间性能的重要指标,图 10 为 0.04~10 s 内喷雾机作业流场分布:在 2~4 s 时部分雾滴颗粒开始出现沉降,随着时间的推移,最低高度喷口作业的雾滴由于受到空间中气流的推动影响最小,起先出现下

落的趋势,当沉降的雾滴接触地面后便产生回弹现象。在 4~10 s 过程中,雾滴颗粒的运动趋势与先前时段基本保持一致,随着进一步的运动,雾滴的横向、纵向弥散分布程度进一步扩大。相比之下较高位置喷出的雾滴由于受到下方喷口气流的推动作用,使颗粒在空间中飘浮和弥散的时间延长,说明雾滴粒径和横向气流存在着相互作用,共同影响着雾滴在空间场中的运动轨迹。整体观察可知,CFD 仿真实验能较好地模拟实际喷雾作业的流场情况,有助于更全面地反映喷雾机在不同高度和时间段内雾滴在空间中的运动特性。

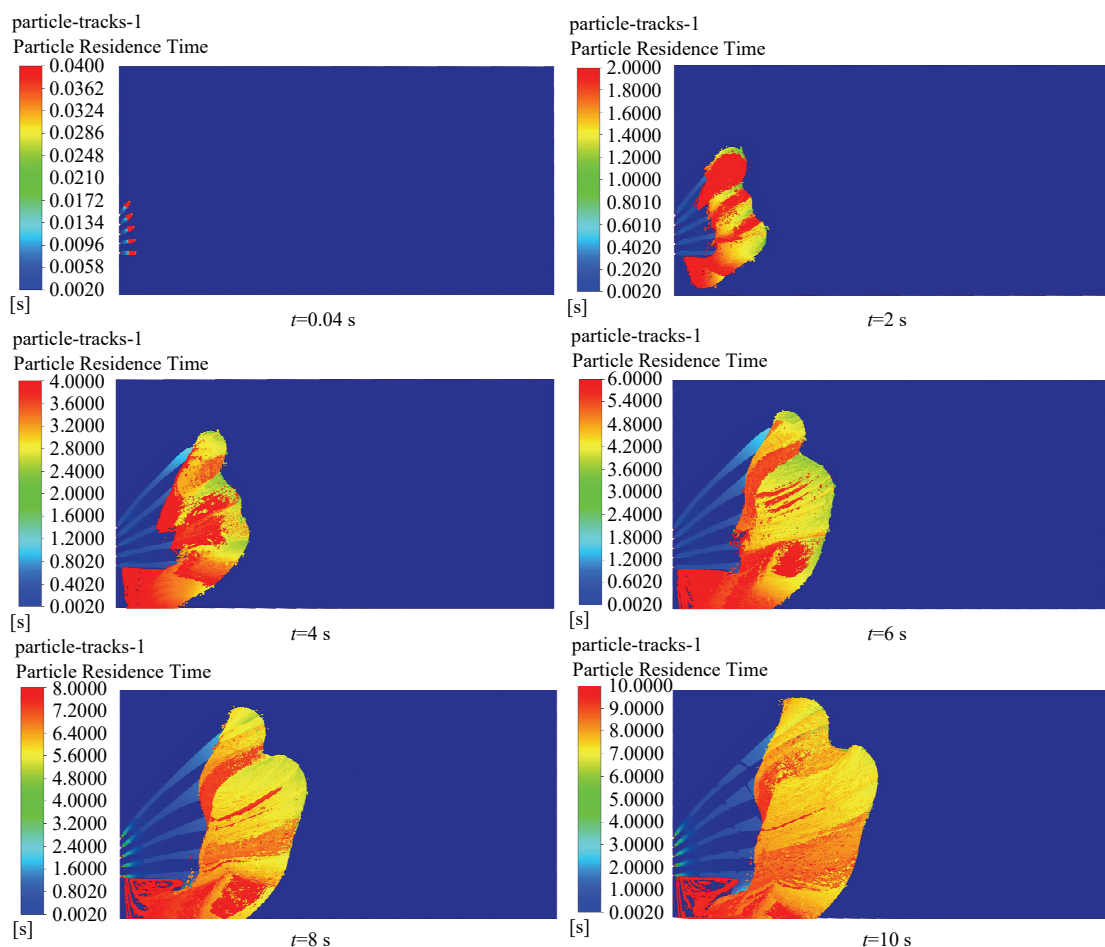


图 10 0~10 s 喷雾作业下流场分布情况示意图

Fig. 10 Schematic diagram of flow field distribution under spray operation in 0~10 s

