doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.05.012

玉米籽粒收获机组合筛面预筛分式清选装置设计与试验

王　飞[1]　阿力木·买买提吐尔逊[1,2]　张俊三[2]　李谦绪[2]　徐路明[1]
(1.新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐 830052;2.新疆新研牧神科技有限公司,乌鲁木齐 830011)

摘要:针对目前玉米籽粒收获机不能适应 15 kg/s 以上的大喂入量清选需要,设计了一种具备预清选功能的清选装置。首先对玉米脱出物离开螺旋输送器到达预清选筛前的玉米籽粒进行受力分析,然后对曲柄连杆机构的运动模型加以简化。其次分析玉米籽粒在筛面上的运动状态;对离心风机叶轮、蜗壳进行设计计算。采用单因素试验确定风机转速、振动频率、上筛筛孔开度取值范围;以风机转速、振动频率、上筛筛孔开度为试验因素,以籽粒含杂率和清选损失率为评价指标,设计三因素三水平中心组合试验,建立各因素与指标之间的回归模型。通过响应曲面方法对试验结果进行分析,并采用 Design-Expert 12 对回归模型进行多目标优化。玉米脱出物喂入量为 16 kg/s 时,得出较优组合为:风机转速 1 202.50 r/min、振动频率 5.41 Hz、上筛筛孔开度 18 mm,在此条件下籽粒含杂率为 0.79%,清选损失率为 1.10%;验证试验结果表明,当风机转速 1 200 r/min、振动频率 5 Hz、上筛筛孔开度 18 mm 时,籽粒含杂率为 0.82%,清选损失率为 1.14%,试验值与优化值相对误差小于 5%,与传统双层往复振动筛清选装置相比籽粒含杂率降低 2.07 个百分点,清选损失率降低 2.13 个百分点,证明所设计合理。

关键词:玉米籽粒收获机;预清选装置;大喂入量;曲柄连杆机构
中图分类号:S225.51　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)05-0135-13　　**OSID**:

Design and Experiment of Pre-screening Cleaning Device for Combined Screen Surface of Corn Grain Harvester

WANG Fei[1]　ALIMU Maimaitituersun[1,2]　ZHANG Junsan[2]　LI Qianxu[2]　XU Luming[1]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *Xinjiang Xinyan Luperus Technology Co.*, *Ltd.*, *Urumqi* 830011, *China*)

Abstract: In view of the fact that the current corn grain harvester can not meet the need of large feeding quantity cleaning above 15 kg/s, a kind of cleaning device with pre-cleaning function was designed. Firstly, the stress analysis of corn grains before the extruder leaved the screw conveyor and reached the pre-cleaning screen was carried out, and then the motion model of the crank linkage mechanism was simplified. Secondly, the motion state of corn grains on the sieve surface was analyzed. The impeller and volute of centrifugal fan were designed and calculated. The single factor test was used to determine the fan speed, vibration frequency and the value range of the upper screen opening. With the fan speed, vibration frequency and the opening of the upper screen as test factors, and the grain impurity content and cleaning loss rate as evaluation indexes, the three-factor and three-horizontal center combined test was designed to establish a regression model between the factors and indexes. The test results were analyzed by response surface method, and the regression model was optimized by Design-Expert 12. When the feeding amount of corn extract was 16 kg/s, the optimal combination was obtained. The test results showed that the fan speed was 1 202.50 r/min, the vibration frequency was 5.41 Hz, and the opening of the upper screen was 18 mm. Under these conditions, the grain impurity content was 0.79% and the cleaning loss rate was 1.10%. The verification test showed that the speed of the fan was 1 200 r/min, the vibration frequency was 5 Hz, and the opening of the upper screen was 18 mm. At this time, the kernel impurity content was 0.82%, the cleaning loss rate was 1.14%, the relative error between the test value and the optimization value was less than 5%, and the kernel impurity content was 2.07 percentage points

收稿日期:2023-10-09　修回日期:2024-01-02
基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02016)
作者简介:王飞(1996—),男,硕士生,主要从事农业机械装备研究,E-mail:2984350836@qq.com
通信作者:阿力木·买买提吐尔逊(1973—),男,高级工程师,主要从事农业机械化技术装备研究,E-mail:m13899903803@163.com

lower than that of the traditional double-layer reciprocating vibrating screen cleaning device. The loss rate of cleaning was reduced by 2.13 percentage points, which proved that the design was reasonable and met the national cleaning standard.

Key words: corn grain harvester; pre-cleaning device; large feeding quantity; crank linkage mechanism

0 引言

玉米是我国重要的粮食作物之一,其播种面积仅次于小麦和水稻。随着现代化农业机械的发展,玉米籽粒收获机也朝着高效、大喂入量的方向发展;随着玉米单产的不断增加和玉米籽粒收获机作业速度的不断提高,清选装置中脱出物的喂入量逐渐上升[1-4]。风筛式清选装置具有清选损失率低、籽粒含杂率低的优点,被广泛应用于玉米籽粒收获机上[5-6]。然而,现有的清选装置只能有效清选 8 kg/s 以下的玉米脱出物,无法对喂入量超过 15 kg/s 以上的玉米脱出物进行清选,玉米脱出物喂入量超过 15 kg/s 会出现清选筛筛孔堵塞以及籽粒含杂率和清选损失率快速增大等问题,从而影响玉米脱出物的清选效果。

为了提高大喂入量的清选性能,许多学者对清选装置进行了研究。IVANOV 等[7]研究了籽粒在筛面上的分离过程,获得了大喂入量条件下籽粒透过筛孔的条件。LAWINSKA 等[8]采用锥形的转筒筛对物料进行筛分试验,试验证明筛孔堵塞主要原因是物料在筛面上堆积造成的并解决了该问题。LI 等[9]设计了一种复合振动筛,复合振动筛增加了籽粒透筛率,降低了籽粒损失率,提高了筛体对物料的处理能力。王立军等[10]设计了一种具备分流作用的双层筛孔式抖动板,使玉米脱出物在进入清选装置时能够进行有效分散,通过仿真和台架试验证明,与单层抖动板清选装置相比,籽粒含杂率和损失率都大大降低。冯鑫等[11]为了提高大喂入量玉米脱出物的清选性能设计了一种波浪筛机构,通过 CFD-DEM 耦合仿真和台架试验进行验证,得出喂入量为 7 kg/s 时能够满足清选要求。樊晨龙等[12]提出一种双层异向独立振动的清选装置,采用 ADAMS 进行建模,试验验证了曲柄长度、筛面倾角对清选性能影响较大。上述研究虽然在清选装置结构方面进行了改进,并研究了籽粒在筛面上的筛分过程,但在清选大喂入量玉米脱出物时仍然存在清选筛筛孔堵塞、籽粒含杂率以及清选损失率高等问题,仍需进一步改进和研究。

本文在牧神 4YZT-10 型玉米籽粒收获机清选装置基础上,研制 4YZL-13 型玉米籽粒收获机清选装置,设计一种具有预清选功能的清选装置,拟通过双风道风机和在螺旋输送器末端与上清选筛前端之间增加一块小而短的鱼鳞筛、阶梯板、指状筛,来实现玉米脱出物在进入清选装置前预清选;对曲柄连杆机构进行简化,建立运动学模型以及籽粒在筛面上的运动进行分析,对风机蜗壳和叶轮进行设计以及计算风机风压和转速,通过田间试验和对比试验验证设计的合理性,以期提高清选装置对大喂入量玉米脱出物的处理能力。

