

喷杆喷雾机风助风筒流场分析与结构优化*

刘雪美 张晓辉 侯存良

(山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018)

【摘要】 针对气流辅助式喷杆喷雾机的风助风筒原始设计中存在耗气量大、效率低、风速变异系数大的缺点,采用计算流体动力学(CFD)对风助风筒内外流场的三维区域进行了仿真。仿真结果表明:原型风筒内流场存在强旋流、流道窄的缺点,并导致工作外流场风速变异系数大。针对上述两种流场的问题,提出改进设计方案:对于外流场风速变异系数大的问题,采用减小出口尺寸和出口间距,可大大减小风速变异系数,但不能从根本上改变流场结构;为克服内流场强旋流、流道窄的不足,在上述结构参数优化基础上,增加导流板装置,减小速度变异较大区域的出口间距,最终优化结果满足设计要求。样机试验表明设计方案实现了高效和风速变异小的风幕。

关键词: 喷杆喷雾机 风助风筒 计算流体动力学 导流板 流场分析

中图分类号: S493+.1; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)04-0070-06

Air Flow Simulation and Flow Field Optimization for Airduct of Air-assisted Boom Sprayer

Liu Xuemei Zhang Xiaohui Hou Cunliang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract

To improve the drawbacks of original designed air-assisted duct of boom sprayer, such as huge wind consumption, low efficiency, large coefficient variation (CV) of wind velocity, 3-D flow field of interior duct and exterior free flow region was simulated by using computational fluid dynamics (CFD). Flow field analysis of the simulation results showed that there were strong swirling and narrow flow channel in the flow field of prototype air-assisted duct. It also resulted in large CV in exterior free flow field. In response to these shortcomings, two kinds of improvement designs were proposed. Firstly, the outlet size and outlets spacing was decreased to greatly reduce the CV of wind velocity, but could not fundamentally change the flow structure. Secondly, on the basis of above optimization, a flow deflector was added to overcome the strong swirling flow and narrow flow channel. Prototype testing indicated that final scheme achieved high efficiency and small wind speed variations.

Key words Boom sprayer, Air-assisted duct, Computational fluid dynamics, Flow deflector, Flow field analysis

引言

风助风筒所产生的高速定向气流可克服自然风对雾滴飞行方向的影响,使雾滴更容易穿透植物叶冠,从而有利于雾滴在植物不同层次上的沉积。风筒出口风速,特别是气流到达作物顶端时的风速分

布对喷雾分布均匀性、雾滴沉积均匀度有很大影响^[1]。若风筒出口风速太小,气流难以翻动枝叶,无法穿透植株;相反若风速太大,气流会穿透植株,撞击到地面并出现反弹,从而带走雾滴,造成药液浪费和环境污染。与国外风助喷雾机相比,我国现有风助风筒的出口平均风速较低^[2],雾滴减飘效果受

收稿日期: 2010-07-02 修回日期: 2010-08-23
* 农业部农药化学与应用重点开放实验室资助项目(MOAPCA201001)和山东省科技攻关计划资助项目(2007GG10009001)
作者简介: 刘雪美,副教授,博士生,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: lxmywj@126.com
通讯作者: 张晓辉,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: zhangxh@sdau.edu.cn

自然风速影响较大^[3]。在风筒长度方向的风速均匀性未受到足够重视,导致幅宽内的雾滴分布不均匀。因此,必须对当前的风筒结构参数进行优化,以优化流场结构、减小损耗、提高效率、保持适当的出口风速,使流场在风筒长度方向上具有良好的风速一致性。

本文以气流辅助式喷杆喷雾机的风助风筒为研究对象,应用 CFD 数值模拟技术^[4-6],对风筒工作区流场进行分析,优化其结构参数,并提出一种新导流结构以提高气流辅助式喷杆喷雾机性能。

1 风助喷杆喷雾机及风助风筒减飘

气流辅助式喷杆喷雾机(图 1)由机架、药箱、药液泵、液压驱动的轴流风机及风助风筒、喷杆及药液喷雾系统、液压系统等部件组成。为保证喷杆喷雾机的风助风筒有效提高雾化质量、减少雾滴飘移、减小风机功率消耗,风助风筒应在轴流风机最小风量前提下具有最大平均出口风速,并在植株冠层的平均风速达 4 m/s 以上,同时应保证在风筒长度方向上具有最小的风速变异系数(coefficient variation, 简称 CV),完成雾滴均匀喷洒^[7]。

