

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.014

温室轨道式弥雾机气流速度场三维模拟与试验*

祁力钧¹ 王虎¹ 张建华¹ 冀荣华² 王俊³

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;

3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 基于 CFD 模拟技术建立了温室轨道式弥雾机的气流速度场分布模型, 并对模拟结果进行了验证。研究表明, 在所设计的模拟区域内, 气流速度在垂直和水平两个方向呈梯度减小趋势; 改变喷孔气流速度对气流速度场空间分布状态不会产生显著影响, 但对雾滴的分布范围有明显拓展作用; 把喷孔气流速度由 25 m/s 提高到 50 m/s, 可将吹送距离由 2.4 m 增大到 3.6 m, 气流速度场范围半径由 0.20 m 扩大到 0.25 m。试验和模拟结果对比表明, 所建模拟模型能够较准确地模拟温室轨道式弥雾机气流速度场的速度分布特性。

关键词: 弥雾机 温室 喷雾 计算流体力学 三维模拟 气流速度场

中图分类号: S491; TP15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0069-06

3-D Numerical Simulation and Experiment of Air-velocity Distribution of Greenhouse Air-assisted Sprayer

Qi Lijun¹ Wang Hu¹ Zhang Jianhua¹ Ji Ronghua² Wang Jun³

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: An air-velocity distribution model of greenhouse air-assisted sprayer was built by means of CFD simulation technique. Experiments were designed for the evaluation of the simulation results. The research showed that the air velocity decreased as the distance increasing from spray nozzle in vertical and horizontal directions. The change of air flow rate at nozzle had no remarkable influence on the characteristic of air-velocity distribution, but enlarged the droplet distribution area significantly. By increasing the nozzle flow rate from 25 m/s to 50 m/s, the blowing distance could be increased from 2.4 m to 3.6 m, the range of air-velocity distribution expanded from 0.20 m to 0.25 m. The contrast of experiment results and simulation results showed that the simulation model built can be an accurate simulation of the air-velocity distribution of a greenhouse air-assisted sprayer.

Key words: Air-assisted sprayer Greenhouse Spray CFD 3-D simulation Air-velocity distribution

引言

在农药喷施过程中, 雾滴的沉积分布会受到很多因素的影响, 传统的喷雾试验虽然能够描述单因素对喷雾结果的影响, 但对多因素的交互影响则难以给出准确客观的评价。CFD 技术能够借助计算机进行快捷的喷雾模拟, 解决了常规喷雾试验速度

慢、成本高、理想试验条件难以达到等问题。文献表明许多学者对 CFD 模拟技术在室外农药喷施技术方面的应用进行过研究。Weiner 等利用 Fluent 模拟了车载式弥雾机的喷雾流场^[1]; Sidahmed 等也利用 Fluent 对森林用风送式喷雾机的喷雾流场进行了二维和三维模拟^[2]; Tsay 等利用 Fluent 对风助式喷雾的防飘移效果进行了模拟, 通过模拟优化了气流

收稿日期: 2012-02-08 修回日期: 2012-03-19

* 农业部行业科技专项资助项目(201203025)和中国农业大学研究生创业专项资助项目(2012YJ099)

作者简介: 祁力钧, 教授, 博士生导师, 主要从事植保机械和施药技术研究, E-mail: qilijun@cau.edu.cn

速度、流量及气流与喷嘴夹角等参数^[3]; Baetens 等利用 CFX 软件建立了 Hardi Commander 型喷杆风送式喷雾机雾滴飘移的三维模拟模型^[4]。崔志华等利用 Fluent 软件对风筒内气流场进行模拟研究,提出了 9WZCD-25 型风送式喷雾机的改进方案^[5]; 祁力钧等利用 Fluent 软件对果园风送式喷雾机雾滴沉积分布特性进行模拟,并进行定性和定量试验验证^[6]; 陈发元等利用 Fluent 软件对果树喷雾用风扇气流速度场进行三维稳态数值模拟^[7]。目前研究人员对喷雾机的模拟研究多是以室外条件下工作的喷雾机为主要研究对象,针对温室内弥雾机的 CFD 三维模拟研究还很少。