1 整体结构与工作原理

1.1 样机整体结构与工作原理

4YZL-13 型玉米籽粒收获机主要由割台、过桥、脱粒滚筒、风筛式清选装置、切碎器、传动系统、液压系统等组成,如图 1 所示。

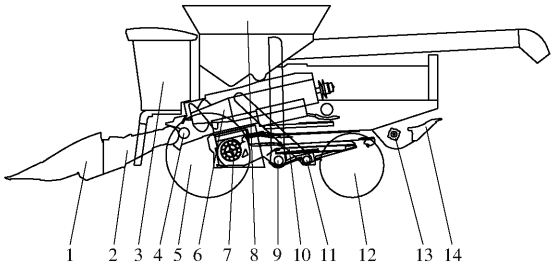


图 1 4YZL-13 型玉米籽粒收获机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of 4YZL-13 type corn grain harvester

1. 割台 2. 过桥 3. 驾驶室 4. 喂入加速辊 5. 驱动轮 6. 单纵轴流滚筒 7. 清选风机 8. 粮仓 9. 输粮螺旋输送器 10. 清选筛 11. 杂余螺旋输送器 12. 导向轮 13. 切碎器 14. 抛撒器

试验时玉米果穗由前端割台采摘送至过桥中,通过过桥中链耙将采摘的玉米果穗送至脱粒滚筒中,在纹杆块和前端脱粒凹板的作用下,果穗上的籽粒被脱下来,茎秆通过切碎器打碎由抛撒器抛到机体外;玉米脱出物往后输送的同时,大部分玉米脱出物通过前端脱粒凹板栅格落入螺旋输送器中,少部分玉米脱出物经回送盘落入清选筛上,螺旋输送器中的玉米脱出物送至清选筛上进行清选分离,玉米脱出物经过清选分离之后,茎秆、苞叶等杂质被排出机体外;干净的籽粒落入输粮螺旋输送器中,然后送至粮仓;未脱净的果穗经过杂余螺旋输送器送至脱粒滚筒内进行二次脱粒、清选。

1.2 清选装置整体结构与工作原理

清选装置主要由风机、预清选机构、上清选筛、下清选筛、曲柄连杆机构、输粮螺旋输送器、杂余螺

旋输送器、回送盘、清选损失传感器等组成，如图 2 所示。

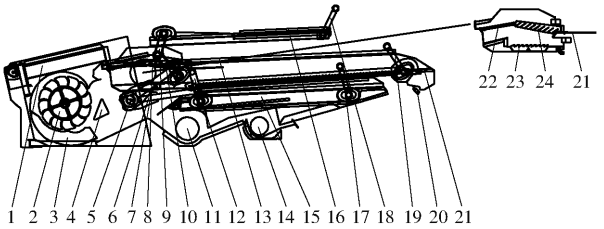


图 2　玉米籽粒收获机清选装置结构示意图

Fig. 2　Structure diagram of cleaning device of corn grain harvester

1. 螺旋输送器　2. 风机　3. 左右分风板　4. 上下分风块　5. 偏心轮　6. 下清选筛连杆　7. 上清选筛连杆　8. 预清选机构　9. 回送盘摇杆　10. 上清选筛摇杆　11. 输粮螺旋输送器　12. 下清选筛摇杆　13. 上清选筛箱　14. 杂余螺旋输送器　15. 下清选筛箱　16. 回送盘　17. 下清选筛吊杆　18. 回送盘吊杆　19. 上清选筛吊杆　20. 清选损失传感器　21. 指状筛　22. 阶梯板　23. 抖动板　24. 固定式鱼鳞筛

玉米脱出物从单纵轴流滚筒前端凹板栅格落入螺旋输送器中，在螺旋叶片推送下将玉米脱出物送至预清选筛，曲柄连杆机构带动清选筛做往复简谐运动，风机通过风道 1 向预清选筛输送风力，在脱出物从预清选筛下落的过程中，部分短茎秆和轻杂质被风吹出机体外，经过预清选筛的玉米脱出物落到抖动板送入上清选筛；部分玉米脱出物从滚筒后端凹板栅格落入回送盘上，通过阶梯板送至预清选筛，再由抖动板送至上清选筛，减轻上清选筛尾部清选压力，预清选筛可以提前预处理 40% 左右的玉米脱出物，有效降低了籽粒的含杂率和损失率。风机通过风道 2 向清选筛处输送风力，上清选筛中的脱出物在振动筛以及风力的协同作用下进行分层、跳跃、离散，质量较小的苞叶以及轻杂质等被气流吹出机体外，玉米籽粒和与籽粒质量相似的芯轴、秸秆在重力作用下落入下清选筛；落入下清选筛的脱出物在振动筛以及风力的共同作用下再次进行筛分，大部分玉米籽粒透过下清选筛孔落入下方输粮螺旋输送器中，而未透筛的脱出物继续向后跳跃，进入杂余螺旋输送器中，然后进入脱粒滚筒进行重复脱粒和分离。通过上筛尾部的清选损失传感器检测清选籽粒的损失率，如果通过清选筛后部的清选物中含有玉米籽粒，清选损失传感器会将损失率数据传到驾驶室内的显示器中，提示操作人员调节清选分离装置的相关参数。清选装置筛分原理如图 3 所示。

2　关键部件设计与运动学分析

2.1　预清选筛机构设计

预清选筛机构主要由阶梯板、固定式鱼鳞筛、指状筛等组成，如图 4 所示。从凹板栅格落下的玉米脱出物在进入清选装置抖动板前通过风机的风力以及预清选筛将短茎秆、苞叶等小杂余吹出机体外，减轻玉米脱出物在清选装置内的清选压力；可以大大降低玉米脱出物在清选装置内的堵塞风险以及降低籽粒含杂率、清选损失率。

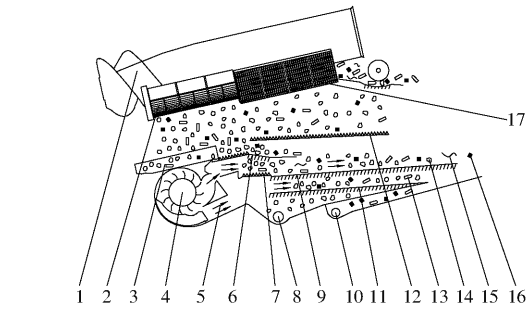
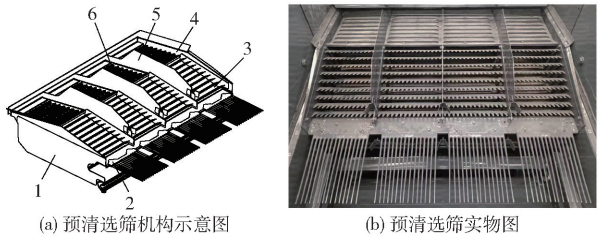


图 3　清选装置筛分原理图

Fig. 3　Sifting principle diagram of cleaning device

1. 脱粒滚筒　2. 凹板筛　3. 螺旋输送器　4. 风机　5. 气流　6. 预清选筛机构　7. 抖动板　8. 输粮螺旋输送器　9. 上清选筛　10. 杂余螺旋输送器　11. 下清选筛　12. 回送盘　13. 玉米茎秆　14. 玉米籽粒　15. 轻杂质　16. 玉米芯轴　17. 分离凹板



