

纵轴流清选装置混合流场数值模拟与优化试验

童水光¹ 沈强¹ 唐宁¹ 贾亚萍¹ 从飞云¹ 顾伟²

(1. 浙江大学机械工程学院, 杭州 310027; 2. 星光农机股份有限公司, 湖州 313017)

摘要: 清选装置性能决定着收获机的作业性能,为了克服纵轴流全喂入风筛式清选装置单风道离心风机气流场不均匀的缺点,对风机、脱粒滚筒产生的混合流场进行三维数值模拟,提出纵轴流全喂入双风道六出风口风机的改进结构,并分析结构改进后振动筛面的气流速度对全流域气流分配的影响。同时,对改进后清选装置进行风机转速、风机入射倾角、鱼鳞筛夹角3因素正交优化,分析了各因素对气流场的影响规律,得到最优参数组合:当风机入射倾角30°、鱼鳞筛夹角40°、风机转速1900 r/min时,更利于高负荷高效率清选。最后,通过田间试验验证了双风道结构和优化试验的准确性,水稻籽粒损失率0.91%,含杂率0.87%,小麦籽粒损失率0.82%,含杂率0.76%。

关键词: 联合收获机; 清选装置; 混合流场; 计算流体力学; 数值模拟

中图分类号: S225.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0135-08

Numerical Simulation and Optimization Experiment of Mixed Flow Field on Longitudinal Axial Flow Cleaning Device

Tong Shuiguang¹ Shen Qiang¹ Tang Ning¹ Jia Yaping¹ Cong Feiyun¹ Gu Wei²

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. Star Agricultural Machinery Co., Ltd., Huzhou 313017, China)

Abstract: The cleaning performance of cleaning device greatly affects the working performance of the machine. In order to overcome the shortcomings of the uneven air-flow field in the longitudinal axial flow full-feeding air-and-screen cleaning device, the mixed flow field produced by the fan and the threshing roller was numerically simulated with computational fluid dynamics (CFD) software. A structure of fan with double air-ducts and six air-outlets was proposed based on the longitudinal axial flow full-feeding cleaning device. By comparing and analyzing the improved structures, the air speed of the sieve has the influence on the distribution of the full air-flow field. At the same time, the orthogonal simulation was carried out on a new type of cleaning device with the three factors (the fan speed, the incident angle of the fan, the included angle of the sieve) in Z section, and the influence of the three factors was analyzed. The optimal combinations are as follows: the incident angle of the fan is 30°, the included angle of sieve is 40°, the speed of fan is 1900 r/min. With the best combination of these structural parameters, the speed of overall air flow in the front and the rear of sieve is uniform and efficient, and it is more beneficial to high-load cleaning. Finally, field tests verified the accuracy of the improved structure and optimization program. The loss rate of the rice is 0.91% and the impurity rate is 0.87%. The loss rate of the wheat is 0.82% and impurity rate is 0.76%, it greatly improved the cleaning performance of the longitudinal axial flow.

Key words: combine harvester; cleaning device; mixed flow field; computational fluid dynamics; numerical simulation

收稿日期: 2016-01-12 修回日期: 2016-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305392)和浙江省自然科学基金重点项目(LZ15E050001)

作者简介: 童水光(1960—),男,教授,主要从事农业机械、有限元仿真、结构优化、机械设计理论研究,E-mail: cloudswk@zju.edu.cn

引言

纵轴流清选装置是联合收获机的核心工作部件之一,其性能的高低决定着收获机整体的作业性能^[1]。实验研究^[2]表明筛面气流场的分布与清选质量有着密切的联系,开展纵轴流清选装置筛面气流场分布的研究,有助于提升整体清选质量和作业效率。目前最常用的风筛式风机为单风道离心风机,但有出风口风速中间大两边小、风量小、气流分布不均匀等缺点,容易引起滚筒堵塞、籽粒含杂率高等问题,无法满足大喂入量、高负荷作业工况的要求^[3]。为了克服单风道风机的缺点,国外大型农业机械跨国公司(如阿里斯·查默斯、克拉斯、约翰·迪尔)^[4]都采用了多个风机或者双风道多出风口清选装置来提高清选质量和效率,但不适用于国内小型纵轴流全喂入机型。我国学者也开展了适合国内双风道清选装置的相关研究^[5-7],但主要集中在横轴流机型,尚未对纵轴流全喂入双风道清选装置进行深入研究。

CFD 技术已经成为进行各类流场研究的必备工具^[8-13],本文采用 CFD 技术对脱粒滚筒和离心风机两者产生的混合气流场进行数值模拟,设计纵轴流全喂入新型双风道六出风口风机,分析结构改进前后振动筛面和尾部气流分布情况。同时,对改进后的双风道六出风口流场模型进行正交优化仿真,获得纵轴流全喂入双风道清选装置气流场的最佳参数,以进一步提高清选装置的性能。

