doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.05.015

轴流式果园喷雾机风送系统优化设计与试验

茹　煜[1]　陈旭阳[1]　刘　彬[1]　王水金[1]　林　明[2]
(1.南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2.中国农业机械工业协会, 北京 100083)

摘要: 针对传统风送式喷雾机风送距离短与药液浪费的问题,设计一种适用于传统果园喷雾机的轴流式风送系统。通过设置不同风筒导叶的安装角、数量、长度和锥形多出口装置的锥度、出口布局方式,进一步引导风送系统气流场,并建立相对应的气流场分布模型。通过对比选取风送系统的最佳优化设计方案,并开展了验证试验。试验结果表明,风筒导叶参数对出口风速影响的显著性由大到小为长度、安装角、数量,锥形多出口装置出口布局方式对出口风速的提升效果明显;当风筒导叶安装角为 10°,数量为 6,长度为 20 cm,且锥形多出口装置锥度为 2.25、出口布局为 A 型时,风送系统出口风速及均匀性达到最优,所建立的模型出口风速与试验值相对误差为 4.66% 和变异系数为 3.63%,验证了数值模拟结果的可靠性。在此基础上,通过喷雾机外流场试验可得,射流边界范围随着出口直径和转速的增加而增大,风送距离也随之增大,当风送距离 0 ~ 2 m,风速大于 5 m/s,衰减幅度明显,当风送距离大于 2 m 时,气流衰减较为平缓,风速距离 4 m 处风速达到 1.5 m/s 左右。优化后轴流式果园喷雾机风送系统结构合理,气流均匀性、风速、边界和射程等方面均满足果园植保机械需求,研究结果可为果园喷雾机风送系统优化设计和风送式施药提供参考。

关键词: 果园喷雾机; 风筒; 锥形多出口装置; 风送系统; 流场模拟
中图分类号: S491　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2022)05-0147-11　　**OSID**:

Optimized Design and Performance Test of Axial Flow Orchard Sprayer Air Delivery System

RU Yu[1]　CHEN Xuyang[1]　LIU Bin[1]　WANG Shuijin[1]　LIN Ming[2]
(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Nanjing Forestry University*, *Nanjing* 210037, *China*
2. *China Association of Agricultural Machinery Manufacturers*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of short air delivery distance and chemical waste of traditional air-driven sprayers, an axial-flow air-delivery system suitable for traditional orchard sprayers was designed. By setting the installation angle, quantity, length of different air duct guide vanes, taper and outlet layout of the conical multi-outlet device, the airflow field of the air delivery system was further guided, and the corresponding airflow field distribution model was established. The best optimal design scheme of the air delivery system was selected by comparison, and a verification test was carried out. The research results showed that the influence of the parameters of the fan guide vanes on the outlet wind speed was significant from large to small as the length, installation angle, and quantity. When the angle was 10°, the number was 6, the length was 20 cm, the taper of the conical multi-outlet device was 2.25, and the outlet layout was type A, the uniformity and size of the outlet wind speed of the air delivery system were the best. The relative errors was 4.66% and coefficients of variation of the experimental values was 3.63%, which verified the reliability of the numerical simulation results. On this basis, through the external flow field test of the sprayer, it could be seen that the boundary range of the jet was increased with the increase of outlet diameter and rotation speed, and the air delivery distance was also increased. At the wind delivery distance of 0 ~ 2 m, the wind speed was above 5 m/s and the attenuation range was obvious, when the air delivery distance was greater than 2 m, the attenuation of the airflow was relatively gentle, and the wind speed at 4 m reached about 1.5 m/s. After optimization, the air delivery system of the axial-flow orchard sprayer had a reasonable structure, and it could meet the needs of orchard plant protection machinery in

收稿日期: 2021 - 11 - 02　修回日期: 2022 - 03 - 12
基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(18)1007B02)
作者简介: 茹煜(1973—),女,教授,博士生导师,主要从事农林植保技术与装备研究,E-mail: superchry@163.com

terms of wind speed uniformity, size, boundary and range.

Key words: orchard sprayer; air duct; conical multi-outlet device; air conveying system; flow field simulation

0 引言

风送系统是果园喷雾机的重要组成部分,能够提供强大的气流带动叶片间的扰动,将雾化的药液输送到果树冠层,从而增加雾滴穿透性和覆盖率,减少雾滴飘移现象,达到很好的沉积效果,提高农药的使用率和作业效率[1-4]。针对我国当前果园大规模定向种植模式,果园风送喷雾机被广泛应用,但其风送系统相关结构设计及优化的研究仍然较少。因此,亟需对果园喷雾机进行改进设计,关键在于优化设计果园喷雾机的风送系统结构。

国内外果园喷雾机的风送系统主要是由风机和导风装置组成,其气流场用传统试验方法研究较为困难,国内外多数基于计算流体动力学[5-6](Computational fluid dynamics,CFD)进行研究,通过仿真模拟对风送式喷雾机内外部气流特性进行研究[7-11]。文献[12-14]模拟了单风机、双风机、四风机 3 种组合风机的气流场,并通过试验进行验证,对比分析了 3 种气流场对冠层风速的影响。DELELE 等[15-16]利用 CFD 技术建立了不同类型的果园风送喷雾机(悬臂式、横流式)风场模型,用来评价喷雾机作业性能。文献[17-18]利用 Fluent 软件对双出风口多风道离心风机的内部流场进行数值模拟,改进风机的结构尺寸,并试验验证了优化后双风道结构的准确性。丁天航[19]根据单风机风送系统两侧流道气流不对称的现象,设计了双风机双流道的果园喷雾机,通过数值模拟软件对单、双风机双流道内部气流场进行模拟,分析了气流场产生的影响因素,结合试验测量探究双风机双流道气流场的分布情况,进一步优化了风送系统。周杰等[20]针对轴流式果园喷雾机,对风送系统内部气流场进行模拟分析,结果表明在挡风板上安装导流锥后,出风口风速提高了 36.8%,改善了出口气流分布不均的情况。王杰等[21]对苗木喷雾机风送系统的 3 种多出口装置进行优化设计和数值模拟,得出不同多出口装置的风速和风压变化规律,并通过试验验证得出多出口装置的最优设计为多排六出口。

目前,多风管果园喷雾机大多应用离心式风机,而鲜有对轴流式风机加以研究应用,轴流式风机质量小、风量的调节范围广、结构简单且安装方便,对于各类喷雾机底盘适应性更强,为喷雾机适用不同果树的植保作业提供了更多选择。本文优化设计一种多风管果园喷雾机的轴流式多出口风送系统,根据喷雾所要求的风量与风压,完成对轴流风机、风筒和锥形多出口装置的结构设计,采用数值模拟和试验相结合的方法来研究风筒和锥形多出口装置结构特征对出口风速的影响,进而确定风送系统的最优设计方案,以满足果树不同生长形态的病虫害防治需求。

1 风送系统结构与原理

当前大规模定向种植模式的梨园[22-23],植株的行间间距为 3~4 m,株距为 2~3 m,树高 2~3 m,为了提高喷雾机出口风速及其均匀性,设计了一种可安装在履带式果园喷雾机上的风送系统,主要由轴流风机、风筒和锥形多出口装置构成,如图 1 所示。风送气流由轴流风机产生,经风筒和锥形多出口装置将单股气流分成多个流向出口,由于出口面积较小,可以有效减少风送系统风量和风压损失,为气流的定向输送和调整提供条件,提高气流利用率。

