

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.014

风送式喷雾机喷筒结构优化数值模拟与试验*

宋淑然¹ 夏侯炳² 刘洪山³ 洪添胜¹ 孙道宗³ 卢玉华³

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642; 2. 华南农业大学后勤处, 广州 510642;
3. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 采用动参考系模型, 将可动风机的转速作为仿真的初始值, 分段划分喷筒内计算区域中的网格, 利用数值及正交试验的方法, 对风送式喷雾机的喷筒结构进行了优化设计, 仿真计算喷筒出口处的风速。为验证模型的正确性, 在对应风机转速下, 实测了喷筒出口各采样点的风速, 并将实测值与仿真结果进行了覆盖率统计及 χ^2 检验。结果表明: 影响喷筒压力损失及喷筒出口风速的因素依次为: 出风口直径、柱形喷筒长度、锥形喷筒长度; 在喷筒出口采样点上, 仿真计算出的风速区间覆盖实测风速的概率为95%; χ^2 检验表明在水平0.05下, 喷筒出风口风速的仿真值均服从其实际测量值的分布; 因此, 利用动参考系方法, 以风机转速为初始条件, 对喷筒出风口速度的数值模拟是可信的。

关键词: 风送式喷雾机 喷筒 数值模拟 结构优化 正交试验 χ^2 检验

中图分类号: S493+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0073-06

Numerical Simulation and Experiment of Structural Optimization for Air-blast Sprayer

Song Shuran¹ Xia Houbing² Liu Hongshan³ Hong Tiansheng¹ Sun Daozong³ Lu Yuhua³

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Logistics Department, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Taking the rotation speed of mobile fan as the initial value of simulation, grids within the computational regions inside the air duct were divided into sections based on the dynamic reference model. The structure of air-blast sprayer was optimized by using numerical experiments and orthogonal experiment. The flow speed at the outlet of air duct was simulated. In order to verify the correctness of model, flow speed at the outlet of air duct was measured at each corresponding fan rotation speed. The coverage rate statistics and χ^2 -test were carried out between measured and simulated value. The results indicated that the order of factors which affected the duct pressure loss and outlet flow speed was: the diameter of outlet, the cylindrical duct length and the tapered duct length. Meanwhile, at the sampling spot of air duct outlet, the measured flow speed in simulation was 95%. The simulated flow speed at the air duct outlet was submissive with the measured distribution when χ^2 -test result was under 0.05. It was reliable to simulate outlet flow speed of air duct by using dynamic reference model with fan rotation speed as initial value.

Key words: Air-blast sprayer Duct Numerical simulation Structural optimization Orthogonal experiment χ^2 -test

收稿日期: 2012-06-14 修回日期: 2012-12-18

* 国家自然科学基金资助项目(30971684)、公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(200903023)、现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-27)和广东省省部产学研结合重点引导资助项目(2009B090300144)

作者简介: 宋淑然, 副教授, 主要从事喷雾技术及测控技术研究, E-mail: songshuran@scau.edu.cn

通讯作者: 洪添胜, 教授, 博士生导师, 主要从事农业工程和机电一体化与信息技术应用研究, E-mail: tshong@scau.edu.cn

引言

国内对风送式喷雾机的研究主要分为两类:第一类是针对轴向进风、两侧出风的果园风送式喷雾机:祁力钧等基于 CFD 技术建立了 Hardi LB2255 型果园风送式喷雾机雾滴沉积分布模型^[1],根据实测的喷雾机相关参数,确定了二维流场的边界条件及模型参数,得到了约束条件下的雾滴沉积轨迹及不同层面上的沉积比率,设计了与模拟条件相同的验证试验,对模拟结果进行了验证分析;吕晓兰等研究了果园风送式喷雾机喷雾技术参数对雾滴沉积分布的影响^[2];郭峰等利用 CFD 技术对果园风送式喷雾机进行三维建模与仿真研究,其模型的结构为流体(空气)的入口为一圆管,出口是横截面为矩形的异型管道,并且与入口圆管相垂直^[3]。第二类是针对炮塔式风送式喷雾机的研究:崔志华等通过假定喷雾筒入口处风速为水平方向,无垂直分量,并将模型简化为二维模型,研究了风送式喷雾机的飘移性能^[4];刘青等在 9WZCD-25 型风送式喷雾机喷雾筒出口处安装导流器,使喷幅提高了 22%~46%^[5]。上述研究的假设条件为均速直线流(不论喷雾筒内部结构是否不同),而实际中喷雾筒内部有旋转的风机和固定的导流器与导流片,轴流风送式喷雾机的实际工况为旋转气流(风机扇叶转动引起),因而上述研究的假设条件与轴流风送式喷雾机的实际工况有一定的距离。

