

果树喷雾用圆盘风扇三维气流速度场数值模拟与验证*

陈发元¹ 汪小岳¹ 丁为民¹ 傅锡敏² 吕晓兰² 何国敏¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

【摘要】 为研究用于果树风送喷雾的圆盘风扇气流速度场分布特性,采用 $k-\varepsilon$ 紊流模型和稳态求解方法,设置合适的边界条件,对单、双风扇不同出口风速的气流速度场进行三维稳态数值模拟和试验验证。结果表明,双风扇同时送风时,在离两风扇中心 1~3 m 的范围内,中心区域的风速明显小于两边的风速,在 3~5 m 的范围内中心区域的风速和两边的风速相差不大。模拟值与试验值对比表明变化趋势一致,二者的拟合直线决定系数 R^2 分别为 0.804 4 和 0.795 7,所建模型可以比较准确地模拟风扇气流速度场的分布。

关键词: 果树 仿形喷雾 圆盘风扇 气流速度场 CFD 模拟 试验

中图分类号: S493+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0051-05

Numerical Simulation and Experimental Verification of 3-D Air-velocity Field of Disk Fan Used in Orchard Sprayer

Chen Fayuan¹ Wang Xiaochan¹ Ding Weimin¹ Fu Ximin² Lü Xiaolan² He Guomin¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

Abstract

In order to investigate the characteristics of air-velocity field of disk fan used in orchard sprayer, a turbulence model by means of the standard sub-model with appropriate boundary condition was developed and 3-D steady state of air-velocity field of single and double fans was simulated and verified. The results showed that in the distance of 1 m to 3 m from the double fans center, the velocities of the center region were lower than the both sides, but in the distance of 3 m to 5 m, the air-velocity distribution of double fans was uniform. The results of comparison showed that the trends of simulated and measured curves were coincident, the correlation determination (R^2) of single and double fans were 0.804 4 and 0.795 7, respectively. The model could accurately predict air-velocity distribution pattern.

Key words Orchard, Profile modeling sprayer, Disk fan, Air-velocity field, CFD simulation, Experiment

引言

果树仿形喷雾是根据果树的实际形状,自动控制喷头在理想的喷雾距离下作业,从而提高雾滴在果树冠层内的分布均匀性,增加农药施用效率的一种新方法^[1-2]。果树风送仿形喷雾是一种新技术,

它可以有效提高农药使用效率和减少对环境的污染。但对于仿形喷雾的相关研究还存在很多难点。

室外试验受自然条件的影响较大,试验结果难以重复,很难确定某一因素对试验结果的影响^[3-4]。CFD 模拟可以突破这一限制,各个参数可以按设定,从而可以获得各种条件下准确的试验结

果^[5-6]。国内外研究表明,不同的风送方式对药液在果树上的分布特性有较大差异,而风扇出口气流速度对药液分布有显著影响^[7-10]。目前,国内外一些学者已作了一些风送施药技术 CFD 模拟研究^[11-16],但这些研究是针对仿形喷雾或风送式喷雾进行的,或是对风扇两维流场的模拟^[17],还未见对风送仿形喷雾气流场进行三维模拟研究的报道。本文通过 CFD 模拟和试验研究用于果树风送仿形喷雾的圆盘风扇三维气流速度场的分布规律,为果树边界仿形雾流场分布规律研究和仿形喷雾控制系统设计提供理论依据。

1 模型的建立

1.1 模拟区域的确定

以沈力 SF-4 型风扇气流速度场为研究对象。根据风扇结构及安装风扇机架的高度,模拟区域定为长 5 m,宽 3 m,高 3 m 的长方体区域,2 个风扇出口直径为 0.46 m,上位风扇离地高度为 1.52 m,下位风扇离地 0.72 m,模拟区域如图 1 所示。

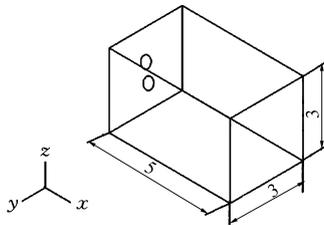


图 1 模拟的流场区域

Fig. 1 Flow field of simulation

1.2 数学模型

数学模型是反映风扇气流场的基本控制方程和相应的定解条件。为使模拟条件与试验条件一致,现作如下假设:① 壁面无滑移,风扇结构表面及模拟区域边界壁面的风速为零。② 气流源垂直于风扇出口,无其他方向分量。③ 沈力 SF-4 型风扇转动均匀,进口气流速度保持不变。气流速度场基于 N-S 方程中的质量守恒方程和动量守恒方程,在此基础上选择 $k-\varepsilon$ 湍流模型,物质运输模型和标准墙功能。各模型通用的数学描述形式为^[18]