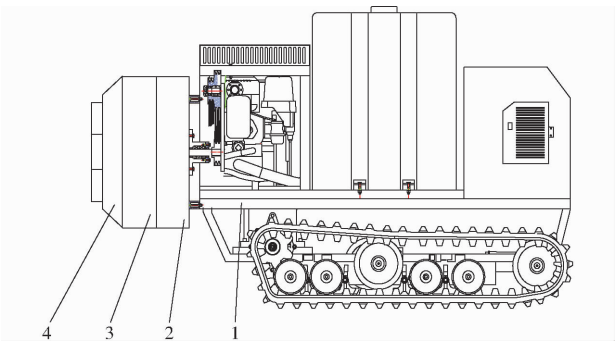


图 1 履带式果园喷雾机的风送系统

Fig. 1 Air conveying system of crawler orchard sprayer

1. 履带式果园喷雾机 2. 轴流风机 3. 风筒 4. 锥形多出口装置

2 关键部件设计与优化

2.1 轴流风机参数确定

2.1.1 风量和风压

在风送系统设计中,除了导流装置设计外,最为重要的环节就是风机设计或选型,风机性能直接影响到喷雾机的有效喷雾距离和雾化效果。风送喷雾机既要求出口气流具备一定动能以到达冠层内部,也要求进风口具备一定压力,因此风机设计或选型最重要的两个参考标准就是风量和风压[24],较大的风量可以提升喷雾机二次雾化的效果,并且能使果树叶片翻转,帮助药液进入果树冠层内部,增强喷雾穿透性[25]。果园风送喷雾机风量的确定通常采用

置换原则和末速度原则[26]，如图 2 所示。

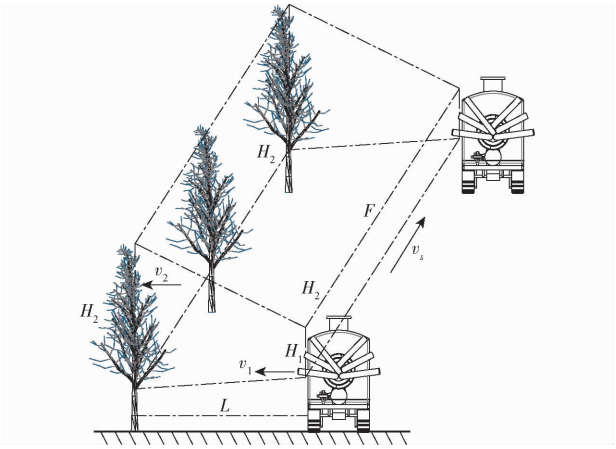


图 2　喷雾机风量置换图

Fig. 2　Sprayer air volume replacement diagram

根据置换原则，风机产生的风量需完全置换出风口至果树的整个空间，风量计算式为[26]

$$Q = \frac{v_s LK}{2}(H_1 + H_2) \tag{1}$$

式中　Q——风量，m^3/s

H_1——喷雾机喷幅宽度，m

H_2——树高，m

L——出风口与树干之间的距离，m

v_s——喷雾机行走速度，m/s

K——气流损失系数，与果树品种、枝叶茂盛程度及气象条件有关，取 1.3 ~ 1.6

在此基础上，考虑末速度原则，根据通过截面的风量相等，得到风管出口气流速度[26]为

$$v_1 = \frac{H_2 v_2}{H_1 K} \tag{2}$$

式中　v_1——风管出口气流速度，m/s

v_2——气流到达树叶气流速度，m/s

所设计搭载风送系统的履带式果园喷雾机主要用于规范化梨园，气流到达树叶最佳风速 v_2 为 7 ~ 8 m/s，其他参数：H_1 为 0.9 ~ 1.6 m，H_2 为 2.6 ~ 3.0 m，L 为 1 m，v_s 为 0.3 ~ 0.7 m/s，代入式(1)、(2)可得出 Q 为 0.682 5 ~ 2.576 m^3/s，v_1 为 7.11 ~ 20.51 m/s。为确保风量满足较大植株，拟定 Q 为 2 m^3/s，即 7 200 m^3/h。

果园风送喷雾机既要求出口气流具备一定动能以到达冠层内部，也要求进风口具备一定压力。风机压力一部分用来提供风机进风口动压，另一部分用来克服摩擦压力损失和局部压力损失[27]，计算式为

$$p = \frac{\rho v_1^2}{2} + \frac{\lambda}{2R}\frac{\rho v_1^2}{2} l + \frac{\xi \rho v_1^2}{2} \tag{3}$$

式中　p——风压，Pa

ρ——空气密度，kg/m^3

λ——摩擦因数　　R——风管半径，m

ξ——局部阻力系数　　l——风管长度，m

参数取值为：ρ = 1.2 kg/m^3，v_1 = 20 m/s，λ = 0.1，R = 0.07 m，ξ = 0.3，l = 1.5 m，代入式(3)可得 p = 569 Pa。

2.1.2　叶轮参数

根据果园喷雾机发动机提供给叶轮轴的转速，风机转速 n 设为 2 000 r/min 来确定叶轮结构参数。考虑到喷雾机上风送系统结构不宜太过复杂，因此风机结构设计为单独叶轮级。计算公式[28]为

$$n_s = \frac{n\sqrt{Q}}{p^{3/4}} \tag{4}$$

$$D = \frac{60K_u\sqrt{2\dfrac{p}{\rho}}}{n\pi} \tag{5}$$

式中　n_s——比转数

D——叶轮外径，m

K_u——统计经验系数，取 1.9

因此，确定风机叶轮外径为 0.54 m，叶片数为 6。

2.2　风筒设计与优化

风筒连接轴流风机和锥形多出口装置，是风送系统的关键部件，它可以减少轴流风机气流的旋转趋势和不稳定性，如图 3 所示。

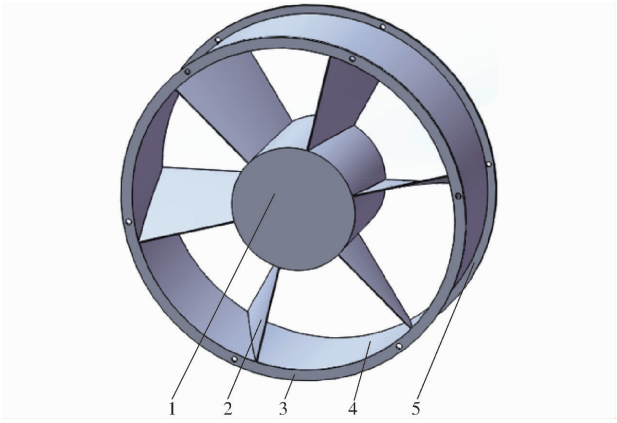


图 3　风筒结构示意图

Fig. 3　Schematic of structure of air duct

1. 导叶筒　2. 导叶　3. 法兰(固定锥形多出口装置)　4. 风筒壁面　5. 法兰(固定风筒)

为了研究风筒内部导叶特征对出口风速的影响，对风筒内部导叶数量、安装角和长度进行结构设计和仿真分析。流场仿真设叶轮转速为 2 000 r/min，叶轮叶片数为 6，每次模拟只改变一个特征参数。方案 1：导叶安装角为 20°，长度为 20 cm，导叶数量为 5、6、7、8、9；方案 2：导叶数量为 6，长度为 20 cm，安装角为 0°、5°、10°、15°、20°；方案 3：导叶安装角为 10°，导叶数量为 6，长度为 5、10、15、20、25 cm。风筒出口截面的模拟结果如图 4 所示。