1 模型建立与数值模拟计算

1.1 三维模型的建立

本文对湖州星光农机有限公司纵轴流全喂入联合收获机进行研究,运用 SolidWorks 软件建立了纵轴流全喂入单风道清选装置的三维模型,如图 1 所

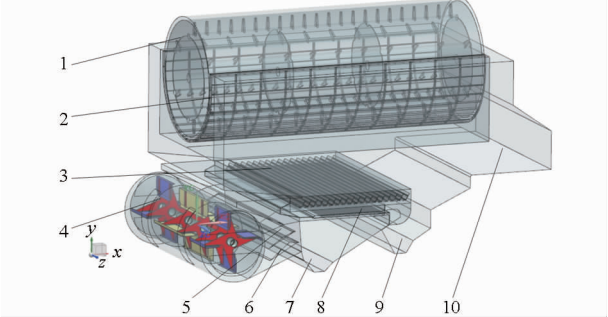


图 1 联合收获机脱粒清选装置结构图
Fig. 1 Structure diagram of threshing-cleaning device for combine harvest

1. 纵轴流滚筒 2. 滚筒凹板筛 3. 鱼鳞筛 4. 风机 5. 上导风板 6. 下导风板 7. 输粮螺旋升运器 8. 编织筛 9. 二次杂余螺旋升运器 10. 清选室外壳

示。单风道风机直径 320 mm,周向叶片数 4,横向叶片数 3。滚筒直径 580 mm,长度 1 480 mm。

1.2 有限元网格的划分

对纵轴流清选装置进行整体网格划分。综合考虑其网格质量和内部流动复杂性,共划分 19 个流动区域,不同流域交界面进行网格关联配对。网格类型采用四面体非结构化网格,并对局部网格加密处理^[14],最大网格尺寸为 30 mm,加密后最小网格尺寸为 5 mm。整体仿真模型网格总数为 2 502 755。

1.3 求解方法及初始、边界条件设定

根据清选流域的工作环境,不考虑温度和粘度的变化,设定流体属性为不可压缩的牛顿流体。湍流模型成功应用于农业机械气固耦合两相流场中^[15-17],模型采用标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型。采用标准壁面函数和稳态求解器进行求解。将风机叶轮区和脱粒滚筒区设置为旋转区域,设定相应的转速,将整体清选装置壁面设置为光滑壁面,设定旋转区域的旋转流动面。设置工作压力为 1 个大气压,风机入口边界采用开口条件(入口条件为压力进口),清选气流尾部出口边界采用开口条件,求解器设置残差为 0.000 2。

2 风道改进前后流场仿真对比分析

2.1 单风道风机流场分析

传统单风道风机叶轮转速为 1 800 r/min,左右两侧为进风口,单风道口三出风口离心式风机流场速度云图数值模拟结果如图 2 所示。

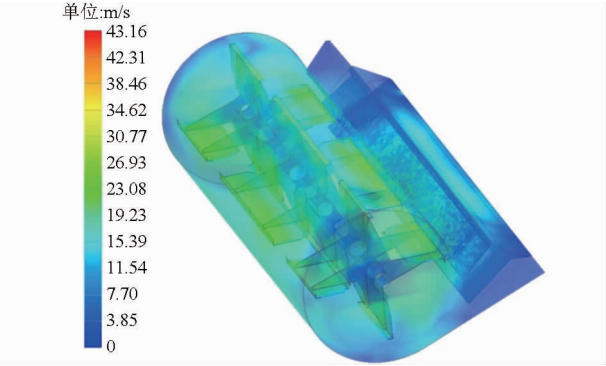


图 2 离心风机流场速度云图

Fig. 2 Speed cloud diagram of flow field for centrifugal fan

搭建风机测速试验平台,进行现场离心式风机风速试验,叶轮转速为 1 800 r/min,左右两侧为进风口,采用 AR826 + SMART SENSOR 型风速仪测速。11 台风速仪(从左到右)均匀分布在风机风道出风口处,分别对上、中、下出风口进行风速试验,现场试验情况如图 3 所示。

安装调试后,参照原 GB 1236—1985《通风机空



图 3 风速试验现场

Fig. 3 Field of wind speed test

表 1 风速试验结果

Tab. 1 Results of wind speed test

风速位置	测量点										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
上出风口	3.1	4.6	5.2	6.0	6.6	6.5	6.3	5.7	4.9	4.2	2.8
中出风口	7.7	12.5	13.8	14.0	14.5	15.3	14.6	13.7	13.7	12.0	6.2
下出风口	11.6	13.8	16.6	18.1	19.0	19.2	19.1	18.3	16.5	14.2	10.8

