Vol. 47 No. 5

DOI: 10.13718/j. cnki. xdzk. 2025.05.017

李震,李云伍,宋锐,等. 基于 CFD 的果园喷雾机风送系统结构设计与试验 [J]. 西南大学学报(自然科学版),2025,47(5): 199-212.

基于 CFD 的果园喷雾机风送系统结构设计与试验

李震1, 李云伍1.2, 宋锐1, 何烨1, 黄祥飞1

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 丘陵山区农业装备重庆市重点实验室, 重庆 400715

摘要:针对传统风送喷雾机风送系统性能差导致风送距离短、风场分散的问题,设计了一种适用于多风机喷雾机 的风送系统。通过将喷雾机作业参数与置换原则和末速度原则结合,对轴流风机关键部件进行了设计。基于 CFD 技术以出风口直径、渐缩筒长度和导流叶数目为影响因素设计单因素和多因素试验,结果表明,风筒参数对出风口 最大风速的影响由大到小依次为:出风口直径、导流叶数目、渐缩筒长度;风送系统最优参数组合为:出风口直径 为112 mm,渐缩筒长度为177.4 mm,导流叶数目为5片。在仿真基础上制作试验台开展性能试验可得,风机转速 为5000 r/min 时,风送距离在0~2.5 m 范围内的风速均大于4 m/s,满足末速度要求;风机转速大于4 500 r/min 时,射流扩展边界较大,满足远距离作业幅宽要求,可为果园喷雾机风送系统的结构设计优化提供参考。

关 键 词:果园喷雾机;风送系统;计算流体力学;响应面法;

射流扩展边界

中图分类号: TB126; S224.3 文献标志码: A 文章编号: 1673-9868(2025)05-0199-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Structural Design and Experiment of a Wind Delivery System for Orchard Sprayer Based on CFD

LI Zhen¹, LI Yunwu^{1,2}, SONG Rui¹, HE Ye¹, HUANG Xiangfei¹

1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Regions, Chongqing 400715, China

Abstract: Aiming at the problems of short air supply distance and scattered wind field caused by poor performance of traditional air assistant spraying machines, a wind delivery system suitable for multi-fan spraying machines was designed. By combining the operational parameters of the spraying machine with displacement and final velocity principles, the key parts of axial flow fans were designed. Based on the Computational Fluid Dynamics (CFD) technology, single-factor and multiple-factor experiments were designed by considering the outlet diameter, converging tube length, and number of deflector blades as the influencing factors. The simulation results showed that the influence of the air duct parameters on the maximum wind speed at the outlet was in the following order: outlet diameter, number of deflector blades, converging tube length. The optimal parameter combination for the wind delivery system was found to be an outlet diameter of 112 mm, a converging tube length of 177. 4 mm, and 5 deflector blades. Experimental platform was made based on the simulation results to carry out the performance tests. The results showed that at a fan speed of 5 000 r/min, the wind speed at distances from 0 to 2.5 m exceeded 4 m/s, meeting the final velocity requirements. When the fan speed exceeded 4 500 r/min, the jet expansion boundary was large enough to meet the requirements of long distance operation width. This study can provide reference for optimization of the structural design of the wind delivery system for orchard sprayers.

Key words: orchard sprayer; wind delivery system; computational fluid dynamics; response surface methodology; jet expansion boundary

在果树栽培管理过程中,通常采用喷雾机施药的方法来减少病虫害的影响,但现有的风送喷雾机往往 存在风送距离短、风场分散的问题,主要因为风送系统的性能不佳,气流流动能力较差^[1-3]。