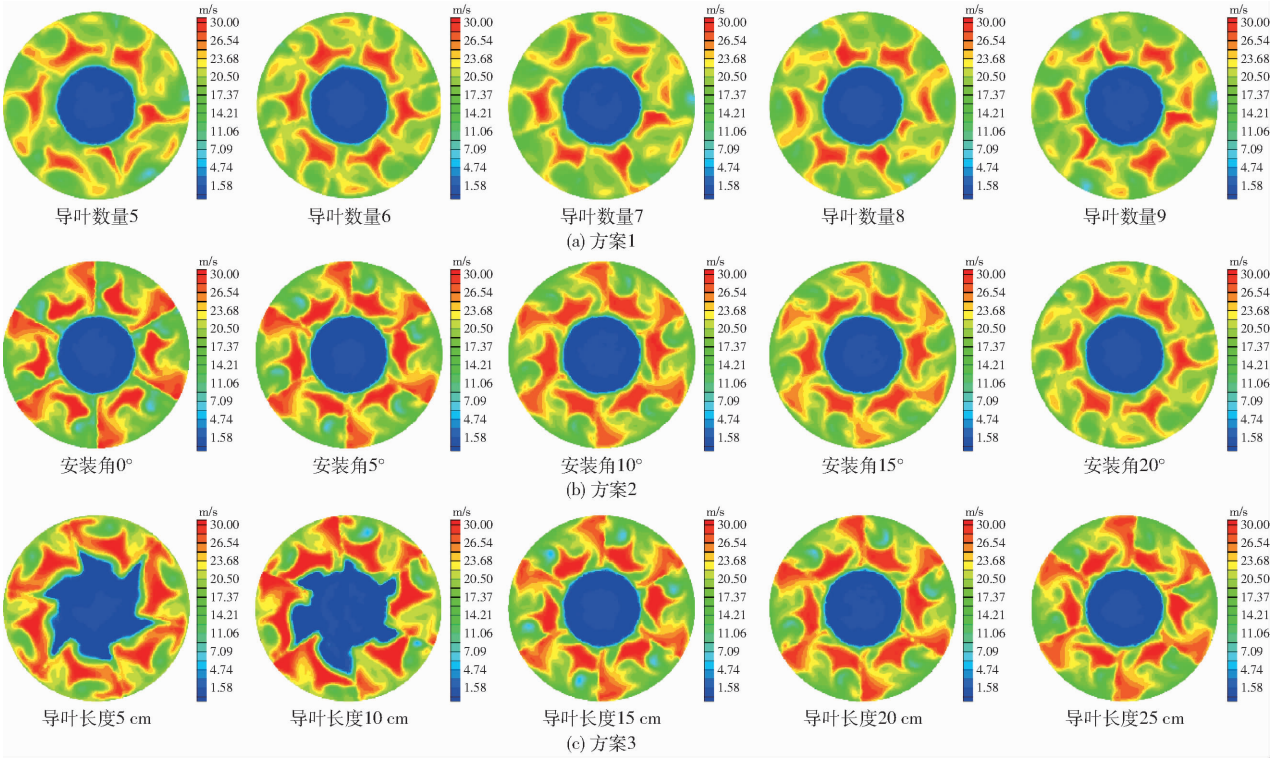


图 4 风筒出口速度云图

Fig. 4 Air duct exit velocity cloud maps

由图 4 可知,方案 1 中随着导叶数量的增加,流道的最大风速变化不大,基本稳定在 33 m/s 左右,平均风速呈下降趋势,从 25.15 m/s 降至 22.72 m/s;当导叶数量为偶数时每个流道气流的风速分布相似,气流分布较为均匀,具有较高的对称性,波动幅度不明显,且出风口气流红色高风速区域主要集中在导叶的左侧壁面。方案 2 中导叶安装角越小,风速最大值越大,且各流道之间的风速差异最小,但从风速平均值来看,导叶安装角为 10°时各流道平均风速最大,达 24.5 m/s。方案 3 中可以发现导叶长度小于等于 10 cm 时,速度云图中心区域的低风速区域呈不规则型,且该区域面积明显大于其他几种情况;当导叶长度大于 10 cm 时,气流开始稳定,速度云图的差异较小,但各个流道中存在小部分速度小于 9 m/s 的区域,当长度达到 20 cm 以后,该区域开始消失;随着导叶长度的增加,最大风速呈小幅度下降,但平均风速稳定在 23 m/s 左右,各个流道气流的速度区域稳定。

对导叶数量、安装角、长度与出口风速进行线性回归分析,回归系数见表 1。

由表 1 可知,风筒导叶参数对出口风速影响的显著性由大到小为:长度、安装角、数量。因此,采用 20-6-0 型、20-6-10 型和 20-8-10 型 3 种较优的风筒设计方案进行后续研究,其中 20 表示长度、6 和 8 表示导叶数量、0 和 10 表示安装角。

表 1 导叶数量、安装角、长度与出口风速的回归系数

Tab. 1 Regression coefficient of guide vane number, installation angle, length and outlet wind speed

模型	非标准化系数		标准化系数	t 检验
	回归系数	标准误差		
常量	20.270	2.242		9.039
导叶数量	-0.297	0.343	-0.191	-0.864
安装角	0.047	0.032	0.333	1.477
导叶长度	0.200	0.063	0.646	3.196

2.3 锥形多出口装置结构设计与优化

锥形多出口装置连接风筒和软性风管,能够将气流平滑地从风机出口输送至 6 根风管,减少气流的损失,提高了输送效率。针对锥形多出口装置的设计,通过改变锥形罩锥度(0.75、1.25、1.75、2.25、2.75)和出口布局(A 型、B 型、C 型)来研究特征参数对风送效果的影响,锥形多出口装置示意图如图 5 所示。

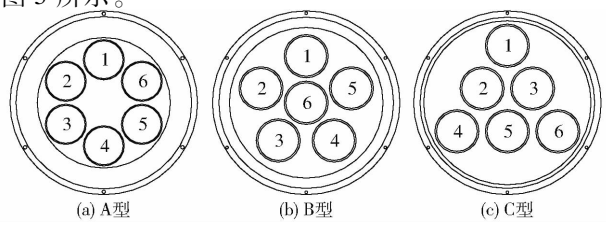
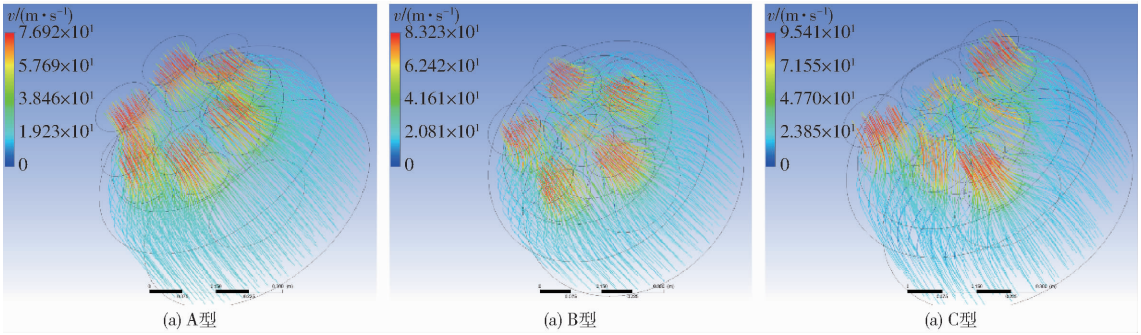