国外利用计算机对喷雾机及其工作环境参数进行建模,并对喷雾过程进行仿真,其喷雾效果在效率和经济性方面均有较大的研究优势,但大多是针对轴向进风、两侧出风的果园风送式喷雾机。Delele 等设计了计算流体力学模型以研究喷雾机在横流风机所产生的三维气流场中的喷雾效果,Endalew 等利用 CFD 技术建立了果园两风扇混流风送式喷雾机的三维模型,利用该模型对不同树冠密度区域的喷雾气流速度的高低分布进行了预测,国外部分学者还对果园风助式喷雾机的雾滴穿透及喷雾性能改善方面进行了研究^[6-9]。

本文利用数值模拟及正交试验的方法,对风送式喷雾机的喷雾筒结构进行优化设计,利用动参考系模型,实现计算区域中可动部件的数值模拟。在建立喷雾筒力学模型的基础上,仿真分析喷雾筒出口处速度,并通过试验测定评价模型的可靠性,为风送式喷雾机喷雾筒结构的优化提供一种更接近实际工况的仿真方法。

1 仿真假设及计算模型

随着 Fluent 引入运动参考系动参考系模型

MRF(Moving reference frame)和可动单元体的概念,很多包含运动区域的问题可以在 Fluent 中得到解决,使用动参考系主要解决一些静止参考系(惯性系)中有关运动参考系的非稳态问题^[10-13]。在预试验中,用流线示踪法对风送式喷雾机喷雾筒内部流场的气流方向进行了测试,结果表明喷雾筒内的气流为有旋流,为一个稳定的旋转参考系(旋转速度为常数),因此可将其流动运动方程转换至旋转参考系中,进而求解其稳态解。因此,应用 MRF 方法对喷雾筒流场进行仿真比均匀均匀入流假定条件下的仿真更加接近喷雾筒的实际工况。

由于选定喷雾筒内最大风速小于 40 m/s,故可认定喷雾筒内部为不可压缩气体的稳态流动,采用定常计算(相对风机转速),并忽略重力对流场的影响。仿真计算采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型^[14]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中 G_k ——由层流速度梯度产生的湍流动能

G_b ——由浮力而产生的湍流动能

Y_M ——由于在可压缩湍流中过度的扩散产生的波动

$C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ ——经验常数

α_k 、 α_ε —— k 方程和 ε 方程的湍流 Prandtl 数

S_k 、 S_ε ——由用户定义

在湍流工程计算中,RNG $k-\varepsilon$ 模型来源于严格的统计技术,与标准的 $k-\varepsilon$ 模型相比,仿真计算精度更高。

2 喷雾筒结构优化设计

2.1 喷雾筒结构

风送式喷雾机的喷雾筒主体由柱形喷雾筒与锥形喷雾筒构成。在柱形喷雾筒内部,安装有轴流风机和 5 片导流片;在锥形喷雾筒内部安装有半椭球形导流器和 5 片导流片。喷雾筒结构如图 1 所示。

2.2 网格划分

采用 Gambit 对喷雾筒体进行网格划分。由于喷雾筒的内部结构比较复杂,故将复杂的模型整体切割成若干个相对简单的几何体,先划分面网格再划分体网格。面网格的作用为确定体网格密度的生成方向,方便模型的局部加密。经过多次网格预划分,确定采用如下网格划分方法:①先将喷雾筒整体切割成

