doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.021

水稻联合收获机叶片交错式离心清选风机设计与试验

谢方平[1,2]　夏　威[1]　王修善[1,2]　王勋威[1,2]　张振阳[1]　张楷华[1]
(1.湖南农业大学机电工程学院,长沙 410128;2.智能农机装备湖南省重点实验室,长沙 410128)

摘要:针对现有 4LZ-3.0Z 型水稻联合收获机作业过程中物料在筛面上分布存在两边多中间少、前多后少的现象,导致物料在清选过程中筛分不充分的问题,设计了一种叶片交错式离心清选风机,通过交错叶轮产生的压强差生成横向气流,改善物料横向分布均匀性。基于风机在工作过程中前后叶片的压力差,建立了叶片夹角与风速的数学模型,结合理论压差与横向风速表达式推导,得出了叶片交错角与横向风速存在非线性函数关系的结论。通过风机流场数值模拟与清选室筛面风速实测,验证了理论分析的合理性并得出了横向风速。通过单因素试验,以分风板倾角、风机转速和叶片交错角度为影响因素,以籽粒含杂率与清选损失率为评价指标,得出各因素对评价指标的影响规律。设计三因素三水平响应曲面试验,通过响应曲面方法和多目标优化得出最优参数:风机转速为 1 105.614 r/min、分风板倾角为 39.91°、叶片交错角度为 25.073°,在最优参数下籽粒含杂率为 1.08%,清选损失率为 0.774%,优于传统清选装置性能。

关键词:水稻联合收获机;清选装置;交错式离心风机
中图分类号:S225.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)07-0228-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Interlaced Centrifugal Cleaning Fan for Rice Combine Harvester

XIE Fangping[1,2]　XIA Wei[1]　WANG Xiushan[1,2]　WANG Xunwei[1,2]　ZHANG Zhenyang[1]　ZHANG Kaihua[1]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha* 410128, *China*
2. *Hunan Province Key Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery Equipment, Changsha* 410128, *China*)

Abstract: In view of the phenomenon that the materials distribute unevenly on the sieve surface during the operation of 4LZ-3.0Z rice combine harvester, with more materials on the sides and less in the middle, and more at the front and less at the back, which leads to insufficient screening of the materials during the cleaning process, a leaf-interlaced centrifugal cleaning fan was designed to generate a lateral airflow through the pressure difference between the front and rear vanes, improving the uniformity of the lateral distribution of the materials. A mathematical blade angle and wind speed model was established based on the pressure difference between the front and rear vanes during the fan's operation. By combining the theoretical pressure difference and the expression of the lateral wind, it was concluded that there was a nonlinear function relationship between the staggered blade angle and the lateral wind. Through numerical simulation of the fan flow field and the actual measurement of the wind speed on the sieve surface of the cleaning chamber, the rationality of the theoretical analysis was verified and the size of the lateral wind was obtained. Through single-factor experiments, it was determined that the deflector plate angle, fan speed and blade stagger angle were the influencing factors, and the grain impurity rate and cleaning loss rate were used as evaluation indicators to obtain the influence relationship of each factor. A three-factor three-level response surface experiment was designed. The optimal parameters were obtained through the response surface method and multi-objective optimization: the fan speed was 1 105.614 r/min, the deflector plate angle was 39.91°, and the blade stagger angle was 25.073°. Under the optimal parameters, the grain impurity rate was 1.08% and the cleaning loss rate was 0.774%, which was superior to the performance of the traditional cleaning device.

Key words: rice combine harvester; cleaning device; interlaced centrifugal fan

收稿日期:2025-08-20　修回日期:2025-10-28
基金项目:湖南省高新技术产业引领计划项目(2020NK2002)
作者简介:谢方平(1970—),男,教授,博士,主要从事南方地区油粮机械化生产技术及装备研究,E-mail:hunanxie2002@163.com
通信作者:王修善(1990—),男,实验师,主要从事南方粮油作物机械化收获技术与装备研究,E-mail:hnwxs@hunau.edu.cn

0　引言

清选装置是影响水稻联合收获机收获质量的关键部件。目前，谷物联合收获机中应用最广泛的是风筛式清选装置，主要由离心风机和清选筛组成，其主要功能是将脱粒后的谷物与杂质进行分离，使水稻籽粒的含杂率和清选损失率达到工作要求。近年来，为满足高产水稻收获，伴随喂入量增大，对联合收获机的清选性能提出了更高的要求。清选风机成为改善清选性能的关键[1-4]。

近年来，相关学者对收获机清选装置，特别是风机进行了深入研究。陈霓等[5]根据喂入量所需空气流量、风机全压、平均风速，设计了叶轮外径两头大、中间小的双圆锥离心风机，并对双圆锥离心风机关键参数进行了设计，解决了清选过程中气流与物料分布不匹配的问题，提高了清选质量。王长宁等[6]设计了双风道人字变斜式叶轮横流风扇并通过试验验证了风机装置清选性能的提高，解决了 D2 型自走式谷物联合收获机清选损失超标的问题。周水清等[7]在传统蜗壳型线设计方法的基础上，对多翼离心风机蜗壳进行改型设计，采用修正的 $k-\varepsilon$ 模型进行计算，发现蜗舌处的流动分离现象得到改善。童水光等[8]提出了双风道六出风口结构的风机，基于数值模拟方法，分析了风机气流场分布特性，为清选性能的优化提供了理论依据，并通过试验验证了双风道六出风口结构的优化结果。李洪昌等[9]采用 CFD－DEM 耦合方法对风筛式清选装置进行数值模拟，结果表明：适当增加出风口风速可加速物料后移速度，可提高振动筛的处理能力，但会增加籽粒损失。LI 等[10]通过 CFD 数值模拟探究清选装置内部的气流场并进行试验，分析了喂入量对气流速度的影响并提出了一种不同工况下根据喂入量调整单个运行参数的方法。GEBREHIWOT 等[11]提出了一个具有横流入口的离心式风机，采用 CFD 数值模拟探究增加错流开口对离心风机性能的影响，使用热线风速仪测量出口风速用以验证数值模拟，研究发现增加的错流开口减少了风机在较高负载下提供的流量，但是提高了风机出口流量的均匀性。徐立章等[12]建立了双出风口多风道离心风机的流道模型，通过数值模拟方法探究其内部流场特性，分析了风机转速、进风口直径和分风板角度对气流速度、压力分布的影响，通过优化风机运行参数的组合配置，提高清选性能及作业效果。LIANG 等[13]提出了一种双出风口多风道清选装置的设计方法，通过试验确定了导板角度、风机转速、筛网开度的最佳组合，使收获机的清选性能得到提升。ZHANG 等[14]针对离心风机运行参数调整不当影响清选室气流场的问题，通过研究风机转速、叶片倾角等参数的交互作用，发现调高转速与增大叶片倾角可优化气流均匀性并降低涡流能耗。

以上研究表明：通过创新风机结构设计、运用数值模拟方法、调整运行参数的组合配置，可以改善清选室气流场的流场特性，减少籽粒损失、降低含杂率、防止堵塞和提高清选效率。针对 4LZ－3.0Z 型水稻联合收获机作业过程中存在脱出物在振动筛筛面两侧多、中间少的分布不均现象，本文设计叶片交错式离心清选风机，通过理论分析与数值模拟探究清选气流场的机理，通过试验探究关键参数对清选效果的影响，以期为联合收获机清选系统风机结构改进提供技术参考。