(a) 预清选筛机构示意图　　(b) 预清选筛实物图

图 4　预清选筛机构示意图与实物图

Fig. 4　Schematic and physical drawings of pre-cleaning screen mechanism

1. 左侧壁　2. 指状筛　3. 固定式鱼鳞筛　4. 右侧壁　5. 隔板　6. 阶梯板

对离开螺旋输送器到预清选筛前的玉米籽粒进行受力分析[13]，如图 5 所示。

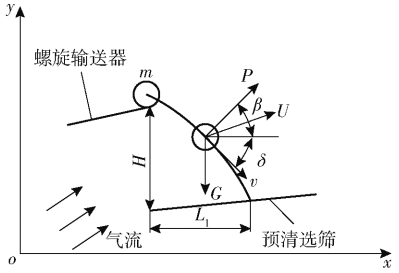


图 5　玉米籽粒离开螺旋输送器到预清选筛前受力分析

Fig. 5　Force analysis of corn grains before leaving screw conveyor to pre-cleaning screen

玉米籽粒从螺旋输送器下落过程中受到风机气流力、振动惯性力、重力，且离开螺旋输送器时具有一定速度 v。

玉米籽粒到预清选筛前垂直方向运动方程和加

速度方程为

$$\begin{cases} v_x = v\cos\delta \\ v_y = v\sin\delta \\ a_y = \dfrac{P\sin\beta - G}{m} \\ H = vt_1\sin\delta + \dfrac{1}{2}a_y t_1^2 \end{cases} \tag{1}$$

式中 v——籽粒离开螺旋输送器时速度,m/s

v_x——籽粒沿水平方向分速度,m/s

v_y——籽粒沿垂直方向分速度,m/s

a_y——籽粒在垂直方向上加速度,m/s^2

t_1——籽粒从螺旋输送器落到预清选筛的时间,s

δ——籽粒速度与水平方向夹角,(°)

H——玉米脱出物垂直方向位移,mm

P——玉米籽粒所受的气流力,N

G——玉米籽粒所受的重力,N

m——籽粒质量,g

β——气流方向角,(°)

玉米籽粒到预清选筛前水平方向的运动方程和加速度方程为

$$\begin{cases} a_x = \dfrac{P\cos\beta}{m} \\ L_1 = vt_1\cos\delta + \dfrac{1}{2}a_x t_1^2 \end{cases} \tag{2}$$

其中

$$\begin{cases} P = k_p m v_1^2 \\ k_p = \dfrac{k\rho A_1}{m} \\ G = mg \end{cases} \tag{3}$$

式中 v_1——气流速度,m/s

L_1——玉米脱出物水平方向位移,mm

a_x——籽粒在水平方向上加速度,m/s^2

A_1——出风口截面积,m^2

k_p——漂浮系数

g——重力加速度,m/s^2

k——空气阻力系数

ρ——空气密度,kg/m^3

通过对螺旋输送器到预清选筛前的玉米籽粒进行受力分析可知玉米脱出物到预清选筛的时间,为高效低损清选装置的设计提供理论基础。根据式(1)、(3)可计算出螺旋输送器到阶梯板的高度为 120 mm,螺旋输送器到阶梯板的高度如果过低会导致玉米脱出物堆积不利于籽粒的清选;如果螺旋输送器到阶梯板的高度过高会导致清选装置安装尺寸不够。

测量 4YZL-13 型玉米籽粒收获机清选装置的安装尺寸和查阅《农业机械设计手册》[14]可知,装有纵向轴流脱粒滚筒的联合收获机,筛子宽度接近脱粒装置的宽度,因此设计预清选筛宽度为 1 329 mm。根据式(2)和式(3)并结合上清选筛的长度以及清选装置内部安装位置,设计阶梯板长度为 395 mm,固定式鱼鳞筛的长度为 428 mm,指状筛的长度为 275 mm。采用游标卡尺测量玉米脱出物中玉米籽粒高度和宽度分别在 13.86~21.97 mm 和 10.81~16.52 mm 之间,因此确定固定式鱼鳞筛的筛孔开度为 24 mm。

根据上述分析可知,玉米脱出物到达预清选筛的时间以及阶梯板长度、固定式鱼鳞筛长度对清选效果有较大影响。如果阶梯板长度不合理会导致玉米脱出物直接落到预清选机构中的鱼鳞筛上,导致预清选机构中的鱼鳞筛发生堵塞影响清选效果;如果鱼鳞筛长度不合理会导致玉米脱出物不能有效经过预清选机构中的鱼鳞筛,从而影响清选效果。

2.2 振动筛设计及运动学分析

2.2.1 振动筛设计

振动筛的性能决定玉米籽粒含杂率和损失率,玉米籽粒收获机振动筛结构如图 6 所示。

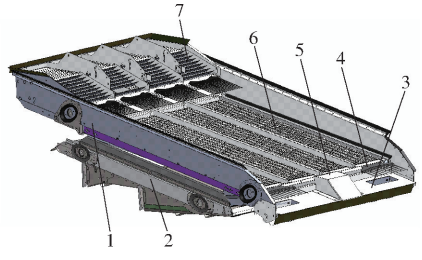


图 6 玉米籽粒收获机振动筛三维结构图

Fig. 6 Three dimensional structure diagram of vibrating screen of corn grain harvester

1. 上清选筛箱 2. 下清选筛箱 3. 尾板 4. 指状筛 5. 电机护罩 6. 鱼鳞筛 7. 预清选机构

在清选作业时,筛面面积对喂入量大小有重要影响,设计出合理的筛面面积对实现大喂入量高效清选具有重大意义。通过查阅《农业机械设计手册》[14]可知筛子长度 L 与喂入量关系为

$$L = \frac{Q_s}{B_s q_s} \tag{4}$$

式中 Q_s——喂入量,kg/s

B_s——筛面宽度,mm

q_s——筛子单位面积承受谷物混合物喂入量,可调节鱼鳞筛为 1.5~2.5 kg/(s·m^2)

装有纵向轴流脱粒滚筒的联合收获机,一般情况下宽度 B_s 接近脱粒装置的宽度。

根据单纵轴流滚筒脱粒装置宽度确定筛子的宽度为 1 278 mm;为实现大喂入量高效清选作业,清选装置喂入量为 16 kg/s,代入式(4)计算出筛子长度

L 为 2 000 mm。

2.2.2　振动筛运动学分析

振动筛是清选装置的核心部件之一[15]，其运动状态直接影响到籽粒含杂率和清选损失率。采用封闭矢量多边形分析法建立矢量方程[16]，进行振动筛机构的运动学分析，如图 7 所示。振动筛驱动机构为曲柄连杆机构，图中 AB 表示曲柄（偏心轮），BC、BL 表示连杆，ED、DH、KM 表示摇杆，HP、MN 分别表示上清选筛和下清选筛，EF 表示回送盘，FG、PJ、NO 分别表示回送盘吊杆、上清选筛吊杆和下清选筛吊杆，S_1、S_2为虚拟杆长度。