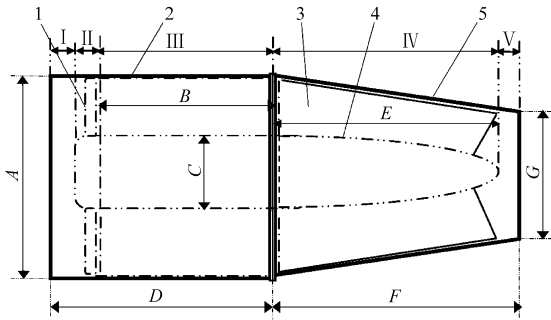


图1 喷筒结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of air duct

1. 风机 2. 柱形喷筒 3. 导流片 4. 导流器 5. 锥形喷筒

5个段,分别为I、II、III、IV、V段(图1)。②I、V段结构简单,不需划分面网格,采用Tgrid方法直接生成interval size(间隔大小)为1的四面体和金字塔网格。③风机安装在II段,由于风机面有较多的曲面与弧线,该段结构较复杂,因此先将组成风机的面全部划分面网格,面网格采用Tri方法生成interval size为0.1的三角形网格,II段中除风机的扇面外,其余的所有面划分为interval size为0.8的三角形网格。④在III、IV段,先将组成导流片的面划分interval size为0.2的三角形网格,然后体网格为interval size为1的四面体和金字塔网格。在不影响计算结果的情况下,尽量减少网格数量以节省计算机资源。通过Gambit所建的喷筒、风机三维模型网格化后的模型如图2所示。

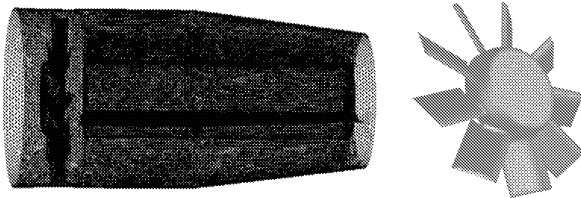


图2 喷筒和风机的三维模型

Fig. 2 3-D model of air duct and fan

2.3 数值计算

根据前期单因素试验的结果,选择锥形喷筒长度 F 、出风口直径 G 和柱形喷筒长度 B 3个因素,导流器为半椭球型的情况下,参照原喷筒的结构尺寸及喷筒中电动机的大小,设置了5个水平,进行正交试验,选取三因素五水平正交试验表 $L_{25}(5^3)$,如表1所示。取风机转速2927 r/min(工频下)进行仿真计算。正交设计下的数值试验结果如表2所示。表中, $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$,正交试验结果的统计分析如表3、4所示。

表3中第1行数据 $\sum X_1$ 为因素 F 、 G 、 B 在第1水平下的5个压力损失之和;表4中第1行数据 $\sum Y_1$

表1 因素与水平

Tab. 1 Factors and levels

水平	因素		
	锥形喷筒长度 F/cm	出风口直径 G/cm	柱形喷筒长度 B/cm
1	40.5	31.5	19.5
2	46.5	33.0	25.5
3	52.5	34.5	31.5
4	58.5	36.0	37.5
5	64.5	37.5	43.5

为因素 F 、 G 、 B 在第1水平下的5个出风口风速之和。同理得 $\sum X_2 \sim \sum X_5$ 、 $\sum Y_2 \sim \sum Y_5$ 。规定 R_{X_i} 和 R_{Y_i} 为极差。由正交试验的结果可知:影响喷筒压力损失及喷筒出口风速的因素大小顺序依次为出风口直径、柱形喷筒长度、锥形喷筒长度。若寻求喷筒内部压力损失最小,可选 $F_1 G_5 B_1$ 的喷筒结构组合;若寻求出风口风速最大,可选 $F_2 G_1 B_1$ 的喷筒结构组合。由于因素 F 与 B 对喷筒压力损失及出风口风速的影响不大,因此选取喷筒的结构时,可先根据风送式喷雾机的整体情况(包括机架对喷筒重心的要求,轴流风机的大小等因素)取定 F 与 B 的大小, G 的大小视用户对风速及压力损失的需求而定。本文在综合考虑轴流风机大小、机架对喷筒重心的要求及喷雾机功率等因素后,选定 F 、 G 、 B 分别为52.5 cm、34.5 cm和37.5 cm。喷筒内半椭球形导流器的半长轴和半短轴分别为96 cm和20 cm,其他部分的尺寸为: $A = 45$ cm、 $C = 20$ cm、 $D = 58$ cm、 $E = 48$ cm;风机结构尺寸为:轮毂直径20 cm;叶片长11.45 cm、叶宽度8.25 cm、叶片安装角 31° 、叶片数9。