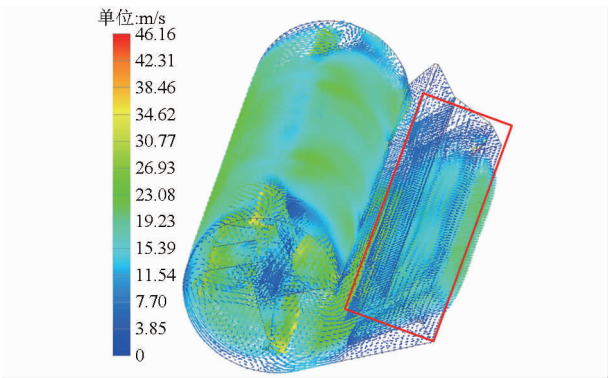


图 4 单风道三出风口风速拾取位置

Fig. 4 Velocity-pickup position of three air-outlets in single air-duct

对比分析单风道风机横向 11 个测点的风速数值模拟数据和现场风速试验数据,如图 5 所示。

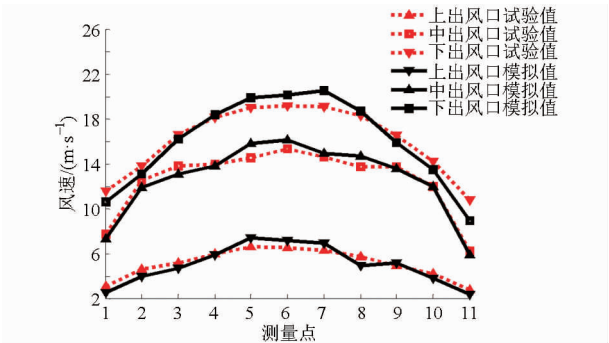


图 5 出风口风速变化曲线

Fig. 5 Changing curves of velocity on air-outlets

从图 5 可以看出,现场试验测量的风速数据变化趋势和数值模拟结果总体相近,由于风速仪对风场的干扰、仿真参数流体理想化属性、壁面等边界条件设置等因素,造成结果的微小偏差。

两者的对比分析可知,利用 CFD 软件进行清选装置风场数值模拟是可行的。

2.2 改进前(单风道)流场仿真分析

在风机入射倾角 22°,鱼鳞筛(上筛)夹角 50°,

气动力性能试验方法》,进行真实样机的风速试验,测量离心风机上、中、下出风口风速分布的结果如表 1 所示。

根据现场测试单风道出风口 11 个测量点的位置分布,对风机流场数值模拟的结果进行单风道三出风口横向风速的拾取,拾取点的分布位置如图 4 所示,在此区域内相同位置拾取 11 个点的风速。

脱粒滚筒转速 600 r/min、风机转速 1 800 r/min 的情况下,对改进前单风道清选流场进行仿真分析,整体流场风速矢量图如图 6 所示。

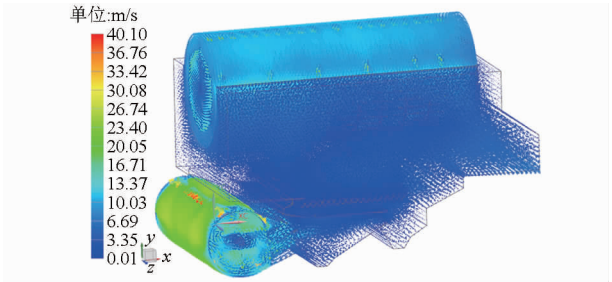


图 6 整体清选装置流场速度矢量图

Fig. 6 Flow field speed vector diagram of overall cleaning device

风机和脱粒滚筒旋转形成混合流场,风机产生较高的气流吹向振动筛上方,同时和滚筒转动形成的气流交汇,大部分上升气流沿着交汇层流向尾部出风口。

对 Z 取 0、300、- 300 mm 3 个横截面(范围: $- 540 \text{ mm} < Z < 540 \text{ mm}$)进行流场分析,不同 Z 截面条件下流场速度矢量图如图 7 所示。

由图 7a 可知, $Z = 0 \text{ mm}$ 截面是清选室正中间区域,上升气流最先与滚筒底部交汇,由于滚筒自身旋转产生气压保护层,大部分气流沿着交汇层流向尾部出风口,小部分气流反向流向筛面前部。总体筛面中部、后部气流较大,但筛面前部和抖动板区域气流微弱且产生涡流现象,不利于清选作业,无法起到有效的筛分作用。

由图 7b、7c 可知, $Z = 300 \text{ mm}$ 和 $Z = - 300 \text{ mm}$ 截面上升气流和滚筒产生的气流交汇,交汇处产生紊流和穿透现象,整体气流流向尾部出风口。由于离心式风机横向气流不均匀因素,相比 $Z = 0 \text{ mm}$ 截面,整体气流速度较小。筛面前部和抖动板区域也

