

圆锥形风机清选室气流场数值模拟与试验

周璇^{1,2} 王志明^{1,2} 陈霓^{1,2} 陈德俊²

(1. 金华职业技术学院机电工程学院, 金华 321017; 2. 金华职业技术学院农机技术与装备浙江省工程实验室, 金华 321017)

摘要: 针对横置轴流联合收获机圆柱形风机产生的气流场不能解决脱出混合物在振动筛筛面堆集的问题, 设计了圆锥形风机, 阐述了圆锥形风机利用横向风优化脱出物筛面分布来改善清选质量的工作原理。根据清选室实际结构和尺寸建立了三维模型, 利用 CFX 软件对无物料状态下圆柱形风机与不同锥度圆锥形风机作用下清选室气流场进行了数值模拟。利用布点法对不同类型风机作用下清选室气流场风速进行了测量, 并通过物料分布对比试验和田间试验, 验证了圆锥形风机的工作性能。结果表明: 圆锥形风机作用下, 清选室内产生明显的沿振动筛筛宽方向指向排草口一侧的横向风, 当圆锥形风机锥度为 3.5° 时, 清选室气流场风速分布情况较为理想, 在振动筛入口一角(下落物料最多的部位)产生的横向风速达到 2.68 m/s; 与圆柱形风机相比, 圆锥形风机作用下脱出物堆集中心点部位物料质量减少 27.66%, 主下落区脱出物质量占脱出物总质量的比值降低 10.53 个百分点, 可使脱出混合物在筛分前得到预均布处理。圆锥形风机作用下, 联合收获机损失率、含杂率和破碎率明显优于行业标准规定值, 且与圆柱形风机相比, 含杂率指标得到显著改善。

关键词: 横置轴流联合收获机; 清选装置; 圆锥形风机; 气流场; 数值模拟; 试验

中图分类号: S225.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)03-0091-10

Numerical Simulation and Experiment of Airflow Field of Cleaning Room under Action of Conical Fan

ZHOU Xuan^{1,2} WANG Zhiming^{1,2} CHEN Ni^{1,2} CHEN Dejun²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Jinhua Polytechnic, Jinhua 321017, China
2. Zhejiang Engineering Laboratory of Agricultural Machinery Technology and Equipment, Jinhua Polytechnic, Jinhua 321017, China)

Abstract: In order to solve the unmatched problem between airflow field generated by traditional cylindrical fan of vibrating screening transverse axial flow combined harvester and the distribution of separated mixture on the screen surface, a conical centrifugal cleaning fan was designed and its working principle was described, which can improve the quality of cleaning by optimization of cross wind. According to the actual structure, a three-dimensional model of the cleaning device was established and a numerical simulation of the flow field distribution of cleaning room under the action of cylindrical cleaning fan and conical cleaning fan with different taper blades was conducted by using the CFX software. The results showed that the transverse wind was obviously produced by the conical cleaning fan along with the direction of screen width. The speed of transverse wind was increased with the increase of taper value of the fan blade, but the speed of longitudinal wind along the length of the vibrating screen was decreased with the taper value of the fan blade. The area of low wind speed zone at middle position of the vibrating screen also became larger, which was detrimental to the cleaning of mixture. The best velocity distribution of the cleaning room was appeared when the taper value of the fan blade was 3.5°. The experiment of the flow field under different types of cleaning fans was conducted by using the distributing-point method. The results showed that the speed of transverse wind at the corner of the entrance of the vibrating screen can reach 2.68 m/s, and the speed of transverse wind at middle position of vibrating

收稿日期: 2018-09-14 修回日期: 2019-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305182)、浙江省科技厅公益技术应用研究项目(2017C32097)和浙江省教育厅科研项目(Y201534330)

作者简介: 周璇(1982—),女,讲师,主要从事现代农业机械设计理论与研究,E-mail: jhzhoux@163.com

通信作者: 王志明(1981—),男,教授,博士,主要从事水稻收获机械设计与理论研究,E-mail: jhewzm@163.com

screen can reach 2.07 m/s, which was obviously bigger than the value produced by the cylindrical cleaning fan and beneficial to the distribution of the separated mixture along with the screen width. At the end of the screen length, the speed of the longitudinal wind produced by the conical cleaning fan was 0.78 m/s, which was smaller than the longitudinal speed and helped to reduce the loss of grain cleaning. The distribution experiment was also conducted for the action of cylindrical cleaning fan and the conical cleaning fan. The results showed that the weight of mixture in main falling area made up 59.21% of the weight of all mixture under the action of conical fan and the number of cylindrical fan was 69.74%. The offset location where the maximum weight mixture appeared under the action of conical fan was adjusted to 166 mm along the width direction compared with cylindrical fan, and the weight dropped by about 27.66%. It was verified that the conical fan can apply the transverse wind to blow away the mixture gathered in the inlet of the vibrating screen, which was conducive to improve the cleaning quality. Field experiment was conducted and the results showed that the performance indexes of combine harvester furnished with conical fan, including loss rate, impurity rate and crushing rate were obviously better than those stipulated in occupation standards. It can reduce the impurity rate index of combine harvester obviously, contrasting the conical fan with cylindrical fan.

Key words: axial flow combined harvester; cleaning mechanism; conical fan; airflow field; numerical simulation; experiment

0 引言

联合收获机清选室气流场的空间分布及变化直接影响脱出物运动和筛分的效果,对风机作用下清选室的气流场分布开展数值模拟和试验研究,有助于改善联合收获机风筛式清选装置工作性能^[1-3]。

横置轴流联合收获机工作时,脱出混合物堆集在滚筒前端下方的振动筛上,既造成振动筛偏负荷运转,又影响风机清选作业效果^[4-6]。为改善清选质量,国内外学者从优化清选装置结构和工作参数的角度对清选室气流场进行了深入研究。文献[7-10]研究了出风口角度和风机转速等因素对清选气流场的影响,得到了影响气流分布的主要结构和工作参数;文献[11-13]对采用双(多)风道风机后的清选室流场进行了研究;文献[14-20]提出贯流风机、振动筛上部增设抖动板、出风口增设导风板、改变清选室结构等方法改善清选室气流场分布;还有学者采用数值模拟和试验相结合的方法进行了气流场和物料运动的研究^[21-25]。这些研究对特定机型的清选装置在具体工况下的清选作业有指导意义。