1　交错式离心清选风机结构和原理

1.1　清选装置结构

交错式离心清选风机位于清选室的左下方，在清选过程中通过形成气流场作用于振动筛筛面上脱出混合物[15]，实现对物料的清选。其结构如图 1 所示。

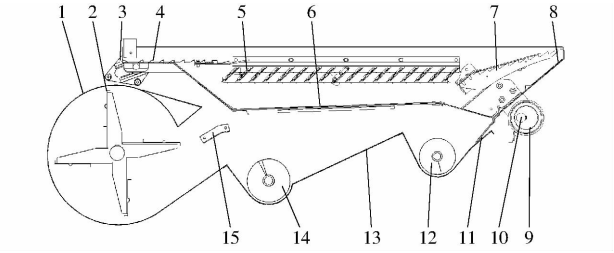


图 1　清选装置结构示意图

Fig. 1　Schematic of cleaning device structure

1. 蜗壳　2. 叶轮　3. 滑槽轴承　4. 导流板　5. 鱼鳞筛　6. 编织筛　7. 尾筛　8. 清选筛后挡板　9. 偏心轮　10. 清选筛摇杆　11. 塑料挡板　12. 杂余螺旋输送器　13. 底板　14. 籽粒螺旋输送器　15. 分风板

1.2　叶轮结构参数

在 4LZ－3.0Z 型水稻籽粒联合收获机清选室的基础上进行叶轮结构参数的调整设计，沿叶轮轴方向将叶轮均分为 3 段，分别为左、中、右 3 段，且左、右两端呈对称分布，从左到右依次连接。风机各部件结构参数如表 1 所示。

1.3　分风板结构参数

分风板是清选装置的重要组成部分，起到调节气流分布的作用[16-18]。4LZ－3.0Z 型水稻籽粒联合收获机清选室分风板的结构参数如表 2 所示。

1.4　风机工作参数

交错式离心清选风机应符合离心式风机的原始参数，其原始设计参数是空气流量 Q、风机全压 p 和

表 1 叶轮结构参数

Tab. 1 Impeller structural parameters

参数	数值
风机宽/m	0.635
单个叶轮宽/m	0.21
叶轮左、右段大端外径 d_{21}/m	0.36
风扇宽 b/m	0.69
叶轮圆锥角/(°)	3
叶轮左、右端小端外径 d_{22}/m	0.34
叶轮中段小端外径 d_{23}/m	0.33
进风口直径 D/m	0.275
叶轮内径 d/m	0.197
出风口高度 h/m	0.17

表 2 分风板结构参数

Tab. 2 Air distribution plate structural parameters

参数	数值
分风板长度/m	0.65
分风板宽度/m	0.08
旋转角度/(°)	25 ~ 45
起始高度/m	0.25

出风口平均风速 v_a。流量 Q 与联合收获机清选过程中杂质数量成正比,出风口平均风速 v_a 根据被清除杂质的空气动力学特性确定[19]。

空气流量 Q 计算公式为

$$Q = 1.04q \tag{1}$$

式中 q——喂入量,取 3.0 kg/s

将数据代入式(1)得 $Q = 3.12$ m^3/s。

出风口平均风速 v_a 计算公式为

$$v_a = \alpha_a v_p \tag{2}$$

式中 v_p——杂质中物料的漂浮速度,稻麦颗粒 v_p 为0.6 ~ 5.0 m/s,短茎秆(< 10 cm) v_p 为 5.0 ~ 6.0 m/s,取 4 m/s

α_a——系数,出口平均风速应是轻杂质漂浮速度的 α_a 倍,对于颖壳 α_a 为 1.9 ~ 3.9,谷糠 α_a 为 2.5 ~ 5.0,取 4.5

将数据代入式(2)得 $v_a = 18$ m/s。

风机全压 p 计算公式为

$$p = p_s + p_d \tag{3}$$

其中

$$p_d = \gamma \frac{v_a^2}{2g} \tag{4}$$

式中 p_s——清选风机静压,取 200 Pa

p_d——清选风机动压,Pa

γ——空气容重,取 11.77 N/m^3

g——重力加速度,取 9.8 m/s^2

将数据代入式(4)可得 $p_d = 194.57$ Pa,风筛清选装置中风机静压范围一般为 196 ~ 247 Pa[20],本文 p_s 取 200 Pa,最后由式(3)得 $p = p_s + p_d = 394.57$ Pa。在一定条件下如空气流道截面变小时,p_s 和 p_d 可以相互转换。

1.5 交错式离心清选风机定义与原理

根据收获过程中脱出物在筛面上存在两边多、中间少的现象[21-22],清选风机采用四叶片离心式风机。如图 2 所示,将叶片分为 3 段,分别为左、中、右段。图 2 中截面Ⅰ、Ⅱ为左、右段中间横截面,Ⅲ为中段中间横截面。其中Ⅰ、Ⅱ面上各叶片沿轴向投影重叠与Ⅲ面上叶片沿轴向投影的夹角为交错角 ξ。故而该风机称为交错式离心清选风机。叶轮的进风口位于其左右两侧,左、右段与中段叶轮各叶片呈夹角 ξ,当风机叶轮旋转时,左右段与中段叶轮形成的风场将处于不同的动态压强状态,在进风口持续送风作用下,左、右段风场气流会向中段风场汇聚,形成压强差,相邻风场的压强差会在清选室内产生横向气流。风机轴经由左右两侧法兰轴承座与机架相连,叶片通过支撑板安装在风机轴上。动力系统通过带轮带动风机轴转动,进而驱动叶轮旋转。

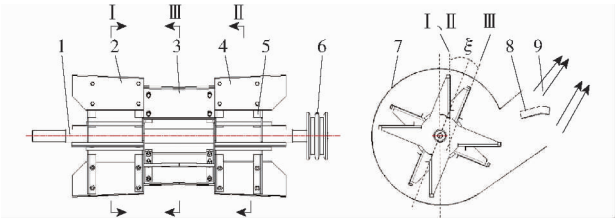


图 2 风机结构示意图

Fig. 2 Schematic of fan structure

1. 风机轴 2. 左叶片 3. 中叶片 4. 右叶片 5. 支撑板 6. 皮带轮 7. 风机蜗壳 8. 分风板 9. 出风口

2 理论计算

2.1 交界面压差计算

交错式离心风机叶轮在高速旋转时,空气从进风口进入叶轮,叶轮带动空气一起旋转,在离心力作用下排出机壳。清选风机转动机械功使每立方米空气获得的能量 p_e(压力)由风扇的基本方程即欧拉方程确定[19,23],即

$$p_e = \frac{\gamma}{g} v u \cos\alpha \tag{5}$$

式中 v——空气离开叶轮时的绝对速度,m/s

u——叶轮外圆切线速度,m/s

α——v 与 u 的夹角,(°)

根据文献[19]可知,由于气流通过风机产生涡流对叶片冲击和摩擦等引起了能量损失,使每立方米空气实际所获的能量 p_i 为

$$p_i = \eta p_e = \frac{\eta\gamma}{g} v u \cos\alpha = \frac{\eta\gamma}{g} v R \omega \cos\alpha \tag{6}$$

式中 η——风机效率,取 0.5

R——叶轮半径，取 0.165 m

ω——叶轮角速度，取 125.66 rad/s

由于交错式离心风机分左、中、右 3 段，且左、右两段呈对称分布，在此选取左、中相交界面来进行分析。如图 3 所示，在速度三角形 u_1Av_1、u_2Bv_2 中，已知 $u_1=u_2=R\omega$，β 为结构角，$\beta=60°$。故可求得结构角 ϕ_1、ϕ_2[24] 为

$$\begin{cases}\phi_1=\arcsin\dfrac{u_1\sin\beta}{v_1}\\ \phi_2=\arcsin\dfrac{u_2\sin\beta}{v_2}\end{cases}\tag{7}$$