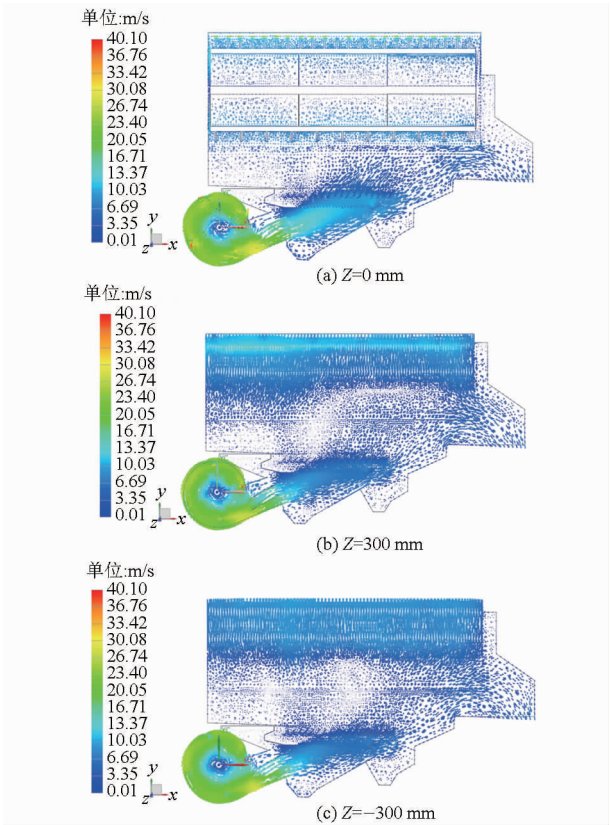


图 7 不同 Z 截面的流场速度矢量图

Fig. 7 Speed vector diagram of flow field in different Z sections

产生涡流现象,容易引起物料堵塞。

对不同 Z 截面条件下整体仿真流场的气流4 个关键部位进行气流速度拾取,位置分别是:筛面中部 A、筛面后部 B、筛面前部 C、尾部出风口中心 D。速度仿真结果如表 2 所示。

表 2 速度仿真结果

Tab.2 Results of speed simulation

截面/mm	位置				m/s
	A	B	C	D	
0	9.24	8.37	1.53	6.07	
300	6.19	5.57	1.37	6.93	
-300	5.85	5.27	1.65	6.55	

根据改进前的流场仿真结果可知:由于离心式风机两侧进风口的影响,出风口横向风速中间大两边小导致整体流场横向流速分布不均匀,Z = 0 mm 截面处整体流速最大;筛面前部和抖动板区域气流微弱且产生多处涡流现象,没有达到分离漂浮速度,此区域也是物料下落的集中地带,容易引起堵塞,不利于前部高负荷清选。滚筒旋转形成的气压保护层有利于气流高效地流向筛尾。

2.3 改进后(双风道)流场优化分析

参考离心式通风机设计理论的标准^[18],在纵轴流全喂入收获机的单风道风机上部增加了一个上风

道结构。上风道内安装了带有倾角的两片分风板,分成左、中、右 3 个出风口。双风道六出风口风机结构如图 8 所示,双风道清选装置网格结构正视图如图 9 所示。

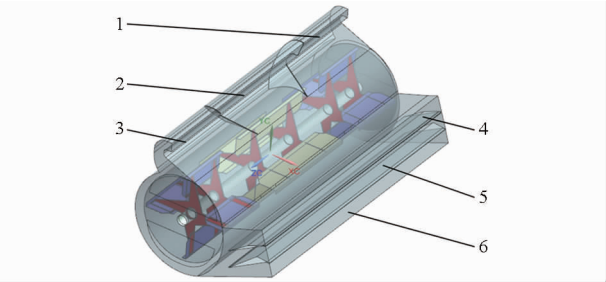


图 8 双风道六出风口风机模型

Fig. 8 Fan model of double air-ducts and six air-outlets

1. 上出风口 I 2. 上出风口 II 3. 上出风口 III
4. 下出风口 IV 5. 下出风口 V 6. 下出风口 VI

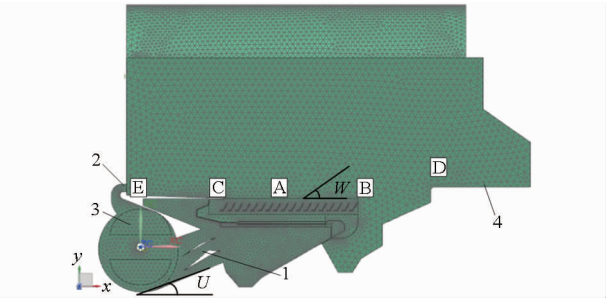


图 9 网格结构正视图

Fig. 9 Front diagram of grid structure

1. 下风道 2. 上风道 3. 入风口 4. 出风口
- A. 筛面中部 B. 筛面后部 C. 筛面前部
- D. 尾部出风口中心 E. 上风道出口处

在风机入射倾角 22°、鱼鳞筛夹角 50°、脱粒滚筒转速 600 r/min(滚筒转速保持不变)、风机转速 1 800 r/min 的工况下,对改进后双风道六出风口风机清选流场进行数值模拟分析,得到新型清选装置的整体流场风速矢量图如图 10 所示。

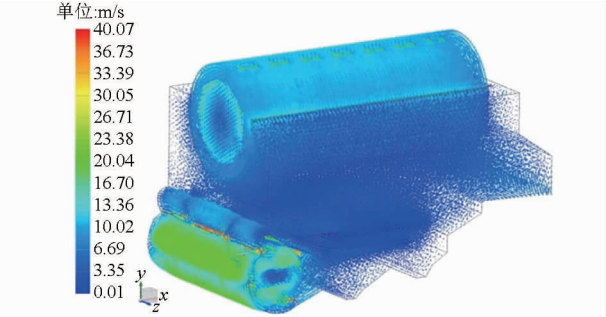


图 10 改进后整体流场速度矢量图

Fig. 10 Speed vector chart of improved overall flow field

结构改进后气流从上、下风道分流,上风道气流流向筛面前部和抖动板区域,克服单风道风机筛面前部风速小的缺点。同时,上出风口 I、上出风口 II、上出风口 III 3 个风道对上出风口左、中、右进行导