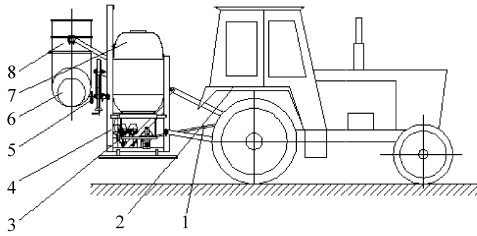


图 1 气流辅助式喷杆喷雾机结构示意图
Fig.1 Composition of air-assisted boom sprayer

- 1. 动力输出轴 2. 拖拉机 3. 药液系统 4. 机架 5. 喷雾系统
- 6. 风助风筒 7. 药液箱 8. 轴流风机

2 风助风筒流场建模

流场建模主要包括 3 部分:数学模型、几何模型和网格划分、边界条件。

2.1 数学模型

流体流动遵循的基本守恒定律包括:质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律^[4]。风助风筒在外流场液滴和空气场互相耦合,精确计算其流场流动状态需考虑液滴升力、重力、液体及气体属性受温度影响等多个复杂因素,考虑到液体体积分数占整个流场的比率较小,气流的动量相对雾滴比较大^[8],因此本文将模型简化,忽略液滴和气体间的耦合作用,只研究气体条件下流场的流动参数。

由于流场风速相对较小,最高约为 35 m/s,可按稳态不可压流动进行处理。忽略温度变化对流体性

质的影响,在不求解能量守恒方程的前提下,流场内的气体流动可用下述数学模型描述^[4]:

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_m) = 0 \tag{1}$$

式中 ρ ——混合密度

$\mathbf{v}_m$ ——质量平均速度

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \mathbf{v}_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = \\ - \nabla p + \nabla [\mu (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \end{aligned} \tag{2}$$

式中 p ——连续相总压力

μ ——混合黏性系数 $\mathbf{F}$ ——体积力

2.2 几何模型与网格划分

为了使仿真条件与实际试验条件相符,降低出口边界条件对流场仿真结果的影响,在建立 8 m 幅宽的三维风筒仿真模型的基础上,将风助风筒出风口外离地面高度 1 m 内 9 m × 1 m × 0.5 m 的自由流动区加入计算区域。在满足计算精度的前提下,为减少计算负荷,将仿真区域几何模型根据横向、纵向两个对称面简化为物理模型的 1/4。仿真三维模型如图 2 所示。其中,模型中 0.25 m 和 4.5 m 是对称计算的尺寸。图 3 为增加导流板装置的风助风筒结构示意图,由于连接各导流板的肋板厚度较小,且数量较少,对流动的影响较小,因此在对导流板建模时可以不考虑肋板。

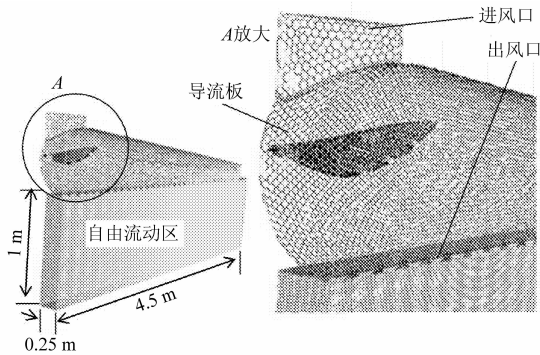


图 2 风助风筒及部分空气区域三维流场仿真区域示意图

Fig.2 Structure and size of simulation zone

为满足计算效率和精度需要,且使网格划分较为简便采用分块划分网格的方法,以出风口为界限,风筒内部流场采用四面体楔形网格划分,右边采用 cooper 方法网格划分,出风口部分采用结构网格划分,三维流场区域采用 submap 结构体网格划分。为更准确地计算出风口处流场分布,出风口及其附近区域采用较密的网格划分方案。三维结构共划分网格约 4.9×10^5 ,节点约 3.8×10^5 。