3 出风口风速的数值模拟及测量试验

3.1 试验验证方法

当环境风速小于0.3 m/s时,在室外对喷筒出风口风速进行测量。利用变频器改变风机转速,在不同转速下测出喷筒出风口各采样点的风速 v_m ;将上述风机转速作为MRF仿真的初始条件,仿真计算出在不同转速下喷筒出风口各采样点上的风速仿真结果 v_s ;通过对比分析 v_m 与 v_s 间的差异,验证仿真计算模型的正确性。出风口采样点均匀分布在喷筒出风口处 $r = C/2 + (G - C)/4 = 13.5$ cm的圆周上(选在风机轮毂与出风口圆周之间),如图3所示。

3.2 试验仪器

MicroMaster440型变频器;AZ-8901型风速计,量程0.4~35 m/s,分辨率0.01 m/s,准确度 $\pm 2\%$;RM-1000型光电转速表,量程10~100 000 r/min,

表2 喷筒结构三因素五水平正交试验的数值模拟

Tab.2 Numerical simulation of duct structure in three factors and five levels of orthogonal test

试验号	f	g	b	喷筒入口气流 总压力 p_{in}/Pa	喷筒出口气流 总压力 p_{out}/Pa	$\Delta p = p_{in} - p_{out}$ /Pa	出风口气流风速 $v/m \cdot s^{-1}$	喷筒效率 $\eta/\%$
1	1	1	1	581.66	546.63	35.03	28.28	93.98
2	1	2	2	540.26	507.30	32.96	27.45	93.90
3	1	3	3	495.94	464.92	31.02	26.35	93.75
4	1	4	4	456.81	423.77	33.04	25.56	92.77
5	1	5	5	419.12	388.17	30.95	24.54	92.61
6	2	1	2	582.61	538.88	43.73	28.57	92.50
7	2	2	3	542.63	499.80	42.83	27.63	92.11
8	2	3	4	500.53	459.77	40.76	26.47	91.86
9	2	4	5	457.72	420.24	37.48	25.47	91.81
10	2	5	1	412.37	390.68	21.69	24.62	94.74
11	3	1	3	585.94	531.22	54.72	28.47	90.66
12	3	2	4	540.92	494.68	46.24	27.58	91.45
13	3	3	5	497.97	454.68	43.29	26.32	91.31
14	3	4	1	452.56	423.56	29.00	25.59	93.59
15	3	5	2	414.33	387.60	26.73	24.60	93.55
16	4	1	4	585.26	522.80	62.46	28.50	89.33
17	4	2	5	544.07	488.67	55.40	27.46	89.82
18	4	3	1	493.51	460.08	33.43	26.57	93.23
19	4	4	2	454.28	420.17	34.11	25.54	92.49
20	4	5	3	417.40	384.43	32.97	24.57	92.10
21	5	1	5	590.11	517.15	72.96	28.11	87.64
22	5	2	1	541.35	496.48	44.87	27.72	91.71
23	5	3	2	496.83	456.08	40.75	26.49	91.80
24	5	4	3	457.92	416.64	41.28	25.45	90.98
25	5	5	4	416.89	381.59	35.30	24.51	91.53

表3 喷筒出入口压力差的统计分析

Tab.3 Statistical analysis of duct pressure difference between inlet and outlet

Δp 之和	F	G	B	Pa
$\sum X_1$	163.02	268.89	164.04	
$\sum X_2$	186.50	222.32	178.27	
$\sum X_3$	199.98	189.25	202.83	
$\sum X_4$	218.38	174.92	217.81	
$\sum X_5$	235.16	147.65	240.09	
$R_{\Delta p}$	72.14	121.24	76.05	
$T_{\Delta p} = R_{\Delta p}/5$	14.43	24.25	15.21	