流。由于两侧 45° 倾斜的导流板,部分气流吹向筛面两侧,弥补筛面区域整体流场风速中间大两边小的缺陷。

取 Z 为 0、300、-300 mm 3 个横截面进行改进后清选装置流场对比分析,不同 Z 截面条件下整体流场速度矢量图如图 11 所示。

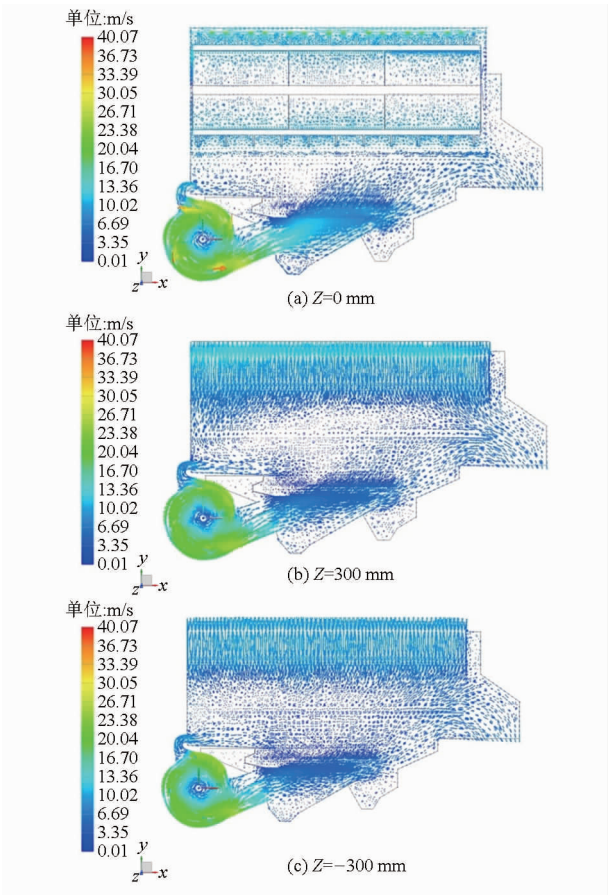


图 11 改进后不同 Z 截面下流场速度矢量图
Fig. 11 Speed vector diagram of improved flow field in different Z sections

对不同 Z 截面条件下改进后仿真流场的气流 5 个关键部位 (A、B、C、D、E) 进行气流速度拾取。新型清选装置拾取仿真结果如表 3 所示。

表 3 改进后速度仿真结果

Tab. 3 Results of speed simulation after improvement					
截面/ mm	位置				
	A	B	C	D	E
0	6.95	6.72	4.76	5.43	10.02
300	4.78	5.18	5.63	6.11	10.01
-300	4.36	5.01	5.23	5.84	10.20

对比表 3 和表 2,根据不同截面上的 C 处速度可知,结构改进后的清选装置显著提高了筛面前部和抖动板区域气流速度,减轻了筛面前部和抖动板区域物料堆积的压力;由于双风道中上风道的气流

分流作用,下风道吹出的风速降低,从而筛面中部、筛面后部和尾部出风口处的速度有所下降;结构改进后的整体流场风速更加均匀,克服局部气流场流速过小的缺点,使得整体筛面上的气流场更加均匀,利于清选作业。

3 新型清选装置流场正交优化

3.1 气流场优化目标

在设计清选装置时,需要满足清选装置基本的气流速度条件。振动筛平面上的气流速度要在清选物料和茎秆杂余的漂浮速度之间,同时,清选装置尾部出风口的气流速度则要小于谷粒的漂浮速度。若筛孔处上升气流速度超过谷粒,则谷粒不能有效通过筛孔,清选损失率增加;若筛孔处风速小于茎秆杂余漂浮速度,则谷粒中含杂率就会增加,清选质量下降;若尾部气流速度过低,则无法及时排出各种杂余,会引起堵塞、二次清选负荷增加等问题。

理想的作业条件为:筛面中后段上升气流速度需要保证略大于物料漂浮速度,尾部出风口的风力应将各类杂余物有效吹走的同时确保谷粒未被吹出。不同物料的不同漂浮速度如表 4 所示^[19],可得出筛面处和尾部出风口区域气流风速满足 $6.0\text{ m/s} < v < 9.8\text{ m/s}$ 的条件时,整体区域能进行有效的筛分。

表 4 不同物料的漂浮速度
Tab. 4 Drifting speeds of different materials

类别	漂浮速度 $F/(m \cdot s^{-1})$	密度 $G/(g \cdot cm^{-3})$
水稻	10.1	1.0
小麦	9.8 ~ 11.5	1.22
稻麦颖壳	0.6 ~ 5.0	0.4
轻质杂草	4.5 ~ 5.6	1.02
短茎秆	5.0 ~ 6.0	

