

油菜收获清选筛面物料匀散导流装置设计与试验

江 涛 李海同 关卓怀 沐森林 吴崇友 张 敏
(农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 针对长江流域油菜主产区普遍使用的履带式油菜联合收获机进行高密高产油菜收获时清选筛面脱出物易堆积,影响油菜籽粒透筛,导致清选损失率高和作业效率低的问题,通过分析清选过程中物料抛散运动规律,设计了筛面物料匀散导流装置,确定了影响清选系统作业性能的装置关键结构与作业参数。构建了清选系统 CFD-DEM 耦合仿真分析模型,采用二次回归正交组合试验方法,探究了导流杆摆动频率、导流杆转速、驱动关节滑槽倾角对清选损失率、清选含杂率的影响,确定了最优参数组合。仿真试验结果表明,各因素对损失率和含杂率均具有显著影响,其中以导流杆摆动频率影响最显著,最优参数组合为导流杆摆动频率 12.5 Hz、导流杆转速 120 r/min、滑槽倾角 20°。基于优化后的参数进行台架试验,结果表明,在相同的大喂入量条件下,增设筛面匀散导流装置后清选损失率为 3.97%,含杂率 3.71%,对比原清选系统损失率降低 49.8%,含杂率降低 34.7%,能够满足高密高产油菜的低损高效清选作业要求。

关键词: 油菜; 收获; 清选; 振动筛; 匀散导流; 离散元

中图分类号: S225.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)01-0146-13 OSID: 

Design and Experiments of Material Uniform Dispersion and Diversion Device on Cleaning Screen Surface for Oilseed Harvesting

JIANG Tao LI Haitong GUAN Zhuohuai MU Senlin WU Chongyou ZHANG Min
(Nanjing Institute of Agriculture Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: To solve the problem that the threshed outputs on the sieve surface of the crawler-type rape combine harvester commonly used in the main oilseed rape producing areas in the Yangtze River basin is prone to accumulation and stagnation when harvesting high-density and high-yield rape, which affects the penetration of oilseeds through the sieve and leads to a high loss rate and low operating efficiency, an uniform dispersion diversion device for material movement on the sieve surface was designed by analyzing the material dispersion movement law during the cleaning process, and the key operating and structural parameters of the device that affect the operating performance of the cleaning system were determined. Based on the coupling method of CFD-DEM, a quadratic regression orthogonal combination test method was used to carry out parameter combination simulation optimization test with oscillation frequency of diversion rod, rotation speed of diversion rod and drive joint chute inclination angle as test factors, and cleaning loss rate and cleaning impurity rate as performance evaluation indexes. The results showed that each factor had a significant effect on the performance evaluation index, among which the most significant effect was on the oscillation frequency of diversion rod. The optimal combination of parameters was oscillation frequency as 12.5 Hz, rotation speed as 120 r/min, and chute inclination angle as 20°. Based on the optimized parameters, the results of the bench test showed that under the same high feeding condition, the cleaning loss rate after the configuration of the device was 3.97%, which was 49.8% lower than that of the original cleaning system, and the impurity rate was 3.71%, which was 34.7% lower. The results showed that the optimal cleaning system could meet the requirements of the crawler

收稿日期: 2022-07-14 修回日期: 2022-10-16

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程重大科研任务项目(CAAS-ZDRW202105)、国家重点研发计划项目(2021YFD2000502)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(S202102-02、S202102-01)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-12)

作者简介: 江涛(1988—),男,助理研究员,主要从事农作物收获技术装备研究,E-mail: justod_cr7@163.com

通信作者: 张敏(1979—),男,研究员,主要从事农作物种植及收获技术装备研究,E-mail: zhangmin01@caas.cn

combine harvester for the low-loss and high-efficiency cleaning operation of high-density and high-yield rape. The research results can provide reference for the design and improvement of cleaning system for oilseed harvesting.

Key words: oilseed; harvesting; cleaning; vibrating screen; uniform dispersion diversion; discrete element

0 引言

联合收获机清选系统作业性能对油菜收获质量具有至关重要的作用^[1-4],国内外油菜联合收获机普遍采用风筛式清选系统^[5-9]。油菜植株经脱粒滚筒作用后,脱出物料落至清选筛面,受到气流与振动筛的共同作用,脱出物在筛面的分布及运动状态对清选损失和作业效率具有显著影响。

随着油菜育种和栽培技术的发展,为了追求更高产量,我国长江流域冬油菜种植密度持续增大^[10],由以前的 30 万株/hm² 左右提高到目前的 45~52.5 万株/hm²,收获期油菜生物量显著提高,喂入量以及脱粒滚筒脱出物量增加明显,现阶段所普遍使用的履带式油菜联合收获主力机型清选处理能力不足,导致清选损失率大幅增高,无法满足高密高产油菜的收获需求,已成为亟待解决的产业关键问题。

欧美等油菜主产国普遍使用大型轮式联合收获机进行作业,机具成熟,作业性能高,且由于清选室空间大,可配置多层抖动板以及多层振动筛,能够有效提升清选筛分面积,可对物料进行多层次的精细筛分^[11-12]。但是我国长江流域常用的履带式联合收获机因为机体空间小,结构紧凑,通过增加振动筛层数达到减损的方法并不适用。

国内学者针对联合收获机清选系统的减损研究主要集中于作业参数优化,张敏等^[13]进行了 Plackett-Burman 试验和响应面回归试验,分析了影响风筛选式联合收获机清选损失率和籽粒含杂率的主要因素为振动筛振幅和曲柄转速。WANG 等^[14]为了降低收获清选损失,通过仿真模拟分析了不同筛孔形式对籽粒透筛概率的影响规律。刘鹏等^[15-16]、仇解^[17]通过设计联合收获机清选系统作业参数自适应调控系统并进行了清选参数优化田间试验,在一定程度上降低了清选损失率与含杂率。耿端阳等^[18]为解决清选损失率和含杂率“双高”问题,探究了清选装置作业参数对清选损失率和籽粒含杂率的影响规律,确定了清选作业参数的最优组合。针对高密高产油菜联合收获清选系统结构优化改进的研究尚未见报道。

通过本研究团队前期田间试验发现,收获高密

高产油菜时,由于割台喂入生物量增加,清选筛面处理能力不足,滚筒脱出物会在筛面产生层叠和堆积,上层物料因无法及时透筛而被直接排出机外,造成清选损失率大幅度上升。通过调节清选作业参数仍然无法有效解决筛面物料堆积导致的籽粒难以透筛的问题,仅依靠气流与振动筛对物料的作用难以提高油菜籽粒与其他杂物的分离作用,无法有效降低清选损失率。

振动筛是风筛式清选系统的关键核心部件^[19],振动筛面物料群体运动可以视为局部无序而整体有序、局部不稳定而整体稳定的流动状态^[20],脱出物料与振动筛面碰撞后被抛起,上升过程中物料群体在自身重力作用下松散、分层和下落,与筛面接触后完成与筛孔的尺寸比较和透筛。当脱出物量增加后,物料在短暂抛起过程中的分层作用减弱,上层物料积压阻碍了物料的分层与松散,进而影响籽粒透筛。因此当脱出物量增加后,为了提高籽粒的透筛几率,需要提高物料群体的分层速度,使其快速达到松散状态,关键在于加强物料群体在局部区域的无序运动,增加物料群体间的无规则碰撞次数,提高物料的离散程度。

基于上述问题和解决思路,本文通过设计清选筛面物料匀散导流装置,对筛面物料流的运动进行及时干预,防止物料堆积,提升籽粒与其他杂质的离散程度,提高籽粒透筛概率,从而提升清选系统的处理能力,提高作业性能,以期为解决履带式油菜联合收获机适应高密高产油菜收获难题,获得低损高效作业效果提供技术参考。

1 清选系统匀散导流装置结构设计

1.1 清选系统整体结构及作业原理

通用型履带式油菜收获机清选系统结构如图 1 所示,清选气流由六叶片离心风机提供,振动筛前端为波纹式抖动板,振动筛为双层式结构,上筛采用鱼鳞筛,下筛采用编织筛,抖动板和上下筛通过筛架尾部的曲柄摇杆机构实现往复运动。物料经过脱粒滚筒后散落在抖动板和鱼鳞筛面,脱出物中的油菜籽粒通过筛面落入输粮螺旋输送机并被输送至粮箱中,小部分物料落入筛尾下方的二次清选螺旋输送机并被输送回脱粒、清选系统进行二次作业。如前