目前,国内外学者们已针对风送系统开展了诸多研究,但多侧重于单轴流风机风送喷雾机,通过计算 流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)技术对喷雾机内外流场进行仿真模拟,从而得到最优风场 下的结构,实现风送系统的优化。徐奕蒙等^[4]利用 CFD 技术对喷雾机风箱进行了仿真分析和结构改进,优 化了风送系统内气体流动性能,提高了风场分布的均匀性;翟长远等^[5]给出了塔式喷雾机出风道的数值模 拟方法,分析了湍流模型和计算区域大小对喷雾机流场仿真的影响规律;郭江鹏等^[6]采用 CFD 技术建立了 多风道喷雾机风送系统内流场仿真模型,并进行响应面分析,解决了气流分布不均的问题;茹煜等^[7]设计 了一种单轴流风机多风管的新型风送系统,通过设定不同的结构尺寸,建立相应的流场模型进行数值模拟 分析,得到最佳流场下的设计方案;杨欣等^[8]对多风管喷雾机进行内外流场仿真,确定了风道、出风口和 转换接口的最优结构参数,并得出了最佳工况下的风机转速和出风口高度;Dekeyser等^[9]通过 CFD 技术 和试验研究验证了塔式喷雾机的气流场分布模型,试验结果表明雾滴分布与气流场状态直接相关,最后通 过 CFD 模型优化了果园风送喷雾机的结构参数;Badules等^[10]针对作物形状建立了风送式喷雾机外流场模 型,研究了气流场和作物之间的相互影响,并指出 CFD 模型的误差与风筒的几何形状、气流速度以及湍流 模型有关;Holownicki等^[11]针对喷雾机脱靶问题设计了一种能够连续实时调节风量的节能风送系统,该 系统采用双轴流风机,提供了更宽的风量范围,与可调叶片恒速工作方法相比表现出更大的适用性。

上述研究从喷雾机实际作业条件出发,通过优化风送系统的部分参数,一定程度上改善了传统风送喷 雾机存在的风送距离短和风场分散的问题,但喷雾机的风送系统种类较多,各种气流的流动情况皆有不 同,因此本研究设计了一种轴流风机与风筒直接装配的小型风送系统,可应用于果园多风机喷雾机中,实 现自动对靶变量喷雾。为便于结构设计和改进,利用 CFD 技术开展风送系统技术研究,根据风筒内外流场 分布、出风口速度分布等数据确定风筒结构的最优设计方案,以期满足喷雾机果园作业的需求。

1 风送系统结构及工作原理

当前规模化种植的果园中,果树种植具有标准的间距规范,以规模化柑橘园为例,矮密早丰栽培模式下,柑橘种植行距为3m,株距为1.5m,树高小于2.5m,具有树冠小、产量高、便于机械化作业等特点。为适应规模化种植模式,解决因树冠特征导致的喷雾效果不佳的问题,本研究团队根据丘陵山区地貌特点和果园农艺需求^[12],设计了一种安装在履带式转运平台上的多风机喷雾机,主要由风送系统、喷雾系统、

行走系统和导航系统组成,整机结构如图1所示,技术参数如表1所示。本研究主要针对风送系统的结构 进行设计与分析。



1. 风送系统; 2. 喷雾系统; 3. 导航系统; 4. 行走系统。

图 1 整机结构示意图

表1 喷雾机技术参数

参数	数值	参数	数值
外形尺寸/mm	$1\ 020\! imes\!800\! imes\!1\ 800$	柱塞泵流量/(L・min ⁻¹)	15~22
底盘动力/kW	5	额定工作压力/MPa	4~4.5
种植行距/m	$3 \sim 5$	药箱容积/L	100
作业速度/(m•s ⁻¹)	0~1.8	喷头数量/个	4

风送系统包括轴流风机和风筒 2 部分,主要 结构如图 2 所示。作业时,轴流风机在叶轮的高转 速下将空气沿轴线方向吸入并轴向排出,产生高 速气流。当药液雾滴受到高速气流的冲击时,表面 张力被克服,从而使雾滴进一步雾化。同时高速气 流裹挟雾滴吹送至果树各冠层^[13],提高喷雾作业 的工作效率和幅宽。风筒安装在轴流风机出风口 处,轴流风机运转过程中,由于叶轮的旋转,产生 类似于旋涡的气流。该气流通常呈现出较大的切 向风速,过大的切向风速会带来剧烈扰动,因此选 择在风筒内部安装导流装置,其特殊的形状和结