因此,在正交优化过程中,主要目标是使得整体流域气流速度在满足清选条件的基础上更加合理高效。

3.2 正交优化方案与优化数据

清选装置中间区域是气流速度最大最集中的区域, $Z = 0$ 截面上的气流场分布和气流大小对籽粒损失率、含杂率和破碎率都有密切的关联。为了获得最优组合,进行风机转速、风机入射倾角、鱼鳞筛夹角三因素三水平正交优化仿真^[20],因素水平表如表 5 所示,分别考察 $Z = 0\text{ mm}$ 截面鱼鳞筛面前部 (A 处)、筛面中部 (B 处)、筛面后部 (C 处) 和尾部出风口处 (D 处) 的风速。

根据正交表,进行 9 组数值模拟计算,其中正交试验安排和仿真结果如表 6 所示。

表 5 因素水平表
Tab.5 Levels and factors

水平	风机入射倾角 $U/(^{\circ})$	风机转速 $N/(r\cdot min^{-1})$	鱼鳞筛夹角 $W/(^{\circ})$
1	22	1 800	40
2	26	1 900	50
3	30	2 000	60

表 6 试验设计与仿真结果

Tab.6 Experiment design and simulation results

序号	风机入射倾角 $U/(^{\circ})$	风机转速 $N/(r\cdot min^{-1})$	鱼鳞筛夹角 $W/(^{\circ})$	A 处速度/ $(m\cdot s^{-1})$	B 处速度/ $(m\cdot s^{-1})$	C 处速度/ $(m\cdot s^{-1})$	D 处速度/ $(m\cdot s^{-1})$
1	22	1 800	40	7.57	7.71	5.30	6.21
2	22	1 900	50	7.08	7.50	4.74	6.17
3	22	2 000	60	9.02	10.14	5.06	6.23
4	26	1 800	50	7.46	6.58	4.63	5.46
5	26	1 900	60	7.76	6.95	4.75	6.02
6	26	2 000	40	10.21	8.50	6.43	7.51
7	30	1 800	60	8.07	5.98	4.60	5.58
8	30	1 900	40	8.50	8.03	6.04	7.34
9	30	2 000	50	10.24	7.89	5.34	6.04

法有效地排出杂余物料,容易增加二次清选负荷和引起堵塞,使得清选含杂率增加;第 6、9 组:筛面中部气流速度超过漂浮速度,不利于谷物有效的分离,增加筛面后部的清选负担,同时损失率也会提高;第 1、2、5、8 组:满足清选条件,能进行高效的清选作业。

对 1、2、5、8 组结果对比分析,第 8 组(风机入射倾角 30°、鱼鳞筛夹角 40°、风机转速 1 900 r/min)为最优组合:清选装置整体气流均匀,筛面前部和尾部出风口处速度较大,损失率和含杂率都较低,更利于整体的高负荷清选作业。 $Z=0\text{ mm}$ 、 $Z=300\text{ mm}$ 、 $Z=-300\text{ mm}$ 3 个横截面下流场速度矢量图如图 12 所示。

4 田间现场试验

田间试验时,水稻品种为早优,晚熟无倒伏,作物自然高度为 85.4 cm,籽粒千粒质量为 34.6 g,收获时籽粒含水率约为 24.5%,茎秆含水率约 78.8%,割幅为 2.18 m,作业速度 1.74 m/s,割茬高度 16.7 cm;小麦品种为金麦 8 号,晚熟无倒伏,作物自然高度为 82.5 cm,籽粒千粒质量为 40.3 g,收割时籽粒含水率约为 17.5%,茎秆含水率约 50.1%,割幅为 2.18 m,作业速度 1.82 m/s,割茬高度 17.4 cm。

为了保证最后试验结果的真实性和可比性,纵轴流清选流场数值模拟与田间试验参数和结构保持一致,试验共有 6 种工况:单风道(改进前)、22°、1 800 m/s、50°;双风道(改进后)、22°、1 800 m/s、

3.3 优化结果分析

根据清选原理,A、B、D 处的气流速度都需要满足在 $6.0\text{ m/s} < v < 9.8\text{ m/s}$ 范围内。由表 6 中的仿真数据可知:第 3 组:筛面后部气流速度超过谷物漂浮速度,会导致部分谷物吹向尾部出风口,增加清选损失率;第 4、7 组:尾部出风口处气流速度不足,无