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\varphi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\varphi) + S \quad (1)$$

其展开形式为

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\varphi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\varphi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial z} \right) + S \quad (2)$$

式中 φ ——通用变量,代表 u, v, w 等求解变量

Γ ——广义扩散系数

S ——广义源项

1.3 气流参数和边界条件的选定

分别模拟 2.0、4.5、6.0、7.0、9.5、11.5 m/s 6 种出口风速下气流速度场,大气温度设为 27 °C,对应的空气粘度为 $1.79 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,入口设为速度入口,出口设为压力出口。

2 模拟结果分析

建模过程在 Gambit 软件中完成,采用四面体非结构化网格。由于空气流动属于低速流,并且模型是稳态的,在计算速度和内存占用方面隐式方法要明显优于显式方法,所以选择 3-D 分离式稳态隐式求解器作为处理方法。参考压力为标准大气压即 101.325 kPa,离散格式使用二阶精度。

模拟的结果表明,进口气流分别为 2.0、4.5、6.0、7.0、9.5、11.5 m/s 时,气流速度场分布特性无显著差异。受篇幅所限此处只给出 9.5 m/s 时单、双风扇的气流速度场,离风扇轴中心 1 m、3 m、5 m 截面气流速度场,如图 2~3 所示。

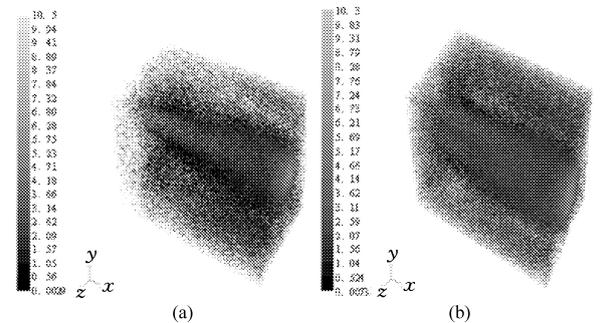


图 2 $v = 9.5 \text{ m/s}$ 时单、双风扇气流速度场

Fig. 2 Air-velocity field at inlet velocity of 9.5 m/s

of single and double fans

(a) 单风扇 (b) 双风扇

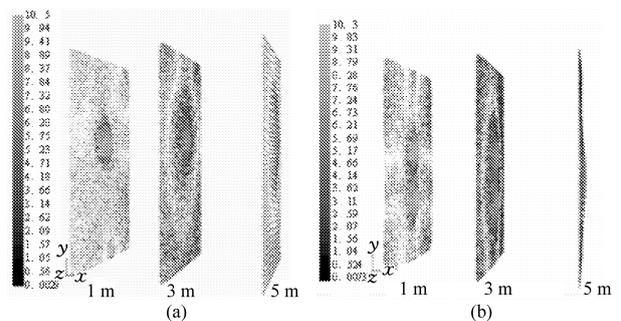


图 3 $v = 9.5 \text{ m/s}$ 时单、双风扇离风扇不同

距离截面处速度场

Fig. 3 Air-velocity field in different distance from the fan at inlet velocity of 9.5 m/s of single and double fans

(a) 单风扇 (b) 双风扇

从图 2a 可以看出,单风扇的气流速度场近似于喇叭口形状,气流场沿风扇轴中心线发散。随着距离的增大,气流场的范围不断扩大。气流速度场以

外区域速度风速较小。从图 2b 可以看出,当 2 个风扇同时送风时,气流场的范围明显扩大了,但总的分布规律变化不明显。

从图 3a 可以明显看出,气流场随着离风扇轴中心距离的增大不断扩大,而速度不断减小。从图 3b 可以看出,双风扇送风时在离风扇轴中心较近的截面处,气流场开始交叉,但是交叉还不很明显,到离风扇轴中心较远的截面时,已经完全交叉在一起了。