构有利于气流的定向流动。气流经过风筒汇聚和导流装置的整流后,既能提升风速和气流均匀性,也能减 少湍流引起的能量损失。

2 轴流风机设计

根据柑橘种植的农艺模式,结合风送喷雾机置换原则和末速度原则,确定轴流风机的参数。

2.1 风机风量确定

置换原则是指喷雾机单侧轴流风机产生的风量总和能完全置换作业区域所包含的全部空气[14]。喷雾

机作业示意图如图 3 所示,根据置 换原则,单侧风机产生的风量总和 应大于虚线扫掠部分的体积,风量 计算式^[15]为:

$$Q \ge rac{1\ 800(H_1 + H_2)V_s LKK_s}{N}$$
 (1

式中:Q 为单风机风量(m^3/h); H₁ 为单侧风送系统高度(m); H₂ 为树冠高度(m);L 为作业距 离(m);V_s 为作业速度(m/s);K 为气流衰减系数;K_s 为置换空间 系数;N 为单侧风机数目。

根据喷雾机的实际尺寸和柑 图3 喷雾机作业示意图 橘种植的标准间距规范,取 H_1 =0.6 m, H_2 =1.4 m,L=0.8 m, V_s =0.5 m/s,K=1, K_s =0.6,N=2,代 入式(1)中,计算得 $Q \ge 432$ m³/h。

2.2 风机风速确定

末速度原则是指作业过程中轴流风机产生的气流接触树冠时,其风速应高于某数值,该数值即为树体 所需的末速度。末速度原则对轴流风机的气动性能要求较高,这是由于气流需要一定的动能扰动枝叶,才 能达到更好的喷施效果^[14]。根据风量公式和外流场的风量关系,得:

$$Q = H_1 V_1 K = H_2 V_2$$
 (2)

则轴流风机出风口风速为:

$$V_1 = \frac{H_2 V_2}{H_1 K}$$
(3)

式中: V_1 为轴流风机出风口风速(m/s); V_2 为树体所需的末速度(m/s)。

由相关研究可知,树冠直径为 6.5 m 的苹果树所需气流末速度为 9~10 m/s,树冠体积更大的梨树为 7~8 m/s^[14],本研究作业对象柑橘密植果树的树冠直径仅为 2 m 左右,因此选择气流末速度 $V_2 = 4$ m/s。 其余参数值与式(1)保持一致,将 $V_2 = 4$ m/s 代入式(3)得 $V_1 = 9.33$ m/s。

2.3 风机技术参数确定

根据轴流风机的风量和风速要求,选用依必安派特 6318/2TDH4P-007 型轴流风机,其主要技术参数 如表 2 所示。

表 2 轴流风机技术参数表

参数	参数数数值		数值	
重量/kg	0.91	转速/(r•min ⁻¹)	$0 \sim 9 200$	
尺寸/mm	$172 \times 160 \times 51$	额定功率/W	127	
额定电压/V	48	风量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	0~950	

3 风筒结构设计与流体分析

3.1 风送系统计算模型建立

为节约试验成本,提高设计效率,利用 CFD 技术开展风筒结构设计研究。其中,风送系统计算模型的 建立是 CFD 技术实施的关键,也是本研究开展的前提和基础,主要包括计算域构建、网格划分和求解器设置3个步骤^[16-17]。



对于计算域的构建,首先确定其尺寸,根据喷雾机实际作业区域确定计算域尺寸为:长1500 mm、宽500 mm、高500 mm。在SpaceClaim 中完成计算域几何模型的构建和布尔运算^[17],将计算域分为旋转域和静止域,风机扇叶所在区域为旋转域,风筒和外流场所在区域为静止域,计算域模型如图4所示。将计算域模型导入 Ansys Meshing 模块进行处理,采用非结构化网格分别对旋转域和静止域进行划分,并对交界面、扇叶、导流装置和风筒边界等部分进行局部网格细密化处理^[18-19],旋转域和静止域的网格划分示意图如图5 所示。



图 4 计算域模型

图 5 旋转域和静止域的网格划分

本研究采用滑移网格的方法进行仿真计算。针对求解器的设置,在 Fluent 中设置流场入口为压力入口,出口为压力出口;旋转域和静止域的交界面设置为 Interior,其他壁面设置为 Wall;计算模型选择 Realizable k-epsilon 湍流模型;求解控制方程选择 SIMPLE 算法和二阶迎风离散化格式^[20-22]。