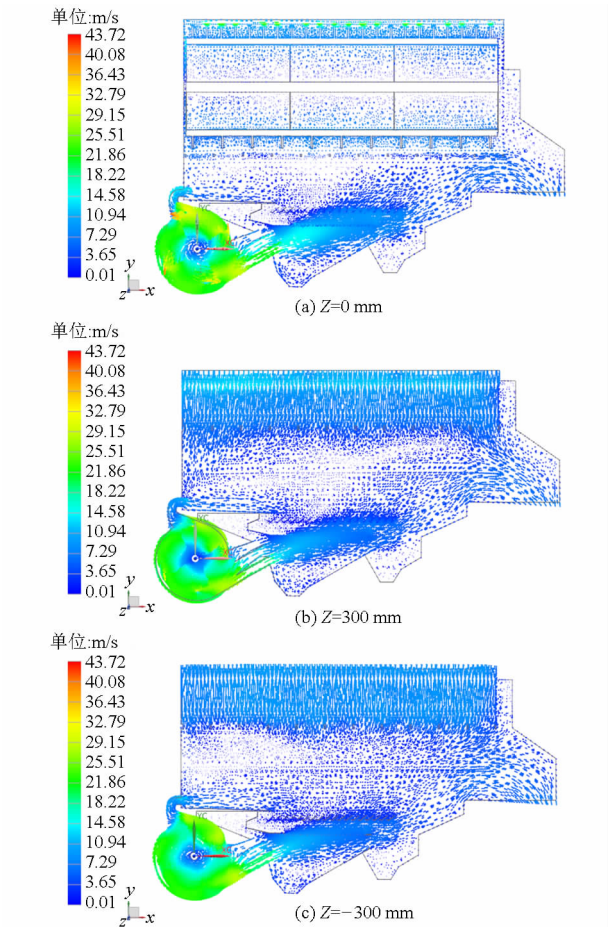


图 12 优化后不同 Z 截面下流场速度矢量图
Fig.12 Speed vector diagram of optimized flow field in different Z sections

50°;双风道、22°、1 800 m/s、40°;双风道、22°、1 900 m/s、50°;双风道、26°、1 900 m/s、60°;双风道、30°、1 900 m/s、40°。

分别对水稻和小麦进行 3 组重复试验,取平均值后得到田间试验结果如表 7 所示。

表 7 田间试验结果
Tab.7 Results of field experiment %

序号	水稻籽粒			小麦籽粒		
	损失率	含杂率	破碎率	损失率	含杂率	破碎率
1	2.70	2.19	0.71	1.78	1.95	0.53
2	1.86	1.51	0.32	1.22	1.40	0.41
3	1.28	1.06	0.40	1.09	0.93	0.37
4	1.34	1.13	0.33	1.17	1.04	0.29
5	1.40	1.20	0.28	1.20	1.21	0.21
6	0.91	0.87	0.31	0.82	0.76	0.25

表 7 中最优组合为:双风道、30°、1 900 m/s、40°。改进前水稻籽粒损失率为 2.70%,含杂率为 2.19%,小麦籽粒损失率为 1.78%,含杂率为 1.95%;改进后水稻籽粒损失率为 1.86%,含杂率为 1.51%,小麦籽粒损失率为 1.22%,含杂率为 1.40%;优化后水稻籽粒损失率为 0.91%,含杂率为 0.87%,小麦籽粒损失率为 0.82%,含杂率为 0.76%。改进优化后的整体清选效果明显,损失率和含杂率达到最优组合,田间试验验证了数值模拟的可行性,说明纵轴流全喂入双风道六出风口结构能有效改善清选质量。

5 结论

(1)在风机入射倾角 22°、鱼鳞筛夹角 50°、脱粒滚筒转速 600 r/min、风机转速 1 800 r/min 工况下,对单风道风机清选装置进行混合流场数值模拟,得出不同截面($Z = 0\text{ mm}$, $Z = 300\text{ mm}$, $Z = -300\text{ mm}$)的速度分布矢量图,得到了整体气流场的分布状况和不足之处。

(2)提出了纵轴流全喂入双风道六出风口风机的改进结构,通过结构改进前后仿真对比分析,改进后的清选装置显著提高了筛面前部和抖动板区域的气流速度,改善了整体流域的均匀性,使得气流的分配更加合理高效。

(3)对新型纵轴流双风道清选装置 $Z = 0\text{ mm}$ 截面进行正交优化仿真,最优组合为:风机入射倾角 30°、鱼鳞筛夹角 40°、风机转速 1 900 r/min。结果表明,筛面前部和尾部出风口处速度相对较大,清选装置整体气流均匀,更利于高负荷清选作业。

(4)开展纵轴流全喂入清选装置的田间试验,验证了改进结构和优化方案的准确性,优化后水稻籽粒损失率为 0.91%,含杂率为 0.87%,小麦籽粒损失率为 0.82%,含杂率为 0.76%,大幅度提高了纵轴流的清选性能。

参 考 文 献

1 唐忠,李耀明,李洪昌,等. 联合收获机风筛式清选装置清选室内涡流试验[J]. 农业机械学报, 2010,41(12): 62 – 66.
TANG Zhong, LI Yaoming, LI Hongchang, et al. Analysis on the eddy current of the air-and-screen cleaning device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 62 – 66. (in Chinese)

2 MEKONNEN Gebreslasie Gebrehiwora, JOSSE De Baerdemaekera, MARTINE Baelmans. Effect of a cross-flow opening on the performance of a centrifugal fan in a combine harvester computational and experimental study[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 247 – 256.