文所述,为了提高籽粒透筛几率,需要通过外部作用来增加物料的松散度,以星光至胜 100 型油菜联合收获机清选系统为参考,在抖动板后部、振动筛上方增设两组匀散导流装置,如图 1 所示。

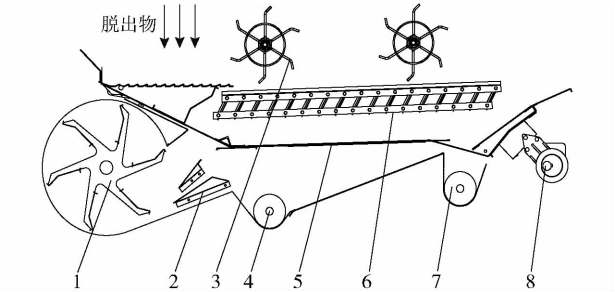


图 1 带有匀散导流装置的清选系统结构示意图
Fig.1 Schematic of structure of cleaning system with uniform dispersion diversion device

1. 风机 2. 导风板 3. 匀散导流装置 4. 输粮螺旋输送机 5. 编织筛 6. 鱼鳞筛 7. 二次清选螺旋输送机 8. 振动筛驱动臂

物料在经过滚筒脱粒分离后进入清选系统,脱出物在振动筛的作用下产生向上的抛掷运动。匀散导流装置的导流杆作空间复合运动,对物料运动进行干预和引导,增加物料间的碰撞,提高物料松散度和均匀性,减小筛分压力,提高籽粒透筛几率,作业过程示意如图 2 所示。

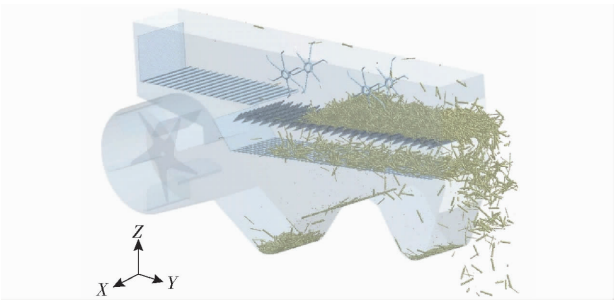


图 2 清选系统作业过程示意图
Fig.2 Schematic of process of cleaning system

1.2 匀散导流装置运动分析及结构设计

1.2.1 运动分析

匀散导流装置主要由导流杆、驱动关节、主轴、主轴驱动轮、滚筒以及滚筒驱动轮组成,结构如图 3 所示。导流杆在空间中的运动为绕 Y 轴往复摆动和绕 X 轴匀速转动的复合运动,同步实现对脱出物料群体的匀散、导流和推送:在筛面横向方向上绕 Y 轴往复摆动形成对脱出物料群体运动的匀散导流,绕 X 轴匀速转动形成对筛面物料群体的纵向推送。

如图 3 所示,主轴驱动轮以恒定角速度在 YOZ 平面内绕 X 轴旋转,带动驱动关节以相同的角速度匀速旋转,通过驱动关节上的滑槽与滚子接触作用,导流杆仅在 XOZ 平面内做往复摆动而并不会产生旋转。同时,滚筒独立于主轴绕 X 轴匀速转动,筒

壁与导流杆接触作用,带动导流杆以相同的角速度绕 X 轴转动。

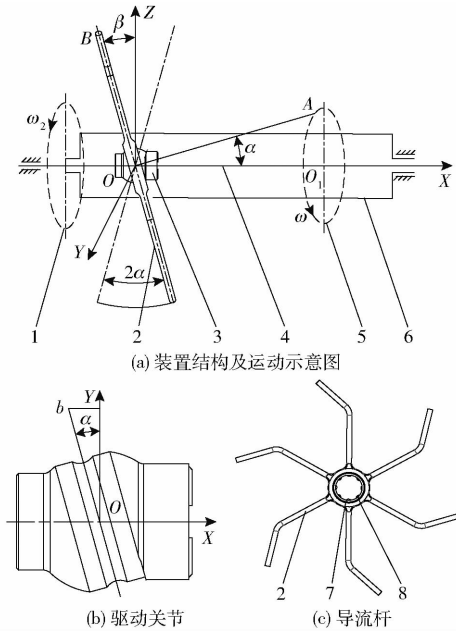


图 3 匀散导流装置结构及运动示意图
Fig.3 Schematics of device structure and movement

1. 滚筒驱动轮 2. 导流杆 3. 驱动关节 4. 旋转主轴 5. 主轴驱动轮 6. 滚筒 7. 保持架 8. 滚子

当主轴驱动轮转过一定角度后,根据几何关系有

$$\begin{bmatrix} L_{OA} \\ L_{OB} \\ O \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{OA} \cos \alpha & L_{OA} \sin \alpha \sin(\omega t) & L_{OA} \sin \alpha \cos(\omega t) \\ -L_{OB} \sin \beta & 0 & L_{OB} \cos \beta \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 ω ——主轴驱动轮角速度,rad/s
 α ——驱动关节滑槽倾角,(°)
 L_{OA} ——主轴驱动轮外圆到点 O 距离,mm
 L_{OB} ——导流杆顶端到点 O 距离(导流杆回转半径),mm
 β ——导流杆摆动角,(°)
 O ——零向量
 t ——主轴驱动轮转动时间,s
 $i、j、k$ ——X、Y、Z 轴方向上的单位向量
根据摆环运动特性,始终有向量 L_{OB} 垂直于向量 L_{OA} ,则

$$L_{OB} L_{OA} = 0 \quad (2)$$

联立式(1)和式(2)可得

$$\tan \beta = \tan \alpha \cos(\omega t) \quad (3)$$

导流杆顶端在 X 轴向的移动距离为

$$x = L_{OB} \sin \beta \quad (4)$$

式中 x ——导流杆顶端在 X 轴向移动距离,mm
将式(3)代入式(4)可得

$$x = L_{OB} \frac{\tan \alpha \cos(\omega t)}{(1 + \tan^2 \alpha \cos^2(\omega t))^{1/2}} \quad (5)$$

则导流杆顶端在 X 轴方向的速度和加速度分别为

$$v_x = L_{OB} \omega \tan \alpha \frac{\sin(\omega t)}{(1 + \tan^2 \alpha \cos^2(\omega t))^{3/2}} \quad (6)$$

$$a_x = L_{OB} \omega^2 \tan \alpha \cos(\omega t) \frac{1 + 3 \tan^2 \alpha - 2 \tan^2 \alpha \cos^2(\omega t)}{(1 + \tan^2 \alpha \cos^2(\omega t))^{5/2}} \quad (7)$$

式中 v_x ——导流杆顶端在 X 轴向移动速度, mm/s

a_x ——导流杆顶端在 X 轴向加速度, mm/s²

此外, 导流杆在滚筒带动下在 YOZ 平面内作圆周运动, 则

$$\begin{cases} z = L_{OB} \sin(\omega_2 t) \\ y = L_{OB} \cos(\omega_2 t) \end{cases} \quad (8)$$

式中 z ——导流杆顶端在 Z 轴向移动距离, mm

y ——导流杆顶端在 Y 轴向移动距离, mm

ω_2 ——滚筒转动角速度, rad/s

则导流杆顶端在 YOZ 平面内的速度和加速度分别为

$$\begin{cases} v_z = L_{OB} \omega_2 \cos(\omega_2 t) \\ v_y = -L_{OB} \omega_2 \sin(\omega_2 t) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} a_z = -L_{OB} \omega_2^2 \sin(\omega_2 t) \\ a_y = -L_{OB} \omega_2^2 \cos(\omega_2 t) \end{cases} \quad (10)$$