3 试验与结果分析

3.1 试验条件和方案

加工制造零部件并完成样机装配。参照《植物保护机械 通用试验方法》(JB/T 9782—2014)和《农林机械 灌木与乔木作物用喷雾机》(GB/T 32250.3—2015)进行果园自走式弥雾喷雾机作业性能测定试验。试验于 2022 年 11 月

在甘肃省兰州新区皋兰县开展,试验当天为多云天气,气温为 3°C ,相对湿度为 44%RH,自然风速为 $0.8\sim 1.5$ m/s。试验设备主要包括喷雾机、量筒、风速仪($0.3\sim 45$ m/s)、秒表、卷尺和记号笔等,喷雾溶剂为清水。

由喷雾系统设计特性可知,相邻两个弥雾装置的高度和夹角参数相等,在测量速度时只需记

录最底部的喷口速度随距离的变化情况即可,图 11 为喷雾机速度和空间测量原理图。试验中,为减小外界自然条件产生的影响,果园自走式弥雾喷雾机需放置于无风环境中,在静态下进行速度和空间立体测量^[31]。

速度测量方法见图 11(a),沿着喷雾系统外边缘用记号笔以 0.2 m 的间距测量距离并等距标定 11 个样点,利用风速仪测定并记录数据,将实际测定结果与仿真结果进行对比和验证。空间测量原理如图 11(b)所示,在喷雾机作业过程中,立体测量数据需满足工作幅宽和高度的实际要求,利用记号笔在水平和竖直方向上记录喷雾机作业时空间数据。

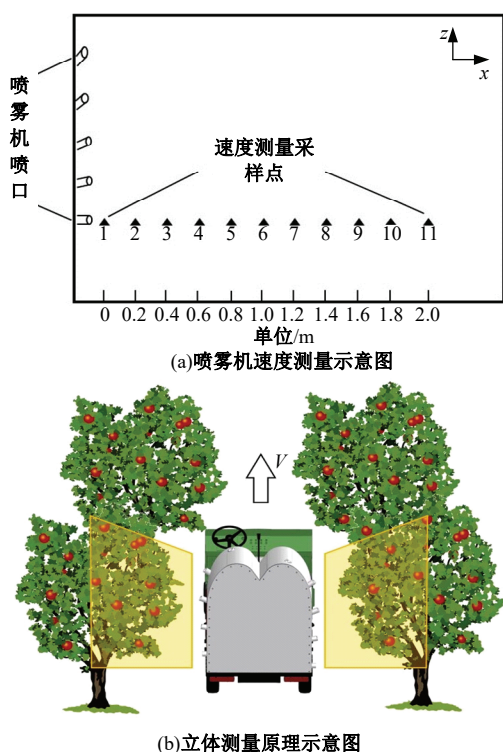


图 11 喷雾机速度和立体测量原理示意图

Fig. 11 Schematic diagram of speed and stereoscopic measurement of sprayer

3.2 结果与分析

试验前期需将弥雾装置化油器的油门略微拧动,机具启动后先将管道内的其他气体排出,待机具工况稳定后再打开药液开关,检查是否喷雾。试验结束后为防止弥雾装置喷管损坏,熄火前应先将关闭喷洒系统药阀开关。图 12 为无风空间中喷雾机静态下的试验现场。

为确保现场试验结果的准确性和喷雾机设计的可靠性,对仿真实验与现场试验测量的风速值进行相对误差分析,结合测量 11 个不同位置采样



图 12 无风空间中喷雾机静态下的现场试验

Fig. 12 Static field test of sprayer in a windless space

点得出相对误差如表 2 所示。采用 ExpAssoc 函数对数据进行拟合,得到现场试验决定系数 $R_1^2=0.9972$,仿真实验决定系数 $R_2^2=0.9974$,均接近于 1,表明方程拟合可靠度高。由表 2 可知,距喷雾口 0~2 m 处的各采样点实测值和仿真值相对误差值范围在 2.23%~5.75%;从仿真值和实测值速度大小变化的数据可以看出,离喷口最近的采样点 1 与 2 之间速度差值最大,依次往后距离越远相邻采样点的速度差值逐渐减小并趋于稳定,直至达到弥散的状态。另一方面,试验风速值均小于仿真值,其原因可能是在喷雾过程中外界气温较低,弥雾装置喷出的水雾与空气冷凝效果较强烈,水雾中的雾滴颗粒粒径增大,从而导致颗粒速度降低。

喷雾机工作时喷雾的立体参数是评价喷雾机作业性能的重要参数,为探究喷雾作业时的空间分布特性,对喷雾机实际作业时的喷雾高度和喷雾距离进行测量,将测得的数据与仿真模拟结果比较,如图 13 所示。相对误差能够精准反映测量的可信程度,对数据进行计算可知,在采样点喷雾