图 5 锥形多出口装置示意图

Fig. 5 Multi-outlet cone covers with different layouts

2.3.1　出口布局

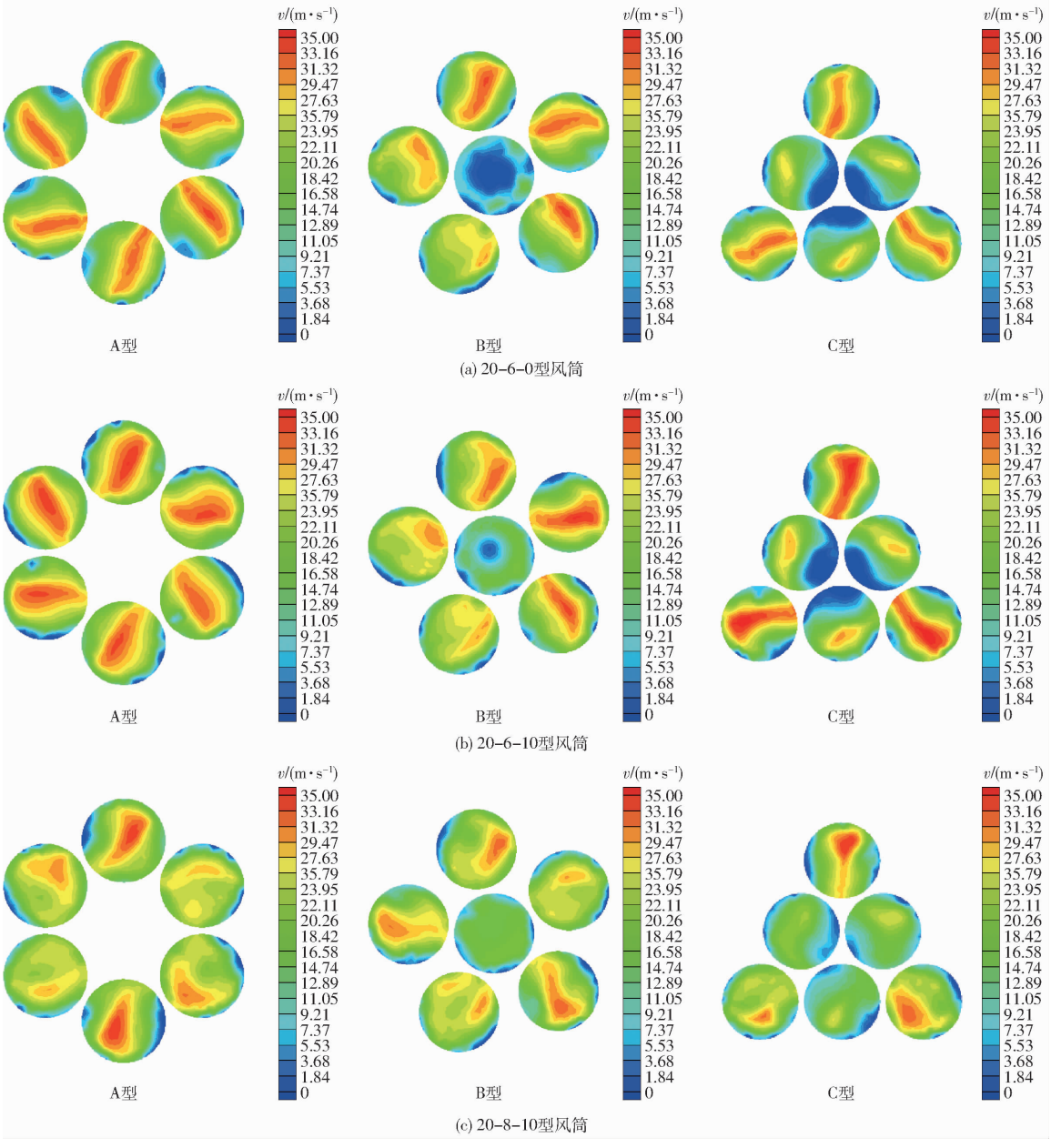
将锥形多出口装置连接在风筒和风机上，将 A 型、B 型、C 型 3 种出口布局（锥度不变）分别与 20－6－0 型、20－6－10 型、20－8－10 型 3 种风筒进行组合模拟，叶轮转速设为 2 000 r/min，气流轨迹与出口速度云图如图 6、7 所示。



(a) A型　　(a) B型　　(a) C型

图 6　3 种布局锥形多出口装置气流轨迹图

Fig. 6　Air flow trajectories of conical multi-outlet device with three layouts



(a) 20–6–0型风筒

(b) 20–6–10型风筒

(c) 20–8–10型风筒

图 7　3 种布局锥形多出口装置出口速度云图

Fig. 7　Contour maps of exit velocity of three layouts with multi-outlet devices

由图 6 可知,当 3 种布局锥形多出口装置分别与同一种风筒组合时,C 型装置中间 3 个出口气流流畅度最低,内部流线出现了旋涡和旋转的现象,增加了气流传递过程中能量的损失,B 型和 A 型装置旋涡现象基本消失。从图 7 可以看出,A 型多出口装置各个出口的中心区域风速均为最高,每个出口的气流分布差异较小,且与 20 - 6 - 10 型风筒组合效果最佳,平均风速达 28.73 m/s,各出口中心风速标准差仅有 0.31 m/s,而 B 型装置 6 号出口和 C 型装置 2、3、5 号出口风速明显低于其他出口,原因是装置中心位置出口下方有导叶筒存在,阻碍了气流传递。当 3 种风筒分别与同一锥形多出口装置组合时,可以发现导叶数量 6 风筒装置各个出口风速的均匀性明显优于导叶数量 8 风筒,但 20 - 6 - 0 型风筒各出口的风速和气流均匀性不如 20 - 6 - 10 型。由此可知,20 - 6 - 10 型风筒和 A 型出口布局锥形多出口装置组合的气流效果最优。

2.3.2 锥度

在探究锥形罩锥度对出口风速影响的模拟中,叶轮转速固定为 2 000 r/min,风筒选用 20 - 6 - 10 型,出口布局为 A 型,锥度分别为 0.75、1.25、1.75、2.25、2.75,图 8 为锥形多出口装置出口截面速度云图。随着锥形罩锥度的增大,气流逐渐从出口内壁的一侧往中心区域集中,且速度云图上的高风速区域增大,锥度为 2.25 时,高风速区域面积最大。锥形罩的设计可以明显提高各个出口的最大风速,对平均风速的提升效果并不明显,当锥度在 0.75 ~ 1.75 之间时,各个出口的平均风速在 27 m/s 左右,锥度为 2.25 时平均风速为 28.73 m/s,达到最大,并且出口之间的风速差异最小。由此可知,锥度对锥形多出口装置出口风速的提升效果并不明显,不同锥度下,各个出口平均风速的差异较小,其中锥度为 2.25 时,出口气流效果最佳。