与楔形网格或其他混合型网格等非结构网格相

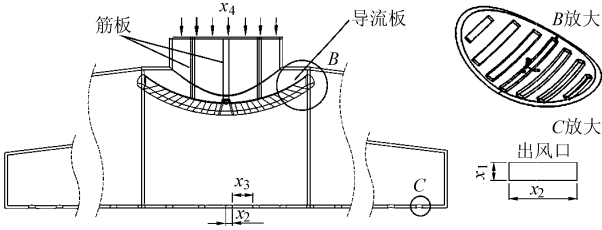


图3 增加导流板装置的风助风筒结构示意图
Fig.3 Air-assisted duct structure with flow deflector

比,在满足计算精度的前提下多面体网格具有网格数量小(约为其他网格数量的1/3~1/5)的优点,可以大大降低计算费用,改善计算效率。因此,将Gambit划分的混合型网格导入Fluent后,将风助风筒区域的网格转换成多面体网格,以降低网格数量,增加计算速度。

2.3 边界条件与计算方法

边界条件是指在求解域的边界上所求解的变量或者其一阶导数随地点及时间变化的规律。合理的边界条件是CFD稳定有正确定解的前提,也是计算收敛并得以进行的前提。风筒进口采用速度进口边界条件,进口速度10 m/s,其湍流类型选用湍流密度(10%)和水力直径;出口为压力出口边界条件,出口压力为大气压101 325 Pa;壁面采用无穿透、无滑移边界条件进行处理;空气属性参数分别设置为:密度1.225 kg/m³,动力粘度1.7894 × 10⁻⁵ Pa·s。

具体计算方法对模型的收敛性、精确性及计算费用有很大的影响。本文采用控制体积法求解控制方程,压力速度耦合方式选用SEMPLE算法,对流相、源相采用二阶迎风格式进行求解,对扩散相采用中心差分格式进行离散以提高解的精度,避免假扩散现象对解的精度造成不良影响^[4]。

3 风助风筒的流场计算及评价指标

在进行风筒优化设计时,为评价不同风筒结构流体动力学的性能优劣,首先应确定风助风筒的性能评价准则。本文选取的风筒性能评价指标为:

出口平均风速

$$\bar{v}(X) = \frac{1}{a} \sum v$$

式中 a——风筒出风口数

v——出口风速,m/s

出口正下方0.5 m处平均风速

$$\bar{v}_{0.5}(X) = \frac{1}{b} \sum v_{0.5}$$

式中 b——0.5 m处的风速采样点个数,取模型在0.5 m处幅宽内的网格点数

v_{0.5}——0.5 m处各采样点风速测值,m/s

出口正下方0.5 m处风速变异系数

$$C_{v_{0.5}(X)} = \frac{S_{v_{0.5}}}{\bar{v}(X)} \times 100\%$$

其中

$$S_{v_{0.5}} = \sqrt{\frac{\sum v_{0.5}^2 - \left(\sum v_{0.5}\right)^2/b}{b-1}}$$

式中 S_{v_{0.5}}——0.5 m处风速的标准差

3.1 原型风助风筒的流场分析

原型风助风筒关键参数为:出口宽度x₁ = 20 mm,出口长度x₂ = 120 mm,出口间距x₃ = 120 mm,进口直径x₄ = 500 mm。其中间对称面的流场速度分布云图如图4所示。气流从出口流出后速度较高,受出口外空气阻力的影响,略微向外扩散,但扩散幅度较小,三维流场中较稀疏的出口气流不能交汇,在气流之间形成低速区。其中,尤以对称面附近两道气流间速度为最低,因此整个流场区域风速变异系数大,出口0.5 m处喷雾分布均匀性和雾滴沉积均匀度也较差。