式中　u_1、u_2——左、中段叶轮叶片外圆切线速度，m/s

v_1、v_2——空气离开左、中段叶轮叶片时的绝对速度，m/s

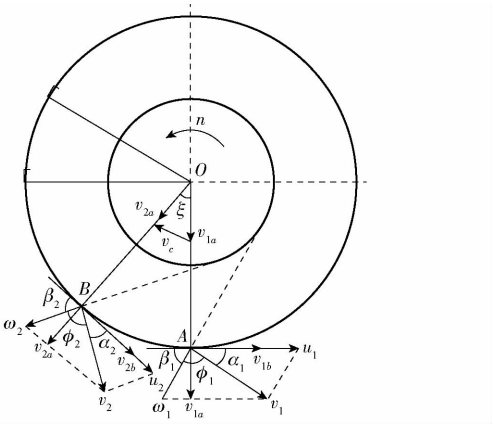


图 3　清选风机叶轮工作示意图

Fig. 3　Working diagram of cleaning fan impeller

根据平角的定义 $\alpha+\phi+\beta=180°$，$\beta=60°$，可得 $\alpha=120°-\phi$，代入式(7)可求得 $\cos\alpha_1$、$\cos\alpha_2$，即

$$\begin{cases}\cos\alpha_1=\dfrac{3R\omega}{4v_1}-\dfrac{1}{2}\cot\dfrac{\sqrt{3}R\omega}{2v_1}\\ \cos\alpha_2=\dfrac{3R\omega}{4v_2}-\dfrac{1}{2}\cot\dfrac{\sqrt{3}R\omega}{2v_2}\end{cases}\tag{8}$$

式中　α_1——v_1 与 u_1 的夹角

α_2——v_2 与 u_2 的夹角

当叶片 OA 到达出风口时，此时风压 p_1 为

$$p_1=\frac{\eta\gamma}{g}Rv_1\omega\cos\alpha_1\tag{9}$$

当叶片 OB 到达出风口时，此时风压 p_2 为

$$p_2=\frac{\eta\gamma}{g}Rv_2\omega\cos\alpha_2\tag{10}$$

当叶片 OA 到达出风口时，在同一平面上中段叶轮此时的风压 $p_3=\theta p_2$（θ 为常数，$0<\theta<1$），故此时左、中段叶轮在叶片 OA 平面的压差 $\Delta p=p_1-p_3$，即 $\Delta p=p_1-\theta p_2$，有

$$\Delta p=\frac{\eta\gamma}{g}R\omega(v_1\cos\alpha_1-\theta v_2\cos\alpha_2)\tag{11}$$

将式(8)代入式(11)中，即

$$\Delta p=\frac{\eta\gamma}{g}R\omega\left(\frac{3u-3\theta u}{4}+\frac{\theta v_2}{2}\cot\frac{\sqrt{3}u}{2v_2}-\frac{v_1}{2}\cot\frac{\sqrt{3}u}{2v_1}\right)\tag{12}$$

假设左、中段叶轮出风口处动压差 $\partial(0<\partial<1)$ 转换为动压 Δp_d，并由高压端向低压端传递产生横向风，横向风速 v_b 计算式为[25]

$$\Delta p_d=\partial\Delta p=\frac{\gamma}{2g}v_b^2\tag{13}$$

由压力差产生的横向风速 v_b 则为

$$v_b=\sqrt{\frac{2g\partial\Delta p}{\gamma}}\tag{14}$$

将式(12)代入式(14)中，得

$$v_b=\sqrt{2\partial\eta R\omega\left(\frac{3u-3\theta u}{4}+\frac{\theta v_2}{2}\cot\frac{\sqrt{3}u}{2v_2}-\frac{v_1}{2}\cot\frac{\sqrt{3}u}{2v_1}\right)}\tag{15}$$

2.2　风机流场数值模拟

2.2.1　数值分析模型

利用 Solidworks 软件建立风机三维模型，并将模型导入 Fluent 软件中进行前处理，在 Spaceclaim 模块中，设定计算域的入口、出口、壁面等边界条件。并在 Mesh 模块中采用四面体非结构化网格。在 Setup 模块中进行计算前的准备工作，采用动坐标系的方法将气流场模型中的叶轮部分设置为动坐标系，回转中心为叶轮轴心，转速设定为 1 200 r/min，离心风机的进、出风口分别设为压力进、出口，采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型与 SIMPLEC 算法，残差设置为 0.001。

2.2.2　验证理论分析

当图 4 中叶片 C、F 到达出风口时，叶片 C、F 截面的动压分布如图 5 所示，此时左、中段叶轮在叶片 C、F 到达出风口时平面压差 $\Delta p_d\approx50$ Pa，根据式(14)得横向风速 $v_b=9.1\sqrt{\partial}$。

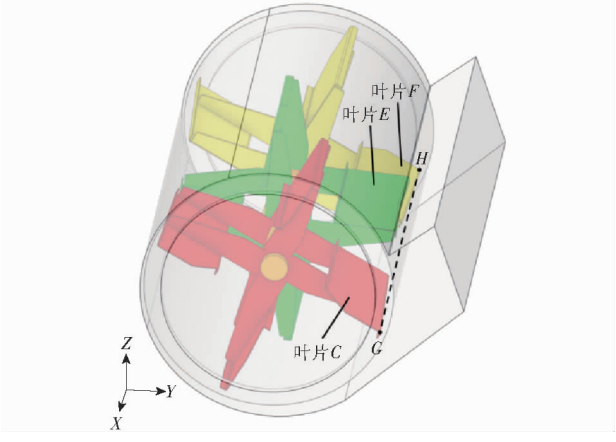


图 4　风机三维模型

Fig. 4　3D model of fan

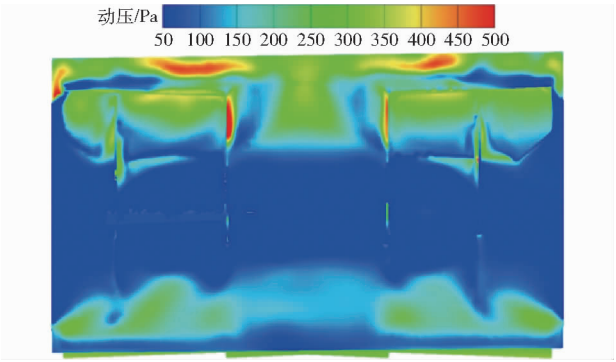


图 5 截面动压分布图

Fig. 5 Cross-sectional dynamic pressure distribution

图 6 为当叶片 C、F 到达出风口时，沿点 G、H 组成线段 GH 的动压变化曲线，叶片长度为 210 mm，

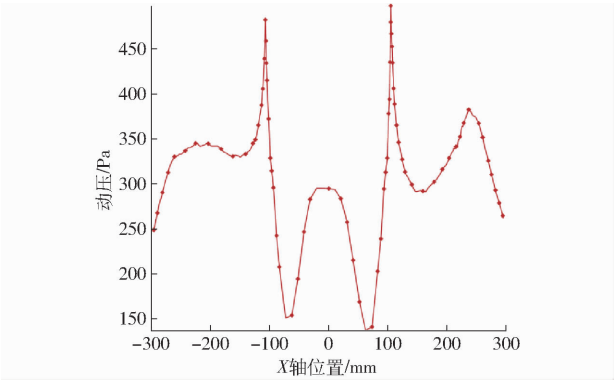


图 6 动压变化曲线

Fig. 6 Dynamic pressure variation curve

如图 6 所示，交错式风机左段叶轮动压整体比中段叶轮约大 50 Pa，故左、中段叶轮出风口处压差 $\Delta p \approx 50$ Pa。

2.3 风机叶片交错夹角

如图 3 所示将 v_1、v_2 正交分解为（v_{1a}、v_{1b}）、（v_{2a}、v_{2b}），并将 v_{1a}、v_{2a} 移至圆心点 O，在速度三角形 $v_{1a}Ov_{2a}$ 中[26]，可得

$$\cos\xi = \frac{v_{1a}^2 + v_{2a}^2 - v_c^2}{2v_{1a}v_{2a}} \tag{16}$$

式中 v_{1a}——v_1 的径向分速度，m/s

v_{2a}——v_2 的径向分速度，m/s

v_c——v_{1a} 与 v_{2a} 的合速度，m/s

在速度三角形 $v_{1a}Av_{1b}$、$v_{2a}Bv_{2b}$ 中，根据速度三角形定则可得

$$\begin{cases} v_1^2 = v_{1a}^2 + v_{1b}^2 \\ v_2^2 = v_{2a}^2 + v_{2b}^2 \end{cases} \tag{17}$$