式中 v_z ——导流杆顶端在 Z 轴向移动速度, mm/s

v_y ——导流杆顶端在 Y 轴向移动速度, mm/s

a_z ——导流杆顶端在 Z 轴向向心加速度, mm/s²

a_y ——导流杆顶端在 Y 轴向向心加速度, mm/s²

由上述分析可以看出, 导流杆的往复摆动和圆周运动主要受导流杆回转半径 L_{OB} 、驱动关节滑槽倾角 α 、主动轴驱动轮角速度 ω 以及滚筒角速度 ω_2 的影响。为方便表述和后续仿真设置, 转换主动轴驱动轮角速度 ω 为导流杆顶端摆动频率

$$f = \frac{\omega}{\pi} \quad (11)$$

式中 f ——导流杆顶端往复摆动频率, Hz

转换滚筒角速度 ω_2 为导流杆转速

$$n_2 = \frac{30 \omega_2}{\pi} \quad (12)$$

式中 n_2 ——导流杆转速, r/min

1.2.2 结构设计

为保证导流杆摆动极限位置在筛面内, 驱动关节中心点 O 到筛面侧边距离为

$$D \geq L_{OB} \sin \alpha \quad (13)$$

式中 D ——驱动关节中心到筛面侧边距离, mm

为保证相邻导流杆在 X 轴方向不会相互干涉,

中心距为

$$L \geq 2 L_{OB} \sin \alpha \quad (14)$$

式中 L ——相邻驱动关节中心距, mm

设振动筛面宽度为 b , 则筛面宽度方向上可配置的导流装置个数满足

$$2D + (q - 1)L \leq b \quad (15)$$

即
$$q \leq \frac{B}{2L_{OB} \sin \alpha} \quad (16)$$

式中 q ——振动筛面宽度方向导流杆个数

通过测量参考机型清选室尺寸, 确定脱粒滚筒最低点到上筛面的距离为 260 mm, 综合考虑振动筛振幅以及物料群体运动过程中离开筛面的高度, 设计导流杆转动中心到端部距离 $L_{OB} = 100$ mm。考虑传动时的稳定性以及振动, 并参考联合收获机割刀摆环机构倾角最佳范围^[21], 设计驱动关节滑槽倾角不超过 30°。根据筛面宽度 760 mm, 设计筛面宽度方向导流杆个数为 7 个。

油菜脱出物在离开抖动板后在水平方向上移动距离为 90 ~ 110 mm^[22], 因此为了不影响物料在离开抖动板后的运动, 设计第 1 组导流杆转动中心到抖动板端部的距离为 160 mm, 由于筛分物料量沿着筛面长度方向递减, 此外若第 2 组导流杆过于靠近筛尾, 会降低作用效果, 因此设计两组导流杆中心距离为 400 mm, 具体尺寸如图 4 所示。

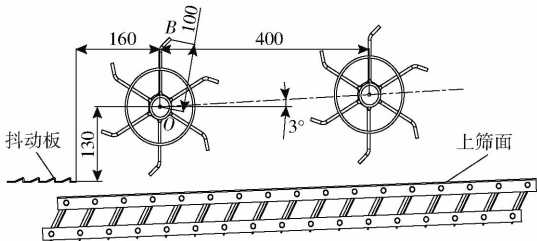


图 4 装置位置示意图

Fig.4 Schematic of device position

2 仿真模型与参数设置

2.1 清选系统及匀散导流装置模型

根据前文设计在 SolidWorks 软件中建立清选系统以及匀散导流装置三维模型, 其中鱼鳞筛开度为 40°, 编织筛孔尺寸为 10 mm × 10 mm, 筛面倾角为 3°, 筛面长度为 850 mm。在运用离散元方法探究谷物振动筛分的仿真研究中, 常采用减小筛面宽度的方法来降低计算量^[7, 23-24]。本文研究目的为探究匀散导流装置对筛面物料的疏松和分层作用对清选性能的影响, 由于振动筛作业时没有横向位移, 且其结构在宽度方向上对称, 筛面宽度对筛上物料的运动规律几乎没有影响, 因此综合考虑, 将筛面宽度设为 200 mm。在 ANSYS Workbench 软件的 Meshing

模块中采用四面体非结构网格法对三维模型进行网格划分^[25-26],设置网格最小单元尺寸为 2 mm,对鱼鳞筛面进行网格加密,共生成 28 241 332 个网格,平均质量 0.84,网格结构如图 5 所示。

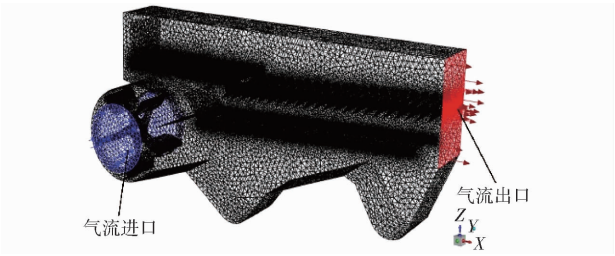


图 5 清选系统网格模型

Fig. 5 Grid model of cleaning system

2.2 颗粒离散元模型

油菜收获滚筒脱出物主要可分为 3 类:油菜籽粒、角果壳和茎秆,如图 6 所示。根据实际外形尺寸建立离散元模型。油菜籽粒平均直径为 2 mm,千粒质量 4.2 g;茎秆平均长度 50 mm,直径 6 mm;角果壳平均长度 45 mm,近似宽度与厚度为 3 mm。

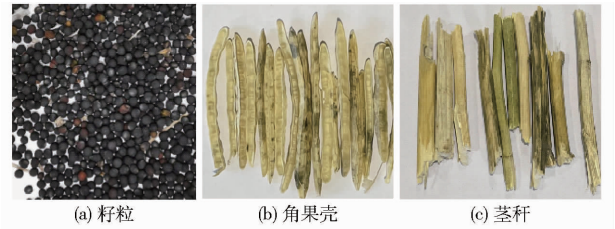


图 6 油菜脱出物组成

Fig. 6 Threshed outputs composition

各材料力学特性参数及相互间接触作用系数如表 1、2 所示^[27-28]。

表 1 物料力学特性参数

Tab. 1 Mechanical properties of materials

参数	籽粒	角果壳	茎秆	筛面
泊松比	0.25	0.4	0.4	0.3
剪切模量/MPa	1.1	0.2	0.75	7 000
密度/(kg·m ⁻³)	1 060	110	240	7 850

表 2 各材料间接触系数

Tab. 2 Contact coefficient between materials

材料	碰撞恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
籽粒-籽粒	0.3	0.4	0.01
籽粒-角果壳	0.1	0.6	0.01
籽粒-茎秆	0.1	0.5	0.01
籽粒-筛面	0.3	0.3	0.01
角果壳-角果壳	0.1	0.4	0.01
角果壳-茎秆	0.1	0.4	0.01
角果壳-筛面	0.1	0.6	0.01
茎秆-茎秆	0.3	0.4	0.01
茎秆-筛面	0.3	0.5	0.01

2.3 仿真参数设置

EDEM 软件中的基础接触模型采用 Hertz - Mindlin 无滑动模型,为了避免宽度缩减造成振动筛两侧壁面对物料运动的影响,将计算区域的 X 轴方向设为周期边界条件,即当有颗粒离开一侧壁面的计算区域时,会从另一侧壁面进入计算区域。该机型正常作业时振动筛频率为 6 Hz,振幅 21 mm,振动方向角 30°。设定 EDEM 中时间步长是 Rayleigh 步长的 25%。在 Fluent 中选择标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,求解器类型选定为压力基非稳态,风机转速为 950 r/min,时间步长为 EDEM 中的 50 倍。

根据前期田间试验结果,该机型以正常作业速度收获高密高产油菜时,进入割台螺旋输送器的油菜植株生物量约为 7 kg/s,其中进入清选系统的脱出物质量约占 41%,脱出物各成分质量分数为籽粒 43%、角果壳 22%、茎秆 31%、其他杂余 4%,设定 EDEM 中的颗粒工厂连续生成脱出物总时间为 4 s。为避免表述歧义,文中的喂入量均指由脱粒滚筒进入清选系统的脱出物质量。

在 EDEM 中设置 4 个统计区域,如图 7 所示。其中籽粒透筛统计区域位于编织筛下方,划分为 50 × 10 个子区域,分别对应于编织筛的筛孔,用于统计籽粒透筛数量和位置。籽粒统计区域 1 用于统计收集到的籽粒以及杂物质量,籽粒统计区域 2 用于统计通过筛尾进入二次脱粒清选的籽粒及杂物质量,筛尾损失统计区域用于统计清选过程中被排出机体的籽粒个数。

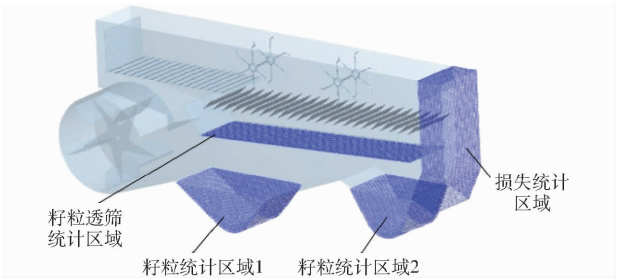


图 7 各统计区域示意图

Fig. 7 Schematic representation of each statistical area

3 仿真结果分析

3.1 原机清选仿真结果

根据前述参数设置进行仿真,由各统计区域计算清选损失率为 8.81%,含杂率 5.17%,已超过油菜联合收获作业标准。图 8 为清选过程中筛面物料运动情况,由于脱出物量增加,筛上物料产生层叠和堆积,筛孔被大量的角果壳以及短茎秆所覆盖,处于物料中上层的籽粒透筛机率降低,易随筛面杂物一起向后运动并被抛出机体外。图 8a、8b 分别为筛前