图 4 为双风扇的垂直中心面(图 4a)和水平中心面(图 4b)气流速度场模拟结果。从图 4a 可以看出,在上位风扇的上部区域形成了逆时针的回流区,在下位风扇的下部区域形成了顺时针的回流区。两风扇之间的区域,小于 1 m 时交叉不明显,大于 1 m 时出现了明显的交叉风。在离风扇距离大于 2.5 m 的区域内,上位风扇的速度场受下位风扇速度场的影响开始向轴中心线上部区域增大,而下位风扇速度场受上位风扇速度场的影响开始向轴中心线下部区域增大,这样的气流速度场可以将雾滴吹送到果树较高和较低的冠层区域,改善喷雾作业中药液的覆盖率和分布的均匀性。

从水平中心面的气流速度场模拟结果可以看出(图 4b),在离两风中心 1 m 以上的范围内两风扇的气流速度场开始交叉,并且随着距离的增大气流速度场的范围也不断扩大,在离两风扇中心 1 m 到 3 m 的范围内,气流速度场交叉还不明显,在 3 m 到 5 m 的范围内,气流速度场已经完全交叉在一起了。

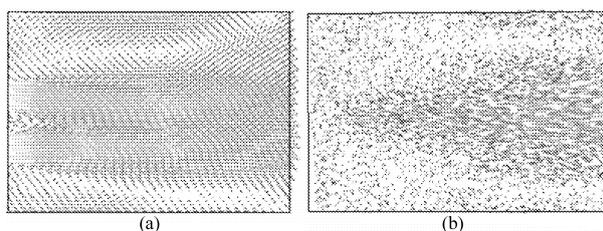


图 4 进口速度 9.5 m/s 时双风扇速度场
Fig. 4 Air-velocity field at inlet velocity of 9.5 m/s of double fans
(a) 垂直中心面 (b) 水平中心面

3 试验与分析

为了验证模拟结果,在农业部南京农业机械化研究所植保机械工程技术实验室使用 ZRQF-D 型智能热球式风速计(北京市检测仪器厂)对沈力 SF-4 型风扇气流速度场进行了测量。为了减少测量中读数的误差,直接读取 10 s 内的平均风速。分别测量了单、双风扇 7.0、9.5、11.5 m/s 3 种出口风速下的气流速度场,同时测量试验环境的温度和相对湿度,对风场中的每个点测 3 次,取平均值作为最终测量结果。

受篇幅所限,在此只给出了 11.5 m/s 时,单、双风扇离风扇轴中心 1、3、5 m 的截面气流速度模拟值与试验值的对比,如图 5 所示。

试验结果表明,风速沿风扇轴中心线快速减小,风扇轴中心线下部风速普遍大于上部,右部风速普遍大于左部,这与模拟结果基本吻合。从单、双风扇离风扇轴中心 1、3、5 m 的截面气流速度模拟值与试