式中 v_{1b}——v_1 的切向分速度，m/s

v_{2b}——v_2 的切向分速度，m/s

将式（16）代入式（17）可得

$$\begin{cases} v_1 = \sqrt{v_c^2 - v_{2a}^2 + v_{1b}^2 + 2v_{1a}v_{2a}\cos\xi} \\ v_2 = \sqrt{v_c^2 - v_{1a}^2 + v_{2b}^2 - 2v_{1a}v_{2a}\cos\xi} \end{cases} \tag{18}$$

根据式（15）可知叶片 OA、OB 的夹角 ξ 与 v_1、v_2 存在非线性函数关系，故夹角 ξ 与横向风 v_b 存在非线性函数关系。将式（18）代入式（15）中，得

$$v_b = \sqrt{\frac{3u\eta R\omega\partial - 3\theta u\eta R\omega\partial}{2} + \theta\eta R\omega\partial v_2\cot\frac{\sqrt{3}u}{2\sqrt{v_c^2 - v_{1a}^2 + v_{2b}^2 - 2v_{1a}v_{2a}\cos\xi}} - \eta R\omega\partial v_1\cot\frac{\sqrt{3}u}{2\sqrt{v_c^2 - v_{2a}^2 + v_{1b}^2 + 2v_{1a}v_{2a}\cos\xi}}} \tag{19}$$

在交错式离心风机工作时运行轨迹为整圆，其圆角 360°由 4 个叶片均分为了 90°，其中叶片交错角为 0°～45°与 45°～90°时，左、中段叶片位置会发生重叠产生相同的效果，故叶片交错角 ξ 的调节范围为 0°～45°。

3 清选室筛面风速分布测定

3.1 筛面风速分布测定方法

为了获得接近真实情况的气流场分布，采用布点法对清选室进行气流场试验[27-28]。试验时使用测量设备为 AR866A 型精密热线风速仪，其测量范围为 0.3～30 m/s，分辨率为 0.01 m/s，风机转速设定为 1 200 r/min。

如图 7 所示，以振动筛筛齿顶端为坐标原点，沿筛长方向为 X 轴正方向，筛宽方向为 Y 轴正方向，垂直于筛面向上为 Z 轴正方向。选取 Z 轴正方向 30、50、70 mm 3 个平面作为风速测量面[29]，沿 X 轴正方向均匀布置 6 排，每排间隔 137 mm；沿 Y 轴正方向均匀布置 5 排，每排间隔 99 mm。

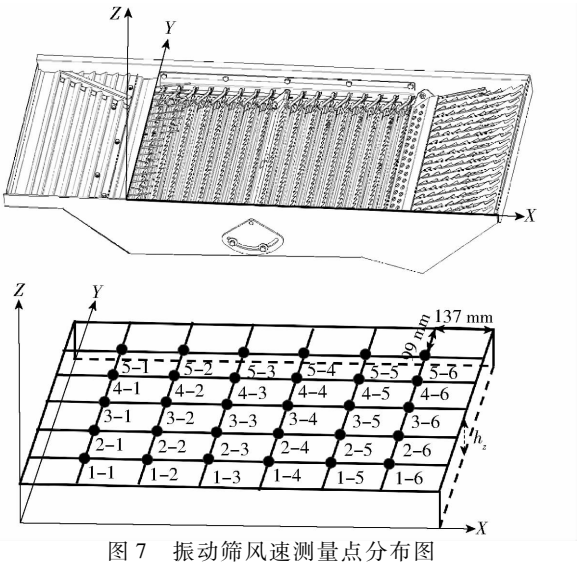


图 7 振动筛风速测量点分布图

Fig. 7 Vibrating screen air flow measurement points distribution diagram

3.2 筛面风速结果分析

X 轴方向气流（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；Y 轴方向气流（横

向风)起吹送物料的作用[29]。为了对比交错式离心风机与传统圆柱式离心风机纵向风情况,在筛长方向(X 轴方向)上,选取 3 个截面位置分别为 270、550、820 mm,结果如图 8 所示。

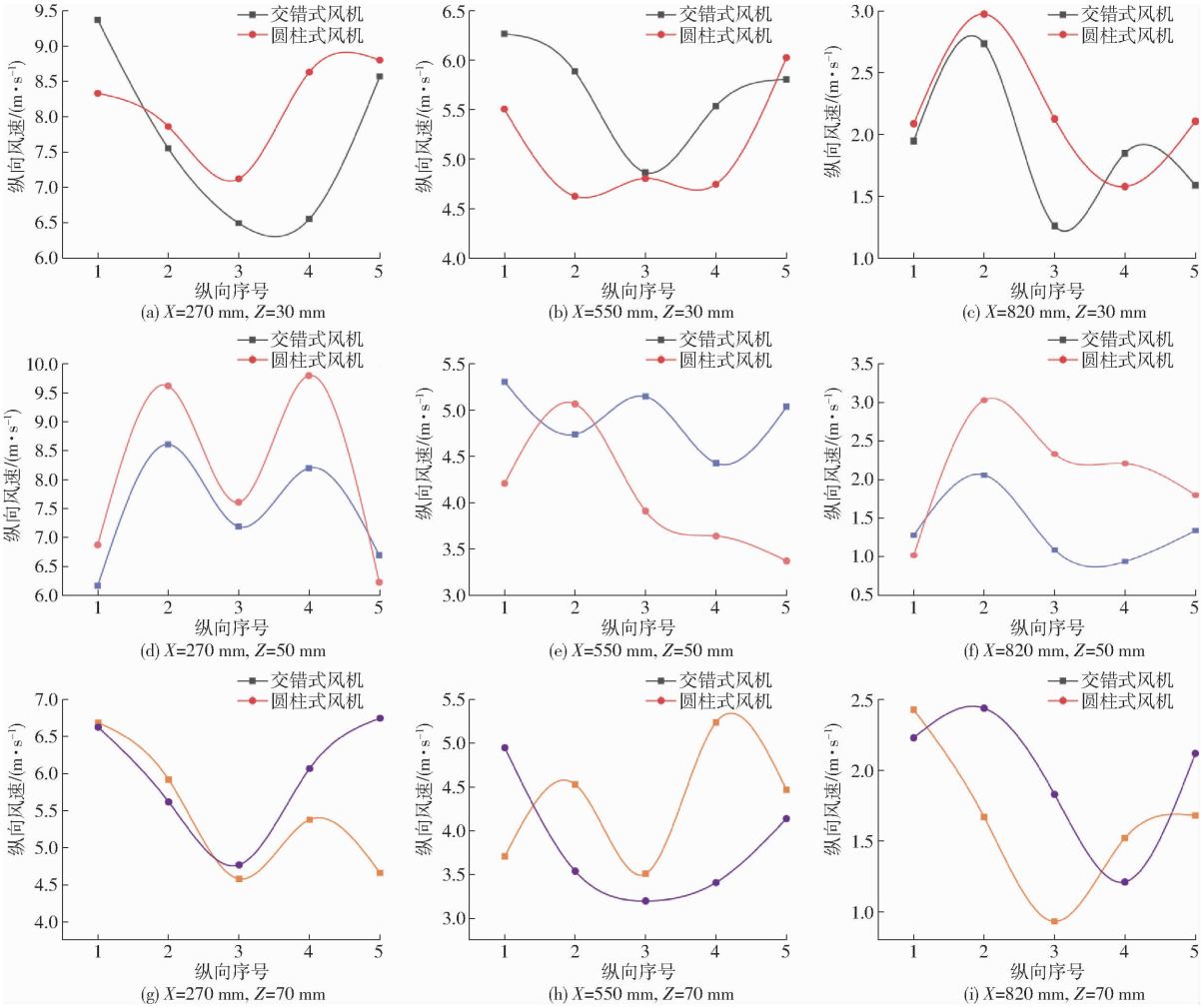


图 8　沿 X 轴各截面纵向风速变化曲线

Fig. 8　Longitudinal wind speed at each cross-section along the X-axis

由图 8a、8d、8g 可知,在筛面前端(X = 270 mm)交错式风机纵向风速相比于圆柱式风机较低,但仍大于水稻杂余的悬浮速度,满足清选作业要求。随着测量平面高度的上升,纵向风速随之降低但风速仍满足作业要求。由图 8b、8e、8h 可知,在筛面中端(X = 550 mm)交错式风机纵向风速均值大于圆柱式风机,且沿筛宽(Y 轴)中间纵向风速交错式风机大于圆柱式风机,有利于清选过程中对物料的筛分,降低籽粒含杂率。由图 8c、8f、8i 可知,在筛面后端(X = 820 mm)交错式风机纵向风速小于圆柱式风机,有利于减少水稻籽粒抛出机外,减少清选损失率。