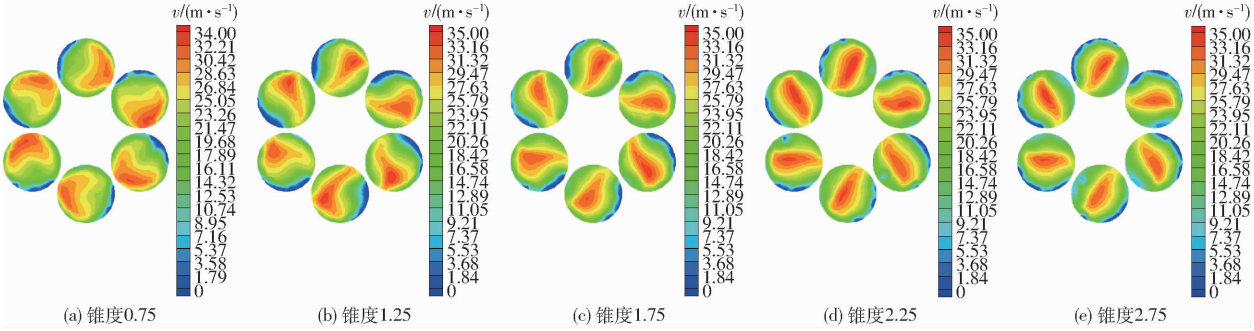


图 8 出口速度云图

Fig. 8 Exit velocity cloud maps

综上所述,采用 20 - 6 - 10 型风筒,锥形多出口装置按照锥度为 2.25、出口布局为 A 型进行设计,该选型为风送系统的最优组合。

3 风送系统参数优化与性能试验

3.1 试验材料与设备

为验证风送系统结构设计的合理性及得到最优结构参数组合的可靠性,设计了 20 - 6 - 0 型、20 - 6 - 10 型、20 - 8 - 10 型 3 种风筒和锥度为 2.25 的 A 型、B 型、C 型 3 种锥形多出口装置,将 9 种风筒-锥形多出口装置组合安装在履带式果园喷雾机上(图 9),根据文献[29]方法,采用 kanomax 6243 型多点风速仪和 SMART AR866 型手持式风速仪测量气流速度,DT - 2234C 型转速计测量风机转速,开展风送系统的性能试验和喷雾机外部流场试验。



图 9 履带式果园喷雾机

Fig. 9 Crawler orchard sprayer

3.2 试验方法

3.2.1 风送系统模型试验验证

为了验证仿真分析的准确性以及检验优化设计的实际效果,测量锥形多出口装置的出口风速。试验设置风机转速为 2 000 r/min,将 3 种锥形多出口装置分别安装在 3 种风筒上,将风速仪探头置于锥形出口装置出口圆心位置对风速进行采集,测量 10 s 内各个测量点风速平均值,每组试验重复 3 次,以保证数据的准确性,现场试验如图 10 所示。

3.2.2 喷雾机外部流场试验

在风送喷雾作业中,风送系统流出的气流通过光滑的软管指向靶标,为了进一步研究喷雾机外部

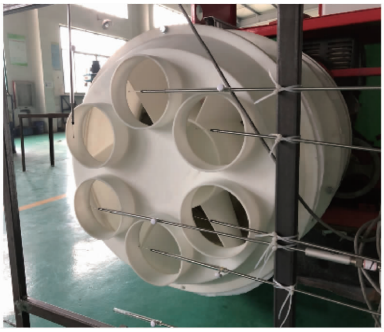


图 10　锥形多出口装置气流分布试验

Fig. 10　Airflow distribution test of conical multi-outlet device

流场的分布及衰减规律，基于仿真及优化试验确定的关键部件结构参数，完成履带式果园喷雾机及风送系统的加工试制，并将风管及风阀安装在风送系统上进行喷雾机外部流场试验。

(1)单风管气流射流边界试验

使用手持热敏式风速仪测量不同风送距离下，每个界面的边界风速，将风速仪放在与风管出口轴线等高的试验架上、上下左右移动风速仪，当测量值为 1.5 m/s 时，认定此处为截面上风速的边界[30]，并记录距离。每个截面测量上、下、左、右共 4 个点，一共设置 7 个测量截面，每个测量截面与出口的距离分别为 0、0.5、1、1.5、2、2.5、3 m。设置 8 种风管出口直径，分别为 7、8、9、10、11、12、13、14 cm。分别在风机转速为 2 000、2 500、2 800 r/min 3 种转速下进行试验，射流边界值测量示意图如图 11 所示。

(2)多风管风场试验

设置风机转速分别为 2 000、2 500、2 800 r/min，风管出口直径为 14 cm，在距离风管出口中心 0、0.5、1、1.5、2、2.5、3、4 m 设置测量点，待风送系统稳定后，测量两侧风管的气流速度，利用多点风速仪测量 3 个风机转速下各风管出口中心测量点的风速，每个测量点重复 3 次取平均值。风管排列序号和现场试验图如图 12 所示。

3.3　风送系统结构对出口风速的影响

根据试验测量 9 种风筒-锥形多出口装置组合

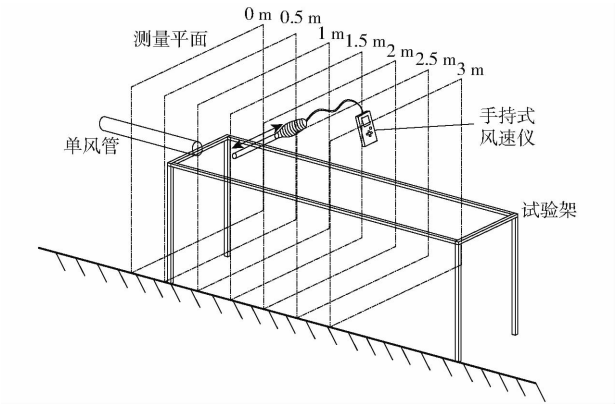


图 11　单风管射流边界试验示意图

Fig. 11　Schematic of jet boundary test of single air duct

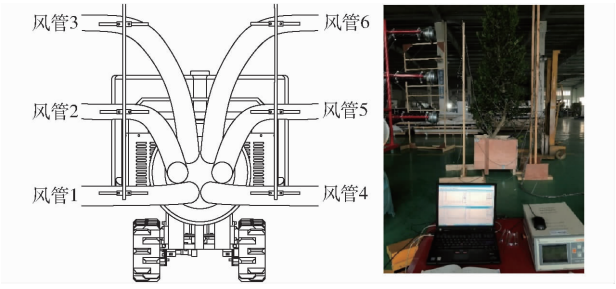


图 12　多风管风场试验

Fig. 12　Multi-duct wind field test

各个出口测量点的风速，各个出口风速如图 13 所示。

各个出口风速试验结果如图 13 所示，当 3 种锥形多出口装置分别与同一种风筒配合时，A 型装置各出口风速的差异较小，平均值更大，B 型装置的 6 号和 C 型装置的 2、3、5 号出口风速明显低于其他出口，可见 A 型出口装置设计优于 B、C 型。当 3 种风筒分别与同一锥形多出口装置组合时，导叶数量 6 风筒组合的各个出口风速差异明显小于导叶数量 8 的风筒，其中 20－6－0 型风筒各出口风速和气流均匀性明显不如 20－6－10 型，与模拟结果所得气流速度分布规律一致。