3 李洪昌. 风筛式清选装置理论及试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2011.
LI Hongchang. Theoretical and experimental study on air-and screen cleaning unit [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)

4 JOHN DEERE COMPANY. Bigger capacity for cleaner grain and more of it[C]//The Furrow. Plains Edition, September-October, 1990:19.

5 彭精武,申德超,李秉仁,等. 双风道清选装置在谷物联合收获机上应用[J]. 农业机械学报, 1995, 26(4):151 – 155.
PENG Jingwu, SHEN Dechao, LI Bingren, et al. Application of double air-duct cleaning device for grain combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1995, 26(4):151 – 155. (in Chinese)

6 申德超,孙来思,栾锡富. 双风道清选轴流脱粒机的试验研究[J]. 农机化研究, 1996, 18(2): 47 – 50.
SHEN Dechao, SUN Laisi, LUAN Xifu. Experimental study on axial-flow threshing machine with double air-duct cleaning device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 1996, 18(2): 47 – 50.

7 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 on a centrifugal fan with double-outlets and multiple air-duct [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 78 – 86. (in Chinese)

8 栾春华,王晓静. 基于 Fluent 的混流式风机整机流场数值模拟[J]. 机械设计与制造, 2008(2): 178 – 179.
LUAN Chunhua, WANG Xiaojing. Numerical anaiysis of whole flow field for a mixed-flow fan based on Fluent [J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(2): 178 – 179. (in Chinese)

9 李洪昌,李耀明,徐立章,等. 风筛式清选装置气流场的数值模拟与分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2010, 31(4): 378 – 382.
LI Hongchang, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Numerical simulation and analysis on flow field of air-and-screen cleaning

mechanism [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2010, 31(4): 378 – 382. (in Chinese)

10 江涛,吴崇友,伍德林. 基于 Fluent 的联合收割机风筛选流场仿真分析[J]. 中国农机化学报,2015,36(3): 26 – 29.
JIANG Tao, WU Chongyou, WU Delin. Simulation analysis of wind screen flow field for combine harvester based on Fluent[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(3): 26 – 29. (in Chinese)

11 林建忠,阮晓东,陈邦国,等. 流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

12 TONG Z, CHEN Y, MALAWI A, et al. Quantifying the impact of traffic-related air pollution on the indoor air quality of a naturally ventilated building[J]. Environment International, 2016, 89 – 90: 138 – 146.

13 TONG Z, BALDAUF R W, ISAKOV V, et al. Roadside vegetation barrier designs to mitigate near-road air pollution impacts[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541: 920 – 927.

14 邵卫,李意民,贾利红. 离心风机内部流场模拟[J]. 煤矿机械, 2006, 27(7): 47 – 49.
SHAO Wei, LI Yimin, JIA Lihong. Numerical simulation of internal flow in centrifugal fan [J]. Coal Mine Machinery, 2006, 27(7): 47 – 49. (in Chinese)

15 杜小强,肖梦华,胡小钦,等. 贯流式谷物清选装置气固两相流数值模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 27 – 34.
DU Xiaoqiang, XIAO Menghua, HU Xiaoqin, et al. Numerical simulation and experiment of fas-solid two-phase flow in cross-flow grain cleaning device [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 27 – 34. (in Chinese)

16 任述光,谢方平,王修善,等. 4LZ – 0.8 型水稻联合收割机清选装置气固两相分离作业机理[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 16 – 22.
REN Shuguang, XIE Fangping, WANG Xiushan, et al. Gas-solid two-phase separation operation mechanism for 4LZ – 0.8 rice combine harvester cleaning device [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 16 – 22. (in Chinese)

17 蒋恩臣,王立军,刘坤,等. 联合收获机惯性分离室内气固两相流数值模拟[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2006, 27(3): 193 – 196.
JIANG Enchen, WANG Lijun, LIU Kun, et al. Numerical simulation of gas particle flow in inertia separation chamber of stripper combine harvester [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006, 27(3): 193 – 196. (in Chinese)

18 续魁昌. 风机手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.

19 南京农业大学. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,1996.

20 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005:276 – 293.

~~~~~

(上接第 150 页)

14 凌邦国. 碰撞过程中碰撞力定量计算 [J]. 南通工学院学报:社会科学版,2001,17(4):7 – 9.  
LING Bangguo. The quantitative calculation of impact in the process of collision[J]. Journal of Nantong Institute of Technology: Social Science Edition, 2001, 17(4):7 – 9. (in Chinese)

15 郑焕武. 碰撞时间的定量计算[J]. 四川师范大学学报:自然科学版,2001,24(3):307 – 309.  
ZHENG Huanwu. The quantitative calculation of collision time[J]. Journal of Sichuan Normal University: Natural Science, 2001, 24(3):307 – 309. (in Chinese)

16 陈建东,郭辉,韩长杰,等. 小型啤酒花采摘机的结构设计及试验[J]. 新疆农业大学学报,2010,33(6):513 – 516.  
CHEN Jiandong, GUO Hui, HAN Changjie, et al. Structural design and experiment of hops’ minitype-pick machine[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2010, 33(6):513 – 516. (in Chinese)