温室内的施药条件与室外喷雾有较大的差别。温室内环境密闭、温度高、湿度大、无风,不利于雾滴在作物冠层内的穿透沉积,并且常规大量、大雾滴喷洒方法极易造成药液流失,容易造成施药人员中毒^[8]。针对温室的环境特点,研究开发了温室专用的轨道式自动弥雾机,可定时、定量、按照设定的喷雾参数自动作业。本文针对该弥雾机,建立其空间气流速度场模型,通过 CFD 技术三维模拟,研究其气流速度场的分布规律。分析不同的喷孔气流速度对气流速度场分布特性的影响,并进行试验验证。

1 温室轨道式弥雾机

温室轨道式弥雾机可以实现自动加药排药,行走和喷雾等功能,如图 1 所示。行走机构可使弥雾机沿导轨自动作往复运动,摆动机构可使喷头在 $\pm 75^\circ$ 范围内匀速摇摆,药液通过加药装置由地面进入导轨上弥雾的机自带药箱。施药过程中药液经导管进入起涡器,起涡器将电风机产生的气流转换成高速旋切的气流,高速旋切的气流将液体雾化,雾滴直径为 $50 \mu\text{m}$ 左右,雾化的雾滴经喷雾装置内的电风机驱动通过喷雾装置下方的 3 个喷孔喷出,飘向温室内的作物。喷孔气流速度在 $25 \sim 50 \text{ m/s}$ 范围内可调。

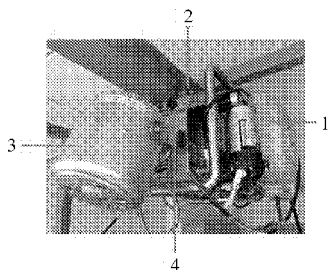


图 1 温室轨道式弥雾机

Fig. 1 Greenhouse air-assisted sprayer

1. 加药装置 2. 行走机构 3. 喷雾装置 4. 摆动机构

2 模拟设置

弥雾机的施药原理是利用喷孔排出的高速气流将雾化后的雾滴吹送到作物上,雾滴的沉积运动距离和沉积分布均匀性均受到弥雾机的空间气流速度场影响。本文模拟在不同喷孔气流速度条件下,弥雾机空间气流速度场的分布特性,通过调整喷孔气流速度,来确定最佳施药距离的延伸范围。

2.1 模拟流场区域及网格化

为了得到弥雾机气流速度场的分布特性,结构尺寸和实际流场范围,将流场区域定为底面直径为 $1\,000 \text{ mm}$ 、高为 $4\,000 \text{ mm}$ 的圆柱体区域,该区域范围能够很好地包括实际喷雾流场区域。雾滴由弥雾机的喷孔喷出,因此用模拟圆柱体区域上表面的 3 个直径为 10 mm 的小圆孔代替 3 个喷孔,作为流场区域的速度入口。实际气流速度场沿轴线方向对称分布,因此圆柱体区域设置为与弥雾机喷头体同轴心,如图 2a 所示。

网格划分方案为:面网格为 Tri-Pave,即三角形非结构网格。模拟圆柱体区域上表面采用此方式划分,3 个小圆网格间距为 5 mm ,控制体单元总数为 29×3 个;大圆剩余部分网格间距为 20 mm ,控制体单元总数为 748 个。体网格为 TGrid,即为三角形四面体非结构网格,在保证计算精度和节省计算量的条件下,经过对比试验,将体网格间距设为 50 mm ,此区域控制体单元总数为 419 300 个,模拟区域划分网格后如图 2b 所示。

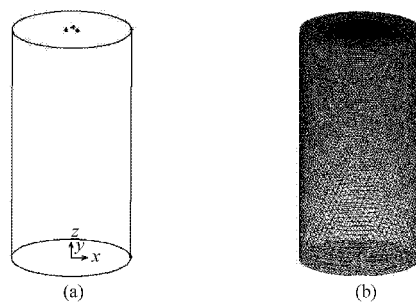


图 2 三维模拟区域

Fig. 2 3-D simulation region

(a) 模拟区域示意图 (b) 模拟区域网格图

2.2 模拟条件假设

为了保证模拟条件与实际的喷雾作业条件一致,同时节省模拟计算量,即兼顾模拟效率与精度的平衡,模拟研究过程中根据前人的相关研究结论对模型求解条件作如下假设^[9~12]:

(1) 壁面无滑移条件假设:假设温室轨道式弥雾机喷头体结构表面及模拟区域边界壁面的气流速度均为零。

(2) 气流源垂直于风扇出口表面假设: 在施药过程中, 沿导轨方向的速度虽然是始终存在的, 但是由于风送系统的气流速度(最小为 25 m/s)相对于弥雾机的行走速度(高速为 0.33 m/s)要大得多, 对雾滴飘移起主要作用。为了优化风送系统气流对雾滴飘移性能的作用效果, 忽略行走速度对风送系统的影响。假设流场入口的气流垂直于喷孔表面射出, 并无其他方向的分量。

(3) 风送系统气流源稳定假设: 假设温室轨道式弥雾机的风机运行稳定, 即模拟区域气流入口的速度稳定不变。

2.3 模拟物理模型

利用基于非结构化网格的有限元方法求解 N-S 方程和湍流方程, 获得连续相气流场的速度分布, 模拟涉及的主要理论模型如下:

以 N-S 方程中的质量守恒方程和动量守恒方程为基础, 通用数学描述形式为

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\varphi) = \text{div}(\Gamma_{\varphi} \text{grad}\varphi) - \frac{\partial\rho}{\partial x} + S_{\varphi} \quad (1)$$

式中 φ ——通用变量, 代表 u, v, ω, T 等求解变量

Γ_{φ} ——广义扩散系数 S_{φ} ——广义源项

在此基础上应用标准 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型进行迭代求解, 通用数学描述形式为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + \mu_t \left(\frac{\partial \mu_t}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} - \rho C_D \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \right] \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

式中 μ_t ——湍流粘度 k ——湍流动能

ε ——流体的湍流扩散率

σ_k, C_{μ} ——经验常数, 取 $C_{\mu} = 0.09$

式(1)~(3)中其他各参数可参考 Fluent 用户手册^[13]。

2.4 连续相参数及边界条件设置

经试验测量, 喷孔气流速度为 25~50 m/s, 湍流强度为 15%, 大气温度设定为 27°C, 空气密度为 1.225 kg/m³, 相对湿度为 15%, 对应的气体粘度为 1.85 × 10⁻⁵ Pa·s。

边界条件设置: 圆柱体区域顶面 3 个小圆孔设置为速度入口, 底面设置为压力出口, 其余边界设置为壁面。

流场的迭代模拟过程中, 选用稳态、离散、隐式求解器, 选用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行求解。求解前主要参数的设置应与实际试验条件相同, 模拟时流场温度设置为 27°C, 边界条件的湍流强度设为

15%, 氧气体积分数为 22%。参差收敛标准的设置中, 流体连续性、 x 向速度、 y 向速度、 z 向速度、 k 和 ε 参差收敛标准都设置为 1×10^{-3} , 能量的收敛标准设置为 1×10^{-6} , 每 100 次迭代计算所需时间约为 15 min。

3 气流速度场模拟结果与特性分析

3.1 气流速度场模拟结果

模拟结果表明, 进口气流速度分别为 25、30、35、40、45、50 m/s 时, 气流速度场分布特性基本相同。图 3 为进口气流速度为 25 m/s 和 50 m/s 时的气流速度场, 通过对比说明温室轨道式弥雾机的气流速度场分布特性。

三股进口气流的速度场在距喷孔 0.4 m 的截面之前已经完全交叉, 交叉后的气流速度场沿喷孔截面中心线呈近似于火焰状发散, 而后收缩(图 3a、3c)。随着与喷孔中心距离的增大, 气流速度场的分布范围变大, 从近端的小圆柱形分布逐渐发展为远端的大圆柱形分布(图 3b、3d)。通过对比可得出, 速度等高线分布在以喷雾器外壳为中心的同心椭圆上, 这表明气流速度的总体分布特性基本保持不变。