表 2 不同采样点处实测与仿真速度值的误差分析

Table 2 Error analysis of measured and simulated velocity values at different sampling points

采样点	现场试验/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	仿真实验/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	相对误差/%
1	37.30	38.13	2.23
2	21.32	21.98	3.10
3	10.48	10.90	4.01
4	7.23	7.58	4.84
5	5.57	5.88	5.57
6	4.21	4.44	5.46
7	3.65	3.86	5.75
8	3.41	3.57	4.69
9	2.90	3.04	4.83
10	2.65	2.79	5.28
11	2.34	2.42	3.42

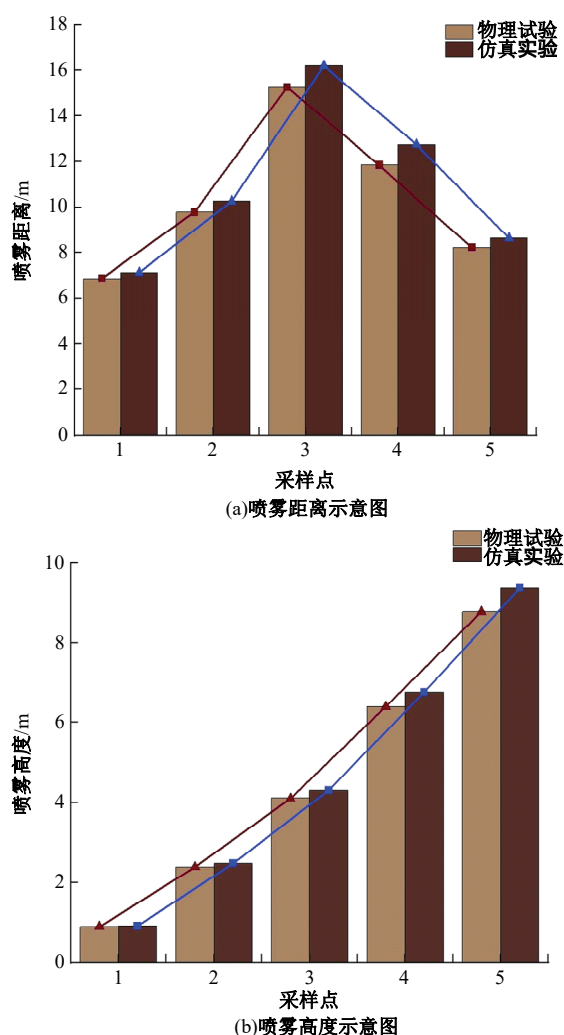


图 13 仿真试验和物理试验下喷雾距离和高度的测量值

Fig. 13 Measurements of spray distance and height under simulation and physical tests

距离实测值和仿真值相对误差最大为 7.52%, 最小为 3.78%, 高度实测值和仿真值相对误差最大为 6.84%, 最小为 2.25%, 说明在喷雾距离和高度上, 仿真数据能较好地反映出实测值。观察图 13(a)可知, 无论是从仿真数据还是从实测数据均能看出, 当弥雾装置超过一定角度时, 喷雾距离会随之缩短, 原因是倾角越大, 平行于地面获得的压力波越小, 继而分速度也会越慢, 冷凝后的雾滴, 在重力的作用下, 导致大角度喷出的雾滴相较于小角度喷口的雾滴逐渐趋近于垂直下落的状态。

4 结 论

(1) 基于矮砧密植果园植保需求, 设计了一款果园自走式弥雾喷雾机, 能够满足 4 m 左右矮密植型作业的空间要求, 完成关键部件结构设计, 确定相邻两个弥雾装置喷口的垂直间距为 420 mm,

夹角为 13°。

(2) 根据喷雾系统特性建立流场的 Realizable $k-\epsilon$ 模型, 并设置 DPM 离散相模型模拟雾滴颗粒的流动, 耦合计算气体和雾滴的相互作用。仿真结果中气流速度呈递减趋势, 水平距离 2 m 之外均未出现高于 2 m/s 的速度气流。喷口处的颗粒浓度维持在 2×10^{-3} kg/s 的稳定状态, 其余采样点颗粒浓度分布不均匀, 但在 1 s 后均呈现趋于平稳的山峰状图形。流场分布 2~4 s 开始沉降后出现回弹, 在 4~10 s 过程中, 雾滴的空间弥散分布程度进一步扩大。整体结果能较好地模拟实际喷雾作业的流场情况。