表4 喷筒出风口风速的统计分析

Tab.4 Statistical analysis of flow speed at outlet

v 之和	F	G	B	m/s
$\sum Y_1$	132.18	141.93	132.77	
$\sum Y_2$	132.77	137.84	132.65	
$\sum Y_3$	132.56	132.19	132.47	
$\sum Y_4$	132.64	127.61	132.63	
$\sum Y_5$	132.28	122.84	131.90	
R_v	0.59	19.08	0.87	
$T_v = R_v/5$	0.12	3.82	0.17	

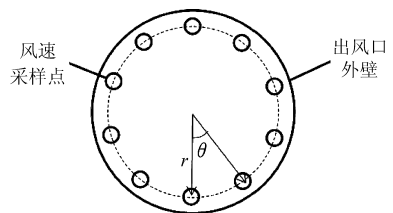


图3 出风口采样点分布图

Fig.3 Scatter gram of sampling points at outlet

分辨率 0.1 r/min (10 ~ 9 999.9 r/min), 精度 0.05% \pm 1dgts。

3.3 试验过程及试验数据

通过变频器调节风机转速, 对应风机转速为 2 926.5 ~ 1 306.5 r/min, 用风速仪测量喷筒出风口处各采样点上的风速, 测量 3 次, 取平均值作为该点的风速测量值。测量结果如表 5 所示, v_m 表示出风口 10 个采样点上对应风机转速下的均值。

将上述风机转速作为 MRF 仿真的初始条件, 在图 3 所示的采样点上经仿真计算得到测速点上风速的仿真值, 如表 6 所示, 表 6 中的 v_s 表示对应转速下出风口整个面上的均值。

表 5 不同转速下出风口采样点风速实测值
Tab. 5 Measured speed at sampling points with different fan speeds

采样点	风机转速/ $r \cdot \min^{-1}$							
	1 306.5	1 541.9	1 775.3	2 008.0	2 240.2	2 470.9	2 699.2	2 926.5
1	11.13	12.77	15.17	17.04	19.43	21.29	23.59	25.38
2	10.91	13.19	15.24	17.04	19.42	21.43	23.89	25.97
3	10.73	12.42	14.74	17.05	18.84	21.03	23.03	24.97
4	11.36	13.26	15.3	17.62	19.56	21.50	23.40	25.48
5	11.35	13.07	15.05	17.12	19.59	21.46	23.34	25.89
6	11.47	13.70	16.06	17.86	20.20	22.38	24.87	27.08
7	10.64	13.04	15.07	17.38	19.38	21.72	23.63	25.61
8	10.84	13.04	15.07	17.27	19.26	21.32	23.42	25.99
9	11.19	12.97	15.35	17.67	19.88	21.64	24.58	26.36
10	10.91	12.89	15.01	17.02	19.40	21.00	23.52	25.53
v_m	11.05	13.04	15.21	17.31	19.50	21.48	23.73	25.83

表 6 不同转速下出风口各采样点的风速仿真值
Tab. 6 Simulation speed at sampling points with different fan speeds

采样点	风机转速/ $r \cdot \min^{-1}$							
	1 306.5	1 541.9	1 775.3	2 008.0	2 240.2	2 470.9	2 699.2	2 926.5
1	11.51	13.88	15.66	17.87	19.90	22.34	24.07	26.67
2	10.73	12.70	14.61	16.58	18.50	20.42	22.32	24.50
3	11.68	13.81	15.92	18.07	20.21	22.26	24.40	24.17
4	10.85	12.80	14.74	16.79	18.66	20.60	22.54	26.35
5	12.05	14.08	16.36	18.34	20.58	22.68	24.76	24.39
6	11.04	12.98	15.00	16.95	18.94	20.81	22.83	26.80
7	11.58	13.89	15.87	18.36	20.24	22.77	23.93	24.70
8	11.01	12.91	14.97	16.75	18.72	20.69	22.80	26.96
9	11.46	13.94	15.76	18.03	20.41	21.88	24.31	24.61
10	10.90	12.89	14.84	16.78	18.70	20.68	22.60	26.37
速度范围	10.73 ~ 12.05	12.70 ~ 14.08	14.61 ~ 16.36	16.58 ~ 19.36	18.50 ~ 20.58	20.42 ~ 22.77	22.32 ~ 24.76	24.17 ~ 26.96
v_s	11.28	13.39	15.37	17.45	19.49	21.51	23.46	25.55