进口气流速度不同时, 气流的最远吹送距离不同, 等距离截面上的气流速度场的分布范围不同。已知温室宽度后可选用不同的进口气流速度和对应的最远吹送距离和最大气流速度场分布范围来达到最佳施药效果。

由图 3 还可看出, z 向速度分量有助于增大吹送距离; x, y 向速度分量有助于增大雾滴的覆盖范围, 改善施药过程中的药液覆盖率和分布均匀性。

3.2 气流速度场分布特性分析

为了分析距喷孔的距离对气流速度分布的影响, 分别导出喷孔气流速度为 25 m/s 和 50 m/s 条件下, 与喷孔距离为 0.4、0.8、1.2、1.6、2.0、2.4、2.8、3.2 和 3.6 m 的 9 个截面上沿垂直于地面方向的速度分布结果, 如图 4 所示。

由图 4a 可以得出, 在各截面上与截面中心距离小于 0.2 m 的区域内, 与喷孔中心距离大于 0.4 m, 小于 2.4 m 的各个截面上, 气流速度分布规律基本相同, 随着与喷孔中心距离的增大而减小, 随着与截面中心距离的增大而减小。在各截面上与截面中心距离大于 0.2 m 的区域内, 速度曲线的波动幅度增大, 不符合上述的分布规律; 在距离喷孔小于 0.4 m 的截面上, 由于 3 股喷孔气流速度场还未交叉混合, 不符合上述的分布规律; 在距离喷孔大于 2.4 m 的

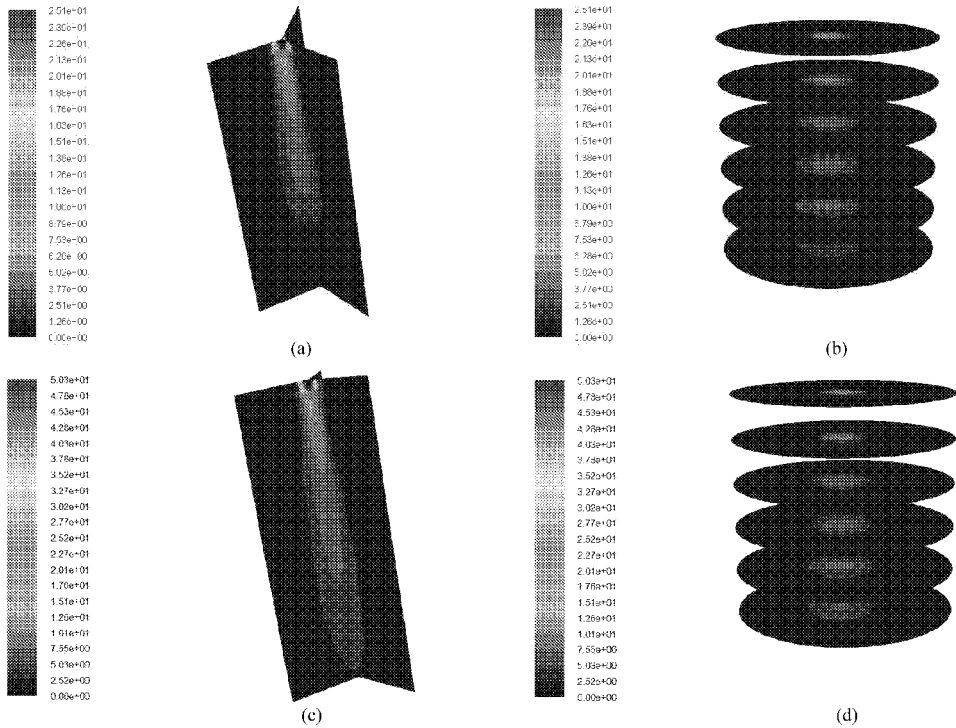


图3 三维速度分布图

Fig. 3 3-D air-velocity field

(a) $v=25$ m/s 时 3 个入口 z 向截面组合速度分布图 (b) $v=25$ m/s 时不同距离截面处速度分布图
 (c) $v=50$ m/s 时 3 个入口 z 向截面组合速度分布图 (d) $v=50$ m/s 时不同距离截面处速度分布图