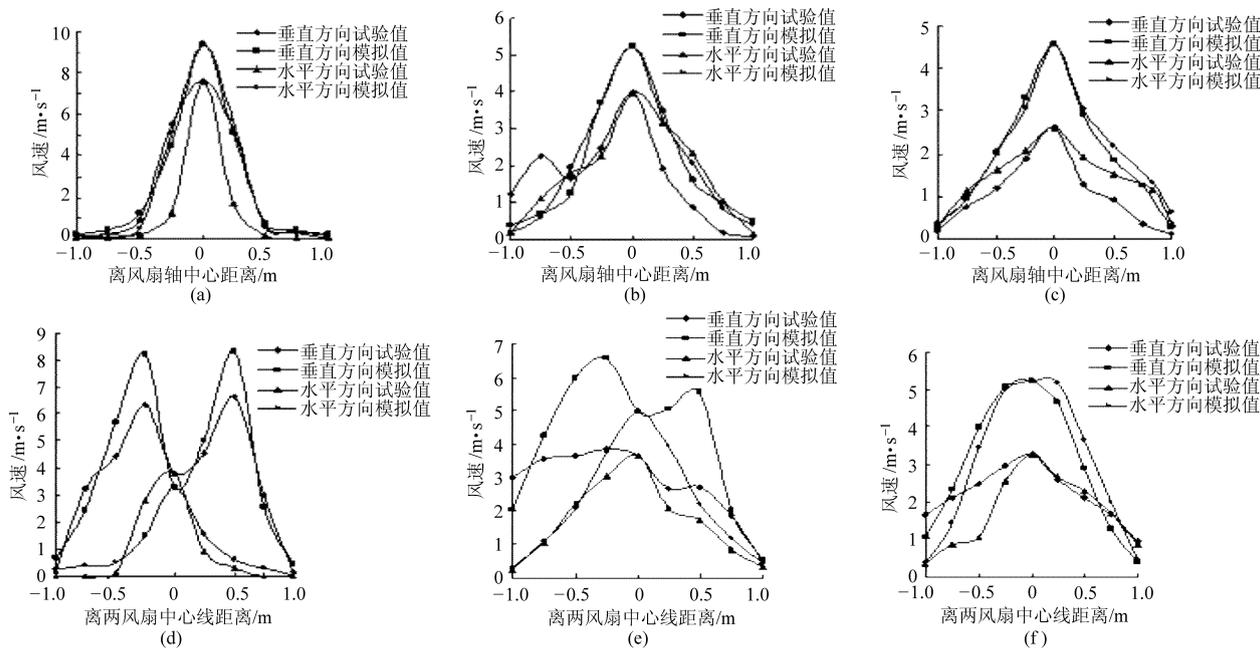


图 5 $v = 11.5 \text{ m/s}$ 时,单、双风扇离风扇不同距离截面上速度模拟值与试验值对比

Fig. 5 Comparison of simulated and experimental value in different distances from the fan center at inlet velocity of 11.5 m/s of single and double fans

(a) 单风扇 1 m 截面 (b) 单风扇 3 m 截面 (c) 单风扇 5 m 截面 (d) 双风扇 1 m 截面 (e) 双风扇 3 m 截面 (f) 双风扇 5 m 截面

验值的对比可以看出,单、双风扇送风时,3个截面处的速度模拟值与试验值趋势基本一致,只是在风扇轴中心线上相差较大。这是因为风扇吹出的是不稳定的螺旋风,而在模拟中简化为稳定的平行风,所以在离风扇轴中心线附近差别较大。双风扇同时送风时是以双风扇之间的中心线为对称轴,所以1、3m的截面可以明显看到风速在中心线附近突然降低,而在5m处又和单风扇送风时的规律一样了。这是因为在3m以内时两风扇的风场交叉不明显,所以风速偏低,到5m处时两风扇的速度场已经完全交叉在一起了。

通过对单、双风扇模拟值与试验值的线性相关性(图6)可以看出,试验值与模拟值具有较好的对应关系。单、双风扇模拟值与试验值的线性相关式分别为 $y = 1.252x$ 和 $y = 1.2406x$,其决定系数 R^2 分别为0.8044和0.7957。

4 结论

(1) 进口气流速度的变化对圆盘风扇气流速度

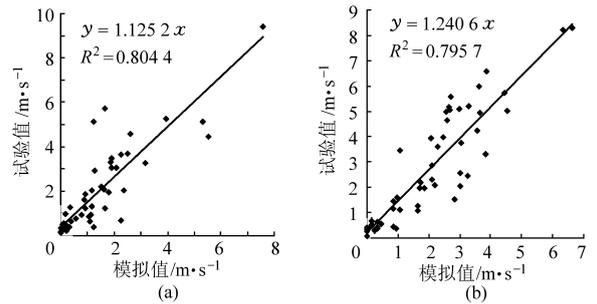


图6 单、双风扇模拟值与试验值之间的回归直线
Fig.6 Regression line between measured and simulated value of single and double fans