以各风送系统平均风速模拟值与试验值相对误差、各出口风速试验值的变异系数为评价指标对仿

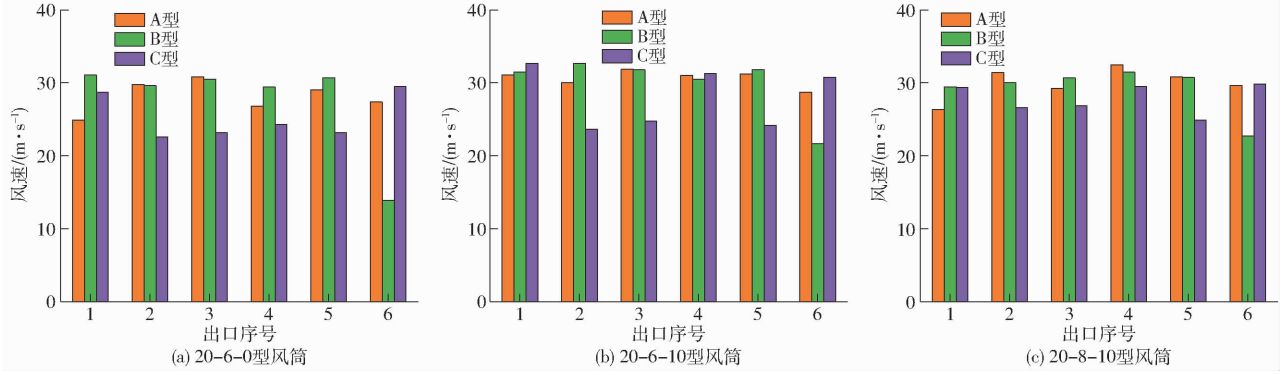


图 13　9 种组合各个出口风速

Fig. 13　Nine combinations of each outlet wind speed

真与试验进行评估。表 2 为 9 种风送系统各出口风速试验值的变异系数以及平均风速试验与模拟结果对比，平均风速相对误差均不大于 9.03%，可见仿真模型可靠性较高，能够较好地反映风送系统在实际作业中的气流场分布特性。其中 20－6－10 型风筒和 A 型出口布局锥形多出口装置组合的风送系统结构各出口平均风速试验和仿真值相对误差为 4.66%，各出口风速试验值变异系数为 3.63%，出口风速效果最优，表明该风送系统可提供稳定均匀的气流，性能可满足果园喷雾机出口风速的作业要求。

3.4 喷雾机外部流场试验结果与分析

3.4.1 单风管气流射流边界试验

风机产生的气流可以将药液输送到更远的地方，而单根风管出口风速的调节可以更好地应对精准施药的要求。根据验证试验结果进行喷雾机外流场单风管风场试验，各试验组竖直、水平方向射流边界随风送距离及出口直径的变化曲线如图 14、15 所示。

表 2 试验与模拟结果对比

Tab. 2 Comparison of test and simulated average wind speed results

风筒	出口	模拟值/(m·s^{-1})	试验值/(m·s^{-1})	相对误差/%	变异系数/%
20－6－0 型	A 型	27.43	28.11	2.48	7.76
20－6－0 型	B 型	25.02	27.28	9.03	14.41
20－6－0 型	C 型	23.50	25.22	7.32	12.10
20－6－10 型	A 型	28.73	30.07	4.66	3.63
20－6－10 型	B 型	27.56	29.98	8.78	13.81
20－6－10 型	C 型	25.82	27.87	7.94	14.71
20－8－10 型	A 型	28.09	29.98	6.73	2.10
20－8－10 型	B 型	27.05	29.17	7.84	7.10
20－8－10 型	C 型	25.77	27.83	7.99	9.13

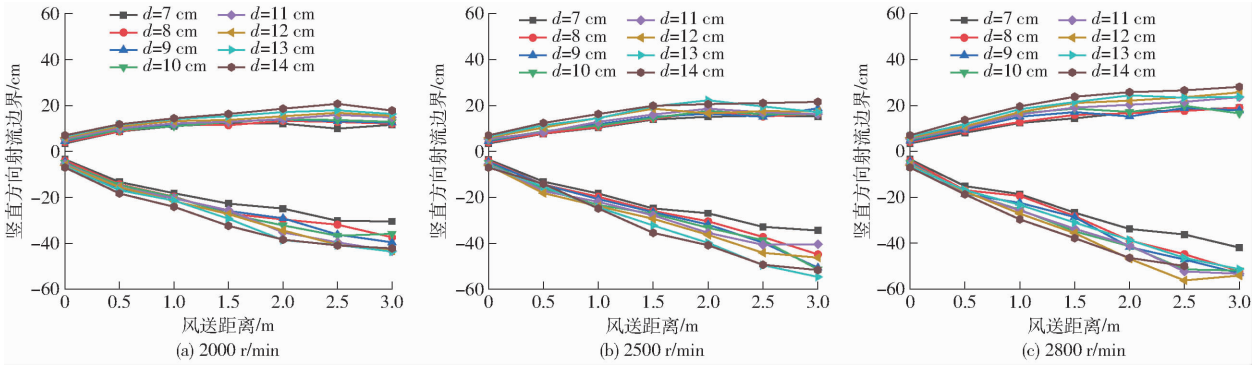


图 14 竖直方向上射流边界

Fig. 14 Jet boundary in vertical direction

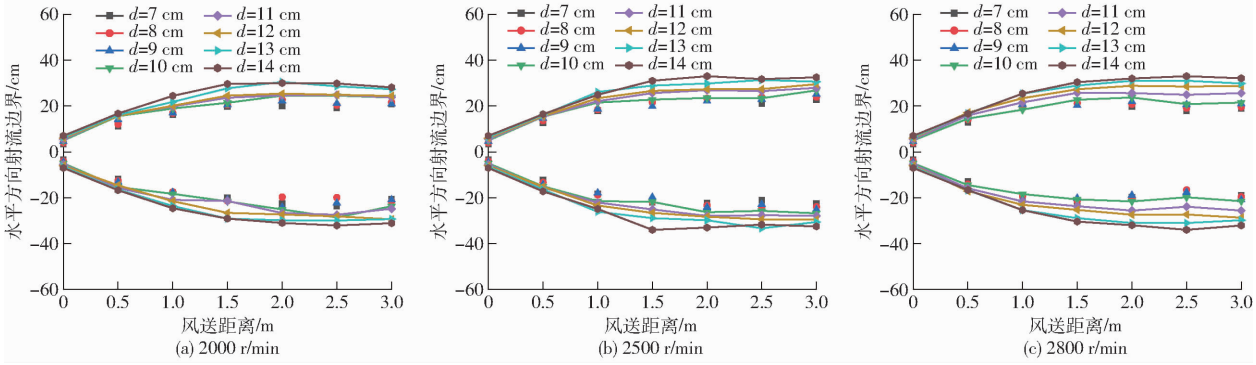


图 15 水平方向上射流边界

Fig. 15 Jet boundary in horizontal direction

由图 14 可知，上下边界没有呈现对称的现象，可能是由测量时产生的误差、风管安装没有完全水平以及外界的气流和空气自身质量等原因导致的。3 种转速下风管上侧射流边界随风送距离增加呈现先增大后平缓的趋势，下侧则呈现线性扩大的趋势；在相同转速下，在风送距离 0～1.5 m 内，射流边界随出口直径的增加而明显增大，在风送距离 1.5～3 m 内，曲线波动较大，下侧射流边界相较上侧变化更为明显；随着风机转速的提升，射流边界逐渐升高，出口直径为 7 cm 时，转速 2 000 r/min 的上侧射流边界最大为 20.7 cm，而当转速增加至 2 800 r/min 时，最大值达到 28.1 cm，出口直径为 14 cm 时，下侧射流边界由 2 000 r/min 时的 43.6 cm 增加至 2 800 r/min 时的 58.6 cm。