笔者前期提出了非均布气流清选原理,并进行了圆锥形风机的理论计算^[26]。本文针对横置轴流联合收获机风筛式清选装置,提出将原有圆柱形风机改为圆锥形风机,利用圆锥形风机叶轮两端形成动压差生成的横向风,将脱粒分离后下落过程中的脱出混合物沿振动筛筛宽方向均布,使清选室气流场满足清选作业要求。为探索圆锥形风机利用横向风优化脱出物筛面分布改善清选质量的作用机理,揭示非均布气流流场的可视形态,本文采用数值模

拟和试验研究相结合的方法,对比分析圆柱形风机和不同锥度的圆锥形风机作用下清选室气流场分布情况,并通过物料分布试验和田间试验,验证圆锥形风机的优选锥度及其工作性能。

1 模型建立

1.1 圆锥形风机结构与工作原理

圆锥形风机三维模型如图1所示。结合典型农用离心风机设计要求^[27],确定圆锥形风机结构参数为:两台风机并联,每台风机宽度444 mm,两台风机间距112 mm,总宽度1 000 mm;风机叶轮大端外径320 mm,当风机锥度 $\alpha = 2.3^\circ$ 时,叶轮小端外径280 mm,叶轮小端外径随风机锥度增大而减小;大小端叶轮内径相同,均为170 mm;每台风机双侧进风,进风口直径250 mm;叶片安装支架为中间折弯的条钢,固定在风机转轴上,根部倾角 30° ,顶部倾角 10° 。

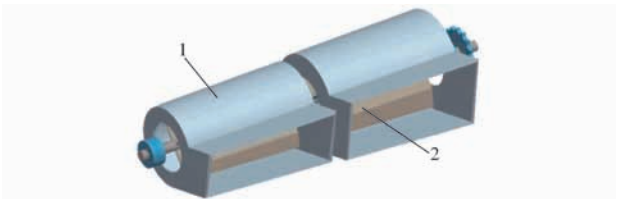


图1 圆锥形风机三维模型
Fig. 1 3D model of conical centrifugal cleaning fan
1. 风机壳体 2. 风机叶片

圆锥形风机工作原理如图2所示。出风口产生气流风速 V ,方向垂直于风机叶片母线,由于叶片母线与风机轴线不平行,风速 V 沿筛长(X 向)和筛宽(Z 向)方向分解,分别得到在两个方向上的分速度 V_a 、 V_b ,将 V_a 定义为纵向风风速,作用与圆柱形风机

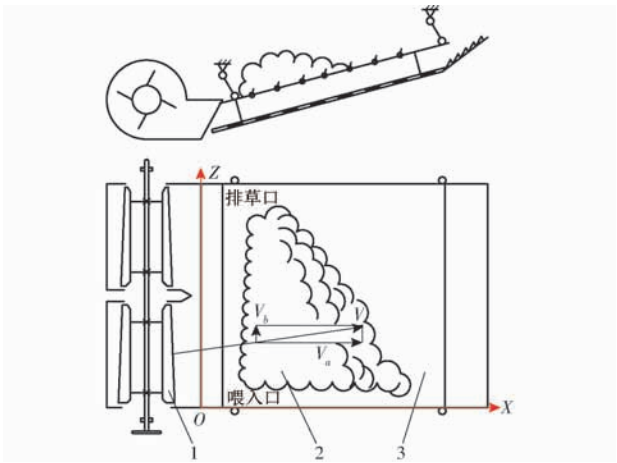


图 2 圆锥形风机工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of conical cleaning fan

1. 圆锥形风机 2. 脱出混合物 3. 振动筛

产生的气流一样,用于清选物料;将 V_b 定义为横向风风速,方向为沿筛宽方向从喂入口侧指向排草口侧,用于朝筛宽方向吹散向振动筛入口一角积聚的物料,起均布物料作用。

1.2 清选室流场数值分析模型

横置轴流联合收获机清选室三维模型如图 3 所示。清选装置为离心风机加双层振动筛结构,风机安装在凹板筛下方靠前的位置,出风口对着双层振动筛筛面,气流通道倾角 4° 。双层振动筛的上筛为鱼鳞筛,下筛为圆孔筛。上筛为主筛,筛宽 980 mm,筛长 730 mm,清选筛面积 0.72 m^2 ,筛面倾角 15° ,振动筛曲柄转速 320 r/min ,最大垂直振幅 40 mm,最大水平振幅 43 mm。清选后的籽粒经籽粒滑板落入籽粒螺旋输送机,被输送至集粮箱,部分含籽粒的杂余落入复脱杂余滑板,经杂余螺旋输送机进入复脱装置进行复脱,杂质被吹出机体外。

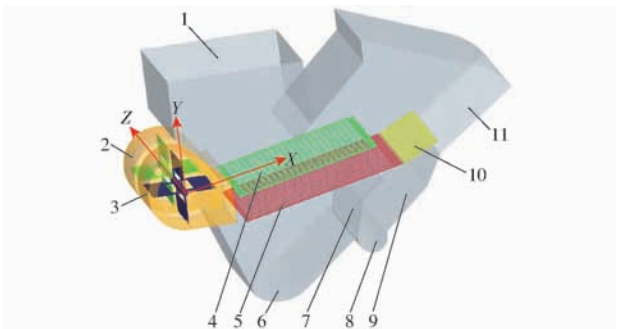


图 3 横置轴流联合收获机清选室三维模型

Fig. 3 3D model of cleaning room of axial flow

combine harvester

1. 脱粒室 2. 排草口侧风机(R) 3. 进料口侧风机(L) 4. 上筛(鱼鳞筛) 5. 下筛(圆孔筛) 6. 籽粒螺旋输送机 7. 籽粒滑板 8. 杂余螺旋输送机 9. 复脱杂余滑板 10. 尾筛 11. 清选室出口

横置轴流联合收获机离心风机宽径比大于 4,用两个短风机并列排布替代一个长风机,以减小出

风口中段的负压,减少风机两侧的气流反吸。将进料口侧风机定义为 L 风机,排草口侧风机定义为 R 风机,在风机轴线处建立坐标系,以 L 风机的外端面轴心处 O 点为原点,沿振动筛筛长方向为 X 方向,振动筛与筛面垂直方向为 Y 方向,振动筛筛宽方向为 Z 方向。风机出风口截面位于 $X = 240\text{ mm}$ 处,圆柱形风机出风口高度为 200 mm(图 4 中虚线所示),与圆锥形风机叶轮大端出风口高度相同,选择出风口上、中、下 3 处标记为 b1、b2、b3 截面,作为出风口风速测点定位标记线,如图 4 所示。