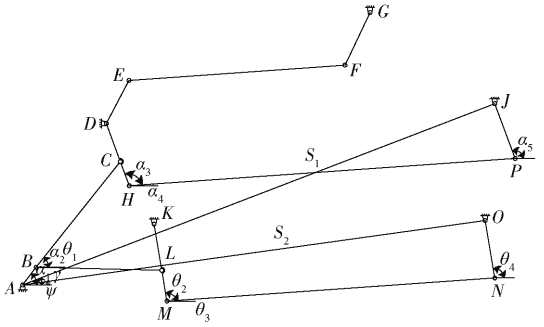


图 7　振动筛机构运动简图

Fig. 7　Motion diagram of vibrating screen mechanism

假设筛面上的运动轨迹均相同，并且近似于一条直线，则将筛体的运动看作简谐运动[17]，则筛面上任一点的位移 x 为

$$x = -r\cos(\omega t) \tag{5}$$

式中　r——曲柄半径，mm

t——曲柄运动时间，s

ω——曲柄角速度，rad/s

位移对时间 t 求导得速度 v_{1x}为

$$v_{1x} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \omega r\sin(\omega t) \tag{6}$$

速度对时间 t 求导得加速度 a_{1x}为

$$a_{1x} = \frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = \omega^2 r\cos(\omega t) \tag{7}$$

建立上筛面矢量运动方程为

$$\boldsymbol{l}_{AB} + \boldsymbol{l}_{BC} + \boldsymbol{l}_{CH} + \boldsymbol{l}_{HP} + \boldsymbol{l}_{PJ} = \boldsymbol{S}_1 \tag{8}$$

$$\begin{cases} l_{AB}\cos\alpha_1 + l_{BC}\cos\alpha_2 + l_{CH}\cos\alpha_3 + l_{HP}\cos\alpha_4 + \\ \quad l_{PJ}\cos\alpha_5 = S_1\cos\gamma \\ l_{AB}\sin\alpha_1 + l_{BC}\sin\alpha_2 + l_{CH}\sin\alpha_3 + l_{HP}\sin\alpha_4 + \\ \quad l_{PJ}\sin\alpha_5 = S_1\sin\gamma \end{cases} \tag{9}$$

式中　α_1——曲柄 AB 与水平面夹角，(°)

α_2——连杆 BC 与水平面夹角，(°)

α_3——摇杆 CH 与水平面夹角，(°)

α_4——上筛面 HP 与水平面夹角，(°)

α_5——吊杆 PJ 与水平面夹角，(°)

γ——虚拟杆 AJ 与水平面夹角，(°)

l_{AB}、l_{BC}、l_{CH}、l_{HP}、l_{PJ}——AB、BC、CH、HP、PJ 长度

对式(9)求一阶导数可得速度矩阵方程

$$\begin{bmatrix} -l_{AB}\sin\alpha_1 & -l_{BC}\sin\alpha_2 & -l_{CH}\sin\alpha_3 & -l_{HP}\sin\alpha_4 & -l_{PJ}\sin\alpha_5 \\ l_{AB}\cos\alpha_1 & l_{BC}\cos\alpha_2 & l_{CH}\cos\alpha_3 & l_{HP}\cos\alpha_4 & l_{PJ}\cos\alpha_5 \end{bmatrix} \cdot$$

$$[\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3 \quad \omega_4 \quad \omega_5]^{\mathrm{T}} = \omega_4 \begin{bmatrix} -S_1\sin\gamma \\ S_1\cos\gamma \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中　ω_1——曲柄 AB 角速度，rad/s

ω_2——连杆 BC 角速度，rad/s

ω_3——摇杆 CH 角速度，rad/s

ω_4——上筛面 HP 角速度，rad/s

ω_5——吊杆 PJ 角速度，rad/s

对式(9)求二阶导数可得加速度矩阵方程

$$\begin{bmatrix} -l_{AB}\sin\alpha_1 & -l_{BC}\sin\alpha_2 & -l_{CH}\sin\alpha_3 & -l_{HP}\sin\alpha_4 & -l_{PJ}\sin\alpha_5 & -l_{AB}\cos\alpha_1 & -l_{BC}\cos\alpha_2 & -l_{CH}\cos\alpha_3 & -l_{HP}\cos\alpha_4 & -l_{PJ}\cos\alpha_5 \\ l_{AB}\cos\alpha_1 & l_{BC}\cos\alpha_2 & l_{CH}\cos\alpha_3 & l_{HP}\cos\alpha_4 & l_{PJ}\cos\alpha_5 & -l_{AB}\sin\alpha_1 & -l_{BC}\sin\alpha_2 & -l_{CH}\sin\alpha_3 & -l_{HP}\sin\alpha_4 & -l_{PJ}\sin\alpha_5 \end{bmatrix} \cdot$$

$$[\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_3 \quad \varphi_4 \quad \varphi_5 \quad \omega_1^2 \quad \omega_2^2 \quad \omega_3^2 \quad \omega_4^2 \quad \omega_5^2]^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} -S_1\sin\gamma & -S_1\cos\gamma \\ S_1\cos\gamma & -S_1\sin\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_4 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \tag{11}$$

式中　φ_1——曲柄 AB 角加速度，rad/s^2

φ_2——连杆 BC 角加速度，rad/s^2

φ_3——摇杆 CH 角加速度，rad/s^2

φ_4——上筛面 HP 角加速度，rad/s^2

φ_5——吊杆 PJ 角加速度，rad/s^2

建立下筛面矢量运动方程为

$$\boldsymbol{l}_{AB} + \boldsymbol{l}_{BL} + \boldsymbol{l}_{LM} + \boldsymbol{l}_{MN} + \boldsymbol{l}_{NO} = \boldsymbol{S}_2 \tag{12}$$

$$\begin{cases} l_{AB}\cos\alpha_1 + l_{BL}\cos\theta_1 + l_{LM}\cos\theta_2 + \\ \quad l_{MN}\cos\theta_3 + l_{NO}\cos\theta_4 = S_2\cos\psi \\ l_{AB}\sin\alpha_1 + l_{BL}\sin\theta_1 + l_{LM}\sin\theta_2 + \\ \quad l_{MN}\sin\theta_3 + l_{NO}\sin\theta_4 = S_2\sin\psi \end{cases} \tag{13}$$

式中　θ_1——连杆 BL 与水平面夹角，(°)

θ_2——摇杆 LM 与水平面夹角，(°)

θ_3——下筛面 MN 与水平面夹角，(°)

θ_4——吊杆 NO 与水平面夹角，(°)

ψ——虚拟杆 OA 与水平面夹角，(°)

l_{BL}、l_{LM}、l_{MN}、l_{NO}——BL、LM、MN、NO 长度

对式(13)求一阶导数可得速度矩阵方程

$$\begin{bmatrix} -l_{AB}\sin\alpha_1 & -l_{BL}\sin\theta_1 & -l_{LM}\sin\theta_2 & -l_{MN}\sin\theta_3 & -l_{NO}\sin\theta_4 \\ l_{AB}\cos\alpha_1 & l_{BL}\cos\theta_1 & l_{LM}\cos\theta_2 & l_{MN}\cos\theta_3 & l_{NO}\cos\theta_4 \end{bmatrix} \cdot$$

$$[\omega_1 \quad \omega_6 \quad \omega_7 \quad \omega_8 \quad \omega_9]^{\mathrm{T}} = \omega_8 \begin{bmatrix} -S_2\sin\psi \\ S_2\cos\psi \end{bmatrix} \tag{14}$$