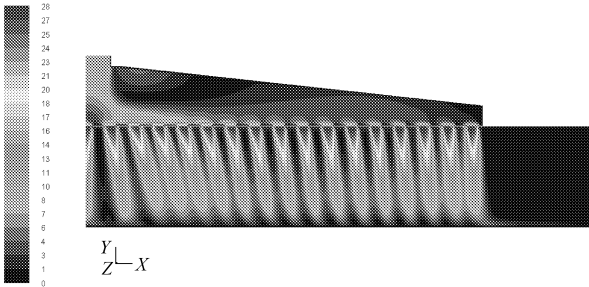


图4 风助风筒中间对称面的气流速度场
Fig.4 Flow velocity field in middle symmetric plane of air duct

对称面上的气流迹线图(图5)显示,在环绕风助风筒的进口周围形成了高速旋流,消耗了部分能量,并因此影响了气流向风筒径向的流动,使原型风筒耗气量大。同时,在三维流场的中间区域也观察到了速度较低的旋流,此旋流对耗气量影响较小,但因出口两高速气流的流向偏差较大,在两者中间形成了低速回流区,使风速变异系数增大。

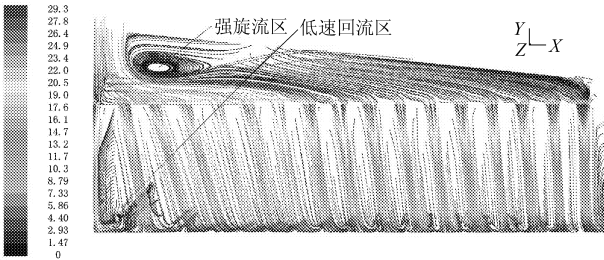


图5 风助风筒中间对称面的气流迹线图
Fig.5 Pathline in middle symmetric plane of air duct

3.2 改进出口结构参数后的流场分析

采用相关向量机和多目标优化算法进行结构优

化^[9],圆整后得到一组优化的结构参数为:出口宽度 $x_1 = 10\text{ mm}$,出口长度 $x_2 = 60\text{ mm}$,出口间距 $x_3 = 60\text{ mm}$,进口直径 $x_4 = 500\text{ mm}$ 。通过减小出口长度和宽度,减小出口间距,增加出口密度等优化措施后,风助风筒的速度云图如图 6 所示。由图可以看出,近对称面三道气流速度同其余气流速度仍有较大差异,速度相对较低,但整个流场区域的气流分布均匀度已经有较大提高。气体流动迹线图(图 7)显示,进口周围的旋流强度已大大减弱,漩涡消失,因此可降低气体的能量损耗,提高利用效率。

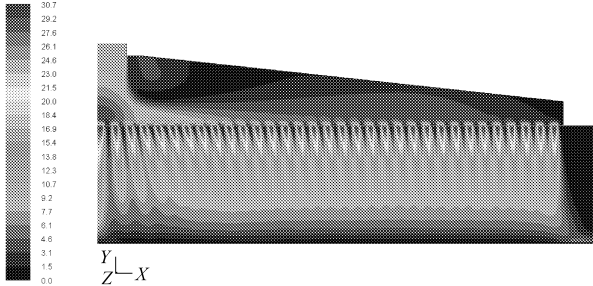


图 6 优化后风筒气流的中间对称面速度分布云图

Fig. 6 Flow velocity field in middle symmetric plane of optimized air duct

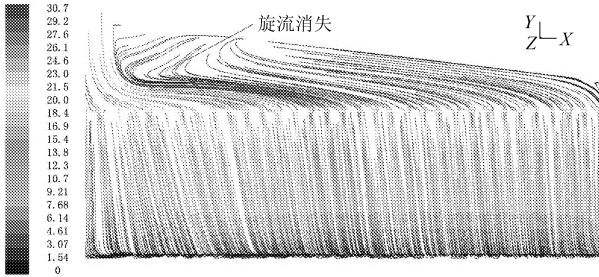


图 7 风助风筒中间对称面的气流迹线图

Fig. 7 Pathline in middle symmetric plane of optimized air duct

3.3 增加导流板后的流场分析

改变进出口参数可以提高风筒流场气流分布均匀度,但其结构形式决定了流场有涡流形成,对称面附近气流分布均匀性较差等缺点。从流场气体流动轨迹及速度分布图可以看出,气体进入风筒后受流体惯性影响导流效果较差,到达出口平面时除一部分流出风筒外大部流体被壁面反弹,在反弹力和惯性力共同作用下以较高速度流向两侧。高速气体在风筒内环绕进口气流形成旋流,在对称面和出口两个方向形成压力:一方面,在对称面方向进一步压迫进口气流,减小了进气流道,阻碍了流体从进口向两端导流;另一方面,向下压迫风筒外侧扩散的气流,在对称面附近的出口前形成窄流道、高速气流,进一步加剧相应区域出口气流的倾斜角,使该区域相应的风速变异系数增大。