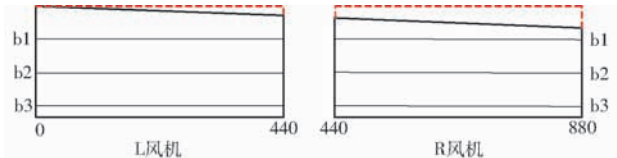


图 4 出风口风速测点定位标记线

Fig. 4 Wind velocity measurement point marking of tuyere

数值模拟时,首先将三维模型导入 CFXDesign 软件中,合并面、边、点,对模型进行适当简化,然后定义各部件材料参数(空气和钢)、输入输出边界条件和运动类型(角运动)。模拟分析过程中,假设流体是不可压缩的。分析采用的湍流模型为低雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型,湍流/层流粘性比 100,湍流度 0.05,高级湍流参数包括:长度尺度为 3.5、壁面系数为 5.5、CMu 为 0.085、CE1 为 1.47、CE2 为 1.97、Van Driest 常数为 28、Kappa 为 0.43、RNG Beta 为 0.016、RNG Eta 为 4.42、RNG CEO 为 1.45。

初始条件下,因气流场分布状态未知,故气流通道端面均采用恒压力边界条件,内壁采用无滑移壁面条件。预定义迭代次数 100 次进行迭代计算,直至收敛为止,通过后处理获得各种参数下模型的数值模拟结果。

2 清选室流场数值模拟

2.1 圆柱形风机作用下清选室流场数值模拟

风机转速 n 是清选作业的关键工作参数,其数值由清选风机作业所需全压 p 确定,即

$$n = \frac{30}{\pi R_1} \sqrt{\frac{pg}{\psi \gamma}} \quad (1)$$

其中

$$p = p_s + p_d \quad (2)$$

式中 γ ——空气容重,为 11.77 N/m^3

g ——重力加速度,为 9.8 m/s^2

R_1 ——圆锥叶轮大端半径, m

ψ ——压力系数

静压 p_s 用于克服流动中各种阻力,对于离心风机 + 双层振动筛结构形式的联合收获机清选装置 p_s 为 $196 \sim 247\text{ Pa}$,取 $p_s = 200\text{ Pa}$;动压 p_d 为气流运动

提供动能,求得 $p_d = 86.47 \text{ Pa}$ 。则可计算得到风机转速为 $1\,260 \text{ r/min}$ 。

在风机转速 $1\,260 \text{ r/min}$ 工况下,对圆柱形风机作用下清选室流场进行数值模拟,得到清选室流场速度分布矢量图,如图 5 所示。

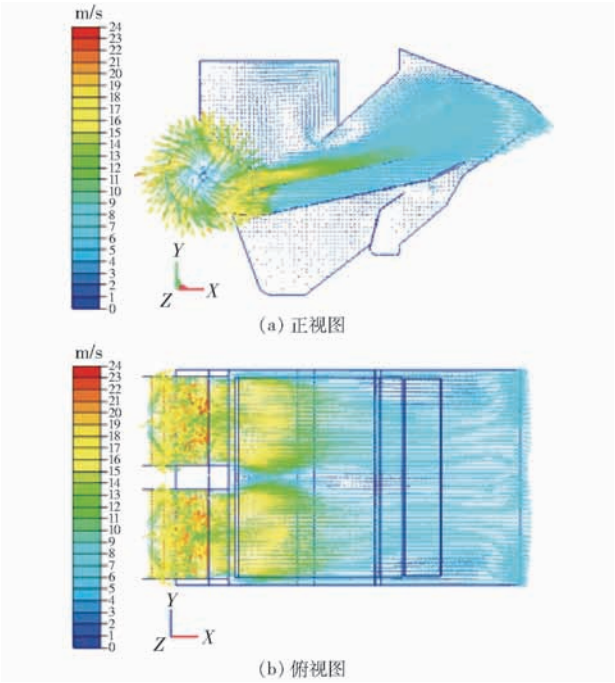


图 5 圆柱形风机作用下清选室流场速度分布矢量图
Fig. 5 Vector graphs of velocity distribution in cleaning room under action of cylindrical fan

由图 5 可得,轴向进入风机的气流在高速旋转的风机叶片作用下被径向从出风口吹出,在风机中心轴处形成负压区;两台风机连接处靠近出风口的位置存在低风速区,但气流到达振动筛时,两台风机出来的气流交汇在一起;左、右两台风机出风口风速均匀一致,气流沿风机叶片切向吹出,在振动筛前端风速最大,气流沿筛面平行方向向筛尾作纵向运动,风速逐渐减小,基本不产生沿筛宽方向的横向风;在两台风机吹出的两股气流相互影响下,在振动筛中间位置和振动筛尾部靠近侧面的位置产生了低风速区域;清选室出口的气流分布较为均匀。

进一步考察圆柱形风机出风口风速以及纵向风、横向风和垂直风风速情况,提取 b1、b2、b3 截面风速数值模拟结果数据,绘制圆柱形风机出风口风速曲线如图 6 所示,纵向风 (X 方向) 风速曲线如图 7 所示,横向风 (Z 方向) 风速曲线如图 8 所示,垂直风 (Y 方向) 风速曲线如图 9 所示。

由图 6~9 可知,在出风口位置纵向方向 (X 方向) 的不同截面 (图 4 中 b1、b2、b3 截面) 上,上端的风速大于下端的风速,风机两端的风速大于中间的风速;其产生的纵向风风速最大值为 14.56 m/s ,平

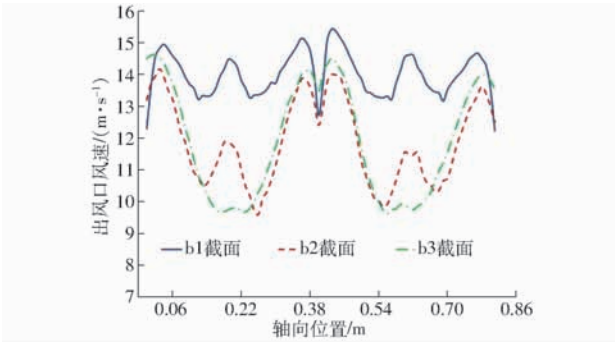


图 6 圆柱形风机出风口风速变化曲线
Fig. 6 Wind speed at outlet of cylindrical fan

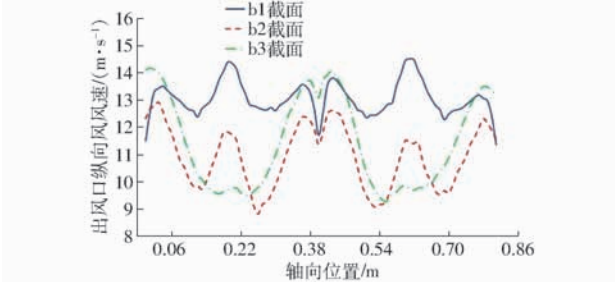


图 7 圆柱形风机出风口纵向风风速变化曲线
Fig. 7 Longitudinal wind speed at outlet of cylindrical fan