3.2 风筒结构对气流参数的影响分析

当风送式喷雾机稳定工作时,气流由轴流风机产生,经风筒汇聚后喷出,此时风筒内流场可视为一 元可压缩定常流,即流场中任意一点的所有状态参数都不随时间改变。风筒结构对流体的影响通常以截 面积变化的形式反映,在不可压缩定常流中,流体的速度随流体横截面积的大小呈负相关变化,但在可 压缩定常流中,这种情况是不确定的,因此需要具体分析截面积变化对一元可压缩定常流的影响来确定 风筒的结构。

由一元恒定可压缩流体的连续性方程和欧拉方程可知^[23]:

$$\frac{\mathrm{d}A}{A} + \frac{\mathrm{d}\rho}{\rho} + \frac{\mathrm{d}V}{V} = 0 \tag{4}$$

$$c^2 \frac{\mathrm{d}\rho}{\rho} + V \mathrm{d}V = 0 \tag{5}$$

$$Ma = \frac{V}{c} \tag{6}$$

联立式(4)-式(6),可得速度变化量 dV 和流体速度 V 的关系为:

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{V}} = \frac{1}{\mathrm{Ma}^2 - 1} \,\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{A}} \tag{7}$$

式中: A 为流场横截面积(m²); ρ 为流体密度(kg/m³); c 为声速(m/s); V 为流体流速(m/s); Ma 为马 赫数。

对于亚声速流体(Ma < 1),如果 dA/A < 0,则 dV/V > 0,即截面积减小导致速度增加;如果 dA/A < 0,则 dV/V < 0,即截面积增加导致速度减小。对于超声速流体(Ma > 1),如果 dA/A < 0,则 dV/V < 0,即截面积减小导致速度减小;如果 dA/A > 0,则 dV/V > 0,即截面积增加导致速度增加。对于声速流体(Ma = 1),dA/A = 0。不同结构参数对风筒性能的影响如图 6 所示。

由上述讨论可知,亚声速流体和超声速流体在截面积变化时的速度表现是呈负相关的。在流体速度为 亚声速时,为使流体加速,需要采用渐缩式结构;在超声速时,为使流体加速,需要采用扩张式结构。应用 于果园喷雾的轴流风机产生的气流低于声速,为亚声速流体,因此需要采用渐缩式风筒。



图 6 不同结构参数对风筒性能的影响

3.3 风筒最优结构参数的确定

风筒包括渐缩式风筒和导流装置2部分。对于渐缩式风筒,决定其结构的2个重要参数分别为出风口 直径 D 和渐缩筒长度L,如图7所示。导流装置由导流器和导流叶构成,如图8所示。导流器有柱体形、锥 体形和半椭球形3种,由相关研究可知,采用半椭球导流器的风筒出口气流较为收敛,出口风速高,工作 效率高^[24],因此根据半椭球导流器的特点开展导流叶数目S的研究。





出风口直径 D、渐缩筒长度 L 和导流叶数目 S 的变化范围较广,本研究利用 Fluent 设计单因素试验, 分别探究 3 个参数对风筒性能的影响。根据风机的技术参数可知,在转速为 5 000 r/min 时提供的风量为 516.3 m³/h,能够满足喷雾机作业的风量要求,因此设置风机转速为 5 000 r/min,试验结果如图 9 所示。 由图 9a 可知,随着出风口直径 D 的增大,出口最大风速 V 呈逐渐减小的趋势;由图 9b 可知,随着渐缩筒 长度 L 的增大,出口最大风速 V 先减小后增大再减小,并在 L = 180 mm 时最大;由图 9c 可知,随着导流 叶数目 S 的增加,出口最大风速 V 先减小后增大再减小,并在导流叶数目 S 为 5 片时最大。根据单因素试 验结果,结合风筒装置设计要求,在保证风速的同时应选择较大出风口面积以提升风场对树冠的覆盖面 积,因此确定出风口直径 D 的范围为 112~119 mm,渐缩筒长度 L 的范围为 172.5~187.5 mm,导流叶 数目 S 的范围为 4~6 片。

根据选取的结构参数区间,采用3因素3水平试验方案,试验因素编码表如表3所示。利用 Design-Expert 13.0 的 Box-Behnken 进行试验设计,共设置17组风筒模型仿真试验,试验方案与试验结果如表4 所示(表中 X₁、X₂、X₃分别表示出风口直径 D、渐缩筒长度L、导流叶数目S 的编码)。其中第13~17组