式中　ω_6——连杆 BL 角速度，rad/s

ω_7——摇杆 *LM* 角速度,rad/s

ω_8——下筛面 *MN* 角速度,rad/s

ω_9——吊杆 *NO* 角速度,rad/s

对式(13)求二阶导数可得加速度矩阵方程

$$\begin{bmatrix} -l_{AB}\sin\alpha_1 & -l_{BL}\sin\theta_1 & -l_{LM}\sin\theta_2 & -l_{MN}\sin\theta_3 & -l_{NO}\sin\theta_4 & -l_{AB}\cos\alpha_1 & -l_{BL}\cos\theta_1 & -l_{LM}\cos\theta_2 & -l_{MN}\cos\theta_3 & -l_{NO}\cos\theta_4 \\ l_{AB}\cos\alpha_1 & l_{BL}\cos\theta_1 & l_{LM}\cos\theta_2 & l_{MN}\cos\theta_3 & l_{NO}\cos\theta_4 & -l_{AB}\sin\alpha_1 & -l_{BL}\sin\theta_1 & -l_{LM}\sin\theta_2 & -l_{MN}\sin\theta_3 & -l_{NO}\sin\theta_4 \end{bmatrix}\cdot$$

$$[\varphi_1 \quad \varphi_6 \quad \varphi_7 \quad \varphi_8 \quad \varphi_9 \quad \omega_1^2 \quad \omega_6^2 \quad \omega_7^2 \quad \omega_8^2 \quad \omega_9^2]^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} -S_2\sin\psi & -S_2\cos\psi \\ S_2\cos\psi & -S_2\sin\psi \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \varphi_8 \\ \omega_8^2 \end{bmatrix} \tag{15}$$

式中 φ_6——连杆 *BL* 角加速度,rad/s^2

φ_7——摇杆 *LM* 角加速度,rad/s^2

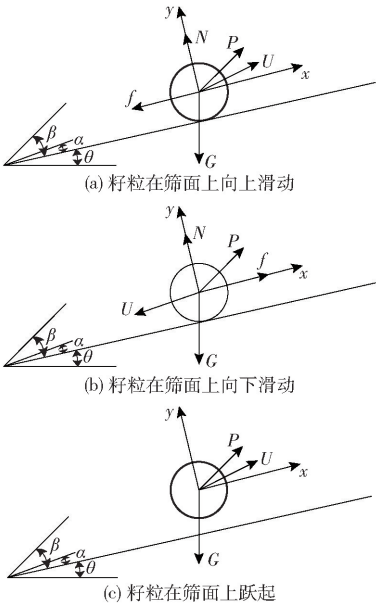
φ_8——下筛面 *MN* 角加速度,rad/s^2

φ_9——吊杆 *NO* 角加速度,rad/s^2

分析上述各式可知,曲柄连杆机构中 ω_1、ω_2、ω_6 影响筛面速度、角加速度的变化,而角速度的变化可以通过调节曲柄转速来实现。曲柄(偏心轮)*AB* 和连杆 *BC*、*BL* 的长度影响振幅变化,而振幅变化可以通过调节偏心轮大小来实现。通过查阅《农业机械设计手册》[14]及前期研究,同时根据清选装置安装尺寸,确定偏心轮直径 85 mm,连杆长度 l_{BC}、l_{BL}分别为 440 mm 和 600 mm,摇杆长度 l_{ED}为 260 mm,摇杆长度 l_{DH}为 320 mm(其中 l_{CH}为 130 mm),摇杆长度 l_{KM}为 340 mm(其中 l_{LM}为 130 mm),吊杆长度均为 330 mm。

2.3 玉米籽粒运动规律分析

从理论上对物料籽粒进行相对运动分析,有助于进一步得出物料籽粒群在筛面的运动轨迹。玉米籽粒在振动筛上的运动形式主要取决于籽粒在筛面上的受力[18],不同时刻所受力不同,籽粒 3 种受力情况如图 8 所示。



(a) 籽粒在筛面上向上滑动

(b) 籽粒在筛面上向下滑动

(c) 籽粒在筛面上跃起

图 8 筛面物料在不同状态下的受力分析

Fig. 8 Force analyses of screen surface materials in different states

(1)籽粒在筛面上向上滑动时受力分析

如图 8a 所示,当物料籽粒在筛面上所受惯性力向右时,物料籽粒有向上滑动趋势,此时物料籽粒在筛面上平衡方程为

$$\begin{cases} P\cos\beta + U\cos\alpha = f + G\sin\theta \\ N + P\sin\beta + U\sin\alpha = G\cos\theta \end{cases} \tag{16}$$

其中

$$\begin{cases} P = k\rho A_1 v_1^2 \\ U = m\omega^2 r\cos(\omega t) \\ f = N\tan\varphi \\ G = mg \end{cases} \tag{17}$$

式中 *U*——玉米籽粒所受的振动惯性力,N

N——玉米籽粒所受的支持力,N

f——玉米籽粒所受的摩擦力,N

α——振动方向角,(°)

θ——筛面倾角,(°)

将式(17)代入式(16),整理可得

$$\omega^2 r\cos(\omega t) = \frac{g\sin(\varphi+\theta) - k_p v_1^2\cos(\beta-\varphi)}{\cos(\alpha+\varphi)} \tag{18}$$

其中

$$k_p = \frac{k\rho A_1}{m} \tag{19}$$

令

$$K_1 = \frac{g\sin(\varphi+\theta) - k_p v_1^2\cos(\beta-\varphi)}{\cos(\alpha+\varphi)}$$

因为 $\cos(\omega t) \geqslant 1$,所以玉米籽粒向上滑动条件为

$$r\omega^2 > K_1 \tag{20}$$

(2)籽粒在筛面上向下滑动时受力分析

如图 8b 所示,当物料籽粒在筛面上所受惯性力向左时,物料籽粒有向下滑动趋势,此时物料籽粒在筛面上平衡方程为

$$\begin{cases} f + P\cos\beta = U\cos\alpha + G\sin\theta \\ N + P\sin\beta = U\sin\alpha + G\cos\theta \end{cases} \tag{21}$$

将式(17)代入式(21),整理可得

$$\omega^2 r\cos(\omega t) = \frac{g\sin(\varphi-\theta) + k_p v_1^2\cos(\beta+\varphi)}{\cos(\alpha+\varphi)} \tag{22}$$

令

$$K_2 = \frac{g\sin(\varphi-\theta) + k_p v_1^2\cos(\beta+\varphi)}{\cos(\alpha+\varphi)}$$

因为 $\cos(\omega t) \geqslant 1$,所以玉米籽粒向下滑动条

件为

$$r\omega^2 > K_2 \tag{23}$$

(3)籽粒在筛面上跃起时受力分析

如图 8c 所示，筛面对籽粒支持力为零时，籽粒将会被抛起离开筛面。籽粒抛起时，摩擦力也随之消失。此时籽粒所受到的力为气流作用力、系统惯性力和重力，即

$$N = P\sin\beta + U\sin\alpha - G\cos\theta = 0 \tag{24}$$

将式(17)代入式(24)，整理可得

$$\omega^2 r\cos(\omega t) = \frac{g\cos\theta - k_p v_1^2 \sin\beta}{\sin\alpha} \tag{25}$$