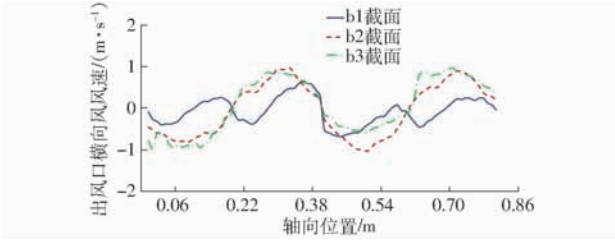


图 8 圆柱形风机出风口横向风风速变化曲线
Fig. 8 Transverse wind speed at outlet of cylindrical fan

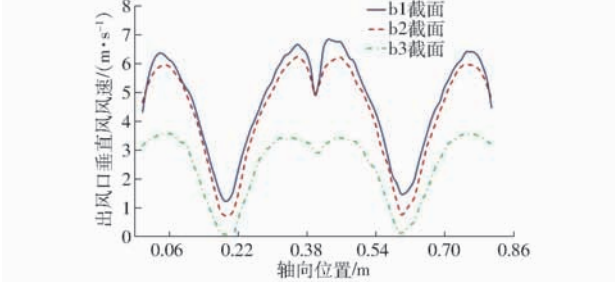


图 9 圆柱形风机出风口垂直风风速变化曲线
Fig. 9 Vertical wind speed at outlet of cylindrical fan

均值为 11.80 m/s ;出风口位置轴向方向 (横向风) 风速平均值为 0.05 m/s ,对脱出物均布效果的影响可忽略不计;出风口位置垂直方向 (Y 方向) 存在一定的正向风,且离进风口较近的端面风量大。同时,由图 6~9 可以看出,由并联组成的两台风机产生的风速呈对称分布,表明圆柱形风机作用下,左右两风机的出风效果基本相同,其清选室气流流场分布均匀。

2.2 圆锥形风机作用下清选室流场数值模拟

实现脱出物有效均布需要圆锥形风机产生 2~

5 m/s 的横向风风速,则风机锥度取 2.3°~5.0°为宜^[27]。为验证圆锥形风机作用下清选室流场分布情况,选取与圆柱形风机相同工况,对不同锥度

(2.3°、3.5°、5.0°)圆锥形风机作用下清选室流场进行数值模拟,得到清选室流场速度分布矢量图如图 10 所示。

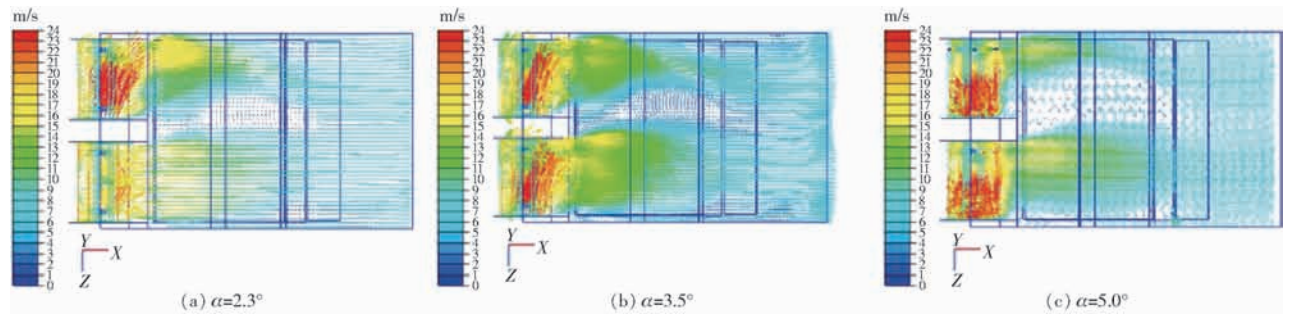


图 10 圆锥形风机作用下清选室流场速度分布矢量图

Fig. 10 Vector graphs of velocity distribution in cleaning room under action of conical fan

当锥度 $\alpha = 2.3^\circ$ 时,圆锥形风机产生了一定的横向风,最大横向风位置处于 R 风机叶轮大端处,而脱出物主要聚积位置在 L 风机叶轮大端处,故产生的横向风对脱出物均布影响较小。

当锥度 $\alpha = 3.5^\circ$ 时,L、R 两台风机均产生了明显的横向风,且风速最大值位于 L 风机叶轮大端端面处,有利于将脱出物在振动筛筛面沿筛宽方向吹散均布。

当锥度 $\alpha = 5.0^\circ$ 时,L、R 两台风机均产生了明显的横向风,风速最大值位于 L 风机叶轮大端端面处,满足脱出物多的部位横向风大的清选需求。但在振动筛中间位置形成了大面积的低风速区,不能及时将该区域的籽粒和杂余向清选室后方吹送,将对整体清选效果产生影响。

对比分析不同锥度圆锥形风机作用下清选室气流场分布情况可知,虽然增大风机叶轮锥度可以增加横向风风速,但随着叶轮锥度的增加,风机产生的纵向风风速变小,不利于将杂质吹出清选室,且在振动筛中间位置产生低风速区,反而影响了谷物清选的效果。可见,锥度并非越大越好。比较 3 种不同锥度圆锥形风机气流场数值模拟结果可知,风机锥度为 3.5° 时,气流场风速分布情况较为理想,既产生了一定的横向风,又兼顾纵向风风速,同时振动筛中间位置的低速风区域面积小,可满足清选作业要求。

进一步分析该风机出风口风速情况,提取数值模拟数据,绘制该风机出风口风速图以及纵向风、横向风和垂直风风速图,如图 11~14 所示。

如图 11 所示,对于锥度为 3.5° 的圆锥形风机,L、R 两台风机产生的风速基本对称,且每台风机叶轮大端产生的风速大于叶轮小端;b1 截面平均风速为 11.41 m/s,b2 截面平均风速为 10.32 m/s,b3 截面平均风速为 11.66 m/s。由图 12 可知,纵向风风速最大值为 16.19 m/s,平均值为 10.30 m/s,满足清选作