试验为误差校正检验组,误差校正检验组通过设置不同的计算步数来检验模型结果的准确性。



表 3 试验因素编码表

编码		试验因素	
	D/mm	L/mm	S/片
-1	112.0	172.5	4
0	115.5	180.0	5
1	119.0	187.5	6

表 4 试验方案与试验结果

试验序号 ————		试验因素	=1	
	${X}_1$	X_{2}	X_{3}	- V/(m · s)
1	-1	-1	0	14.13
2	1	-1	0	11.13
3	-1	1	0	14.64
4	1	1	0	11.71
5	-1	0	-1	14.05

续表 4

206

计队应日		试验因素	$\frac{1}{5}$		
风驰广与 -	${X}_1$	X_{2}	X_{3}	$- V/(m \cdot s)$	
6	1	0	-1	10.89	
7	-1	0	1	13.85	
8	1	0	1	10.66	
9	0	-1	-1	12.59	
10	0	1	-1	12.88	
11	0	-1	1	11.78	
12	0	1	1	12.05	
13	0	0	0	13.30	
14	0	0	0	13.14	
15	0	0	0	13.57	
16	0	0	0	13.38	
17	0	0	0	13.66	

对上述试验结果进行数据处理及分析,出口最大风速 V 的显著性及方差分析如表 5 所示。

表 5 显著性及方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F 值	<i>p</i> 值
模型	23.33	9	2.59	44.84	<0.000 1**
X_{1}	18.78	1	18.78	324.81	$<$ 0.000 1 **
X_{2}	0.338 9	1	0.338 9	5.86	0.046 0*
X_{3}	0.535 6	1	0.535 6	9.26	0.018 7*
$X{}_1X{}_2$	0.001 6	1	0.001 6	0.026 8	0.874 5
$X{}_1X{}_3$	0.000 3	1	0.000 3	0.005 8	0.941 6
$X{\scriptstyle_2} X{\scriptstyle_3}$	0.000 2	1	0.000 2	0.003 3	0.956 0
X_{1}^{2}	0.245 8	1	0.245 8	4.25	0.078 2
X_2^2	0.338 5	1	0.338 5	5.85	0.046 1*
$X_{\scriptscriptstyle 3}^{\scriptscriptstyle 2}$	2.84	1	2.84	49.10	0.000 2**
失拟项	0.237 4	3	0.079 1	1.89	0.272 3
R^{2}			0.983 0		
信噪比			21.992 6		

注:*、**分别表示在5%、1%水平上差异具有统计学意义。

由表 5 中出口最大风速 V 的显著性及方差分析可知,模型项 p < 0.0001,失拟项 p = 0.2723,说明响 应面函数模型极显著,失拟不显著,误差较小;多元相关系数 $R^2 = 0.9830$,说明该模型拟合程度很高;信 噪比为 21.9926,说明该模型能够提供可靠、精确的预测结果;对比各因素 F 值和 p 值,得出影响大小的 顺序为 $X_1 > X_3 > X_2$ 。出口最大风速 V 的回归方程为:

 $V = 13.43 - 1.53X_1 + 0.21X_2 - 0.26X_3 + 0.02X_1X_2 - 0.01X_1X_3 - 0.01X_2X_3$

 $-0.24X_1^2 - 0.28X_2^2 - 0.82X_3^2$

(8)

试验因素交互效应与出口最大风速 V 的响应曲面如图 10 所示。由图 10a 可知, X1 一定时, V 随 X2 增

大而缓慢增大; X₂ 一定时, V 随 X₁ 增大而减小。由图 10b 可知, X₁ 一定时,随着 X₃ 增大, V 呈先增大 后减小的趋势; X₃ 一定时, V 随 X₁ 增大而减小。由图 10c 可知, X₂ 一定时,随着 X₃ 增大, V 呈先增大后 减小的趋势; X₃ 一定时, V 随 X₂ 增大先缓慢增大再缓慢减小。



a. $f_1(X_1, X_2, 0)$

b. $f_1(X_1, 0, X_3)$



c. $f_1(0, X_2, X_3)$

图 10 交互效应响应曲面

根据试验结果,在 Design-Expert 中以出口最大风速 V 为评价标准,以期望 V 最大化为优化目标,对风筒结构进行优化,约束为出风口直径 D、渐缩筒长度 L 和导流叶数目 S,数学模型如式(9)所示,得到最佳结构参数:出风口直径 D 为 112 mm,渐缩筒长度 L 为 177.4 mm,导流叶数目 S 为 5 片。

$$\begin{cases} \max: V = f(D, L, S) \\ 112 \le D \le 119 \\ 172.5 \le L \le 187.5 \\ 4 \le S \le 6 \end{cases}$$
(9)