为了对比交错式离心风机与传统圆柱式离心风机横向风速情况,在筛宽方向(Y 轴正方向)上,选取 3 个截面位置分别为 99、297、495 mm,结果如图 9 所示。

由图 9a、9d、9g、9c、9f、9i 可知,在筛面两侧(Y = 99 mm、Y = 495 mm)交错式风机横向风速变化为 0.54 ~ 2.22 m/s,而圆柱式风机横向风速变化为 0.54 ~ 1.95 m/s。交错式风机横向风速均值大于圆柱式风机,有助于将物料从筛面两侧向中间吹送,从而消减因物料在两边的堆积而导致的物料在筛面上两边多中间少的现象。由图 9b、9e、9h 可知,在筛面中间(Y = 297 mm)交错式风机横向风速最大达到了 3.14 m/s,沿筛长方向(X 轴正方向)上,图 9b、9e、9h 横向风速分别从极值 3.14 m/s 降低到 0.62 m/s、从极值 2.53 m/s 降低到 0.6 m/s、从极值 2.03 m/s 降低到 0.64 m/s,由于物料在筛面上存在前多后少的现象,其在筛面上物料分布由多到少,横向风速的变化实现了沿筛长方向(X 轴正方向)横向风速对物料的均匀吹送。

4　台架试验

4.1　试验材料与方法

为探明交错式离心风机分风板倾角、风机转速和叶片交错角度等结构参数和工作参数对工作性能(籽粒含杂率和清选损失率)的影响,在湖南农业大

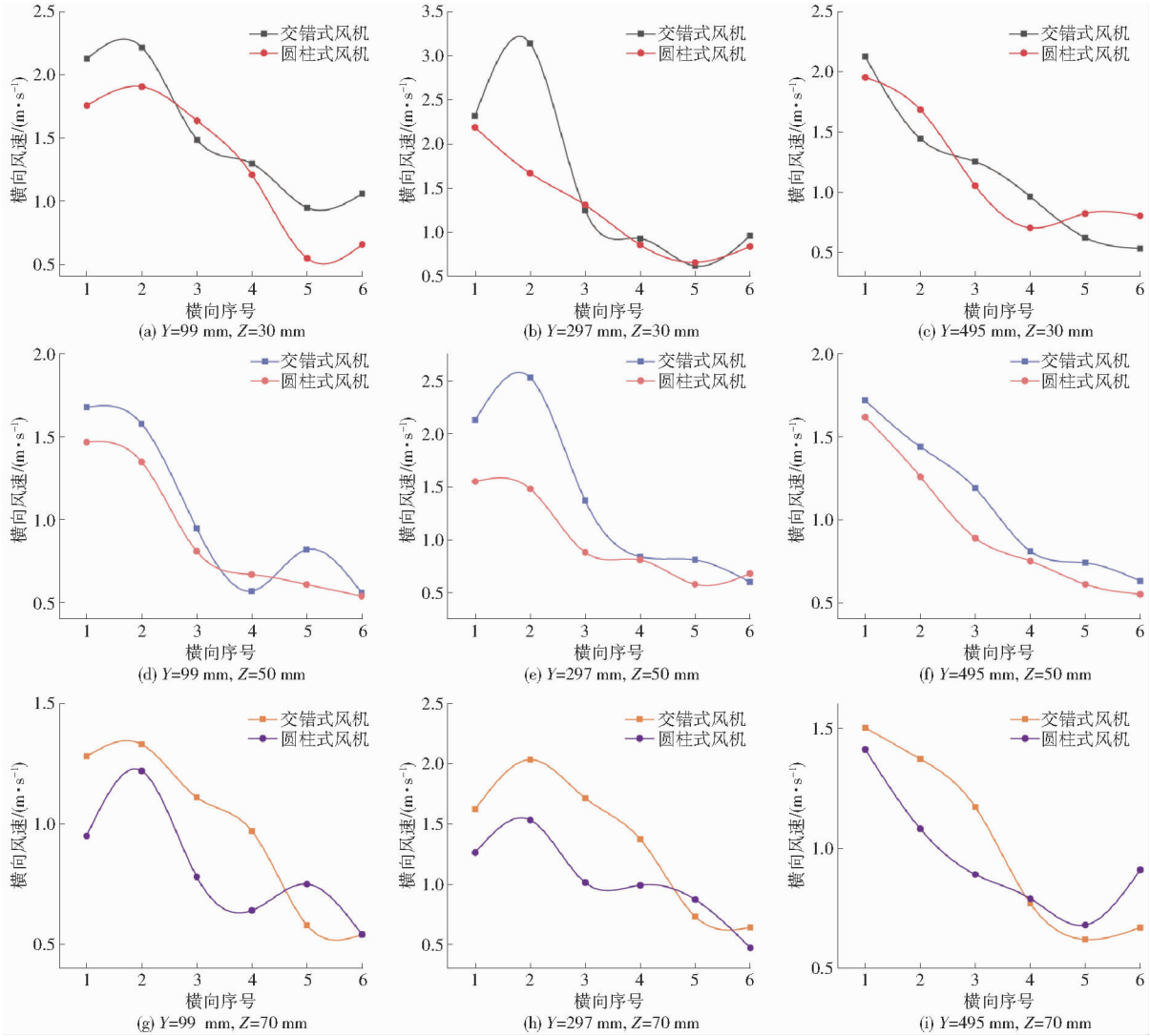


图 9 沿 Y 轴各截面横向风速变化曲线

Fig. 9 Lateral wind speed at each cross-section along the Y-axis

学农业机械化工程实训中心进行了试验，脱粒清选试验台主要由水稻输送带、清选室、风机、振动筛、脱粒系统组成，试验台如图 10 所示。



图 10 清选试验台

Fig. 10 Cleaning test bench

1. 水稻输送带 2. 清选室 3. 风机 4. 振动筛 5. 脱粒系统

试验采用三因素三水平设计方法进行台架试验。每次试验结束测定籽粒含杂率和清选损失率。试验水稻品种为“陵两优—268”，割茬高度 20 cm（人工收割），株高 105 cm，籽粒含水率 28% ~30%，茎秆含水率 48% ~52%，水稻产量为 9 750 kg/hm^2，草谷比 1.4。

4.2 单因素试验

根据前期试验和台架可调范围，确定各因素水平如表 3 所示。每组试验时固定风机转速、分风板倾角、叶片交错角度其中任意两个因素，研究其中单个因素变化时，籽粒含杂率和清选损失率的变化规律。单因素试验时，固定因素取值为：风机转速 1 200 r/min、分风板倾角 25°、叶片交错角度 25°。

表 3 单因素试验因素水平

Tab. 3 Factors and levels of single-factor experiment

水平	因素		
	风机转速/(r·min^{-1})	分风板倾角/(°)	叶片交错角度/(°)
1	900	25	5
2	1 000	30	15
3	1 100	35	25
4	1 200	40	35
5	1 300	45	45