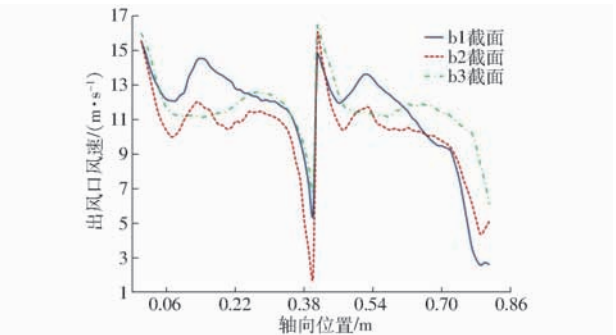


图 11 圆锥形风机 ($\alpha = 3.5^\circ$) 出风口风速变化曲线

Fig. 11 Wind speed at outlet of conical fan ($\alpha = 3.5^\circ$)

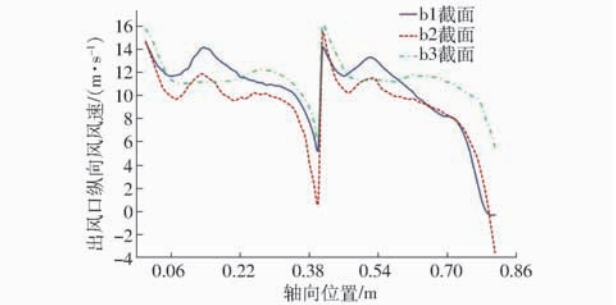


图 12 圆锥形风机 ($\alpha = 3.5^\circ$) 出风口纵向风风速变化曲线

Fig. 12 Longitudinal wind speed at outlet of conical fan ($\alpha = 3.5^\circ$)

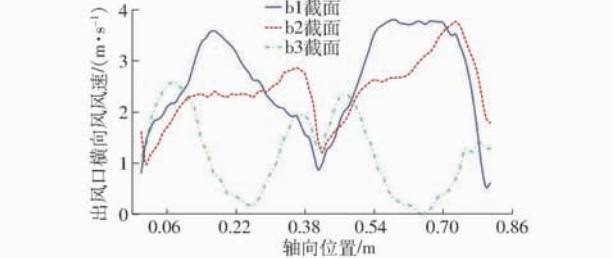


图 13 圆锥形风机 ($\alpha = 3.5^\circ$) 出风口横向风风速变化曲线

Fig. 13 Transverse wind speed at outlet of conical fan ($\alpha = 3.5^\circ$)

业要求。由图 13 可知,横向风风速在出风口 b1、b2、b3 截面依次降低,横向风风速最大值为 3.81 m/s,L 风机产生的横向风风速平均值为 2.65 m/s,略小于 R 风

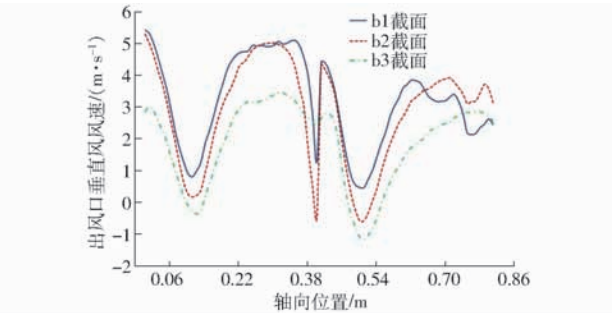


图 14 圆锥形风机($\alpha=3.5^\circ$)出风口垂直风风速变化曲线

Fig. 14 Vertical wind speed at outlet of conical fan ($\alpha=3.5^\circ$)

表 1 不同类型风机出风口平均风速数值模拟结果

Tab.1 Average wind speed of air outlet of different types of fan

风机类型	L 风机				R 风机			
	体积流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	纵向风风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	横向风风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	垂直风风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	体积流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	纵向风风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	横向风风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	垂直风风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
圆柱形风机	1.09	11.76	0.08	3.30	1.10	11.85	0.02	3.23
圆锥形风机(2.3°)	1.08	11.59	1.23	2.96	0.99	10.71	3.02	2.35
圆锥形风机(3.5°)	1.00	10.82	2.65	2.60	0.92	9.86	3.33	2.00
圆锥形风机(5.0°)	0.95	10.24	3.58	2.24	0.81	8.75	3.60	1.11

3 试验

3.1 清选室流场风速测定与结果分析

清选室流场风速测定在自行研制的物料清选试验台上进行,试验台如图 15 所示。



图 15 清选室流场风速测定试验台

Fig. 15 Test bench for measurement of wind velocity in cleaning room

1. 水稻运输带 2. 割台螺旋输送机 3. 风机驱动电机 4. 输送槽 5. 脱粒滚筒 6. 清选室 7. 清选风机 8. 脱粒滚筒驱动电机 9. 振动筛驱动电机 10. 数据采集系统 11. 电气控制柜

试验台架配置 3 台由变频器控制的电机,脱粒滚筒驱动电机为脱粒滚筒和割台螺旋输送器等工作部件提供动力,额定功率 20 kW,风机驱动电机为风机等部件提供动力,额定功率为 10 kW,振动筛驱动电机为振动筛提供动力,额定功率为 5 kW;台架试验前,通过变频器设定风机转速为 1 260 r/min。清选室内安装有双层振动筛,筛宽 1 000 mm,筛总长(含尾筛)1 400 mm。

为得到接近实际情况的气流场分布,采用布点

机产生的横向风风速平均值(3.33 m/s)。由图 14 可知,垂直风风速平均值为 2.38 m/s,且 L 风机产生的垂直风大于 R 风机产生的垂直风。

不同类型风机出风口位置各方向的平均风速数值模拟结果如表 1 所示。

由表 1 可知,L、R 两台风机产生的出风量基本相同;与圆柱形风机相比,圆锥形风机产生的纵向风和垂直风略小,但横向风增加明显,符合设计要求;随着锥度的增加,风机出风量呈缓慢减小趋势,纵向风和垂直风风速变小,横向风风速变大。

法,对无脱出物状态下筛面气流场风速分布进行测量。以振动筛前端进料口侧为坐标原点,筛宽方向为 Z 轴正向,筛长方向为 X 轴正向,垂直于筛面向上方向为 Y 轴正向。沿 X 轴正向均匀布置 5 排测量点,每排间距 250 mm,与原点的距离分别为:0、250、500、750、1 000 mm。沿 Z 轴正向均匀布置 5 排测量点,每排间距 150 mm,与原点的距离分别为:100、250、400、550、700、850 mm。测量平面距离上筛筛面 50 mm,平面测点位置分布如图 16 所示。