3.4 流体分析

在最优结构参数下对风筒进行流体分析,风筒流场压力分布和速度分布云图如图 11 所示。由图 11a 可知,风筒内流场压力基本呈轴对称分布,且沿风速方向逐渐减小,至风筒出口处压力达到最小。由图 11b 可知,随着渐缩筒管壁直径的减小,风筒内流场风速逐渐增大,在风筒出口处风速增至最大。该结果符合伯努利原理对连续性流体流动的解释。

208





为探究风筒外流场的分布规律,在距离风筒出口 0.1、0.4、0.7、1.0 m 处设置截面,得到各处 的风筒外流场速度截面云图如图 12 所示。由图 12 可得,各截面处的速度云图呈较为规则的圆形,且 中心区域风速高,周围风速低。随着风送距离的增大,截面上的最大风速逐渐减小,风筒射流的扩展 面积逐渐增大。





为探究导流装置对风筒内流场的影响,在其他参数保持相同的情况下对无导流装置和有导流装置的风筒进行仿真分析,无导流装置和有导流装置的风筒内流场流线图如图 13 所示。通过对比分析可知,无导流装置风筒内的气流呈螺旋状,有导流装置的气流流向经导流叶整流后变为平行于风筒轴线的方向,说明导流装置影响着风筒内部流场的分布,其存在抑制了气流的旋转作用,有效降低了螺旋气流的切向风速分量,改善了气流的流动特性。



图 13 无导流装置和有导流装置的风筒内流场流线图

4 性能试验

4.1 风速试验

为验证仿真模拟结果的准确性及风送系统的性能,按照仿真最优参数制作试验台进行风速试验, 本试验以风速和风送距离为评价指标验证其性能^[25]。试验地点位于西南大学农业机械实验室,环境 温度为 12 ℃,湿度为 48%,试验仪器为卷尺和艾沃斯 AS-H10 分体式风速计。试验设置风机转速为 5 000 r/min,试验组分别为有导流装置风送系统和无导流装置风送系统以及对应的仿真对照组。试 验过程中,在距离出风口中心 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m 处设置速度测量点,待风送系统 稳定后,利用风速计测量各点风速,每个测量点重复测量 5 次取平均值。试验现场如图 14 所示。



图 14 试验现场图

4.2 射流扩展边界试验

风机转速的调节可以更好地满足精准施药的需求,为进一步研究不同风机转速下风送系统外部流场 的分布规律,设计并开展射流扩展边界试验,使用风速计测量不同风送距离下每个界面的射流扩展边界 点。试验地点位于西南大学农业机械实验室,环境温度为4.5℃,湿度为73%。试验设置风机转速分别 为4000、4500、5000、5500、6000 r/min。试验过程中,在距离出风口0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、 3.0 m处,设置与出风口平行的测量截面,将风速计放置于测量截面上,测量上下左右4个点。当测得 风速小于0.5 m/s时,此测量点为截面上的射流扩展边界点,同时测量并记录此点到风机轴线的距离, 重复试验5次取平均值。射流扩展边界测量示意图如图15所示。



图 15 射流扩展边界测量示意图

4.3 试验结果与分析

4.3.1 风速试验结果分析

根据各速度测量点数值,得出外流场速度变化趋势,与仿真结果进行对照,如表 6 所示。由表 6 可知, 不同风送系统试验组与仿真对照组之间的相对误差不大于 8%,仿真模拟结果较为准确,能够为风筒的结构设计提供依据。在距离风筒出风口 0~3.0 m 范围内,各风送系统的气流风速均呈现不断衰减的趋势,其中 0~1.0 m 范围内风速较高,衰减不明显; 1.0~3.0 m 范围内风速急剧下降,衰减趋势明显。相较于有导流装置的风送系统,无导流装置的风送系统衰减趋势更为明显,表明导流装置能在一定程度上增大风速,抑制衰减。根据末速度原则,到达树冠的气流速度应不低于 4 m/s,在风送距离 0~2.5 m 范围内风送系统的风速均大于 4 m/s,因此该风送系统满足末速度要求。