和筛尾处的物料堆积情况,图 8c 为筛尾处去除角果壳和茎秆后单独显示籽粒的运动情况,可以看出,沿筛面纵向方向上,籽粒和杂物间均有不同程度的掺杂和裹挟,在筛尾处仍然有较多的籽粒无法透筛,造成损失。

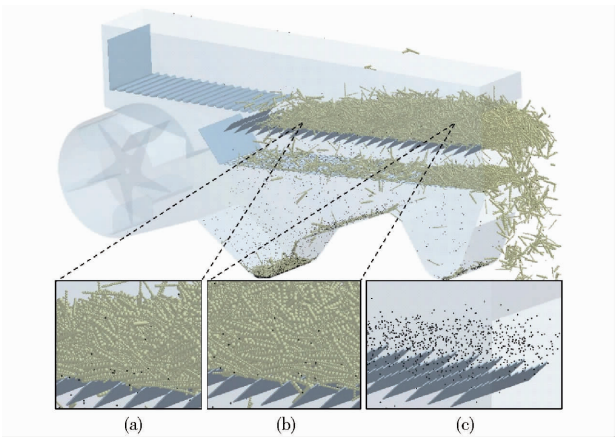


图 8 筛面物料堆积情况示意图

Fig. 8 Schematics of material accumulation on screen

根据籽粒透筛位置和数量建立分布图,如图 9 所示。可以看出,籽粒的透筛位置多分布于振动筛前半段,尤其集中于抖动板与振动筛承接区域内。原因是由于在清选开始时刻,下落的物料并未在筛面产生堆积,籽粒透筛率较高,随着物料层厚度的增加,籽粒与杂物的裹挟掺杂程度加剧,透筛率下降明显。

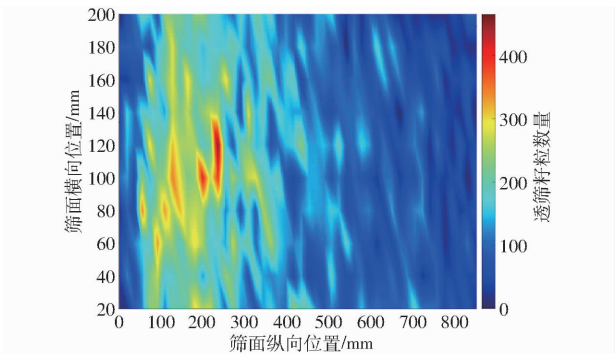


图 9 籽粒透筛位置分布

Fig. 9 Oilseed penetration distribution

3.2 带有匀散导流装置清选仿真结果

3.2.1 筛面气流速度对比

为了明确增设匀散导流装置后筛面的流场变化,提取原机与增设装置后筛面区域截面气流速度矢量图,如图 10 所示。

从图 10 可以看出,原机在鱼鳞筛面上方 30 mm 区域内的 X 轴向气流速度为 4.1 ~ 4.5 m/s,增设匀散导流装置后,鱼鳞筛面上方 30 mm 区域内的 X 轴向气流速度为 4.3 ~ 4.6 m/s,且气流方向基本保持一致,由此可以明确增设导流装置后并不会对筛面区域内的气流速度和方向造成不利影响。

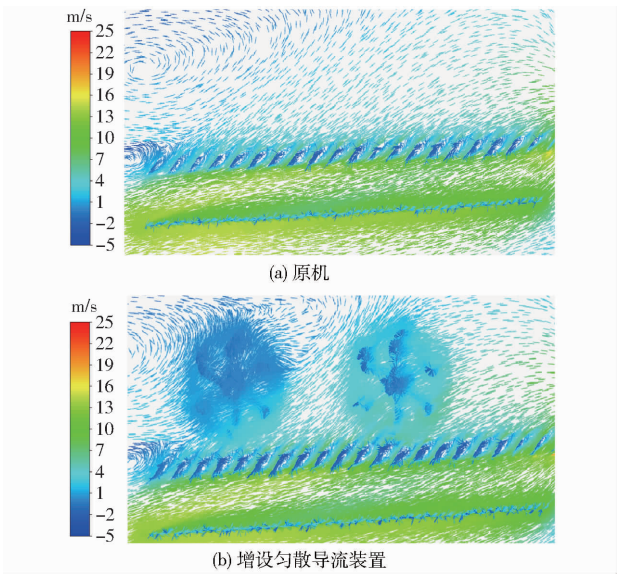


图 10 X 轴向筛面气流速度对比

Fig. 10 Comparison of screen region air velocity of X axis

3.2.2 清选结果分析

根据前文仿真参数,保持振动筛振频、振幅和振动方向角不变,设定导流杆摆动频率为 6 Hz、驱动关节滑槽倾角为 15°以及导流杆转速为 100 r/min,在同等脱出物喂入量下进行清选仿真对比试验,最终清选损失率为 5.74%、含杂率 3.25%,对比原机清选结果,损失率和含杂率均有所降低。

图 11 虚线为导流杆顶端运动轨迹,可以看出,导流杆运动轨迹所形成的环扣能够深入筛面上的物料群体,对其产生沿筛面横向和纵向的导流作用。

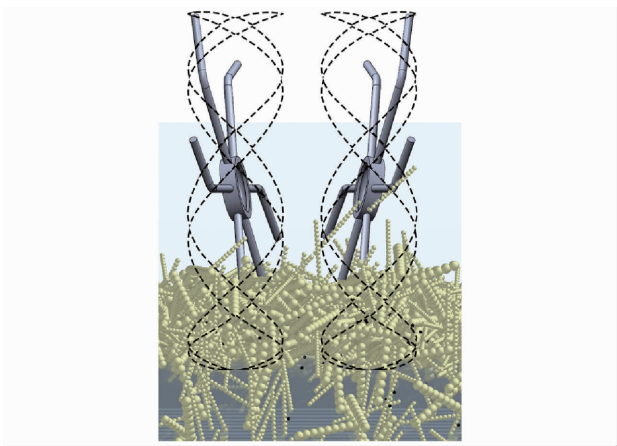


图 11 导流杆运动轨迹示意图

Fig. 11 Schematic of diversion rod movement trajectory

图 12 为原机清选系统与增设匀散导流装置后清选过程中籽粒和角果壳以及茎秆之间的碰撞次数,可以看出,在增设匀散导流装置后,籽粒与角果壳以及茎秆之间的碰撞次数增加明显,根据前文所述,增加振动筛分过程中物料间的无规则碰撞次数将有利于物料达到松散状态,有利于提高籽粒透筛几率。

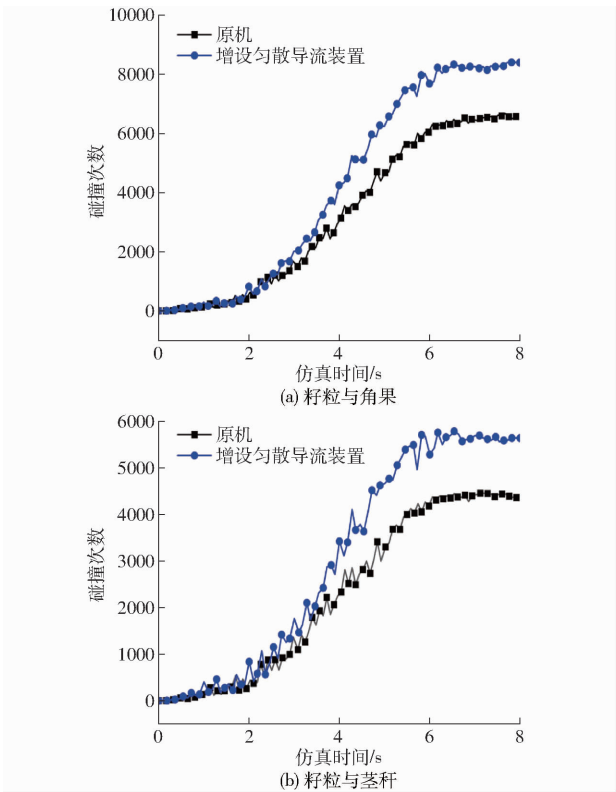


图 12 籽粒与角果及茎秆碰撞次数对比
Fig. 12 Comparison of numbers of oilseed and pod and stalk collision