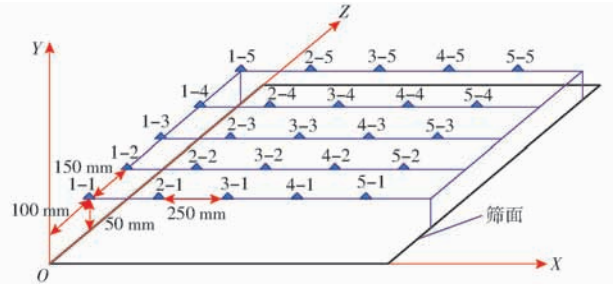


图 16 测点位置分布图

Fig. 16 Position distribution map of measuring point

试验在无脱出物条件下进行,选用 Flow anemometer AVM-07 型数字风速仪(测量范围:0 ~ 45 m/s,精确度:±3%)。测量前,根据测点位置分布图,在振动筛上方 50 mm 平面拉好细铁丝作为测点参照;测量时,将手持式风速仪手柄固定在手机自拍杆上,将手机自拍杆伸入清选室内,每个测点分别使用风速仪在 X、Y、Z 方向测得纵向风速、垂直风速和横向风速。

X 方向气流(纵向风)对物料清选起关键作用,

直接影响清选后籽粒含杂率性能指标； Z 方向气流（横向风）起均布物料的作用，数值仿真结果显示，圆柱形风机横向风风速接近于 0，而圆锥形风机产生明显的横向风。故而在试验结果分析中，重点比较两种风机 X 方向气流和 Z 方向气流的分布情况。

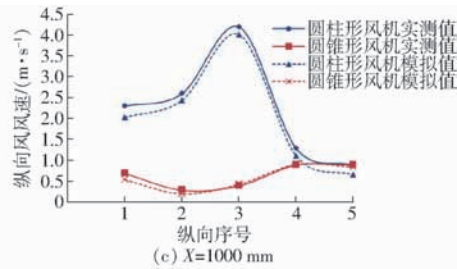
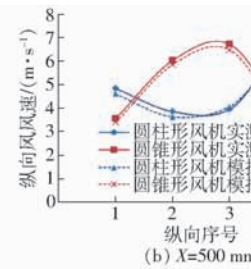
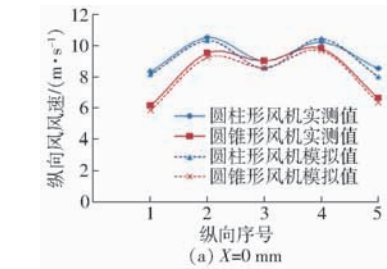


图 17 筛长方向不同截面处纵向风风速比较

Fig. 17 Comparison of longitudinal wind distribution at different sections in X direction

由图 17 可知，现场试验测量的风速变化趋势和数值模拟结果总体相近，由于风速仪对气流场的干扰、数值模拟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。不同截面处各测点风速实测值和模拟值的对比分析可知，利用 CFD 软件进行清选装置气流场数值模拟是可行的。

由图 17a 可知，相同风机转速下，圆锥形风机在出口位置产生的纵向风风速比圆柱形风机略小，但能满足清选作业需求；由图 17b 可知，圆锥形风机在振动筛筛宽方向（ Z 轴方向）上，在振动筛中部形

为了对圆锥形风机和圆柱形风机的纵向风情况进行比较，在筛长方向（ X 轴方向）上，分别选取 0、500、1 000 mm 3 个截面，考察其纵向风情况，选取锥度为 3.5° 圆锥形风机试验结果与圆柱形风机试验结果进行对比分析，同时将试验数据与模拟数据进行对比，结果如图 17 所示。

成的风速比两侧大，满足筛面中部混合物较多的清选需要，而圆柱形风机产生的风速峰值出现在筛宽方向的尾部，此处脱出混合物较少，且以短茎秆为主，故对清选作用不大；由图 17c 可知，在振动筛尾部，圆锥形风机产生的平均风速为 0.78 m/s ，远小于圆柱形风机的平均风速（ 2.16 m/s ），有利于降低清选损失。

为了对圆锥形风机和圆柱形风机的横向风风速进行比较，在筛宽方向（ Z 轴方向）上，分别选取 100、400、700 mm 3 个截面，考察其横向风风速情况，结果如图 18 所示。

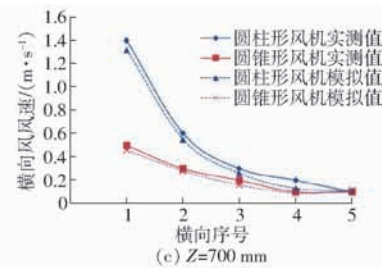
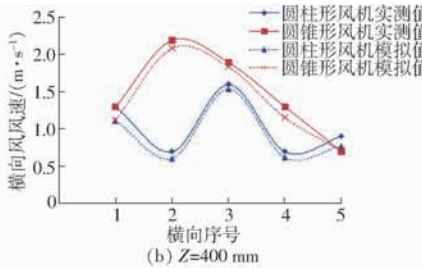
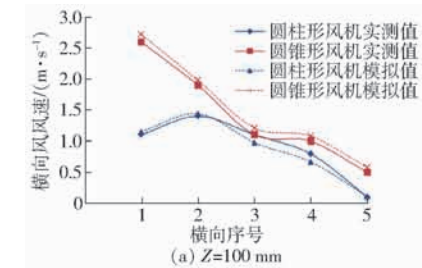


图 18 筛宽方向不同截面处横向风风速比较

Fig. 18 Comparison of transverse wind distribution at different sections in Z direction

由图 18a 可知，圆锥形风机在振动筛前端进料口侧（下落物料最多的部位）产生的横向风风速达到 2.68 m/s ，有利于将栅格式凹板分离落向振动筛入口一角的脱出物向筛宽方向均布，将大大减小振动筛入口一角的堆集，减轻清选负荷。由图 18b 可知，在筛宽方向 $Z = 400\text{ mm}$ 截面处，圆锥形风机在筛面中部的横向风风速仍达 2.07 m/s 以上，说明横向风在筛面中部继续将脱出物从多向少的部位均布，在振动筛中部位置的横向风风速也明显大于圆柱形风机产生的横向风。由图 18c 可知，在振动筛近排草出