风送距离/	有导流装置	仿真对照组	相对误差/	无导流装置	仿真对照组	相对误差/
m	风速/(m・s ⁻¹)	风速/($m \cdot s^{-1}$)	0⁄0	风速/($m \cdot s^{-1}$)	风速/($m \cdot s^{-1}$)	0⁄0
0	13.74	13.08	5.04	13.42	12.83	4.60
0.5	12.61	11.82	6.68	12.71	11.88	6.99
1.0	12.35	11.67	5.83	11.31	10.54	7.31
1.5	11.14	10.52	5.90	10.31	9.62	7.17
2.0	9.87	9.22	7.04	8.50	7.94	7.05
2.5	6.61	6.27	5.42	5.63	5.26	7.03
3.0	3.80	3.66	3.83	3.04	2.83	7.47

表 6 导流装置对风筒性能影响

4.3.2 气流射流扩展边界试验结果分析

根据各截面的射流扩展边界点,分别绘制水平和竖直方向的射流扩展边界变化曲线,如图 16、图 17 所示。由图 16 可知,风送系统水平方向的射流扩展边界呈左右对称分布,且随着风机转速的提升逐渐扩大,随着风送距离的增大先快速增大后逐渐平缓。当风机转速由 4 000 r/min 逐渐提升至 6 000 r/min 时,水平 射流边界的最大值也从 22 cm 扩大至 30 cm。在风送距离 0~2.0 m 范围内,5 种风机转速下的射流边界均 呈现快速扩大的趋势,当风送距离大于 2.0 m 时,射流边界呈现增长缓慢的趋势。

由图 17 可知,风送系统竖直方向的射流扩展边界没有呈上下对称的分布,可能是空气自身质量以及安装误差等原因导致的。同样,上下边界随风送距离的变化趋势与水平方向也有所不同,上边界随风送距离的增大缓慢扩大,下边界随风送距离的增大先快速扩大后缓慢扩大。但上下边界随风机转速的变化趋势与水平方向相似,均呈现随转速的提升逐渐扩大的趋势。当风机转速由 4 000 r/min 逐渐提升至 6 000 r/min 时,上边界最大值由 14 cm 扩大至 22 cm,下边界最大值由 28 cm 扩大至 40 cm。在风送距离 0~3.0 m 范

围内,风机转速为4000 r/min时的上边界在2.5~3.0 m处出现减小,而其他转速时的上边界始终呈现缓慢扩大的趋势;下边界在0~2.0 m范围内快速扩大,大于2.0 m时缓慢扩大。

风送系统射流扩展边界的研究结果为喷雾机作业参数的设置提供了一定的参考依据,当风机转速为 4 000 r/min 时,射流扩展边界在 2.5~3.0 m 处出现减小现象,因此在大于 2.5 m 的远距离喷雾作业时 应选择不低于 4 500 r/min 的转速。



5 结论

根据规模化果园喷雾作业的要求设计了一种适用于果园多风机喷雾机的风送系统,运用 CFD 技术对 轴流风机、风筒和导流装置进行了选型和结构设计,并开展试验验证了风送系统的性能,主要结论如下:

1)完成了轴流风机的设计。根据标准化果树种植的间距规范,结合置换原则和末速度原则,确定风量 $Q \ge 432 \text{ m}^3/\text{h}$,出口风速 $V_1 \ge 9.33 \text{ m/s}$,选用依必安派特 6318/2 TDH4P-007 型轴流风机。

2)通过设计单因素和多因素试验对风筒进行了结构设计。结果表明,风筒参数对出风口最大风速的 影响由大到小依次为:出风口直径、导流叶数目、渐缩筒长度;风送系统最优参数组合为:出风口直径 为112 mm,渐缩筒长度为177.4 mm,导流叶数目为5片。在最优参数组合下制作试验台得出试验组与 仿真对照组之间的相对误差不大于8%,验证了数值模拟结果的准确性。