为提高筛面清选性能,应当提高筛面前端与抖动板衔接区域的脱出物运移速度,使该区域内的物料快速后移和离散均布,减轻筛前压力,提高筛面中段的筛分作用。

提取 1.2~3.5 s 内筛前端区域油菜籽粒在 Y 轴方向上的平均速度,原机与增设匀散导流装置后的籽粒运动速度变化对比如图 13 所示。可以看出,在匀散导流装置的作用下,油菜籽粒在 Y 轴向的平均运移速度较原机整体提升明显,利于其向后推送。

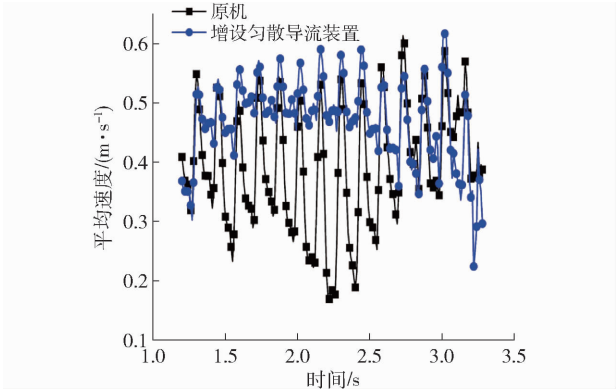


图 13 筛面籽粒 Y 轴方向平均速度对比
Fig. 13 Comparison of oilseed average velocity in Y direction on sieve surface

根据籽粒透筛位置和数量建立分布图,如图 14

所示。由图 14 可以看出,在同样的作业条件下,增设匀散导流装置后,籽粒在筛面横向位置上的透筛分布更加均匀且数量明显增多,同时籽粒的透筛位置在筛面纵向方向上也有延伸,缓解了筛面前端的清选压力。

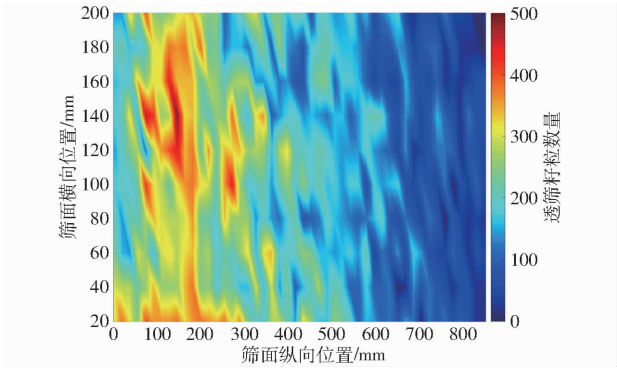


图 14 增设匀散导流装置后籽粒透筛位置分布
Fig. 14 Oilseed penetration distribution after installation of device

结合图 12~14 可以看出,筛面匀散导流装置的复合运动可以增加物料群体间的碰撞次数,提高籽粒和杂物的离散程度,有效解决物料堆积、分层能力减弱所造成的籽粒透筛困难问题,提高籽粒透筛几率和透筛分布均匀性,有效降低清选损失率。同时物料群的疏松也利于气流作用于其内部,提升风选效果,降低含杂率。

3.3 匀散导流装置参数单因素试验

根据前文分析,在收获高密高产油菜时,匀散导流装置有利于降低清选损失率和含杂率,提升清选作业质量,根据式(5)和式(8)可以看出,导流杆摆动频率 f 、导流杆转速 n_2 以及驱动关节滑槽倾角 α 会对导流杆在 X、Y、Z 轴方向上的运动状态造成影响,进而影响匀散导流装置对物料群体的作用。为了研究这 3 个因素对清选作业性能的影响规律,以清选损失率 Y_1 和清选含杂率 Y_2 为评价指标,进行单因素试验。

3.3.1 导流杆摆动频率对清选性能的影响

在导流杆转速 100 r/min、滑槽倾角 15° 时进行导流杆摆动频率单因素试验,试验结果表明,当摆动频率低于 5 Hz 时,根据式(6)和式(11)计算得到的导流杆顶端在筛面横向运动速度较低,对物料群体的运动影响不大,因此截选摆动频率从 6 Hz 开始时的试验结果,如图 15 所示。由图 15 可以看出,随着摆动频率的增加,损失率先逐渐降低再升高,含杂率先下降后再快速增加。当摆动频率升高时,导流杆对筛面物料的横向作用次数增加,提高了籽粒与物料的离散程度,增加透筛率,降低了损失。但是当摆动频率过高时,物料在筛面横向方向运动次数过多,

阻碍了物料的后移,物料堆积影响籽粒透筛,增加了损失率。摆动频率增加,利于筛前物料分层稀疏,提高了气流对于物料中杂余的作用效果,降低了含杂率,但是同样地,过高的摆动频率影响了物料群体后移,增加了物料的透筛次数,杂余透筛几率增加,使含杂率有所增加。因此,选取导流杆摆动频率 9 ~ 12 Hz 作为多因素试验水平范围。

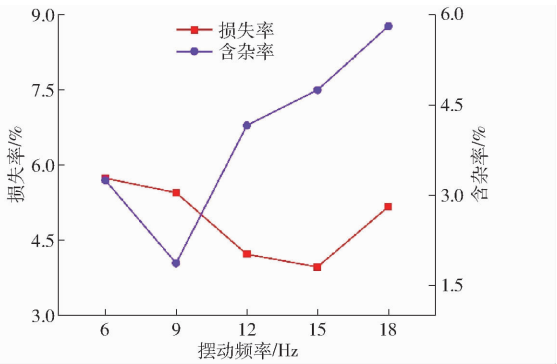


图 15 不同导流杆摆动频率下的清选性能曲线
Fig. 15 Cleaning performance of different diversion rod oscillation frequencies

3.3.2 导流杆转速对清选性能的影响

根据前述仿真试验结果,原机清选筛面籽粒在筛面纵向的平均运动速度为 0.4 ~ 0.6 m/s,为了避免导流杆进入物料层后对物料的后移造成阻碍,需要确保导流杆端部的运动线速度大于 0.6 m/s。导流杆端部点 B 线速度为

$$v_B = \omega_2 L_{OB} = \frac{n_2 \pi}{30} L_{OB} \geq 600 \text{ mm/s} \quad (17)$$

式中 v_B ——导流杆端部点 B 线速度,mm/s

根据设计的导流杆长度 $L_{OB} = 100 \text{ mm}$,由式(17)计算得到导流杆转速需要大于 60 r/min。

在导流杆摆动频率 12 Hz、滑槽倾角 15° 时进行导流杆转速单因素试验,结果如图 16 所示。由图 16 可以看出,随着转速的增加,损失率逐渐降低后再迅速升高,含杂率随着转速提高先略有降低,随后再逐渐增加。当导流杆转速增加,导流杆对物料

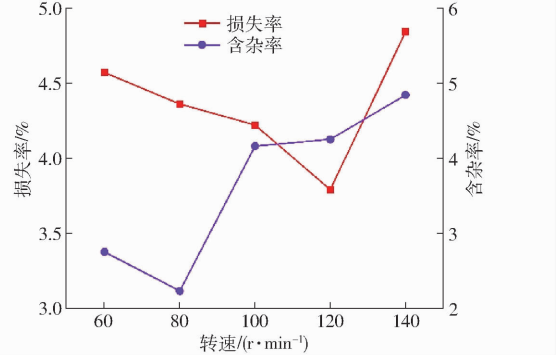


图 16 不同导流杆转速下的清选性能曲线
Fig. 16 Cleaning performance of different diversion rod rotation speeds

群体的疏松作用有所提升,同时提高了物料群体的后移速度,缓解了筛前清选压力,利于籽粒与杂余分离,提高籽粒透筛几率,降低损失。但是当转速过大时,导流杆会造成物料回带,影响物料整体后移,导致筛前物料有所堆积,减少了籽粒透筛几率,增加了损失率。同时影响了气流的分选效果,增加了含杂率。因此,选择导流杆转速 80 ~ 120 r/min 作为多因素试验水平范围。

3.3.3 滑槽倾角对清选性能的影响

根据前文分析,滑槽倾角影响导流杆在筛面的横向运动距离,在相同的摆动频率下,倾角增加使得导流杆横向运动速度增加,虽然提升了对物料的碰撞强度,但同时也增加了物料的横向运动距离,因此滑槽倾角不宜过大。此外,为了降低摆动方向改变时导流杆在驱动关节上的受力,提高运动稳定性,参考联合收获机割刀摆环机构倾角最佳范围,确定滑槽倾角不超过 30°,在单因素试验中设置为 5° ~ 25°。