(3) 完成果园自走式弥雾喷雾机样机作业性能试验, 测得喷雾速度与仿真数据最大误差为 5.75%, 空间风场立体测量中, 实测值和仿真值在喷雾距离下最大误差为 7.52%, 实测值和仿真值在喷雾高度下最大误差为 6.84, 符合设计要求。

参考文献:

- [1] 苏丽旭, 刘莉滋. 我国果园植保机械的现状与发展趋势[J]. 农业装备技术, 2022, 48 (4): 4-8.
Su Li-xu, Liu Li-zi. The current situation and development trends of orchard plant protection machinery in China[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2022, 48 (4): 4-8.
- [2] 赵映, 肖宏儒, 梅松, 等. 我国果园机械化生产现状与发展策略[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22 (6): 116-127.
Zhao Ying, Xiao Hong-ru, Mei Song, et al. Current status and development strategies of orchard mechanization production in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22 (6): 116-127.
- [3] 卢营蓬, 易文裕, 庾洪章, 等. 果园喷雾机械现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2018, 39 (1): 36-41.
Lu Ying-peng, Yi Wen-yu, Tuo Hong-zhang, et al. Present state and trends of orchard sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39 (1): 36-41.
- [4] 刘晓慧, 袁亮亮, 石鑫, 等. 植保施药机械喷雾雾滴飘移研究进展[J]. 农药学学报, 2022, 24 (2): 232-247.
Liu Xiao-hui, Yuan Liang-liang, Shi Xin, et al. Research progress on spray drift of droplets of plant protection machinery[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2022, 24 (2): 232-247.
- [5] 郑永军, 陈炳太, 吕昊曦, 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 Yong-jun, Chen Bing-tai, Lyu Hao-tun, et al. Research progress of orchard plant protection mechanization technology and equipment in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(20): 110-124.
- [6] 李建平, 边永亮, 杨欣, 等. 果园多风机风送喷雾机作业参数优化与试验[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2022, 52(10): 2474-2485.
- Li Jian-ping, Bian Yong-liang, Yang Xin, et al. Operational parameter optimization and testing of an air-assisted multi-fan orchard sprayer[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52 (10): 2474-2485.
- [7] 宋淑然, 阮耀灿, 洪添胜, 等. 宽喷幅风送式喷雾机扩幅喷嘴优化设计及试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 34-42.
- Song Shu-ran, Ruan Yao-can, Hong Tian-sheng, et al. Optimal design and test on expanding duct of wide-swath air-blastsprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(18): 34-42.
- [8] 徐奕蒙, 朱晓文, 刘志杰, 等. 基于计算流体动力学的风送式喷雾机风送系统流场模拟及结构优化[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2018, 44 (4): 451-458.
- Xu Yi-meng, Zhu Xiao-wen, Liu Zhi-jie, et al. Field simulation and structure optimization of the air conveying system in air assisted sprayer based on computer fluid dynamics[J]. Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci), 2018, 44(4): 451-458.
- [9] Endalew M A, Hertog M, Gebrehiwot G M, et al. Modelling airflow within model plant canopies using an integrated approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 66 (1): 9-24.
- [10] Endalew M A, Debaer C, Rutten N, et al. Modeling pesticide flow and deposition from air-assisted orchard spraying in orchards: a new integrated CFD approach[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150 (10): 1383-1392.
- [11] Duga A, Ruysen K, Dekeyser D, et al. CFD based analysis of the effect of wind on orchard spraying[J]. Chemical Engineering Transactions, 2015, 44: 289-294.
- [12] Duga T A, Delele A M, Ruysen K, et al. Development and validation of a 3D CFD model of drift and its application to air-assisted orchard sprayers[J]. Bio-systems Engineering, 2016, 154: 62-75.
- [13] Hong S, Zhao L, Zhu H. SAAS, a computer program for estimating pesticide spray efficiency and drift of air-assisted pesticide applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 155: 58-68.
- [14] Hong S, Zhao L, Zhu H. CFD simulation of pesticide spray from air-assisted sprayers in an apple orchard: tree deposition and off-target losses[J]. Atmospheric Environment, 2018, 175: 109-119.
- [15] 樊桂菊, 牛成强, 张震明, 等. 多气流协同式果园V形防飘喷雾装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53 (3): 138-147.
- Fan Gui-ju, Niu Cheng-qiang, Zhang Zhen-ming, et al. Design and experiment of v-shaped orchard anti-drift spray device with multi-airflow cooperation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53 (3): 138-147.
- [16] Vijay A, Justas J, Ethan K, et al. Dependence of pressure, combustion and frequency characteristics on valved pulsejet combustor geometries[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2018, 100 (3): 829-848.
- [17] Meng X, Jong D W, Kudra T. A state-of-the-art review of pulse combustion: principles, modeling, applications and R&D issues[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 73-114.
- [18] 蒋雪松, 周杰, 许林云, 等. 脉冲式烟雾水雾机工作频率影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50 (11): 85-91.
- Jiang Xue-song, Zhou Jie, Xu Lin-yun, et al. Influence factors of working frequency of pulsed smoker/fogger[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50 (11): 85-91.
- [19] 汪东, 陈青, 许林云, 等. 脉冲式烟雾水雾机热力雾化水剂农药效果分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51 (11): 113-122.
- Wang Dong, Chen Qing, Xu Lin-yun, et al. Analysis on atomization effect of thermal atomization pesticide for pulsed smoker/fogger[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (11): 113-122.
- [20] 王景旭, 祁力钧, 夏前锦. 靶标周围流场对风送喷雾雾滴沉积影响的CFD模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (11): 46-53.
- Wang Jing-xu, Qi Li-jun, Xia Qian-jin. CFD simulation and validation of trajectory and deposition behavior of droplets around target affected by air flow field in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (11): 46-53.