口端（ $Z = 700\text{ mm}$ ），圆柱形风机产生的横向风风速比圆锥形风机产生的横向风大，但由于此处脱出物中籽粒已较少，横向风对清选效果影响较小。

由图 18 可知，圆锥形风机在振动筛前部的横向风风速向沿筛宽方向（ Z 轴方向）逐渐下降，说明在脱出物分离下落最多的部位（振动筛入口处）横向风风速最大；圆柱形风机在振动筛前部的横向风风速，沿筛宽方向从 1.12 m/s 上升到 1.46 m/s ，脱出物多的部位横向风风速小，而脱出物少的部位横向风风速大，对脱出物无均布作用。

3.2 物料分布试验与结果分析

物料分布试验时,拆除振动筛,停止其动力,并在振动筛位置放置物料取样盒。取样盒分 4 行(X 向)、6 列(Z 向),共 24 格,依次标记,每格尺寸为:200 mm(X 向)×166 mm(Z 向)×110 mm(Y 向)。试验前,水稻均匀平铺于物料输送台上(前段留空),输送台共 2 台,每台尺寸(长×宽)为:5 000 mm×900 mm,高度可调,串联使用;每次试验物料总质量 18 kg,按喂入量 1.8 kg/s 设定水稻传送速度,每组试验各 3 次,如图 19 所示。



图 19 取样盒与物料输送台
Fig. 19 Sampling box and material conveyor

清选风机正常工作,分别对圆柱形风机和圆锥形风机(锥度 3.5°)作用下物料分布情况进行测定。试验物料品种为“嘉优 2 号”,测定其性能参数为:千粒质量 26.8 g,籽粒含水率 26.2%,茎秆含水率 57.3%,草谷比 2.7。试验后,收集取样盒中每格物料进行称量,物料分布试验结果如图 20 所示。

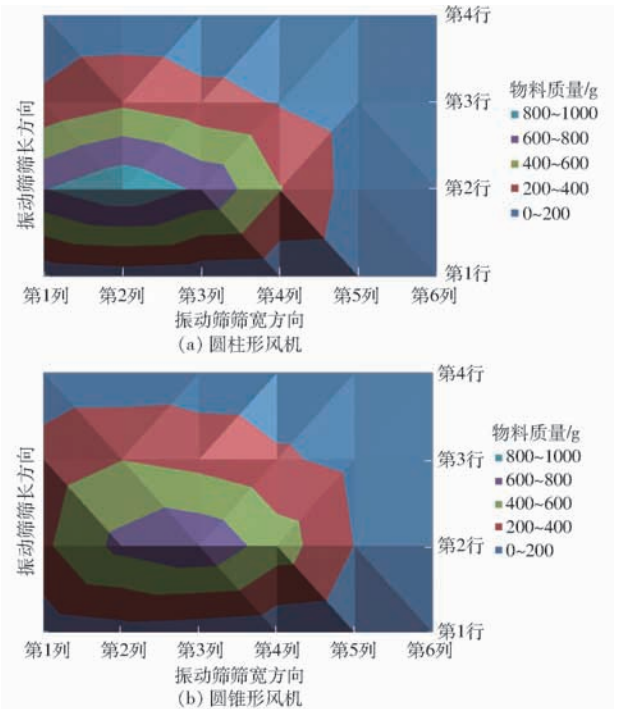


图 20 不同风机物料分布试验结果
Fig. 20 Experimental results of threshed mixture distribution of different fans

物料分布试验结果显示,圆柱形风机作用下,脱出物堆集中心点所在部位为第 8 格(第 2 行第 2 列),该接料格中物料质量 974.2 g,脱出物主下落区

为第 2~3 行、1~3 格,占落料区总面积的 25%,该区域内物料质量 3 402 g,占脱出物总质量的 69.74%;圆锥形风机作用下,脱出物堆集中心点所在部位为第 9 格(第 2 行第 3 列),该接料格物料为 763.1 g,脱出物主下落区为第 2~3 行、2~4 格,占落料区总面积的 25%,该区域内物料总质量为 2 880.0 g,占脱出物总质量的 59.21%;与圆柱形风机相比,圆锥形风机作用下脱出物堆集中心点所在部位脱出物质量减少 27.66%,脱出物主下落区的脱出物质量占脱出物总质量的比值降低 10.53 个百分点,脱出物堆集中心点的位置沿振动筛筛宽方向朝排草口一侧偏移 166 mm。在振动筛位置放置取样盒对清选室垂直方向风速产生一定影响^[28],但本次物料分布试验侧重考察纵向风和横向风对脱出物在振动筛筛面分布的影响,试验结果显示,与圆柱形风机相比,圆锥形风机能利用横向风吹散集中下落的脱出物,可使其在筛分前得到均布预处理,故而试验结果有意义。

对取样盒中全部混合物进行清理,分选出籽粒和杂质并称量,计算清选风机作用下未经振动筛筛分混合物的含杂率;从清选室出口收集全部排出物,挑选出籽粒并称量,计算清选损失率,结果如表 2 所示。可见,圆锥形风机作用下混合物含杂率(未经振动筛筛分)为 6.83%、清选损失率(由气流产生)为 0.22%,两项指标均优于圆柱形风机。

表 2 台架试验结果
Tab. 2 Results of bench test %

风机类型	含杂率	清选损失率
	(未筛分)	(由气流产生)
圆柱形风机	8.42	0.38
圆锥形风机($\alpha=3.5^\circ$)	6.83	0.22

3.3 田间试验

2018 年 11 月,在第三方专业检测机构主持下,在浙江省永康市芝英镇进行了田间试验,如图 21 所示。试验水稻品种、喂入量、风机和清选室等结构和工作参数等试验条件与台架试验一致。试验用履带式全喂入联合收获机割幅为 1.8 m,根据试验田块产量确定机器行走速度,以确保喂入量为 1.8 kg/s。试验分别对圆柱形风机、圆锥形风机(锥度 3.5°)作用下,水稻收获作业损失率、含杂率和破碎率进行测定。

田间试验结果如表 3 所示。圆锥形风机作用下,联合收获机损失率、含杂率和破碎率明显优于行业规定标准,且与圆柱形风机相比,含杂率指标得到显著改善。



图 21 田间试验现场
Fig. 21 Field test site

表 3 田间试验结果
Tab.3 Results of field test %

	总损失率	含杂率	破碎率
行业标准	≤3.0	≤2.0	≤1.0
圆锥形风机(α=3.5°)	1.98	0.45	0.67
圆柱形风机	2.56	1.58	0.85