3) 开展了风速试验与射流扩展边界试验,验证了风送系统的性能。试验结果表明:随着风送距离的增大,风速的衰减幅度逐渐增大;随着风机转速的增大,射流扩展边界范围逐渐扩大;在风机转速为5000 r/min时,风送距离0~2.5 m范围内的风速均大于4 m/s,满足末速度要求;在风机转速大于4 500 r/min时,射流扩展边界较大,满足2.5 m外的远距离作业幅宽要求。

参考文献:

- [1] 张惠,姜春森,张景,等.果园植保仿形喷雾技术研究现状与展望[J].安徽农业科学,2023,51(4):6-11.
- [2] 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.
- [3] 吴建浩. 果园风送式施药技术发展现状 [J]. 农业装备技术, 2023, 49(1): 10-12, 16.
- [4] 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.
- [5] 翟长远,张燕妮,窦汉杰,等.果园风送喷雾机出风口风场 CFD 建模与试验 [J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(3): 70-81.
- [6] 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.

- [7] 茹煜,陈旭阳,刘彬,等. 轴流式果园喷雾机风送系统优化设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 147-157.
- [8] 杨欣,刘玉肖,王阳,等. 果园多风管喷雾机风送系统流场仿真和试验 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(9): 2723-2732.
- [9] DEKEYSER D, DUGA A T, VERBOVEN P, et al. Assessment of Orchard Sprayers Using Laboratory Experiments and Computational Fluid Dynamics Modelling [J]. Biosystems Engineering, 2013, 114(2): 157-169.
- [10] BADULES J, VIDAL M, BONE A, et al. Comparative Study of CFD Models of the Air Flow Produced by an Air-Assisted Sprayer Adapted to the Crop Geometry [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 149: 166-174.
- [11] HOŁOWNICKI R, DORUCHOWSKI G, ŚWIECHOWSKI W, et al. Variable Air Assistance System for Orchard Sprayers: Concept, Design and Preliminary Testing [J]. Biosystems Engineering, 2017, 163: 134-149.
- [12] 李文伟, 江世界, 徐平凡, 等. 丘陵果园自走式小型靶标跟随喷雾机设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 188-197.
- [13] 李慧, 陈子文, 李强, 等. 径向对靶风送式施药机风场优化设计与试验 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(5): 195-206.
- [14] 戴奋奋. 风送喷雾机风量的选择与计算 [J]. 植物保护, 2008, 34(6): 124-127.
- [15] 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.
- [16] 边永亮,李建平,杨欣,等. 果园多风机风送喷雾机聚风筒聚风特性的试验研究 [J]. 中国农业大学学报,2022, 27(5):39-50.
- [17] 宋淑然,夏侯炳,刘洪山,等.风送式喷雾机喷筒结构优化数值模拟与试验[J].农业机械学报,2013,44(6):73-78,55.
- [18] 王克超,李云伍,赵颖,等. 基于 CFD 的果园喷雾风筒装置流体分析与试验 [J]. 中国农机化学报, 2024, 45(1): 96-102.
- [19] 伍志军, 廖红, 邓家波, 等. 基于 CFD 离散型静电喷药沉积特性数值仿真研究 [J]. 河南农业大学学报, 2022, 56(5): 849-857.
- [20] 胡森,陈霖,陈治帆,等.双出风口清选装置气流场仿真及清选试验研究 [J].东北农业大学学报,2023,54(9): 67-79.
- [21] 丁涛,邱绵靖,刘志伟,等.农用轴流风机集流器参数数值模拟优化研究 [J]. 农业机械学报,2022,53(9):342-353.
- [22] 商新月,韩定强,舒雷,等.鱼尾型搅拌桨设计及在羧甲基纤维素钠溶液中的应用[J].西南大学学报(自然科学版), 2024,46(3):147-158.
- [23] E·翰芬纳莫尔,约瑟夫 B·弗朗兹尼.流体力学及其工程应用:第10版[M].钱翼稷,周玉文,译.北京:机械工业 出版社,2009.
- [24] 胡煜, 刘烁玲, 汪屈, 等. 基于 Fluent 的风送式喷雾机导流器仿真分析 [J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(2): 100-105.
- [25] 杜哲,胡永光,仇树成,等.喷雾降温风机风筒优化设计与试验 [J]. 农业机械学报,2020,51(8):118-125,151.

责任编辑 柳剑