4 仿真与实测结果分析

4.1 出风口风速仿真结果对实测值的覆盖率

图 4 为不同风机转速时,喷筒出风口处采样点

风速实测值与仿真数据的对比。其中,折线上的点为实测值,两平行线为仿真计算得出的风速的上、下范围值。由图 4 可知,风速实测值大都落在仿真计算的范围内,只有 4 个点(图 4a 中的第 7 点、图 4b

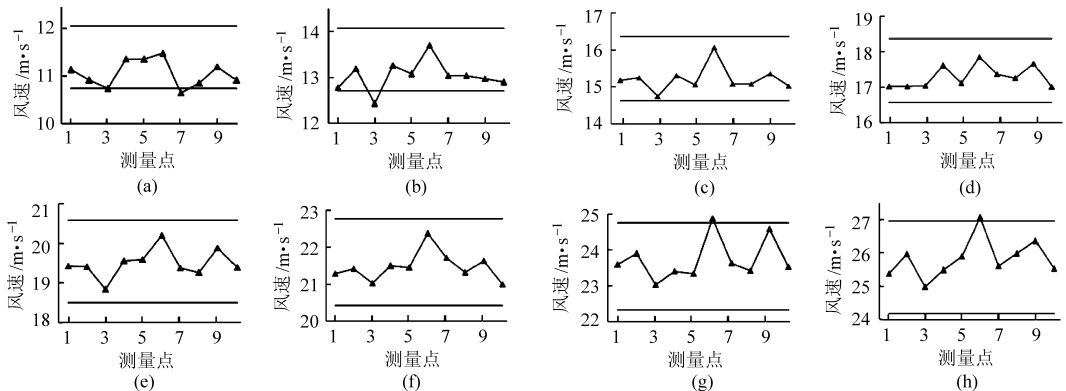


图 4 不同风机转速下仿真结果与实测结果对比

Fig. 4 Comparison of simulated and measured speed at different fan speeds

(a) $n = 1\ 306.5\ r/min$ (b) $n = 1\ 541.9\ r/min$ (c) $n = 1\ 775.3\ r/min$ (d) $n = 2\ 008.0\ r/min$
(e) $n = 2\ 240.2\ r/min$ (f) $n = 2\ 470.9\ r/min$ (g) $n = 2\ 699.2\ r/min$ (h) $n = 2\ 926.5\ r/min$

的第3点、图4g和图4h的第6点)的测量值没有被仿真计算出风速的区间覆盖。出现上述结果的可能原因为:在仿真模型中导流片之间所划分的区域是均匀理想的,而喷筒的安装制作过程中却可能有误差。以各个转速下的所有采样点(80)作为整体,则仿真计算结果对实测风速覆盖的概率为 $[(80-4)/80] \times 100\% = 95\%$;说明采用动参考系模型,仿真的结果能正确预知喷筒出风口的实际风速范围。

4.2 仿真结果与实测结果的 χ^2 检验

图5为各个转速下喷筒出风口风速实测均值与仿真均值的对比。由于实测均值与仿真均值两组数据均是在相同的给定风机转速(8个转速)下分别进行实测及仿真计算所得,可对两组数据进行 χ^2 检验^[15],检验仿真计算结果是否符合实际测量值的分

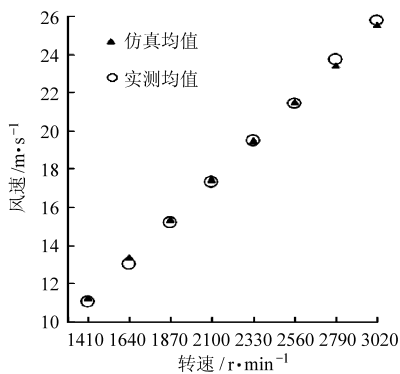


图5 不同转速下出风口风速实测均值与仿真均值对比

Fig. 5 Average testing speed and average simulating speed at air duct outlet with different fan speeds