- [21] 刘立超,孙可可,张千伟,等. 玉米植保无人机热雾喷施系统设计与雾滴分布特性试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53 (12): 80-88.
- Liu Li-chao, Sun Ke-ke, Zhang Qian-wei, et al. Thermal spray system design and droplet distribution characteristics test of maize plant protection UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53 (12): 80-88.
- [22] 郭江鹏,王鹏飞,李昕昊,等. 果园多风道喷雾机送风系统设计优化与试验 [J]. 智慧农业: 中英文, 2022, 4 (3): 75-85.
- Guo Jiang-peng, Wang Peng-fei, Li Xin-hao, et al. Design optimization and test of air supply system for multi-duct sprayer[J]. Smart Agriculture, 2022, 4 (3): 75-85.
- [23] 姜红花,牛成强,刘理民,等. 果园多风管风送喷雾机风量调控系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2020, 51 (S2): 298-307.
- Jiang Hong-hua, Niu Cheng-qiang, Liu Li-min, et al. Design and experiment of air volume control system of orchard multi-pipe air sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (S2): 298-307.
- [24] 王伟伟,谢进杰,陈黎卿,等. 3YZ-80A 型履带自走式玉米行间喷雾机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52 (9): 106-114.
- Wang Wei-wei, Xie Jin-jie, Chen Li-qing, et al. Design and experiment of 3YZ-80A crawler self-propelled corn interrow sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52 (9): 106-114.
- [25] 潘四普,周宏平,蒋雪松,等. 油门开度对 Helmholtz 型脉动燃烧器温升特性影响的模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 70-77.
- Pan Si-pu, Zhou Hong-ping, Jiang Xue-song, et al. Simulation and verification of effect of throttle opening on temperature rise characteristic of Helmholtz pulsating burner[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (8): 70-77.
- [26] 刘秀娟,张慧春. 不同雾化方式喷雾场的数值分析与试验验证[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(9): 959-965.
- Liu Xiu-juan, Zhang Hui-chun. Numerical analysis and test verification of spray field of different atomization nozzle modes[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(9): 959-965.
- [27] 翟长远,张燕妮,窦汉杰,等. 果园风送喷雾机出口风场 CFD 建模与试验[J]. 智慧农业: 中英文, 2021, 3(3): 70-81.
- Zhai Chang-yuan, Zhang Yan-ni, Dou Han-jie, et al. CFD modeling and experiment of airflow at the air outlet of orchard air-assisted sprayer[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(3): 70-81.
- [28] 李绍波,张阔,王佳,等. 基于 CFD 的风送喷雾装置风筒参数优化[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25 (12): 93-102.
- Li Shao-bo, Zhang Kuo, Wang Jia, et al. Optimization of air duct parameters of air supply spray device based on CFD[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25 (12): 93-102.
- [29] 李雪,陆岱鹏,王士林,等. 固定管道式常温烟雾系统雾滴沉积仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51 (S2): 261-267.
- Li Xue, Lu Dai-peng, Wang Shi-lin, et al. Simulation and test on droplet distribution and deposition of fixed pipe cold fogging system in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (S2): 261-267.
- [30] 陈志. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [31] 杨欣,刘玉肖,王阳,等. 果园多风管喷雾机风送系统 CFD 仿真与试验[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2024, 54(9): 2723-2732.
- Yang Xin, Liu Yu-xiao, Wang Yang, et al. CFD simulation and test of wind delivery system of multi-duct sprayer in orchard[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(9): 2723-2732.