每组试验重复 3 次，计算出籽粒含杂率和清选损失率的平均值，试验结果如图 11 所示。

由图 11a 可知，随着风机转速的不断增大，籽粒含杂率呈降低趋势，清选损失率呈上升趋势。这是由于转速不断增大，气流风速随之增大，轻杂质更易被排出机外，因此籽粒含杂率呈现降低趋势，而气流风速过大超过了籽粒的悬浮速度容易把籽粒吹出机外，清选损失率呈上升趋势。由图 11b 可知，随着分风板倾角的不断增大，籽粒含杂率和清选损失率波动较大。这是由于在分风板的导流作用下，随着分风板倾角的变化，气流作用在筛面上的位置发生变化。当分风板倾角为 40°时，籽粒含杂率和清选损失率为最低值。图 11c 可知，随着叶片交错角度的增大，籽粒含杂率呈降低趋势，清选损失率呈上升趋势，这是由于随着叶片交错角度的变化，产生的气流风速不同。

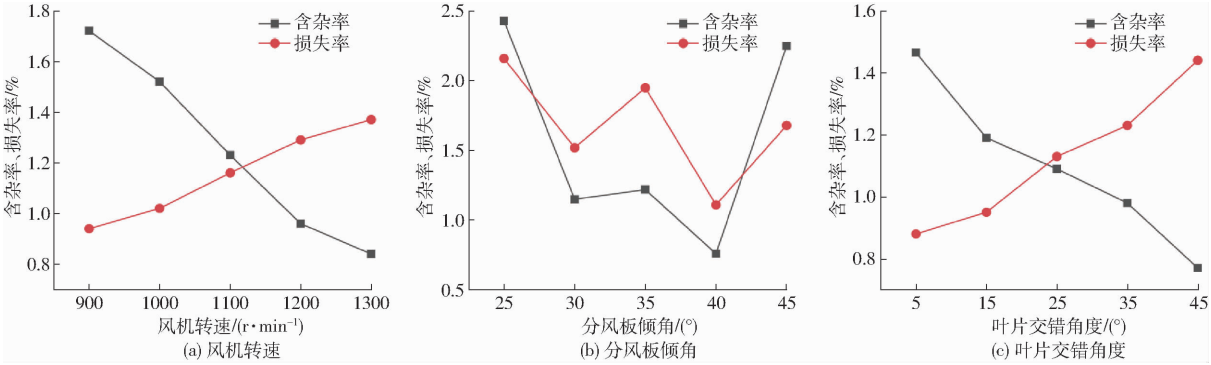


图 11　含杂率、损失率随各因素的变化规律

Fig. 11　Variation patterns of impurity content and loss rate with respect to various factors

4.3　响应曲面试验与结果分析

4.3.1　试验方案与结果

试验时计算出当喂入量为 3.0 kg/s 时，固定某一输送带速度，单位长度应铺放脱出物的质量，根据试验方案，调节风机转速、叶片交错角度与分风板倾角，观测风机转速、分风板倾角、叶片交错角度对工作性能（籽粒含杂率和清选损失率）的影响规律，根据理论分析和生产实际，确定每个试验因素的取值范围，试验因素编码如表 4 所示。

表 4　试验因素编码

Tab. 4　Experimental factors coding

编码	因素		
	风机转速 x_1/(r·min^{-1})	分风板倾角 x_2/(°)	叶片交错角度 x_3/(°)
-1	1 000	35	15
0	1 100	40	25
1	1 200	45	35

每个因素组合方案进行 3 次重复试验，测定籽粒含杂率和清选损失率，然后取其平均值并进行记录，其试验结果如表 5 所示，表中 X_1、X_2、X_3 为编码值。

利用 Design-Expert 13.0 软件对表 5 中的试验数据进行回归分析，得到风机转速、分风板倾角、叶片交错角度与工作性能（籽粒含杂率 Y_1 和清选损失率 Y_2）的函数关系为

$$Y_1 = 1.11 - 0.5581X_1 - 0.105X_2 - 0.500\,6X_3 - 0.05X_1X_2 + 0.153\,7X_1X_3 + 0.07X_2X_3 + 0.253\,4X_1^2 + 0.309\,6X_2^2 + 0.148\,4X_3^2 \quad (20)$$

表 5　响应面试验设计与结果

Tab. 5　Response surface experimental design and results　%

编号	因素			Y_1	Y_2
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	0	2.26	0.81
2	1	-1	0	1.20	1.20
3	-1	1	0	2.25	0.78
4	1	1	0	0.99	1.53
5	-1	0	-1	2.65	0.48
6	1	0	-1	1.27	1.05
7	-1	0	1	1.45	0.98
8	1	0	1	0.69	1.75
9	0	-1	-1	2.35	0.72
10	0	1	-1	1.90	0.76
11	0	-1	1	1.10	1.22
12	0	1	1	0.93	1.47
13	0	0	0	1.13	0.75
14	0	0	0	1.13	0.63
15	0	0	0	0.95	0.79
16	0	0	0	1.26	0.75
17	0	0	0	1.09	0.86

$$Y_2 = 0.756 + 0.31X_1 + 0.073\,8X_2 + 0.301\,3X_3 + 0.09X_1X_2 + 0.05X_1X_3 + 0.052\,5X_2X_3 + 0.173\,2X_1^2 + 0.150\,7X_2^2 + 0.135\,8X_3^2 \quad (21)$$

由表 6 可知，籽粒含杂率 Y_1 和清选损失率 Y_2 的 P 值均小于 0.01，说明两个回归模型极显著；其失拟项 P 值分别为 0.393 7、0.864 7，均大于 0.05，说明两个回归模型拟合程度高；其决定系数 R^2 分别为

0.982 9、0.983 2，表明 98.29% 以上的响应值均可以由这两个回归模型解释。因此，回归方程能够准确地对该装置的清选性能进行预测。

表 6 方差分析

Tab.6 Analysis of variance

方差来源	籽粒含杂率		清选损失率	
	F	*P*	*F*	*P*
模型	44.67	<0.000 1 **	45.47	<0.000 1 **
X_1	180.28	<0.000 1 **	163.35	<0.000 1 **
X_2	6.38	0.039 5 *	9.25	0.018 8 *
X_3	145.05	<0.000 1 **	154.26	<0.000 1 **
X_1X_2	0.723 4	0.423 2	6.88	0.034 2 *
X_1X_3	6.84	0.034 6 *	2.12	0.188 3
X_2X_3	1.42	0.272 6	2.34	0.169 7
X_1^2	19.56	0.003 1 **	26.85	0.001 3 **
X_2^2	29.2	0.001 **	20.33	0.002 8 **
X_3^2	6.71	0.036 *	16.49	0.004 8 **
失拟项	1.28	0.393 7	0.24	0.864 7

注：** 表示影响极显著（$P \leqslant 0.01$），* 表示影响显著（$0.01 < P \leqslant 0.05$）。

4.3.2 籽粒含杂率影响因素分析

根据表 6 对显著项进行响应曲面分析，结果如图 12 所示。由交互项 X_1X_3 可知，籽粒含杂率随风机转速增大而减小。这是由于风机转速提升增强了气流风速，提高了对脱出物的携带能力，从而将更多杂质排出机外，降低籽粒含杂率。籽粒含杂率随叶片交错角度的增加而降低，这是由于叶片交错角度的增大，叶轮左右两侧与中部区域的压强梯度发生变化，使得气流能高效地将脱出物中的杂质有效带出，降低籽粒含杂率。

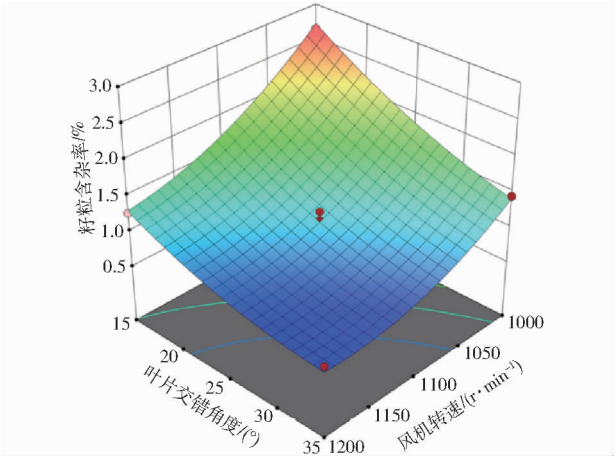


图 12 各显著影响因素对籽粒含杂率的响应曲面

Fig.12 Response surface of significant influencing factors of grain impurity rate