针对上述风筒结构上固有缺点,通过增加导流

板,一方面起导流的作用,拓宽进口处流体流道;另一方面减弱甚至破坏旋流的形成条件,减少能量损耗,提高气体利用效率。增加导流装置后风筒内外流场速度分布如图 8 所示。同无导流板的流场(图 4 和图 6)相比,增加导流板后整个风筒内气体速度分布趋于均匀,原流场中典型的窄流道消失,因而气体可以更好地向末端扩散,且对称面附近较小的出口间距也弥补了原流场对称面附近风速变异系数相对较大的缺点。从气体的流动轨迹来看(图 9),气体进入风筒后,受导流板阻力影响,一部分气体沿导流板的边缘缝隙向两端扩散,另一部分气体经导流槽流出后向两端和出口方向流动,形成了上、下两道流道的双流道结构,但在风筒中仍然形成了小面积涡流。针对无导流板风筒中间对称面附近速度变异较大的缺点,适当增加了中间对称面附近出口的密度,从图 8 速度云图上来看,除第一和第二道出口之间风速变化稍大外,其余各出口间风速均较为均匀。

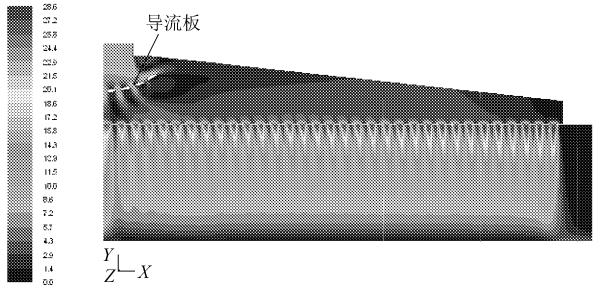


图 8 加导流板后风助风筒气流的中间对称面速度分布云图

Fig. 8 Flow velocity field in middle symmetric plane of optimized air duct

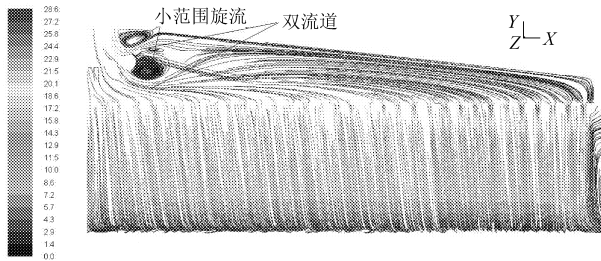


图 9 加导流板风助风筒中间对称面的气流迹线图

Fig. 9 Pathline in middle symmetric plane of optimized air duct

4 导流板风助风筒的试验分析与验证

为了更准确地评价导流板结构对风助风筒的性能影响,进行了风助风筒风速和喷雾试验,并定量地与改进前原型结构进行了对比。试验由 FJX-1 风机性能试验台提供风量,通过自制风助风筒后,由 SYT-2000HF 型皮托管风速风量仪的探头测定风筒每个出风口的风速,并在出风口下方 0.5 m 处沿风筒轴线方向均匀取 20 个点采集样本点的风速,试

验装置如图 10 所示。

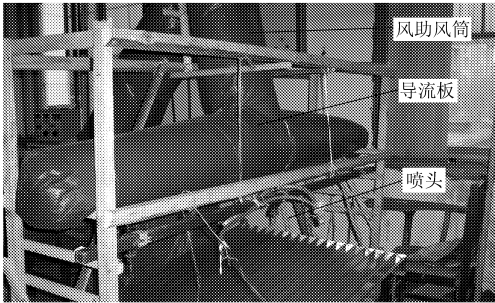


图 10 风助风筒减飘试验装置

Fig. 10 Reduced drift experimental setup for validation of proposed structural air-assisted duct