布。 χ^2 的计算公式为

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(N_i - N_{oi})^2}{N_{oi}} \quad (3)$$

式中 N_{oi} ——不同风机转速下测得的风速

N_i ——对应风机转速下仿真风速

n ——数据个数, $n=8$

利用式(3)计算 $\chi^2 = 0.023$,查 χ^2 检验表得: $\chi_{0.05}^2(n-1) = 16.92$,因为 $\chi^2 = 0.023 < 16.92$,表明在水平0.05下,喷筒出风口风速的仿真值均服从其样本信号(实际测量值)的分布。

5 结论

(1)影响喷筒压力损失及喷筒出口风速的因素依次均为出风口直径、柱形喷筒长度、锥形喷筒长度。锥形喷筒长度与柱形喷筒长度的因素效应明显小于出风口直径的因素效应,因此选取喷筒的结构时,可先取定锥形喷筒长度与柱形喷筒长度,出风口直径可根据用户对风速及压力损失的综合需求而定。

(2)将风机的转速作为仿真的初始值,用MRF模型对风送式喷雾机喷筒出口的风速进行仿真计算,在喷筒出口采样点上仿真计算出的风速区间覆盖实测风速的概率为95%; χ^2 检验表明在水平0.05下,喷筒出风口风速的仿真值均服从其实际测量值的分布,说明利用动参考系方法,采用风机转速为初始条件下的RNG $k-\epsilon$ 模型,对喷筒出风口速度的数值模拟是可信的。

参 考 文 献

- 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)
- 吕晓兰,傅锡敏,吴萍,等. 喷雾技术参数对雾滴沉积分布影响试验[J]. 农业机械学报,2011,42(6):70~75.
Lü Xiaolan, Fu Ximin, Wu Ping, et al. Influence of spray operating parameters on droplet deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(6):70~75. (in Chinese)
- 郭峰,陈建东,郭辉,等. 3WF-8型风送式果园喷雾机性能优化与改进[J]. 农机化研究,2010,32(11):48~56.
Guo Feng, Chen Jiandong, Guo Hui, et al. Performance optimization and advance of 3WF-8 air-assisted orchard sprayer [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2010,32(11):48~56. (in Chinese)
- 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 modification on the spray drift emitted by an air-assisted sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(2):111~115. (in Chinese)
- 刘青,傅泽田,祁力钧,等. 9WZCD-25型风送式超低量喷雾机性能优化试验[J]. 农业机械学报,2005,36(9):44~47.
Liu Qing, Fu Zetian, Qi Lijun, et al. Characteristics optimization experiments of 9WZCD-25 air-blast and ultra low volume sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005,36(9):44~47. (in Chinese)
- 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.
- Endalew A M, Debaer C, Rutten N, et al. A new integrated CFD modeling approach towards air-assisted orchard spraying. Part I. Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2010,71(2):128~136.