令　　$K_3 = \dfrac{g\cos\theta - k_p v_1^2 \sin\beta}{\sin\alpha}$

因为 $\cos(\omega t) \geqslant 1$，所以玉米籽粒发生跃起条件为

$$r\omega^2 > K_3 \tag{26}$$

通过受力分析和式(20)、(23)、(26)可知，玉米籽粒在筛面上以不同状态运动时，影响籽粒上滑、下滑、跃起的主要因素为风机转速、振动频率、筛孔开度；在筛分过程中，玉米籽粒由筛面前端向后端运动，玉米籽粒的跳动可以促进分层，加大籽粒透筛率，减小籽粒损失率。

2.4　双风道离心风机设计

2.4.1　风机整体结构设计

风机主要由蜗壳、叶轮、左右分风板、上下分风块等组成，如图 9 所示。根据玉米籽粒机械化收获清选混合物的清选特征，设计出上下双风道结构和左右三风道结构。

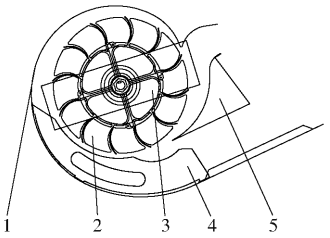


图 9　清选风机结构示意图

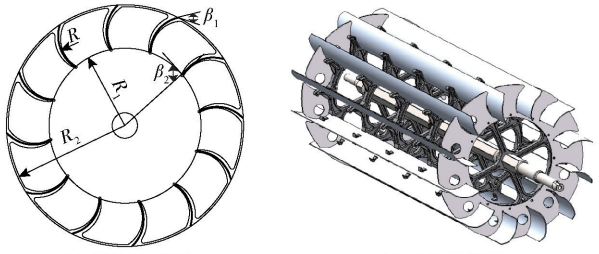
Fig. 9　Structure diagram of cleaning fan

1. 风机蜗壳　2. 叶轮　3. 固定板　4. 左右分风板　5. 上下分风块

采用离心风机与清选振动筛同步配合工作时，风机出口处在上下分风块的作用下分为上、下两风道。上风道吹出的气流主要作用在预清选筛和上层振动筛之间，与固定式鱼鳞筛共同作用下提前将进入清选振动筛的玉米脱出物进行清选，起到预清选作用；下风道的气流主要作用在上、下振动筛之间，与振动筛共同作用下将杂质排出机体外。

2.4.2　风机叶轮设计

叶轮是离心风机的核心部件[19]，当没有外部因素干扰时，风机叶轮旋转带动了整个清选装置内气流场的运动，因此叶轮在电机的带动下形成的气流场将直接影响整机的性能和效率。离心风机的叶轮主要由弧形叶片、辐盘、叶片挡板、叶片固定架等组成，叶轮的主要设计参数包括叶轮内径 D_1 和外径 D_2、叶片曲率半径 R、叶片长度 L_2、叶片数量 Z_1、叶片厚度 t_2 以及叶片的进出口安装角 β_1、β_2 等，风机叶轮结构及参数如图 10 所示。



(a) 参数示意图　　(b) 叶轮结构图

图 10　叶轮结构及参数示意图

Fig. 10　Schematics of impeller structure and parameters

叶轮旋转时，气流从叶轮敞开处(未被风机蜗壳包裹的区域)进入叶轮，在叶轮的带动下，气流在进风口处进入风机，在出风口处排出风机。结合风机设计手册及风筛式清选装置整体结构及参数要求，本设计取离心风机叶轮外径 $D_2 = 510$ mm，风机叶轮内径 $D_1 = 325$ mm，叶片数量 $Z_1 = 12$，叶片厚度 $t_2 = 2$ mm，叶片长度 $L_2 = 1\,328$ mm，进口安装角 $\beta_1 = 90°$，出口安装角 $\beta_2 = 25°$，叶片圆心定位半径 R_0、叶片曲率半径 R 及叶片弧长所对应的圆心角 ε 计算式为

$$\begin{cases} R = \dfrac{R_2^2 - R_1^2}{2(R_2\cos\beta_2 - R_1\cos\beta_1)} \\ R_0 = D_2\sqrt{\dfrac{R}{D_2}\left(\dfrac{R}{D_2} - \cos\beta_2\right) + 0.25} \end{cases} \tag{27}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \tag{28}$$

其中

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \arccos\dfrac{R^2 + R_0^2 - R_1^2}{2RR_0} \\ \varepsilon_2 = \arccos\dfrac{R^2 + R_0^2 - R_2^2}{2RR_0} \end{cases} \tag{29}$$

式中　R_1——叶轮内半径，mm

R_2——叶轮外半径，mm

ε_1——叶片内半径弧长圆心角，(°)

ε_2——叶片外半径弧长圆心角，(°)

将所设计参数代入公式(27)～(29)中可得叶片曲率半径 $R = 83.55$ mm、叶片圆心定位半径 $R_0 = 182.25$ mm、叶片弧长对应的圆心角 $\varepsilon = 80.84°$。

2.4.3　风机蜗壳设计

风机蜗壳的作用是汇集叶轮中甩出的气体并导向出风口，并将叶轮出口处气流部分动能转化为静

压。风机蜗壳设计方法主要基于阿基米德螺旋线法和基于对数螺旋线法[20]。为了便于加工本文离心风机蜗壳,采用阿基米德螺旋线法为设计方案,正方形的边长为 $A_2/4=50$ mm,从正方形的 4 个顶角,分别以 R_3、R_4、R_5、R_6为半径绘出相连的圆弧,即为风机蜗壳的外形,如图 11 所示。根据《农业机械设计手册》[14]中公式可计算出半径 R_3、R_4、R_5、R_6为

$$\begin{cases} R_3=\dfrac{D_2}{2}+\dfrac{1}{8}A_2=280\ \text{mm} \\ R_4=\dfrac{D_2}{2}+\dfrac{3}{8}A_2=330\ \text{mm} \\ R_5=\dfrac{D_2}{2}+\dfrac{5}{8}A_2=380\ \text{mm} \\ R_6=\dfrac{D_2}{2}+\dfrac{7}{8}A_2=430\ \text{mm} \end{cases} \tag{30}$$

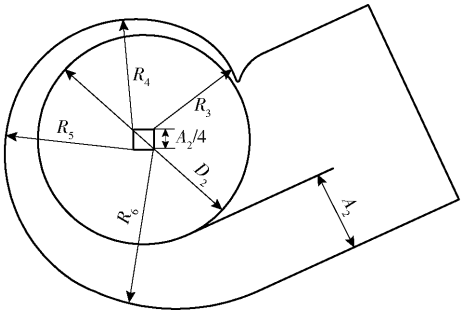


图 11 风机蜗壳结构参数示意图

Fig. 11 Schematic of fan volute structure parameters

2.4.4 风机转速计算

风机转速直接影响到清选装置的性能,风机转速过大会使玉米脱出物被吹出机体外,风机转速过小起不到风筛的作用,且风机转速在风机结构确定的前提下对气流流速有显著影响[21],其数值由风机工作全压决定。

为了确保风机能将脱出物中的杂质吹出机体外,同时具有较低损失率,根据流体动力学可知,清选风机风压计算式为

$$P_a=P_d+P_j \tag{31}$$

其中

$$\begin{cases} P_d=\dfrac{\rho v_a^2}{2} \\ v_a=\eta v_p \end{cases} \tag{32}$$

式中 P_a——风机出风口全压,Pa

P_d——风机出风口动压,Pa

P_j——风机出风口静压,Pa

v_a——风机出风口风速,m/s

v_p——玉米籽粒悬浮速度,取 13.46 m/s

η——速度增大系数,取 1.1[22]