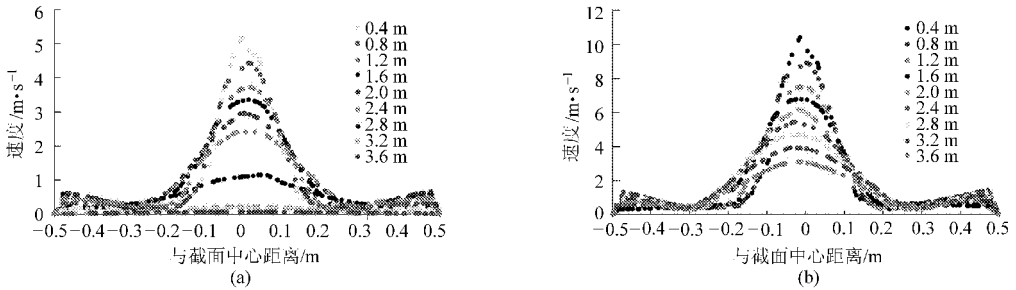


图4 与喷孔不同距离截面上的速度分布

Fig. 4 Velocity distribution at different distances from nozzle

(a) $v=25$ m/s (b) $v=50$ m/s

截面上,速度为 25 m/s 条件下的气流速度场已经衰减,消失,不符合上述的分布规律。由此可以得出,在喷孔气流速度为 25 m/s 条件下,弥雾机最远吹送距离为 2.4 m,最大气流速度场范围半径为 0.2 m。

由图 4b 可以得出,符合上述气流速度场分布规律的区域范围扩大到:在各截面上与截面中心距离小于 0.25 m 的区域内,在距离喷孔大于 0.4 m,小于 3.6 m 的截面上,气流速度分布规律基本相同。由此可以得出,在喷孔气流速度为 50 m/s 条件下,弥雾机的最远吹送距离为 3.6 m,最大气流场范围半径为 0.25 m。可见,通过增大喷孔气流速度,可以有效地增大吹送距离,扩大大气流速度场范围。

而增大喷孔气流速度对于增大吹送距离的作用(2.4 ~ 3.6 m)大于扩大大气流速度场范围的作用

(0.2 ~ 0.25 m),这进一步验证了 z 向速度分量有助于增大吹送距离; x 、 y 向速度分量有助于增大雾滴的覆盖范围这一机理。

4 试验验证

4.1 试验方案

喷孔气流速度不同时,模拟结果接近。受篇幅所限,文中只列出喷孔气流速度为 25 m/s 时测量和模拟结果的对比。

为了与模拟进行对比,试验测量了与模拟相同条件下相同区域的不同点的气流速度。由于距喷孔 0.4 m 处的截面流场范围较小,距喷孔 2.4 m 处的截面速度已趋近于零,在此只选用距喷孔 0.8、1.2、1.6 和 2.0 m 的 4 个有代表性的截面进行试验,分别

测量距中心线 0.05、0.10 和 0.15 m 距离上的速度, 在每个距离上隔 60° 布置一个测量点, 每个与中心线等距离的圆环上共有 6 个测量点, 取 6 个测量点的平均值作为该距离上的速度, 与模拟值进行对比分析。每个截面上共有 18 个测量点。单个截面上的速度采集点分布如图 5 所示。

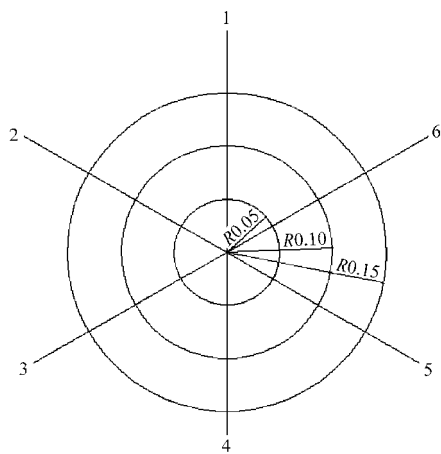


图 5 气流速度场试验测量点布置

Fig. 5 Experimental setup for validation of simulated results

试验时, 启动风机将风机速度调节到 (25 ± 0.2) m/s。然后用风速计对图 5 所示各点的气流速度进行测量, 按照与圆心距离增大的顺序, 同一圆心距的层面上的 6 个点测量完毕后再进行下一个圆周上的测量, 每个测量点重复测量 3 次, 取平均值作为该测量点的测量结果。另外在截面中心点处测量 3 次取平均值作为截面速度峰值。