- 2 Kocher M F, Lan Y, Chen C, et al. Opto-electronic sensor system for rapid evaluation of planter seed spacing uniformity[J]. Transactions of the ASAE, 1998,41(1):237~245.
- 3 Onal Okan, Onal Ismet. Development of a computerized measurement system for in-row seed spacing accuracy[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2009,33(2):99~109.
- 4 Lan Y, Kocher M F, Smith J A. Opto-electronic sensor system for laboratory measurement of planter seed spacing with small seeds[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999,72(2):119~127.
- 5 史智兴,高焕文. 排种监测传感器的试验研究[J]. 农业机械学报,2002,33(2):41~43.
Shi Zhixing, Gao Huanwen. RLD optoelectronic sensor for seeding monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002,33(2):41~43. (in Chinese)
- 6 宋鹏,张俊雄,李伟,等. 精密播种机工作性能实时监测系统[J]. 农业机械学报,2011,42(2):71~74.
Song Peng, Zhang Junxiong, Li Wei, et al. Real-time monitoring system for accuracy of precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(2):71~74. (in Chinese)
- 7 夏俊芳,周勇,张平华. 基于虚拟仪器技术的排种器漏播检测技术[J]. 华中农业大学学报,2008,27(4):540~544.
Xia Junfang, Zhou Yong, Zhang Pinghua. The testing technique research of seed absence on precise seed-meter based on virtual instrument[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2008,27(4):540~544. (in Chinese)
- 8 刘洪强. 精密排种器性能检测装置的研究[D]. 长春:吉林大学,2006.
Liu Hongqiang. Research on the performance detection device of precision seed-metering[D]. Changchun: Jilin University,2006. (in Chinese)
- 9 廖庆喜,邓在京,黄海东. 高速摄影在精密排种器性能检测中的应用[J]. 华中农业大学学报,2004,23(5):570~573.
Liao Qingxi, Deng Zaijing, Huang Haidong. Application of the high speed photography checking the precision metering performances[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2004,23(5):570~573. (in Chinese)
- 10 金衡模,高焕文. 玉米精播机漏播补偿系统设计[J]. 农业机械学报,2002,33(5):44~47.
Kim Hyungmo, Gao Huanwen. Design of a microcomputer-controlled loss sowing compensation system for a maize precision drill [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002,33(5):44~47. (in Chinese)
- 12 张晓辉,赵百通. 播种机自动补播监控系统的研究[J]. 农业工程学报,2008,24(7):119~123.
Zhang Xiaohui, Zhao Baitong. Automatic reseeding monitoring system of seed drill [J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(7):119~123. (in Chinese)
- 13 林静. 甘蔗种植技术要求[J]. 农村实用技术,2011(1):46.
- 14 王美美,陈联诚,区颖刚. 光电传感器快速监测甘蔗种植均匀性研究[C]//中国农业工程学会2011年学术年会论文摘要集,重庆,2011.

~~~~~  
(上接第78页)

- 8 Tsay J R, Liang L S, Lu L H. Evaluation of an air-assisted boom spraying system under a no-canopy condition using CFD simulation[J]. Transactions of the ASAE,2004,47(6):1887~1897.
- 9 Zhu H, Brazee R D, Derksen R C, et al. A specially designed air-assisted sprayer to improve spray penetration and air jet velocity distribution inside dense nursery crops[J]. Transactions of the ASABE,2006,49(5):1285~1294.
- 10 韩占忠. FLUENT 流体工程仿真计算实例与分析[M]. 北京:北京理工大学出版社,2009.
- 11 王瑞金,张凯,王刚. FLUENT 技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- 12 韩占忠,王敬,兰小平. 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,2005.
- 13 闫海津,胡丹梅,李佳. 水平轴风力机叶轮流场的数值模拟[J]. 上海电力学院学报,2010,26(2):123~126.  
Yan Haijin, Hu Danmei, Li Jia. Numerical simulation of flow field for horizontal-axis wind turbine rotor[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power,2010,26(2):123~126. (in Chinese)
- 14 罗惕乾,程兆雪,谢永曜. 流体力学[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- 15 王卫星,宋淑然,鲁楠,等. 加载系统模拟试验及评价[J]. 农业工程学报,1996,12(1):96~100.  
Wang Weixing, Song Shuran, Lu Nan, et al. Simulation test and evaluation of loading system[J]. Transactions of the CSAE, 1996,12(1):96~100. (in Chinese)
- 16 贾卫东,李成,王贞涛. 高沉积静电喷雾装置试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(2):244~248.  
Jia Weidong, Li Cheng, Wang Zhentao. Experimental study on electrostatic spraying device with better deposition[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012,30(2):244~248. (in Chinese)
- 17 马中飞,张于祥,杨秀莉,等. 自吸式喷雾降尘性能试验[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(1):97~101.  
Ma Zhongfei, Zhang Yuxiang, Yang Xiuli, et al. Experiment on dust suppression performance of self-priming sprayer[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2012,30(1):97~101. (in Chinese)