其中 ρ 取 1.293 kg/m^3[23]。

风筛式清选装置中风机静压范围一般为 196~247 Pa[21],本文取 230 Pa;通过计算可得 P_d=141.72 Pa、P_a=371.72 Pa。

根据式(31)计算出的风机全压即可计算出风机转速 n 为

$$n=\frac{60}{\pi D_2}\sqrt{\frac{P_a}{\sigma\rho}} \tag{33}$$

式中 σ——计算系数,取 0.2[23]

通过式(33)可计算出 n 为 1 419 r/min,因此,设计风机最大转速为 1 450 r/min。

3 试验

3.1 试验条件与设备

采用新玉 335 为试验对象,于 2022 年 9 月在新疆维吾尔自治区昌吉市四畦村一队进行田间试验,搭载在牧神 4YZL-13 型玉米籽粒收获机上,机器以 8 km/h 的速度前进,作业幅宽为 6 m,玉米脱出物喂入量为 16 kg/s,玉米长势良好,无倒伏现象。试验器材主要有水分测量仪(分辨率 0.1%)、钢卷尺(精度 1 mm)、游标卡尺(精度 0.02 mm)、秒表、数显推拉力计、电子秤(精度 0.1 g)、籽粒样品袋、帆布等。测量玉米生物特性如表 1 所示。玉米籽粒收获机田间试验如图 12 所示。

表 1 植株物理参数

Tab. 1 Physical parameters of plants

参数	数值
植株行距/mm	495
植株株距/mm	266
自然株高/mm	2 822
百粒质量/g	46.6
最低结穗高度/mm	1 223
单穗籽粒质量/g	269.5
籽粒含水率/%	25.1



图 12 机具田间试验

Fig. 12 Machine field test

3.2 试验指标与方法

试验参照国家标准 GB/T 21962—2020《玉米收获机械》规定的试验方法与指标进行。在试验区域内,调整好机器参数后,机器每前进 20 m 作为一组试验,前后 10 m 为过渡区,从接粮口处取不少于 2 000 g 的脱出物,挑出杂质并称量,并计算籽粒含杂率;同时在试验区内,收集帆布中所有损失籽粒和未脱净的果穗,将其脱净后称量,并计算清选损失率。

籽粒含杂率计算公式为

$$Z=\frac{W_a}{W_z+W_a}\times 100\% \tag{34}$$

式中　W_z——粮仓内玉米籽粒质量，g

W_a——粮仓内杂质质量，g

清选损失率计算公式为

$$S=\frac{W_t}{W_z+W_t}\times 100\% \tag{35}$$

式中　W_t——作业后玉米籽粒损失质量，g

3.3　单因素试验

3.3.1　风机转速对清选性能的影响

为了探究风机转速对清选性能的影响，对不同水平下的风机转速进行单因素试验。根据前期预试验和机器可调范围确定风机转速为 850、1 000、1 150、1 300、1 450 r/min，将振动频率和上筛筛孔开度分别调至 5 Hz 和 20 mm。每组试验进行 3 次取均值，试验结果如图 13 所示。

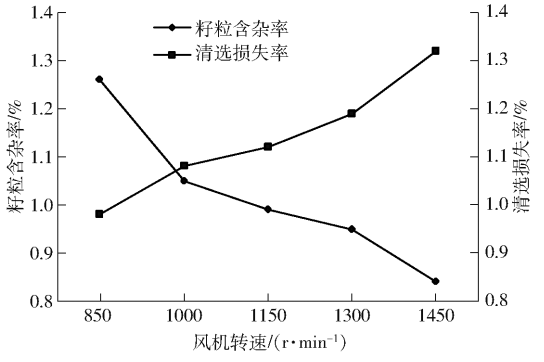


图 13　风机转速对清选性能的影响

Fig. 13　Influence of fan speed on cleaning performance

从图 13 中可知，籽粒含杂率随着风机转速的增加而减小，清选损失率随着风机转速的增加而增加。出现这种情况的原因是风机转速越高，气流速度越高，杂质在气流作用下被吹出机体外，从而减小了籽粒含杂率；但同时较大的风机转速容易把籽粒吹出机体外，导致清选损失率上升。风机转速为 850 ~ 1 000 r/min 时，籽粒含杂率下降幅度最大，清选损失率上升幅度较大；风机转速为 1 000 ~ 1 300 r/min 时，籽粒含杂率和清选损失率变化幅度较小；风机转速为 1 300 ~ 1 450 r/min 时，籽粒含杂率下降幅度较大，清选损失率上升幅度最大。综合上述分析，清选作业时风机转速较优范围为 1 000 ~ 1 300 r/min，此时籽粒含杂率和清选损失率均在较低水平。

3.3.2　振动频率对清选性能的影响

为了探究振动频率对清选性能的影响，对不同水平下的振动频率进行单因素试验。根据前期预试验和机器可调范围确定振动频率为 3、4、5、6、7 Hz，将风机转速和上筛筛孔开度分别调至 1 150 r/min 和 20 mm。每组试验进行 3 次取均值，试验结果如图 14 所示。

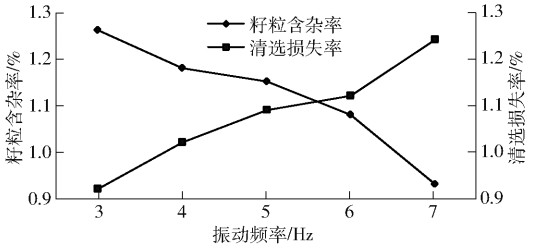


图 14　振动频率对清选性能的影响

Fig. 14　Influence of vibration frequency on cleaning performance

从图 14 中可知，籽粒含杂率随着振动频率的增加而减小，清选损失率随着振动频率的增加而增加。出现这种情况的原因是提高振动筛频率，杂质的运动速度和跳跃次数增加，停留在筛面上的时间及透筛概率减小，从而减小了籽粒含杂率；但振动频率的增加会使籽粒向后移动的速度增加，导致一少部分籽粒未来得及透筛便被抛出机体外，此外，振动频率增加会使籽粒抛起次数增加，减小了籽粒与筛孔的接触几率，从而导致清选损失率增高。振动频率为 3 ~ 4 Hz 时，籽粒含杂率下降幅度较大，清选损失率上升幅度较大；振动频率为 4 ~ 6 Hz 时，籽粒含杂率和清选损失率变化幅度较小；振动频率在 6 ~ 7 Hz 时，籽粒含杂率下降幅度最大，清选损失率上升幅度最大；从图中还可以看出，随着振动频率的增加，籽粒含杂率和清选损失率呈反比变化。综合上述分析，确定振动频率 4 ~ 6 Hz 时为开展玉米清选作业的较优区间。

3.3.3　上筛筛孔开度对清选性能的影响

为了探究上筛筛孔开度对清选性能的影响，对不同水平下的上筛筛孔开度进行单因素试验。根据前期预试验和机器可调范围确定上筛筛孔开度为 16、18、20、22、24 mm，将风机转速和振动频率分别调至 1 150 r/min 和 5 Hz。每组试验进行 3 次取均值，试验结果如图 15 所示。