4.2 评价指标

采用相对误差 E 作为各测量点模拟结果精度的评价指标, 计算公式为

$$E = \frac{|v_m - v_s|}{v_m} \times 100\% \quad (4)$$

式中 v_m ——各点气流速度试验值

v_s ——各点气流速度模拟值

4.3 雾化试验与模拟结果对比

表 1 为喷雾装置出口风速为 (25 ± 0.2) m/s 时, 距喷孔 0.8、1.2、1.6 和 2.0 m 处 4 个截面的截面气流速度的试验值以及同圆心距下 6 个测量点的平均值和模拟值的对比。

表 1 气流速度场分布试验值和模拟值对比

Tab. 1 Comparison of simulated and experimental results

m/s

测量点	与喷孔距离/m											
	0.8			1.2			1.6			2.0		
	R0.05	R0.10	R0.15	R0.05	R0.10	R0.15	R0.05	R0.10	R0.15	R0.05	R0.10	R0.15
1	10.55	6.80	2.33	9.34	6.01	3.12	8.43	5.75	3.67	7.81	5.55	4.05
2	10.36	6.55	2.24	9.55	6.12	3.23	8.55	5.80	3.53	7.76	5.58	3.96
3	10.67	6.46	2.43	9.63	6.09	3.14	8.45	5.47	3.54	7.85	5.67	3.98
4	10.46	6.68	2.31	9.52	6.21	3.26	8.36	5.91	3.46	7.73	5.59	4.03
5	10.58	6.44	2.47	9.72	6.17	3.16	8.46	5.65	3.65	7.90	5.61	4.08
6	10.76	6.70	2.26	9.32	6.15	3.21	8.53	5.80	3.48	7.82	5.65	3.95
平均值/ $m \cdot s^{-1}$	10.56	6.61	2.34	9.51	6.13	3.19	8.46	5.73	3.56	7.81	5.61	4.01
模拟值/ $m \cdot s^{-1}$	10.13	6.10	2.03	8.94	5.83	2.98	8.13	5.45	3.39	7.45	5.42	3.74
$E/\%$	4.07	7.72	13.25	5.99	4.89	6.58	3.90	4.89	4.78	4.61	3.39	6.73
中心点/ $m \cdot s^{-1}$	12.88	10.77	9.70	8.33								
模拟值/ $m \cdot s^{-1}$	12.05	10.06	9.05	7.76								
$E/\%$	6.44	6.59	6.70	6.84								

试验结果表明, 气流速度随着距喷孔距离的增大而减小, 与模拟结果基本吻合。试验与模拟值的平均相对误差为 6.27%, 试验条件与模拟条件不完全吻合是产生相对误差的主要原因, 试验过程中风机喷孔内的起涡器高速转动使得风送气流呈涡流状, 不稳定, 而模拟中简化为稳定的平行风所致。

5 结论

(1) 模拟和试验验证表明, 气流速度场的三维

模型和条件假设能够较准确地模拟温室轨道式弥雾机的气流速度场分布。

(2) 在弥雾机气流速度场模拟区域内, 气流速度在垂直和水平两个方向呈梯度减小趋势。

(3) 温室轨道式弥雾机喷孔气流速度变化对气流速度场的空间分布状态无显著影响, 但对雾滴的分布范围有明显的扩展作用。

(4) 喷孔气流速度由 25 m/s 提高到 50 m/s, 可以将吹送距离由 2.4 m 增大到 3.6 m, 将气流速度场范围半径由 0.20 m 扩大到 0.25 m。