(a) 单风扇 (b) 双风扇

场的分布规律无明显影响。双风扇同时送风时,上、下位风扇对彼此风场影响较大,在3m内两风扇中间区域风速明显小于两边,到5m截面处两风扇速度场完全交叉在一起。

(2) 通过对单、双风扇模拟值与试验值的拟合可以看出,模拟值与试验值可以较好吻合,其决定系数 R^2 分别为0.8044和0.7957。

参 考 文 献

- 1 洪添胜,王贵恩,陈羽白,等.果树施药仿形喷雾关键参数的模拟试验研究[J].农业工程学报,2004,20(4):104~107.
Hong Tiansheng, Wang Guien, Chen Yubai, et al. Profile modeling of spray parameters of chemical solution application to fruit trees[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004,20(4):104~107. (in Chinese)
- 2 王贵恩,洪添胜,李捷,等.果树施药仿形喷雾的位置控制系统[J].农业工程学报,2004,20(3):81~84.
Wang Guien, Hong Tiansheng, Li Jie, et al. Position control system of profile modeling spray for fruit trees [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004,20(3):81~84. (in Chinese)
- 3 Hobson P A, Miller P C H, Walklate P, et al. Spray drift from hydraulic spray nozzles: the use of a computer simulation model to examine factors influencing drift[J]. J. Agric. Engng. Res., 1993, 54(4):293~305.
- 4 Zhu H, Reichard D L, Fox R D, et al. Computer simulation of variables that influence spray drift [J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(5):1401~1407.
- 5 Sidahmed M M, Brown R B. Simulation of spray dispersal and deposition from a forestry air-blast sprayer part II: droplet trajectory model[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(1):5~17.
- 6 Xu Z G, Walklate P J, Rigby S G, et al. Stochastic modeling of turbulent spray dispersion in the near-field of orchard sprayers [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74~76(4):295~304.
- 7 Moor A De, Langenakens J, Vereecke E. Relation between the vertical spraying distribution and the air pattern of orchard sprayers[C]//ASAE 2000 Annual Meeting Papers No.001119.2000.
- 8 Cross J V. Patternation of spray mass flux from axial fan air-blast sprayers in the orchard[C]//British Crop Protection Council Monograph No.46, Air-assisted Spraying in Crop Protection, 1991:15~22.
- 9 Giles D K, Delwiche M J, Dodd R B. Spatial distribution of spray deposition from an air-carrier sprayer [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(3):807~811.
- 10 Wiedenhoff H. Optimisation of spraying methods for fruit trees with reduced use of chemical[C]//British Crop Protection Council Monograph No.46, Air-assisted Spraying in Crop Protection, 1991:219~223.
- 11 Delele M A, Jaeken P, Debaer C, et al. CFD prototyping of an air-assisted orchard sprayer aimed at drift reduction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 55(1):16~27.
- 12 Delele M A, Moor A De, Sonck B, et al. Modeling 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.
- 13 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.
- 14 傅泽田, 王俊, 祁力钧, 等. 果园风送式喷雾机气流速度场模拟及试验验证[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 69 ~ 74.
Fu Zetian, Wang Jun, Qi Lijun, et al. CFD simulation and experimental verification of air-velocity distribution of air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(1): 69 ~ 74. (in Chinese)
- 15 刘财兴, 林惠强, 洪添胜, 等. 果树仿形喷雾的虚拟研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 133 ~ 138.
Liu Caixing, Lin Huiqiang, Hong Tiansheng, et al. Simulation of profile modeling spray of fruit trees[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(7): 133 ~ 138. (in Chinese)
- 16 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)
- 17 陈发元, 汪小岳, 傅锡敏, 等. 圆盘风扇风送喷雾气流速度场的 CFD 模拟及试验验证[J]. 江西农业学报, 2009, 21(11): 87 ~ 89.
Chen Fayuan, Wang Xiaochan, Fu Ximin, et al. CFD simulation and experimental verification of air velocity distribution of air-assisted spraying of disk fan[J]. Acta Agricultural Jiangxi, 2009, 21(11): 87 ~ 89. (in Chinese)
- 18 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

~~~~~

(上接第 34 页)

- 4 杨宇, 李成华. 铲式精密播种机三维参数化设计[J]. 农机化研究, 2009, 31(5): 103 ~ 105.  
Yang Yu, Li Chenghua. 3D parametric design of precision spade punch planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(5): 103 ~ 105. (in Chinese)
- 5 年志刚. 甘蔗收获机械智能设计系统知识库、实例库系统关键技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.  
Nian Zhigang. Research on key technologies for knowledge base, case base of sugarcane harvester intelligent design system [D]. Nanning: Guangxi University, 2006. (in Chinese)
- 6 梁保松, 曹殿立. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- 7 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- 8 Li Y F, Xie M, Goh T N. A study of mutual information based feature selection for case based reasoning in software cost estimation[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3): 5 921 ~ 5 931.
- 9 Liu F H, Hai H L. The voting analytic hierarchy process method for selecting supplier[J]. International Journal of Production Economics, 2005, 97(3): 308 ~ 317.
- 10 Ribaux O, Margort P. Case based reasoning in criminal intelligence using forensic case data[J]. Science & Justice, 2003, 43(3): 135 ~ 143.
- 11 杨宇, 李成华, 张国梁. 基于实例推理的铲式玉米精密播种机设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 51 ~ 55.  
Yang Yu, Li Chenghua, Zhang Guoliang. Design method of precision spade punch planter of maize based on CBR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 51 ~ 55. (in Chinese)