在导流杆摆动频率 15 Hz、转速 100 r/min 时进行导流杆滑槽倾角单因素试验,结果如图 17 所示。由图 17 可以看出,随着滑槽倾角的增加,损失率先有明显降低后再升高。含杂率先略有下降,随后再缓慢上升。随着滑槽倾角的增大,导流杆在筛面横向方向上的作用区域增大,增加了导流杆对物料的作用范围,增加了物料间的碰撞次数,利于物料分层稀疏,增加籽粒透筛率。当滑槽倾角过大时,导流杆对物料群体的作用过激,反而影响了籽粒的透筛,增加了物料在筛面横向方向的运动距离,影响物料向后输送,增加了筛分损失率和含杂率。因此,选择滑槽倾角 10° ~ 20° 作为多因素试验水平范围。

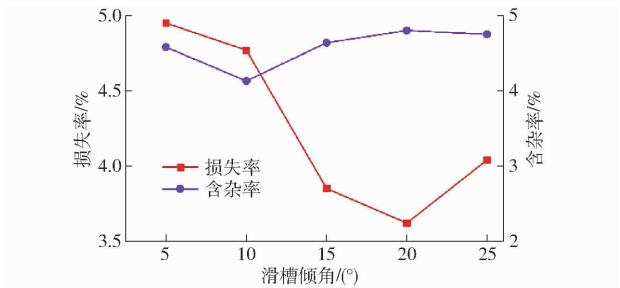


图 17 不同驱动关节滑槽倾角下的清选性能曲线
Fig. 17 Cleaning performance of different joint chute inclination angles

3.4 匀散导流装置参数优化试验

3.4.1 试验方法

根据单因素试验结果所确定的各因素水平范围如表 3 所示。以损失率 Y_1 和清选含杂率 Y_2 作为评价指标,采用 Box - Behnken 试验设计方法,开展三

因素三水平二次回归正交组合试验^[29]。试验方案包括 17 个试验点,其中 12 个分析因子,5 个零点估计误差,试验方案和结果如表 4 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Code of experimental factors

编码	因素		
	导流杆摆动频率	导流杆转速	滑槽倾角
	f/Hz	$n_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$\alpha/(^{\circ})$
-1	9	80	10
0	12	100	15
1	15	120	20

3.4.2 试验结果与分析

对清选损失率 Y_1 和清选含杂率 Y_2 与试验因素 X_1 、 X_2 、 X_3 间的关系进行二次多元拟合,并对回归模型进行方差分析和回归系数显著性检验,结果如表 5 所示。

表 4 试验设计方案及结果

Tab.4 Test design and results

序号	因素			$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	0	6.53	1.87
2	0	1	1	3.67	4.32
3	0	1	-1	4.73	4.53
4	-1	0	1	6.67	1.78
5	0	0	0	4.09	4.38
6	0	0	0	4.12	4.21
7	0	0	0	3.98	4.19
8	-1	1	0	5.36	3.32
9	-1	0	-1	6.68	2.16
10	0	0	0	4.34	4.16
11	0	-1	1	4.73	3.76
12	1	0	1	3.62	4.80
13	0	-1	-1	5.02	3.04
14	1	-1	0	3.98	4.82
15	1	0	-1	4.77	4.13
16	0	0	0	4.22	4.14
17	1	1	0	3.66	4.98

表 5 回归方程方差分析

Tab.5 Variance analysis of regression equation

来源	损失率 Y_1				含杂率 Y_2			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	16.98	9	91.66	<0.000 1 **	16.47	9	150.99	<0.000 1 **
X_1	10.61	1	515.60	<0.000 1 **	11.52	1	950.72	<0.000 1 **
X_2	1.01	1	48.95	0.000 2 **	1.67	1	138.19	<0.000 1 **
X_3	0.789 5	1	38.36	0.000 4 **	0.080 0	1	6.60	0.037 *
X_1X_2	0.182 5	1	8.87	0.020 6 *	0.416 0	1	34.33	0.000 6 **
X_1X_3	0.324 9	1	15.78	0.005 4 **	0.275 6	1	22.75	0.002 **
X_2X_3	0.147 7	1	7.17	0.031 6 *	0.216 2	1	17.84	0.003 9 **
X_1^2	2.80	1	136.22	<0.000 1 **	1.42	1	117.60	<0.000 1 **
X_2^2	0.029 3	1	1.42	0.271 8	0.054 0	1	4.46	0.072 7
X_3^2	0.930 5	1	45.21	0.000 3 **	0.731 3	1	60.35	<0.000 1 **
残差	0.144 1	7			0.084 8	7		
失拟项	0.069 1	3	1.23	0.406 8	0.048 3	3	1.76	0.292 8
误差	0.075	4			0.036 5	4		

注:**表示极显著($P<0.01$);*表示显著($0.01\leq P<0.05$)。

(1)清选损失率回归模型建立与显著性分析
根据表 5,清选损失率 Y_1 回归模型 P 值小于 0.01(极显著),失拟项 P 值大于 0.05,拟合方程决定系数 $R^2=0.98$,表明模型误差小,该模型可用于清选损失的预测。其中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_3^2 对 Y_1 影响极显著, X_1X_2 、 X_2X_3 对 Y_1 影响显著。各试验因素对于回归模型的影响显著性由大到小为: X_1 、 X_2 、 X_3 。剔除不显著因素后,清选损失率 Y_1 的二次回归模型为

$Y_1=4.11-1.15X_1-0.35X_2-0.31X_3+0.21X_1X_2-0.29X_1X_3-0.19X_2X_3+0.81X_1^2+0.47X_3^2$

(18)

根据图 18a 可以看出,当滑槽倾角 X_3 处于 0 水平(15°)时,摆动频率 X_1 增大,损失率 Y_1 降低,导流

杆转速 X_2 增大,损失率 Y_1 降低。在 X_1 的各个水平下,当 X_2 增加时, Y_1 呈现不同幅度的变化。当 X_1 处于低水平时, Y_1 随 X_2 的降低趋势更为明显。

图 18b 中,当转速 X_2 处于 0 水平(100 r/min)时,摆动频率 X_1 增大,损失率 Y_1 先降低后升高,滑槽倾角 X_3 增大,损失率 Y_1 降低,响应面曲线沿 X_1 方向的变化更快。在 X_1 的各个水平下,当 X_3 增加时, Y_1 呈现不同幅度的变化。当 X_1 处于高水平时, Y_1 随 X_3 增大所表现出的降低趋势更为明显。同样的,当 X_3 处于高水平时, X_1 的增大也会导致 Y_1 出现更为明显的变化趋势。

图 18c 中,当摆动频率 X_1 处于 0 水平(12 Hz)时,转速 X_2 增大,损失率 Y_1 逐渐降低,滑槽倾角 X_3

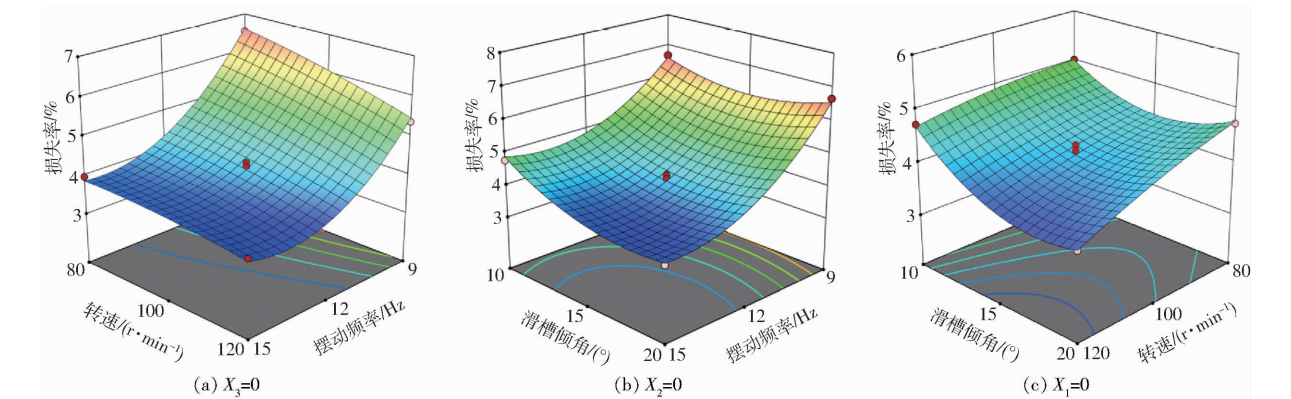


图 18 交互作用对损失率影响的响应面

Fig. 18 Response surfaces of impact of interaction on loss rate

增大,损失率 Y_1 降低,响应面曲线沿 X_3 方向的变化更快。当 X_2 处于高水平时, Y_1 随 X_3 增大所表现出的降低趋势更为明显。

分析产生这种交互作用的原因是随着导流杆摆动频率、转速以及滑槽倾角的增加,匀散导流装置对物料群体的作用强度加大,籽粒与其他物料之间的碰触次数增加,提高了松散度,籽粒透筛几率增加,降低了清选损失率。各因素对清选损失率的影响有所区别,其中以导流杆摆动频率影响最大,主要原因是摆动频率决定了导流杆运动所形成的轨迹环扣在筛面横向方向上的运动次数,随着频率提高,运动次数增加,导流杆对物料群体的作用次数相应增加,增强了单位时间内导流杆的作用强度,当喂入量提高,脱出物料群体密度增大时作用效果更为明显。