参 考 文 献

- 1 Weiner K L, Parkin C S. The use of computational fluid dynamic code for modeling spray from a mistblower[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 55(4):313~324.
- 2 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.
- 3 Tsay L, Fox R D, Ozkan H E, et al. Evaluation of a pneumatic-shield spraying system by CFD simulation [J]. Transactions of the ASAE, 2002,45(1):47~54.
- 4 Baetens K, Nuyttens D, Verboven P, et al. Predicting drift from field spraying by means of 3D computational fluid dynamics model [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 56(2):161~173.
- 5 崔志华,傅泽田,祁力钧,等. 风送式喷雾机风筒结构对飘移性能的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(2):111~115.
Cui Zhihua, Fu Zetian, Qi Lijun, et al. Effect of the air duct medication on the spray drift emitted by an air-assisted sprayer [J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(2):111~115. (in Chinese)
- 6 祁力钧,赵亚青,王俊,等. 基于 CFD 的果园风送式喷雾机雾滴分布特性分析[J]. 农业机械学报,2010,41(2):62~67.
Qi Lijun, Zhao Yaqing, Wang Jun, et al. CFD simulation and experimental verification of droplet dispersion of air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(2):62~67. (in Chinese)
- 7 陈发元,汪小岳,丁为民,等. 果树喷雾用圆盘风扇三维气流速度场数值模拟与验证[J]. 农业机械学报,2010,41(8):51~55.
Chen Fayuan, Wang Xiaochan, Ding Weimin, et al. Numerical simulation and experimental verification of 3-D air-velocity field of disk fan used in orchard sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(8):51~55. (in Chinese)
- 8 Nuyttens D, Windey S, Sonck B. Optimisation of a vertical spray boom for greehouse spray applications [J]. Biosystems Engineering,2004,89(4):417~423.
- 9 吴子牛. 计算流体力学基本原理[M]. 北京:科学出版社,2001.
- 10 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- 11 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988.
- 12 韩占忠. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2008.
- 13 Fluent Inc. Fluent version 4.3 user's manual. Computational fluid dynamics software[M]. Lebanon NH: Fluent Inc., 1995.
- 14 袁雪,祁力钧,冀荣华,等. 温室风送式弥雾机气流速度场与雾滴沉积特性分析[J]. 农业机械学报,2012,43(8):71~77.
Yuan Xue, Qi Lijun, Ji Ronghua, et al. Analysis on features of air-velocity distribution and droplets deposition pattern for greenhouse air-assisted mist sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(8):71~77. (in Chinese)
- 15 袁雪,祁力钧,王虎,等. 温室摇摆式变量弥雾机喷雾参数响应面法优化[J]. 农业机械学报,2012,43(4):45~50,54.
Yuan Xue, Qi Lijun, Wang Hu, et al. Spraying parameters optimization of swing, automatic variables and greenhouse mist sprayer with response surface method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(4):45~50, 54. (in Chinese)
- 16 祁力钧,王沛,张建华,等. 杂草叶片表面结构对雾滴铺展和蒸发的影响[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(3):335~340.
Qi Lijun, Wang Pei, Zhang Jianhua, et al. Influence of weed leaves surface structures on droplet spread and evaporation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012,30(3):335~340. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 51 页)

- 15 王永梅. 小麦精量排种器的试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2006.  
Wang Yongmei. The experimental study of the wheat precision metering device[D]. Urumqi: Xingjiang Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 16 杜辉,王忠举,李汝莘. 气吸式小麦精量播种机的改进研究[J]. 山东农机,2002(6):8~9.
- 17 刘俊峰,杨欣,冯晓静. 2BF-8 型小麦精播机播种均匀性影响因素分析[J]. 农业工程学报,2001,17(6):64~68.  
Liu Junfeng, Yang Xin, Feng Xiaojing. Analysis of influence factor on seeding uniformity of model 2BF-8 wheat precision planter[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(6):64~68. (in Chinese)
- 18 冯晓静,刘俊峰. 2BF-8 小麦精量播种机的开发与研究[J]. 农机化研究,2004(6):124~125.  
Feng Xiaojing, Liu Junfeng. Development and study on 2BF-8 wheat precision planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004(6):124~125. (in Chinese)