表 1 比较了 3 种结构风筒的出口平均风速、垂直距离出口 0.5 m 处平均风速、垂直距离出口 0.5 m 处风速变异系数 3 个关键参数。由表可以看出,减

小出口面积和出口间距的优化措施后使出口平均风速和垂直距离出口 0.5 m 处平均风速增加了 17.8% 和 7.1%。如前所述,即改变进、出口参数后的结构改善了流场分布,使流场旋流减弱,改善流道分布,因此减小了能量损耗,使出口平均风速和 0.5 m 处平均风速增加。增加导流板后出口平均风速相对于原风筒风速又减小了 4.2%,同时由于流场结构的改善,出口 0.5 m 处平均风速增加了 3.5%。结构优化后的风筒风速变异系数减小至 14.2%,增加导流槽和优化对称面附近出口密度后变异系数进一步减小至 9.7%。二次雾化性能试验采用电子显微测定方法,统计雾滴数量中径和体积中径,计算雾滴均匀度^[10]。试验结果证明在同一喷头条件下,轴向雾滴直径均匀度也分别增加了 7.2% 和 9.4%,不同结构风筒的雾滴分布如图 11 所示。

表 1 不同风筒结构性能参数比较

Tab. 1 Performance comparison of different structures of air ducts

风筒结构	出口平均风速 $\bar{v}(X)/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$		0.5 m 处平均风速 $\bar{v}_{0.5}(X)/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$		0.5 m 处风速变异系数 $C_{v0.5(X)}/\%$		二次雾化 雾滴均匀度
	仿真分析	试验实测	仿真分析	试验实测	仿真分析	试验实测	
原型风筒	21.3	19.4	8.5	6.1	42.3	13.2	0.68
结构优化后风筒	25.1	24.3	9.1	6.9	14.2	8.5	0.72
加导流板后风筒	24.2	23.1	9.4	7.1	9.7	5.2	0.76

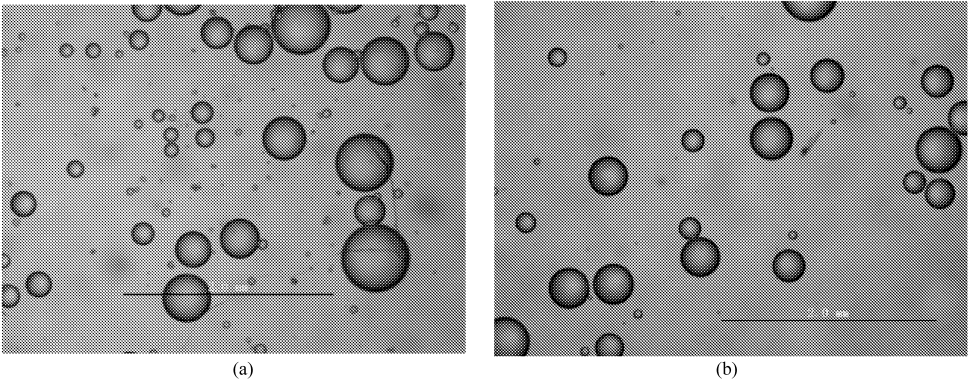


图 11 显微镜下不同风筒试验的雾滴分布

Fig. 11 Droplet distributions under different air-assisted duct

(a) 原型风筒 (b) 优化风筒

由于仿真计算未考虑风机风量的脉动和风速的均匀性,以及自然风速的扰动等实际因素,故模拟与测试有所差异,但试验结果与仿真分析在误差范围内变化趋势基本吻合。

5 结束语

采用 CFD 技术对风助风筒内流场及其工作外流场组成的三维流场区域进行计算。计算表明:原型风筒内存在较大范围的强旋流,且气体扩散流道较窄,耗能大,使出口平均速度及 0.5 m 处平均速度

变低而且风速变异系数变大,不利于液体颗粒的均匀扩散。针对上述流场问题,在建立对应的几何和数学模型的基础上进行了 CFD 流场分析,提出了两种改进方案。第 1 种结构改进方案为减小出口尺寸,并减小出口间距等结构优化,降低旋流强度,改善流道,较好地提高了速度分布均匀性,但风筒流场内仍然有较强烈的旋流和回流,因而具有较大的能量损失。第 2 种方案在上述方案基础上通过增加导流板,在主流场内减弱了旋流,形成双流道结构,但无回流,流道宽,有利于气体在风筒内的扩散和喷