从图 15 中可以看出，与竖直方向相比，水平方向上风管左右两侧射流边界具有较高的对称性，曲

线较为平滑，没有明显的波动。当出口直径相等时两侧曲线基本保持一致，随着转速提升，射流边界范围明显扩大，在转速为 2 000 r/min 时水平射流边界最大值为 61.9 cm，当转速提升至 2 800 r/min，边界的最大值为 67 cm。随着风送距离的增加，射流边界逐渐增大，在风送距离为 0 ~ 1.5 m 时边界迅速扩大，当风送距离大于 1.5 m 时，射流边界变化很小，曲线趋于水平，这与竖直方向上射流边界的分布规律相似。

风管出口射流边界的研究为风送系统风管间距的设置提供了一定的参考依据，观察低转速时射流边界曲线可以发现，当风送距离大于 1.5 m 时，曲线开始保持水平状态，部分射流边界减小，可见风机转速为 2 000 r/min 的工况并不适用于喷雾作业。

3.4.2　多风管风场试验结果与分析

风送式喷雾机作业时，气流风速和射程是评价喷雾机外流场速度分布的重要指标。通过开展喷雾机风送系统外流场性能试验，得到喷雾机两侧风速随风送距离的变化情况，风机转速为 2 000 r/min 时的试验结果如表 3 所示。

表 3　风机转速 2000 r/min 工况下左右两侧风速

Tab.3　Wind speed difference between left and right sides under condition of fan speed of 2000 r/min　　m/s

项目	风送距离/m							
	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4
风管 1	10.20	9.50	8.44	5.79	3.17	1.70	1.23	1.05
风管 4	10.05	9.32	8.24	5.82	3.29	1.78	1.11	1.15
风速差	0.15	0.18	0.2	−0.03	−0.12	−0.08	0.12	−0.10
风管 2	9.94	8.49	7.92	5.78	4.56	3.56	3.19	2.69
风管 5	10.01	8.24	8.11	5.82	4.60	3.83	3.25	2.47
风速差	−0.07	0.25	−0.19	−0.04	−0.04	−0.27	−0.06	0.22
风管 3	9.35	8.05	6.53	5.37	3.31	2.73	1.87	1.85
风管 6	9.32	8.14	6.31	5.42	3.33	2.68	1.68	1.98
风速差	0.03	−0.09	0.22	−0.05	−0.02	0.05	0.19	−0.13

由表 3 可知，喷雾机两侧多风管风场对称，外流场试验测量点可以选择只布置在一侧。20 − 6 − 10 型风筒和 A 型出口布局锥形多出口装置风送系统在不同风送距离下风管出口风速如图 16 所示，根据大量试验经验可知，当风速小于 1.5 m/s 时，气流对冠层的穿透性不足[19]，气流风速从风管出口至风送距离 4 m 处呈不断衰减趋势，在风送距离 0 ~ 2 m 范围内风速较高，在 5 m/s 以上且衰减现象较为明显，在风送距离 2 ~ 3 m 时风速在 3 m/s 左右，在风送距离 3 ~ 4 m 内风速衰减到 1.5 m/s 左右，表明该喷雾机风送气流距离能达到 4 m 的射程要求。随着风机转速的提升，气流在同一风送距离处速度也随之增大，但对气流衰减程度影响较小，且同一转速下不同风管风速之间的差距随风送距离增加呈现缩小的趋势，有利于均匀覆盖整个作业区域，提高喷雾机工作效率。

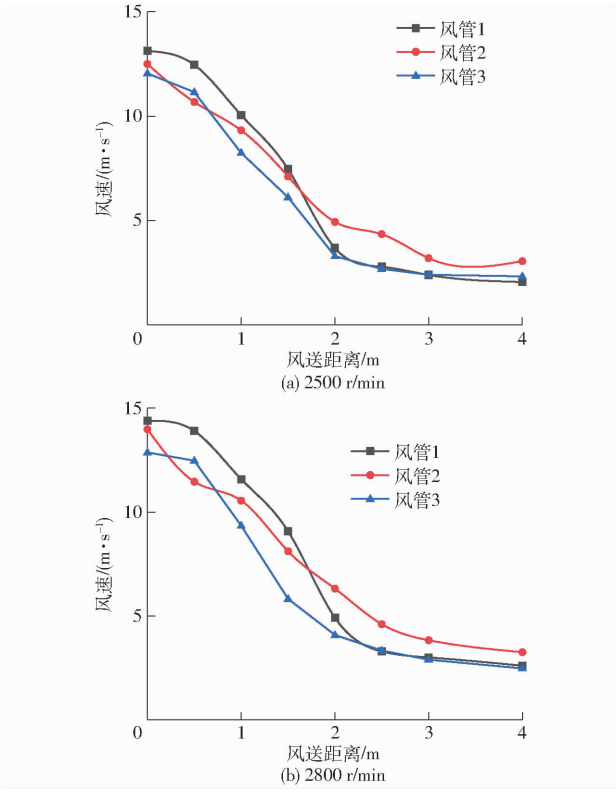


图 16　风管风速曲线

Fig.16　Wind speed curves of ducts

4　结论

（1）设计了一种适用于传统果园喷雾机的轴流式风送系统，对关键部件进行了选型和结构优化设计，确定了风筒导叶特征和锥形多出口装置参数是影响风送系统性能的关键因素。

（2）采用 Fluent 分析软件对轴流风机、风筒和锥形多出口装置内的流场进行数值模拟，仿真结果表明，风筒导叶参数对出口风速影响由大到小为：长

度、安装角、数量,风送系统最优参数组合为:风筒导叶安装角为 10°、数量为 6、长度为 20 cm,锥形多出口装置锥度为 2.25、出口布局为 A 型,最优参数组合下风送系统出口风速模拟值与试验值的相对误差为 4.66% 和变异系数为 3.63%,验证了数值模拟结果的可靠性。

(3)通过喷雾机外部流场试验可得,射流边界范围随着出口直径和转速的增加而增大;气流场风速越高,喷雾机风送距离越大,当风送距离为 0 ~ 2 m 时,风速在 5 m/s 以上且衰减幅度明显,当风送距离大于 2 m 时,气流衰减较为平缓到 1.5 m/s 左右,能满足喷雾机风送气流距离达到 4 m 的射程要求。

(4)优化后轴流式果园喷雾机风送系统结构合理,从气流均匀性、风速、边界和射程等方面均满足果园植保机械需求。

参 考 文 献

[1] 翟长远, 王秀, 葛纪帅, 等. 风送喷雾雾滴粒径测量系统设计与影响因素试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 33 - 38.
ZHAI Changyuan, WANG Xiu, GE Jishuai, et al. Design of droplet size measuring system of air-assisted spraying and experiment on its influencing factors[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(19): 33 - 38. (in Chinese)

[2] 李超. 葡萄园风送式喷雾机的设计[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
LI Chao. Design on air-assisted vineyard sprayer[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012. (in Chinese)

[3] BURGIO G, MARCHIESINI E, REGGIANI N, et al. Habitat management of organic vineyard in Northern Italy: the role of cover plants management on arthropod functional biodiversity[J]. Bulletin of Entomological Research, 2016, 106(6): 759 - 768.