(2) 清选含杂率回归模型建立与显著性分析

根据表 5,清选含杂率 Y_2 回归模型 P 值小于 0.01(极显著),失拟项 P 值大于 0.05,拟合方程决定系数 $R^2 = 0.983$,表明模型误差小,该模型可用于筛分损失的预测。其中 X_1 、 X_2 、 $X_1 X_2$ 、 $X_2 X_3$ 、 $X_1 X_3$ 、 X_1^2 、 X_3^2 对 Y_2 影响极显著, X_3 对 Y_2 影响显著。各试验因素对于回归模型的影响显著性由大到小为: X_1 、 X_2 、 X_3 。剔除不显著因素后,筛分损失率 Y_2 的二次回归模型为

$$Y_2 = 4.26 + 1.2X_1 + 0.46X_2 + 0.1X_3 - 0.32X_1X_2 + 0.26X_1X_3 - 0.23X_2X_3 - 0.58X_1^2 - 0.41X_3^2 \quad (19)$$

根据图 19a 可以看出,当滑槽倾角 X_3 处于 0 水平(15°)时,导流杆摆动频率 X_1 增大,含杂率 Y_2 增加,转速 X_2 增大,含杂率 Y_2 增加。曲面沿 X_1 方向变化更快。当 X_1 处于低水平时, Y_2 随 X_2 增大所表现出的增加趋势更为明显。同样的,当 X_2 处于低水平时, Y_2 随 X_1 增大所表现出的增加趋势更为明显。导流杆频率增加,增加了单位时间内导流杆运动所形成环扣在筛面横向运动次数,增加了对物料群体的

作用次数,杂余透筛几率增加。导流杆转速增大,相邻导流杆作用间隔减小,在高频摆动下会对物料运动产生阻碍,增加了杂物的触筛次数和透筛几率,增加了含杂率。

图 19b 中,当转速 X_2 处于 0 水平(100 r/min)时,摆动频率 X_1 增大,含杂率 Y_2 增加,滑槽倾角 X_3 增大,含杂率 Y_2 逐渐增加,响应面曲线沿 X_1 方向的变化更快。在 X_3 的各个水平下,当 X_1 增加时, Y_2 均快速增加。当 X_1 处于低水平时, Y_2 随 X_3 的增加所表现出的增加趋势较为平缓,当 X_1 处于高水平时, Y_2 随 X_3 的增加逐渐增大。产生该现象的原因是当导流杆摆动频率较高时,在同一导流杆转速下,滑槽倾角增大使得导流杆的运动区域快速增大,对物料群体的作用覆盖范围增加,导致更多的杂物透筛,提高了含杂率。

图 19c 中,当摆动频率 X_1 处于 0 水平(12 Hz)时,转速 X_2 增大,含杂率 Y_2 逐渐增加。当 X_2 处于低水平时,滑槽倾角 X_3 增大,含杂率 Y_2 增加,当 X_2 处于高水平时, Y_2 均处于高值,随 X_3 的增加略微变化。产生该现象的原因是当导流杆转速较低时,滑槽倾角增加提高了导流杆在筛面横向上的作用距离,提高了物料的作用范围,增加了杂物透筛,提高了含杂率。当导流杆转速较高时,导流杆对物料群体作用增加,杂物透筛概率整体上有提升,此时滑槽倾角增大在一定程度上提高了物料层的松散程度,有利于气流作用于料层内部,提高气流对物料的分选效果,利于降低含杂率。

3.4.3 参数组合优化

为了提高匀散导流装置的性能,提高大喂入量条件下的清选作业质量,以清选损失率和含杂率最小为优化目标,对导流杆摆动频率、导流杆转速和滑槽倾角进行参数优化设计,结合约束条件,建立目标及约束函数

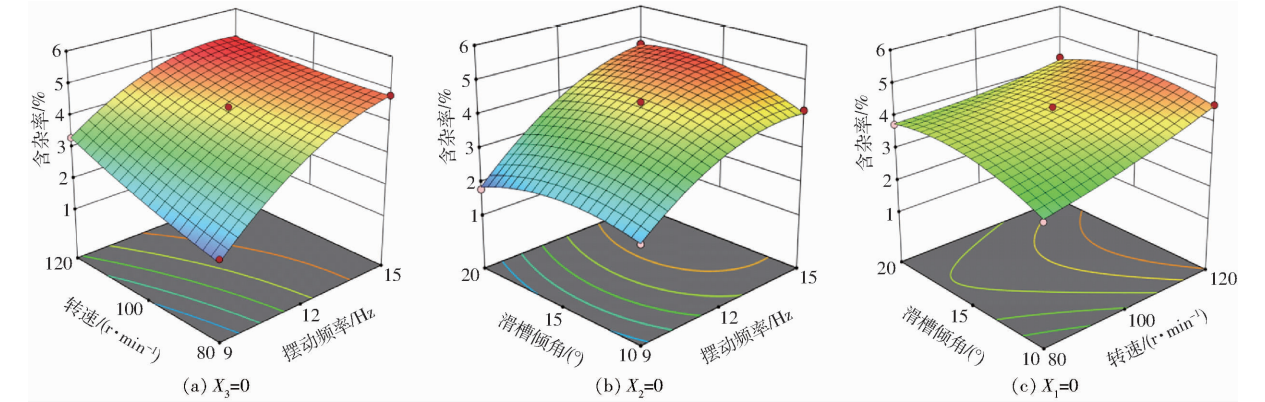


图 19 交互作用对含杂率影响的响应面

Fig. 19 Response surfaces of impact of interaction on impurity rate

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 9 \text{ Hz} \leq f \leq 15 \text{ Hz} \\ 80 \text{ r/min} \leq n_2 \leq 120 \text{ r/min} \\ 10^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

通过 Design-Expert 软件进行多目标优化求解, 优化后的最佳参数组合为: 导流杆摆动频率 12.5 Hz、导流杆转速 120 r/min、滑槽倾角 20°, 对应清选损失率 3.62%, 含杂率 4.31%。

为验证参数组合优化结果的正确性, 建立滑槽倾角为 20° 的驱动关节及匀散导流装置模型, 导入 EDEM 软件中进行验证试验, 设置导流杆摆动频率 12 Hz、导流杆转速 120 r/min, 共进行 3 次试验取平均值, 试验结果为清选损失率 3.82%、含杂率 4.18%, 与优化结果相符。

4 台架试验

4.1 试验材料和方法

为验证匀散导流装置仿真试验结果准确性, 根据前文分析结果加工匀散导流装置实物, 如图 20 所示, 并在搭建的脱粒清选试验台上进行对比试验, 如图 21 所示。

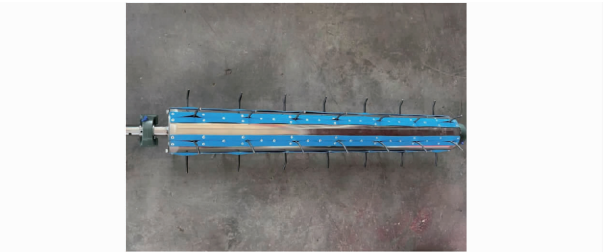


图 20 匀散导流装置实物图

Fig. 20 Picture of uniform dispersion diversion device

在田间收集滚筒脱出物作为台架试验材料, 试验油菜品种为浙油 51, 茎秆含水率 53.8%, 籽粒含水率 30.6%, 千粒质量 4.11 g。根据仿真参数设置, 每次试验将 12 kg 的脱出混合物均匀放于输送带



图 21 台架试验

Fig. 21 Bench test

上, 人工铺放物料时靠近割台一端空余 1 m, 用以输送带加速至设定的线速度, 余下 4 m 均匀铺放物料, 设定输送带线速度为 1 m/s, 各作业参数和仿真试验保持一致, 台架试验共重复 5 次。