4.3.3 清选损失率影响因素分析

根据表 6 对显著项进行响应曲面分析，结果如图 13 所示。由交互项 X_1X_2 可知，清选损失率随风机转速增大而增大。这是由于风机转速提升导致清选室内的气流风速增大，缩短了籽粒的筛分时间，部分籽粒在清选室内未得到充分的筛分就被排出机外，清选损失率增大。清选损失率随着分风板倾角增大先减小后增大。这是由于当分风板倾角处于低水平或高水平时，气流在分风板的导流作用下易形成非理想流场，流场稳定性下降，使得部分未充分筛分籽粒更易排出机外，清选损失率增大。

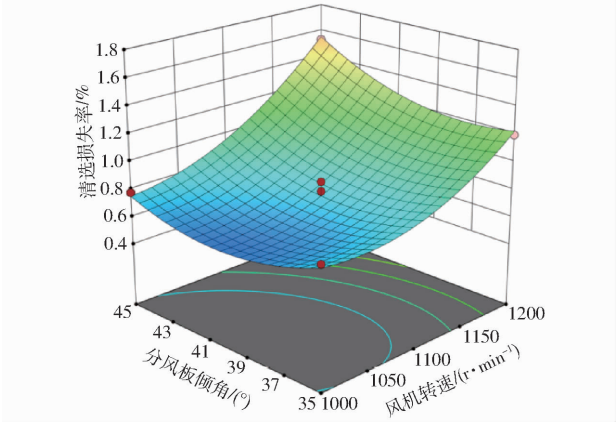


图 13 各显著影响因素对清选损失率的响应曲面

Fig.13 Response surface of significant influencing factors of cleaning loss rate

4.3.4 最佳参数拟合及验证

一般地，当籽粒含杂率和清选损失率均最低时，水稻联合收获机清选装置的工作质量最优。依据因素交互作用对籽粒含杂率和清选损失率的影响规律可得：为使籽粒含杂率较低，需较大风机转速、叶片交错角度；而为使清选损失率较低，需较小风机转速、叶片交错角度。由于过高的风机转速会产生强气流超过籽粒的悬浮速度，导致籽粒被吹出机外，造成清选损失。同时风机功耗随转速增大急剧增加，因此风机转速不能太大。为得到一组最佳的参数组合，设定约束条件

$$\begin{cases} \min Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} 1\,000\ \text{r/min} \leqslant x_1 \leqslant 1\,200\ \text{r/min} \\ 35° \leqslant x_2 \leqslant 45° \\ 15° \leqslant x_3 \leqslant 35° \end{cases} \end{cases} \tag{22}$$

运用 Design-Expert 13.0 对其进行优化，求得因素最佳参数组合：风机转速为 1 105.614 r/min，分风板倾角为 39.91°、叶片交错角度为 25.073°，此时籽粒含杂率为 1.08%，清选损失率为 0.774%。为便于实际工作时参数设定，将最佳参数取整为：风机转速 1 105 r/min，分风板倾角 40°、叶片交错角度 25°。

为验证以上优化结果的准确性，水稻生物学特性、试验方法都与台架试验相同，将优化后的参数应用于试验台架进行验证，重复 3 次并取平均值，测得

籽粒含杂率和清选损失率分别为 0.96%、0.78%。

5　田间试验

为验证优化后的清选参数在联合收获机田间机收作业中的作业效果，将台架试验获得的优化参数组合（风机转速 1 105 r/min、分风板倾角为 40°、叶片交错角度为 25°）应用于 4LZ－3.0Z 型水稻籽粒联合收获机上进行田间试验。试验于 2025 年 7 月 6 日，在湖南省浏阳市沙市镇映昌农机合作社的田地内开展，试验收获的水稻品种为“陵两优—268”，收获期植株自然高度 88 cm，千粒质量 42 g，籽粒含水率约 29.63%，茎秆含水率约 82.07%，草谷比 1.45，水稻产量为 8 505 kg/hm^2。

试验以籽粒含杂率、清选损失率为作业指标，为了避免外界因素对试验结果产生影响，选取土地平整、水稻植株长势均匀的田块作为试验田，并且参照 NY/T 995—2025《谷物联合收获机械作业质量》以及田间实际条件进行测试，试验前，在排杂口和清选口处捆绑油布，收集夹带损失籽粒、清选损失籽粒和未脱净籽粒，每组试验行进距离为 20 m，保持机器行走速度为 0.85 m/s，确保喂入量达到 3.0 kg/s，进行 3 组重复试验，同时从粮仓中随机取样 5 次，每次为 2 000 g，充分混合后抽取含杂样本 5 份，每份 1 000 g，将样本中杂余进行称量，计算籽粒含杂率并取平均值，将油布收集的损失籽粒、粮箱中的籽粒进行称量，计算清选损失率并取平均值，测得籽粒含杂率为 0.65%，清选损失率为 0.96%。

表 7 中第 1 组为圆柱式风机田间试验结果，第 2 组为台架验证试验结果，第 3 组为交错式风机优化参数组合田间试验结果。

交错式风机优化参数组合田间试验与台架验证试验测得籽粒含杂率为 0.65%、0.96%，清选损失率为 0.96%、0.78%，田间试验中茎秆含水率较高，使其在脱粒过程中易被撕裂成较大的片、段状，因而清选过程中细小杂余减少，含杂率降低。茎秆含水率升高，物料的黏结度增大，对水稻籽粒的携带作用增强，在清选过程中水稻籽粒被杂余裹挟着抛出机外，清选损失率增大。圆柱式风机及参数田间试验的籽粒含杂率、清选损失率均大于台架验证试验、交错式风机优化参数组合田间试验，证明采用交错式离心风机在优化参数组合下可以提高清选性能，降低籽粒含杂率和清选损失率。

表 7　不同试验组对比

Tab.7　Comparison between different experimental groups

编号	风机转速/（r·min^{-1}）	分风板倾角/（°）	叶片交错角度/（°）	籽粒含杂率/%	清选损失率/%
1	1 200	25	无	1.22	1.19
2	1 105	40	25	0.96	0.78
3	1 105	40	25	0.65	0.96

6　结论

（1）离心风机的叶片产生交错角度时，会形成横向风，且叶片的交错角度与产生的横向风存在着非线性函数关系，通过数值模拟方法得出了动压差并计算了横向风速。

（2）研究分析了交错式离心风机清选装置籽粒含杂率、清选损失率随相关参数变化规律，得出风机转速较优的作业范围为 1 000～1 200 r/min；分风板倾角较优的作业范围为 35°～45°；叶片交错角度较优的作业范围为 15°～35°。

（3）响应曲面试验表明，最佳参数组合为：风机转速 1 105.614 r/min、分风板倾角 39.91°、叶片交错角度 25.073°，此时籽粒含杂率为 1.08%，清选损失率为 0.774%。满足相关标准（NY/T 498—2013）要求，且优于传统圆柱式风机机型清选性能。

参　考　文　献

[1]　王立军，宋良来，冯鑫，等. 谷物联合收获机筛分装置研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报，2021，52(6)：1－17.
WANG Lijun, SONG Lianglai, FENG Xin, et al. Research status and development analysis of screening devices of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 1－17. (in Chinese)

[2]　徐立章，李洋，李耀明，等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J]. 农业机械学报，2019，50(10)：1－16.
XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1－16. (in Chinese)

[3]　宁新杰，金诚谦，印祥，等. 谷物联合收割机风筛式清选装置研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报，2018，39(9)：5－10.
NING Xinjie, JIN Chengqian, YIN Xiang, et al. Research status and development trend of air-and-screen cleaning device for cereal combine harvesters[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(9): 5－10. (in Chinese)