[4] 周良富, 张玲, 薛新宇, 等. 3WQ - 400 型双气流辅助静电果园喷雾机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 45 - 53.
ZHOU Liangfu, ZHANG Ling, XUE Xinyu, et al. Design and experiment of 3WQ - 400 double air-assisted electrostatic orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 45 - 53. (in Chinese)

[5] 李建平,边永亮,霍鹏,等.喷雾机风送式环形喷管喷雾装置设计与试验优化[J].农业机械学报,2021,52(9):79 - 88.
LI Jianping, BIAN Yongliang, HUO Peng, et al. Design and experimental optimization of spray device for air-fed annular nozzle of sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):79 - 88. (in Chinese)

[6] 王伯凯,于昭洋,胡志超,等.花生捡拾收获机三风系风选系统流场数值模拟与试验[J].农业机械学报,2021,52(11):103 - 114.
WANG Bokai, YU Zhaoyang, HU Zhichao, et al. Numerical simulation and experiment of flow field in three air systems of air separation system of peanut pickup harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11):103 - 114. (in Chinese)

[7] 王永生, 陈虎, 刘建永. 轴流风机研究现状及发展趋势[J]. 装备制造技术, 2012(1): 120 - 121.
WANG Yongsheng, CHEN Hu, LIU Jianyong. Research and development tendency of counter-roating axial[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2012(1): 120 - 121. (in Chinese)

[8] 昌泽舟, 罗皓, 郭丽娜, 等. CFD 软件在通风机设计中的应用[J]. 风机技术, 2009, 51(2): 60 - 64, 72.
CHANG Zezhou, LUO Hao, GUO Li'na, et al. Application of CFD software in the design of fan[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2009, 51(2): 60 - 64, 72. (in Chinese)

[9] SIDAHMED M M, BROWN R B. Simulation of spray dispersal and deposition from a forestry airblast sprayer—Part Ⅰ: air jet model[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(1): 5 - 10.

[10] XU Z G, WALKLATE P J, RIGBY S G, et al. Stochastic modelling of turbulent spray dispersion in the near-field of orchard sprayers[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74/75/76: 295 - 304.

[11] 周良富, 薛新宇, 贾卫东, 等. CFD 技术在果树风送喷雾中的应用与前景分析[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(9): 776 - 782.
ZHOU Liangfu, XUE Xinyu, JIA Weidong, et al. Application of CFD technology in air-assisted spraying in orchard and analysis of its prospects[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(9): 776 - 782. (in Chinese)

[12] ENDALEW A M, DERBAER C, RUTTEN N, et al. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying—Part Ⅱ: validation for different sprayer types[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(2): 137 - 147.

[13] ENDALEW A M, DERBAER C, RUTTEN N, et al. Modelling 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.

[14] SALCEDO R, GRANELL R, PALAU G, et al. Design and validation of a 2D CFD model of the airflow produced by an airblast sprayer during pesticide treatments of citrus[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 116: 150 - 161.

[15] DELELE M A, JAEKEN P, DEBAER C, et al. CFD prototyping of an air-assisted orchard sprayer aimed at drift reduction [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2007, 55(1):16 - 27.

[16] DELELE M A, MOOR A D, SONCK B, et al. Modelling and validation of the air flow generated by a cross flow air sprayer as affected by travel speed and fan speed[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(2):165 - 174.

[17] 徐立章,于丽娟,李耀明,等. 双出风口多风道离心风机内部流场数值模拟[J].农业机械学报,2014,45(10):78－86.
XU Lizhang, YU Lijuan, LI Yaoming, et al. Numerical simulation of internal flow field in centrifugal fan with double outlets and multi-duct[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 78－86. (in Chinese)

[18] 童水光,沈强,唐宁,等. 纵轴流清选装置混合流场数值模拟与优化试验[J].农业机械学报,2016,47(7):135－142.
TONG Shuiguang, SHEN Qiang, TANG Ning, et al. Numerical simulation and optimization experiment of mixed flow field on longitudinal axial flow cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 135－142. (in Chinese)

[19] 丁天航. 双风机双流道果园喷雾机气流场特性研究[D]. 北京：中国农业科学院, 2016.
DING Tianhang. Research on double fans double channel orchard sprayer airflow field characteristic[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese)

[20] 周杰,许林云,周宏平,等.出风口导流分割对轴流式果园喷雾机流场的影响[J].林业工程学报,2018,3(6):128－134.
ZHOU Jie, XU Linyun, ZHOU Hongping, et al. Effect of air outlet stream diversion segmentation on flow field of axial-flow orchard sprayer[J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(6): 128－134. (in Chinese)

[21] 王杰, 茹煜, 周宏平, 等. 苗木喷雾机风送系统优化设计及气流场试验[J]. 林业工程学报, 2020, 5(1): 129－138.
WANG Jie, RU Yu, ZHOU Hongping, et al. Optimal design and airflow field test of seedling sprayer air-assisted system[J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(1): 129－138. (in Chinese)

[22] 邱威, 丁为民, 汪小旦, 等. 3WZ－700 型自走式果园风送定向喷雾机[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 26－30, 44.
QIU Wei, DING Weimin, WANG Xiaochan, et al. 3WZ－700 self-propelled air-blowing orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 26－30, 44. (in Chinese)

[23] 姜宗月, 张晓辉, 范国强, 等. 果园定向仿形弥雾机的设计[J]. 农机化研究, 2015, 37(5): 173－175, 228.
JIANG Zongyue, ZHANG Xiaohui, FAN Guoqiang, et al. Design of orchard directional profiling mist sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(5): 173－175, 228. (in Chinese)

[24] 王亮杰. 风送式葡萄园喷雾机的研制与试验[D]. 泰安：山东农业大学, 2015.
WANG Liangjie. Development and experiment of air-assisted vineyard sprayer[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[25] 王荣. 风送式葡萄园喷雾机的研制[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2015.
WANG Rong. Development of air-assisted vineyard sprayer[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)

[26] 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.
DAI Fenfen. Selection and calculation of the blowing rate of air-assisted sprayers[J]. Plant Protection, 2008, 34(6): 124－127. (in Chinese)

[27] 王杰. 苗木对靶喷雾机风送系统设计及流场分析[D].南京：南京林业大学,2018.
WANG Jie. Design and flow field analysis on air pneumatic system of seedlings to target sprayer[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018. (in Chinese)

[28] 杨诗成, 王喜魁. 泵与风机[M]. 北京:中国电力出版社, 2016.

[29] GB/T 24683—2009　植物保护机械灌木和乔木作物用风送式喷雾机试验方法[S].北京:中国标准出版社,2010.

[30] 周良富,周立新,薛新宇,等.风送喷雾气流衰减与扩展规律分析与试验[J].农机化研究,2019,41(6):201－204,208.
ZHOU Liangfu, ZHOU Lixin, XUE Xinyu, et al. Test and analysis on air attenuation & diffusion law of air-assisted spraying [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019,41(6):201－204,208. (in Chinese)