出,可降低损耗,提高效率,进一步减小了风速变异系数,因此是较为理想的结构。样机试验表明改进

风筒形成的风幕实现了较高的出口平均风速和风速变异小,因而雾滴具有较好的二次雾化均匀度。

参 考 文 献

1 邓巍,丁为民,何雄奎. 变量喷施技术及其雾化特性评价方法综述[J]. 中国农业大学学报,2009,14(3):94~102.
Deng Wei, Ding Weimin, He Xiongkui. Technologies and evaluation methodology of variable spray[J]. Journal of China Agricultural University, 2009, 14(3):94~102. (in Chinese)

2 中国农业机械化科学研究院. 一种喷杆喷雾机:中国, ZL 200620157987.9[P]. 2008-03-05.

3 何雄奎,曾爱军,刘亚佳,等. 水田风送低量喷杆喷雾机设计及其参数研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9):76~79.
He Xiongkui, Zeng Aijun, Liu Yajia, et al. Design and parameter test of the low volume air assistant rice boom sprayer [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9):76~79. (in Chinese)

4 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

5 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)

6 陶雷,何雄奎,曾爱军,等. 开口双圆弧罩盖减少雾滴飘失效果的 CFD 模拟[J]. 农业机械学报,2005, 36(1):35~37.
Tao Lei, He Xiongkui, Zeng Aijun, et al. CFD simulation of open doubled-foil shield on reducing spray drift [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1):35~37. (in Chinese)

7 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)

8 Teske M E, Miller P C H, Thistle H W, et al. Initial development and validation of a mechanistic spray drift model for ground boom sprayers[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(4): 1 089~1 097.

9 刘雪美,张晓辉,刘丰乐,等. 基于 RVM 的喷杆喷雾机风助风筒多目标优化设计[J], 农业机械学报,2010, 41(6): 75~80.
Liu Xuemei, Zhang Xiaohui, Liu Fengle, et al. Multi-objective dynamic design optimization for air duct of air-assisted boom sprayer based RVM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 75~80. (in Chinese)

10 余泳昌,王保华,史景钊,等. 手动喷雾器组合充电式静电喷雾装置的雾化效果试验[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12):85~88.
Yu Yongchang, Wang Baohua, Shi Jingzhao, et al. Design and experimental study of combined charging hydraulic electrostatic spraying box [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(12): 85~88. (in Chinese)

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 Zhu H, Derksen R C, Ozkan H E, et al. Development of a canopy opener to improve spray deposition and coverage inside soybean canopies: part 2. opener design with field experiments[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(6): 1 913~1 921.

(上接第 69 页)

13 张燕,樊靖郁,王道增. 横流冲击射流尾迹涡结构的实验研究[J]. 力学季刊, 2005, 26(4):539~543.
Zhang Yan, Fan Jingyu, Wang Daozeng. Experimental study for wake vortices of an impinging jet in crossflow[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2005, 26(4):539~543. (in Chinese)

14 张晓元,李炜,李长城. 横流环境中射流的数值研究[J]. 水利学报,2002,33(3):32~43.
Zhang Xiaoyuan, Li Wei, Li Changcheng. Numerical simulation for the flow field of vertical round turbulent jet entering the cross current[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(3):32~43. (in Chinese)

15 卞晓静. 横流条件下垂直动量射流数值模拟[J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(5): 530~533.
Bian Xiaojing. Numerical simulation of vertical momentum jet in cross-flow [J]. Journal of Hehai University: Natural Sciences, 2006, 34(5): 530~533. (in Chinese)

16 李炜,姜国强,张晓元. 横流中圆孔湍射流的旋涡结构[J]. 水科学进展,2003,14(5):576~582.
Li Wei, Jiang Guoqiang, Zhang Xiaoyuan. Vortex structures of round turbulent jets in cross-flow[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(5):576~582. (in Chinese)