[4]　刘鹏，金诚谦，刘政，等. 大豆联合收获机田间清选作业参数优化[J]. 农业工程学报，2020，36(10)：35－45.
LIU Peng, JIN Chengqian, LIU Zheng, et al. Optimization of field cleaning parameters of soybean combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 35－45. (in Chinese)

[5]　陈霓，田立权，张正中，等. 半喂入联合收获机双圆锥离心式清选风机设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(12)：

193 – 202.
CHEN Ni, TIAN Liquan, ZHANG Zhengzhong, et al. Design and experiment on double conical centrifugal cleaning fan of head-feed combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 193 – 202. (in Chinese)

[6] 王长宁,宁学贵,王潮璐.联合收获机双风道人字变斜式叶轮横流风扇[J].农业机械学报,2013,44(增刊2):17 – 21.
WANG Changning, NING Xuegui, WANG Chaolu, et al. Design and test of combine harvester cross-flow fan with double channels and herringbone variable inclined impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2): 17 – 21. (in Chinese)

[7] 周水清,王曼,李哲宇,等.多翼离心风机蜗壳改型设计与性能试验[J].农业机械学报,2018,49(10):180 – 186,249.
ZHOU Shuiqing, WANG Man, LI Zheyu, et al. Influence of volute retrofit design on performance of multi-blade centrifugal fan [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 180 – 186,249. (in Chinese)

[8] 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].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 on longitudinal axial flow cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 135 – 142. (in Chinese)

[9] 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].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 79 – 84. (in Chinese)

[10] LI Y, XU L, ZHOU Y, et al. Effects of throughput and operating parameters on cleaning performance in air-and-screen cleaning unit: a computational and experimental study[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 141 – 148.

[11] GEBREHIWOT M G, DE BAERDEMAEKER J, BAELMANS M. 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.

[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].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 in centrifugal fan with double outlet and multi-duct[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 78 – 86. (in Chinese)

[13] LIANG Z, LI Y, DE BAERDEMAEKER J, et al. Development and testing of a multi-duct cleaning device for tangential-longitudinal flow rice combine harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2019, 182: 95 – 106.

[14] ZHANG C, GENG D, XU H, et al. Experimental study on the influence of working parameters of centrifugal fan on airflow field in cleaning room[J]. Agriculture, 2023, 13(7): 1368.

[15] 郭红星,金诚谦,印祥,等.谷物联合收获机清选系统研究现状[J].中国农机化学报,2020,41(6):26 – 36.
GUO Hongxing, JIN Chengqian, YIN Xiang, et al. Research status of the cleaning system of the corn combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(6): 26 – 36. (in Chinese)

[16] 侯华铭,崔清亮,陈益胜,等.谷子收获机风筛式清选装置试验[J].农业工程,2022,12(8):93 – 98.
HOU Huaming, CUI Qingliang, CHEN Yisheng, et al. Experiment on air and screen cleaning device of foxtail millet combine harvester[J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(8): 93 – 98. (in Chinese)

[17] LI D, HE Q, YUE D, et al. Research and experiment on airflow field control technology of harvester cleaning system based on load distribution[J]. Agriculture, 2024, 14(5): 779.

[18] LIANG Z, XU L, DE BAERDEMAEKER J, et al. Optimisation of a multi-duct cleaning device for rice combine harvesters utilising CFD and experiments[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190: 25 – 40.

[19] 吴守一.农业机械学下册[M].北京:中国农业机械出版社,1987.

[20] 杨伦,谢一华.气力输送工程[M].北京:机械工业出版社,2006.

[21] 李奇,谢方平,康家鑫,等.4LZ – 4.0 大豆联合收割机清选装置参数优化及脱出物分布试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2022,48(6):737 – 743.
LI Qi, XIE Fangping, KANG Jiaxin, et al. Parameter optimization and experiment on post-threshed mixture for the cleaning device in 4LZ – 4.0 combine harvester of soybean[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2022, 48(6): 737 – 743. (in Chinese)

[22] 冷峻,栗晓宇,杜岳峰,等.单纵轴流谷物联合收获机清选装置内部流场分析与优化[J].农业工程学报,2020,36(11): 39 – 48.
LENG Jun, LI Xiaoyu, DU Yuefeng, et al. Analysis and optimization of internal flow field of cleaning device of single longtitudinal axial flow grain combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(11): 39 – 48. (in Chinese)

[23] 汤楚宙.水稻联合收割机原理与设计[M].长沙:湖南科学技术出版社,2002.

[24] 成大先.机械设计手册第 1 卷[M].北京:化学工业出版社,2016.

(下转第 263 页)

[24] WANG J, FEI Y, PANG W. Design, modeling, and testing of a soft pneumatic glove with segmented pneunets bending actuators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(3): 990 – 1001.

[25] FENG N, SHI Q, WANG H, et al. A soft robotic hand: design, analysis, sEMG control, and experiment[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1): 319 – 333.

[26] 朱姿娜,张宇鹏,曾阳浩,等. 一种基于蜂巢结构的颗粒阻塞变刚度软体手指[J]. 机器人,2024,46(6):652 – 662.
ZHU Zina, ZHANG Yupeng, ZENG Yanghao, et al. A variable-stiffness soft finger based on particle jamming with honeycomb structure[J]. Robot, 2024, 46(6): 652 – 662. (in Chinese)

[27] YANG X, ZHANG N, HUANG X, et al. Multidirectional bending soft pneumatic actuator with fishbone-like strain-limiting layer for dexterous manipulation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(4): 3815 – 3822.

[28] LI L, XIE F, WANG T, et al. Stiffness-tunable soft gripper with soft-rigid hybrid actuation for versatile manipulations[J]. Soft Robotics, 2022, 9(6): 1108 – 1119.

[29] YOSHIDA K, TSUKAMOTO N, KIM J, et al. A study on a soft microgripper using MEMS-based divided electrode type flexible electro-rheological valves[J]. Mechatronics, 2015, 29: 103 – 109.

[30] TONAZZINI A, SADEGHI A, MAZZOLAI B. Electrorheological valves for flexible fluidic actuators[J]. Soft Robotics, 2016, 3(1): 34 – 41.

[31] HUANG T, XU D, ZHANG H, et al. A lightweight flexible semi-cylindrical valve for seamless integration in soft robots based on the giant electrorheological fluid[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 347: 113905.

[32] 魏宸官. 电流变技术—机理·材料·工程应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2000.

[33] ZATOPA A, WALKER S, MENGUE Y. Fully soft 3D-printed electroactive fluidic valve for soft hydraulic robots[J]. Soft Robotics, 2018, 5(3): 258 – 271.

[34] 董虎,王保兴,李巍,等. 基于单向气动驱动器的软体手变形机理[J]. 东华大学学报(自然科学版),2020,46(2):288 – 296.
DONG Hu, WANG Baoxing, LI Wei, et al. The deformation mechanism of soft hand based on one-way pneumatic actuator[J]. Journal of Donghua University (Natural Sciece), 2020, 46(2): 288 – 296. (in Chinese)

(上接第 238 页)

[25] 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)

[26] 兰纪正,朱恩宽. 欧几里得几何原本第 2 版[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2003.

[27] 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)

[28] 康家鑫,王修善,谢方平,等. 多作物联合收获机独立调节式凹板筛设计与试验[J]. 农业工程学报,2025,41(3):11 – 21.
KANG Jiaxin, WANG Xiushan, XIE Fangping, et al. Design and test of the independently-adjustable concave plate screen for a multi-crop combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(3): 11 – 21. (in Chinese)

[29] 周璇,王志明,陈霓,等. 圆锥形风机清选室气流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(3):91 – 100.
ZHOU Xuan, WANG Zhiming, CHEN Ni, et al. Numerical simulation and experiment of airflow field of cleaning room under action of conical fan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 91 – 100. (in Chinese)