4 结论

(1)清选室流场数值模拟结果显示,圆锥形风机作用下,清选室内产生明显的沿振动筛筛宽方向指向排草口一侧的横向风。增大风机叶片锥度可以

增加横向风风速,但随着锥度的增大,一方面纵向风风速总体变小,不利于籽粒在筛长方向的运动,将导致清选含杂率上升,同时,振动筛中间位置产生的低风速区面积也会增大,同样将影响清选效果。当圆锥形风机锥度为 3.5°时,清选室气流场风速分布较为理想。

(2)清选室气流场风速分布测定试验结果表明,当圆锥形风机锥度为 3.5°时,圆锥形风机在振动筛入口一角(下落物料最多的部位)产生的横向风速达到 2.68 m/s,筛面中部横向风风速达到 2.07 m/s,显著大于圆柱形风机产生的横向风,有利于脱出物沿筛宽方向均布;在振动筛尾部,圆锥形风机产生的平均风速为 0.78 m/s,远小于圆柱形风机的平均风速 2.16 m/s,有利于降低清选损失。

(3)物料分布试验和田间试验结果表明,与圆柱形风机相比,圆锥形风机能利用横向风吹散集中下落的脱出物,可使其在筛分前得到均布预处理。圆锥形风机作用下,联合收获机损失率、含杂率和破碎率性能指标明显优于行业规定标准,且与圆柱形风机相比,含杂率指标得到显著改善。

参 考 文 献

[1] 苏天生,韩增德,崔俊伟,等. 谷物联合收割机清选装置研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2016,38(2): 6-11. SU Tiansheng, HAN Zengde, CUI Junwei, et al. Research status and development trend of cleaning unit of cereal combine harvesters [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016,38(2): 6-11. (in Chinese)

[2] 夏利利. 风筛式清选装置中气流场的数值模拟及试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2008. XIA Lili. Numerical simulation and the experimental study of air flow field of air-and-screen cleaning [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. (in Chinese)

[3] 于丽娟. 双出风口多风道清选装置的设计及试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2015. YU Lijuan. Design and experimental study in cleaning device with double outlet and multi-duct [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015. (in Chinese)

[4] 王志明,吕彭民,陈霓,等. 横置差速轴流脱分选系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 53-61. WANG Zhiming, LÜ Pengmin, CHEN Ni, et al. Experimental study on axial flow differential-speed threshing-separating-cleaning unit [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 53-61. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161208&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.008. (in Chinese)

[5] 陈德俊,龚永坚,黄东明,等. 履带式全喂入稻麦联合收获机新型工作装置研究设计[J]. 农业机械学报,2007,38(8): 82-85. CHEN Dejun, GONG Yongjian, HUANG Dongming, et al. Development on some apparatus of Chinese model caterpillar rice-wheat combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 82-85. (in Chinese)

[6] 刘正怀,郑一平,王志明,等. 微型稻麦联合收获机气流式清选装置研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(7): 102-108. LIU Zhenghui, ZHENG Yiping, WANG Zhiming, et al. Design on air-flowing cleaning unit of micro rice-wheat combine harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 102-108. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150716&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.016. (in Chinese)

[7] 李洋,徐立章,周莹,等. 脱出物喂入量对多风道清选装置内部气流场的影响[J]. 农业工程学报, 2017,33(12): 48-55. LI Yang, XU Lizhang, ZHOU Ying, et al. Effect of extractions feed-quantity on airflow field in multi-ducts cleaning device [J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(12): 48-55. (in Chinese)

[8] 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 air-and-screen cleaning device [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 62-66. (in Chinese)

[9] 江涛,吴崇友,伍德林. 基于 Fluent 的联合收割机风筛式流场仿真分析[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)

[10] 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)

- [11] 童水光,沈强,唐宁,等. 纵轴流清选装置混合流场数值模拟与优化试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):135–142. TONG Shuiguang, SHEN Qiang, TANG Ning, et al. Numerical simulation and optimization experiment of mixed flow field onlongitudinal axial flow cleaning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 135–142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160719&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.019. (in Chinese)
- [12] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 78–86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.013. (in Chinese)
- [13] 樊晨龙,崔涛,张东兴,等. 纵轴流联合收获机双层异向清选装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):239–248. FAN Chenlong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of double-layered reverse cleaning device for axial flow combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 239–248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s032&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.032. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] MEKONNEN G G, JOSSE D B, MARTINE B. 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.
- [16] MEKONNEN G G, JOSSE D B, MARTINE B. Numerical and experimental study of a cross-flow fan for combine cleaning shoes [J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(4):448–458.
- [17] YUKO U, MASAMI M, EIJI I, et al. Turbulent flow characteristics of the cleaning wind in combine harvester [J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2012, 5(3): 102–106.
- [18] CASARSA L, GIANNATTASIO P. Experimental study of the three-dimensional flow field in cross-flow fans [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(6):948–959.
- [19] GEERT C, WOUTER S, BART M, et al. A genetic input selection methodology for identification of the cleaning process on a combine harvester, Part I: selection of relevant input variables for identification of the sieve losses [J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(2): 166–175.
- [20] LI Hongchang, LI Yaoming, GAO Fang, et al. CFD-DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 88:111–119.
- [21] 李耀明,林恒善,陈进,等. 基于神经网络的风筛式清选气流场研究[J]. 农业机械学报,2006,37(7):197–198.
- [22] 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD-DEM 数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2012, 43(2):79–84. LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD-DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 79–84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120217&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.017. (in Chinese)
- [23] 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 gas-solid two-phase flow in cross-flow grain cleaning device[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 27–34. (in Chinese)
- [24] 成芳,王俊. 风筛式清选装置上流场的实验研究[J]. 农业工程学报,1999,15(1):55–58. CHENG Fang, WANG Jun. Test study on the flow field above surface of the air and screen cleaning mechanism [J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(1): 55–58. (in Chinese)
- [25] 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 analysis of whole flow field for a mixed-flow fan based on Fluent[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(2):178–179. (in Chinese)
- [26] 陈霓,黄东明,陈德俊,等. 风筛式清选装置非均布气流清选原理与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(4):73–77. CHEN Ni, HUANG Dongming, CHEN Dejun, et al. Theory and experiment on non-uniform air-flow cleaning of air-screen cleaning unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 73–77. (in Chinese)
- [27] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:下册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [28] 李耀明. 谷物联合收割机的设计与分析[M]. 北京:机械工业出版社,2014.