4.2 试验结果

台架试验结果如表 6 所示。

表 6 台架试验结果对比

Tab. 6 Comparison of bench test results %				
序号	原机清选系统		增设匀散导流装置后清选系统	
	损失率	含杂率	损失率	含杂率
1	7.78	5.67	4.13	3.82
2	7.97	5.78	3.96	3.75
3	7.79	5.32	3.88	3.61
4	7.91	5.89	3.75	3.58
5	8.05	5.73	4.12	4.11
均值	7.91	5.68	3.97	3.71

从表 6 可以看出, 当增设匀散导流装置在最优结构和作业参数条件下, 清选损失率和含杂率结果均符合油菜联合收获作业标准, 其中损失率相较原清选系统降低 49.8%, 含杂率相较原清选系统降低 34.7%, 表明应用所设计的筛面物料导流装置可以解决因喂入量增加而导致的籽粒难以透筛的问题, 能够有效提升清选系统作业性能, 满足履带式联合

收获机进行高密高产油菜收获的清选作业需求。

5 结论

- (1)设计了一种适用于履带式油菜联合收获机的筛面物料匀散导流装置,有效提高了筛面物料分层速度、提升了籽粒与杂质的离散程度、提高了筛分均匀性,有效解决了高密高产油菜收获作业条件下筛面物料堆积问题,提高了清选作业质量。
- (2)通过对匀散导流装置作业过程的理论分析,明确了影响其作业性能的关键参数为导流杆摆动频率、导流杆转速以及驱动关节滑槽倾角,并确定了各参数试验水平。
- (3)通过离散元仿真与二次回归正交组合试验

- 相结合,以导流杆摆动频率、导流杆转速、驱动关节滑槽倾角为试验因素,以清选损失率、清选含杂率为性能评价指标进行仿真试验,确定了影响清选系统作业性能的装置最优作业和结构参数组合为:导流杆摆动频率 12.5 Hz、导流杆转速 120 r/min、滑槽倾角 20°。
- (4)台架对比试验结果表明,在高密高产油菜喂入量条件下,增设匀散导流装置后的清选损失率为 3.97%,含杂率为 3.71%,对比原机结构试验结果,损失率降低 49.8%,含杂率降低 34.7%,表明改进优化后的清选系统能够满足履带式联合收获机在高密高产油菜收获作业条件下的低损高效清选要求。

参 考 文 献

[1] 张青松,张恺,廖庆喜,等. 油菜无人机飞播装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(14):138-147.
ZHANG Qingsong, ZHANG Kai, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of rapeseed aerial seeding device used for UAV [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(14): 138-147. (in Chinese)

[2] 廖庆喜,万星宇,李海同,等. 油菜联合收获机旋风分离清选系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(14):24-31.
LIAO Qingxi, WAN Xingyu, LI Haitong, et al. Design and experiment on cyclone separating cleaning system for rape combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 24-31. (in Chinese)

[3] 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 equipment of grain combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1-16. (in Chinese)

[4] 廖庆喜,王昌,何坤,等. 油菜联合收获后含杂油菜籽复清机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):175-185,232.
LIAO Qingxi, WANG Chang, HE Kun, et al. Design and experiment on re-cleaning machine for rapeseed after combine harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 175-185, 232. (in Chinese)

[5] 李杰,闫楚良,杨方飞. 联合收获机振动筛的动态仿真与参数优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006,36(5): 701-704.
LI Jie, YAN Chuliang, YANG Fangfei. Dynamic simulation and parameter optimization of the combine harvester vibration sieve [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(5): 701-704. (in Chinese)

[6] 王立军,武振超,冯鑫,等. 玉米收获机清选曲面筛设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(2): 90-101.
WANG Lijun, WU Zhenchao, FENG Xin, et al. Design and experiment of curved screen for maize grain harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 90-101. (in Chinese)

[7] XU Lizhang, LI Yang, CHAI Xiaoyu, et al. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow to predict the cleaning performance of rice combine harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190(4): 11-24.

[8] SU Zhan, LI Yaoming, DONG Yunhua, et al. Simulation of rice threshing performance with concentric and non-concentric threshing gaps[J]. Biosystems Engineering, 2021, 197(1): 270-284.

[9] 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)

[10] 王汉中. 以新需求为导向的油菜产业发展战略[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):613-617.
WANG Hanzhong. New-demand oriented oilseed rape industry developing strategy[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 613-617. (in Chinese)

[11] http://www.nongjitong.com/product/jdl_c440_combine_harvester.html[EB/OL].

[12] <https://www.claas.de/blueprint/servlet/blob/1922846/3786cf3f81793de8c8863b2d33de912d/359108-23-dataRaw.pdf>[EB/OL].

[13] 张敏,金诚谦,梁苏宁,等. 风筛选式油菜联合收获机清选机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(24):8-15.
ZHANG Min, JIN Chengqian, LIANG Suning, et al. Parameter optimization and experiment on air-screen cleaning device of rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 8-15. (in Chinese)

[14] WANG Lijun, CHAI Jin, WANG Housheng. Design and performance of a countersunk screen in a maize cleaning device[J]. Biosystems Engineering, 2021, 209(2): 300-314.

[15] 刘鹏,金诚谦,杨腾祥,等. 多参数可调可测式清选系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):191-201.
LIU Peng, JIN Chengqian, YANG Tengxiang, et al. Design and experiment of multi parameter adjustable and measurable

- cleaning system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 191 – 201. (in Chinese)
- [16] 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 operation parameters of soybean combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 35 – 45. (in Chinese)
- [17] 仇解. 油菜籽粒清选损失自适应控制系统的设计与试验[D]. 镇江:江苏大学,2020.
QIU Jie. Development and experiment of adaptive control system for rapeseed seed cleaning loss[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)
- [18] 耿端阳,牟孝栋,张国栋,等. 小麦联合收获机清选机理分析与优化试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2022,52(1):219 – 230.
GENG Duanyang, MU Xiaodong, ZHANG Guodong, et al. Analysis and optimization of cleaning mechanism of wheat combine harvester[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(1): 219 – 230. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] FENG Xin, GONG Zhenping, WANG Lijun, et al. Behavior of maize particle penetrating a sieve hole based on the particle centroid in an air-screen cleaning unit[J]. Powder Technology, 2021, 385: 501 – 516.
- [21] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [22] 汤庆,吴崇友,伍德林,等. 基于 DEM 的谷物联合收割机抖动板性能研究[J]. 江苏农业科学,2017,45(1):208 – 210.
TANG Qing, WU Chongyou, WU Delin, et al. Study on performance of dither plate of grain combine harvester based on DEM[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(1): 208 – 210. (in Chinese)
- [23] 王立军,于泳涛,张帅,等. 蚯蚓运动特征仿生筛筛上玉米脱出物运动特性研究[J]. 农业机械学报,2022,53(3):158 – 166.
WANG Lijun, YU Yongtao, ZHANG Shuai, et al. Motion characteristics of maize mixture on bionic screen based on earthworm motion characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 158 – 166. (in Chinese)
- [24] 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J]. 农业工程学报,2011,27(5):117 – 121.
LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation and analysis of vibration screening based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 117 – 121. (in Chinese)
- [25] 雷小龙,廖宜涛,张闻宇,等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017, 48(3):57 – 68.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57 – 68. (in Chinese)
- [26] 王晗昊,李耀明,徐立章,等. 再生稻联合收获机清选装置内部气流场分析与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(20):84 – 92.
WANG Hanhao, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Simulation and experiment of air flow field in the cleaning device of ratooning rice combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 84 – 92. (in Chinese)
- [27] 施新新,吴崇友,李骅,等. 两种油菜收获脱出物的物理机械特性及空气动力学特性测定与分析[J]. 江西农业学报, 2018,30(6):104 – 108.
SHI Xinxin, WU Chongyou, LI Hua, et al. Measurement and analysis of physical mechanical properties and aerodynamic characteristics of harvesting extractions from two rape varieties[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, 30(6): 104 – 108. (in Chinese)
- [28] LEI Xiaolong, HU Hongqi, WU Wencheng, et al. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM – CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Biosystems Engineering, 2021, 203: 22 – 33.
- [29] 关卓怀,江涛,李海同,等. 倾斜输送式油菜割晒机铺放质量分析与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(4):59 – 68.
GUAN Zhuohuai, JIANG Tao, LI Haitong, et al. Analysis and test of the laying quality of inclined transportation rape windrower[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(4): 59 – 68. (in Chinese)