从图 15 中可知，随着上筛筛孔开度不断增加，籽粒含杂率呈上升趋势，清选损失率呈下降趋势。出现这种情况的原因是上筛筛孔开度增大，杂质易透筛，导致籽粒含杂率增加；但过小的筛孔会使籽粒无法透筛，从而造成清选损失率增加。上筛筛孔开度为 16 ~ 18 mm 时，籽粒含杂率上升幅度较大，清选损失率下降幅度较大；上筛筛孔开度为 18 ~ 22 mm 时，籽粒含杂率和清选损失率变化幅度较小；上筛筛孔开度为 22 ~ 24 mm 时，籽粒含杂率上升幅度最大，清选损失率下降幅度较大。综合上述分析，玉米籽粒收获机清选作业时，上筛筛孔开度较优区

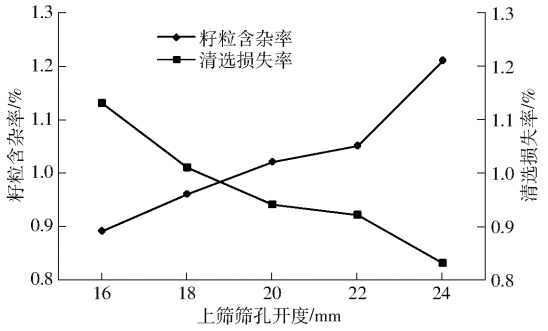


图 15 上筛筛孔开度对清选性能的影响

Fig. 15 Influence of opening of upper screen on cleaning performance

间为 18 ~22 mm,此时籽粒含杂率和清选损失率均在较低水平。

3.4 正交试验

3.4.1 试验设计与结果

根据单因素试验确定风机转速、振动频率、上筛筛孔开度的取值范围,以籽粒含杂率 Z 和清选损失率 S 作为评价指标,以风机转速、振动频率、上筛筛孔开度为试验因素,应用 Box - Behnken 正交试验法进行三因素三水平的田间试验。试验因素编码如表 2 所示。

表 2 正交试验因素编码

Tab. 2 Orthogonal test factors and coding

编码	因素		
	风机转速/($r \cdot min^{-1}$)	振动频率/Hz	上筛筛孔开度/mm
-1	1 000	4	18
0	1 150	5	20
1	1 300	6	22

正交试验设计方案及结果如表 3 所示。A、B、C 为因素编码值。

3.4.2 方差分析

由表 4 可知,籽粒含杂率模型 $P < 0.000\ 1$,说明以籽粒含杂率 Z 作为响应函数的回归模型具有高度的显著性,失拟项 $P = 0.193\ 1 > 0.05$ 不显著,说明模型较稳定,回归方程拟合较好。剔除不显著项建立籽粒含杂率 Z 与风机转速 A、振动频率 B、上筛筛孔开度 C 之间的二次多项式回归模型为

$$Z = 0.942 - 0.106A - 0.096B + 0.098C + 0.038AB + 0.045AC - 0.092A^2 - 0.107B^2 + 0.060C^2 \quad (36)$$

由表 4 可知,清选损失率模型 $P < 0.000\ 1$,说明以清选损失率 S 作为响应函数的回归模型具有高度的显著性,失拟项 $P = 0.134\ 2 > 0.05$ 不显著,说明模型较稳定,回归方程拟合较好。剔除不显著项建立清选损失率 S 与风机转速 A、振动频率 B、上筛筛孔开度 C 之间的二次多项式回归模型为

$$S = 0.946 + 0.201A + 0.168B - 0.104C - 0.090AB + 0.065BC + 0.141A^2 + 0.213B^2 - 0.114C^2 \quad (37)$$

表 3 正交试验设计方案与结果

Tab. 3 Orthogonal experimental design scheme and results

序号	因素			籽粒含杂率	清选损失率
	A	B	C	Z/%	S/%
1	-1	-1	0	0.95	0.82
2	1	-1	0	0.69	1.48
3	-1	1	0	0.72	1.30
4	1	1	0	0.61	1.60
5	-1	0	-1	0.98	0.88
6	1	0	-1	0.65	1.29
7	-1	0	1	1.08	0.74
8	1	0	1	0.93	0.98
9	0	-1	-1	0.90	1.02
10	0	1	-1	0.69	1.26
11	0	-1	1	1.12	0.70
12	0	1	1	0.87	1.20
13	0	0	0	0.97	0.99
14	0	0	0	0.91	0.93
15	0	0	0	0.94	0.95
16	0	0	0	0.96	0.89
17	0	0	0	0.93	0.97

表 4 方差分析

Tab. 4 Analysis of variance

方差来源	籽粒含杂率 Z		清选损失率 S	
	F	P	F	P
模型	41.34	< 0.000 1 **	37.71	< 0.000 1 **
A	94.99	< 0.000 1 **	108.03	< 0.000 1 **
B	77.95	< 0.000 1 **	74.83	< 0.000 1 **
C	79.99	< 0.000 1 **	28.71	0.001 1 **
AB	5.92	0.045 3 *	10.80	0.013 4 *
AC	8.52	0.022 4 *	2.41	0.164 6
BC	0.42	0.537 3	5.63	0.049 3 *
A^2	37.69	0.000 5 **	27.81	0.001 2 **
B^2	50.94	0.000 2 **	63.84	< 0.000 1 **
C^2	16.08	0.005 1 **	18.32	0.003 7 **
失拟项	2.56	0.193 1	3.40	0.134 2

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

3.4.3 响应面分析

为了更直观分析各试验因素对评价指标的影响,绘制因素交互作用对籽粒含杂率 Z 和清选损失率 S 影响的响应曲面,如图 16、17 所示。

由图 16a 可知,当风机转速一定时,籽粒含杂率随着振动频率的增加而逐渐减小,出现这种情况的原因是:提高振动频率有利于脱出物在筛面上更好分层,提高筛分效率,减小籽粒含杂率;当振动频率

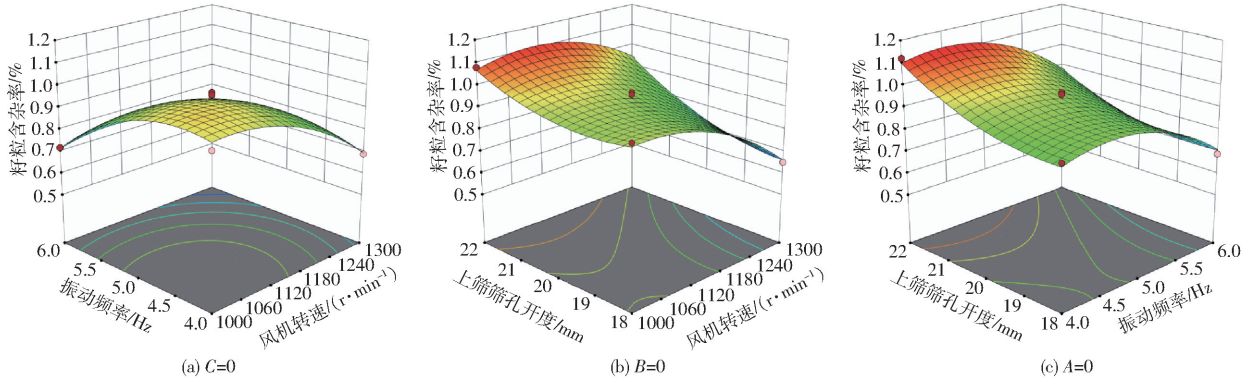


图 16　因素交互作用对籽粒含杂率影响的响应曲面

Fig. 16　Response surfaces of influence of factor interaction on grain impurity content

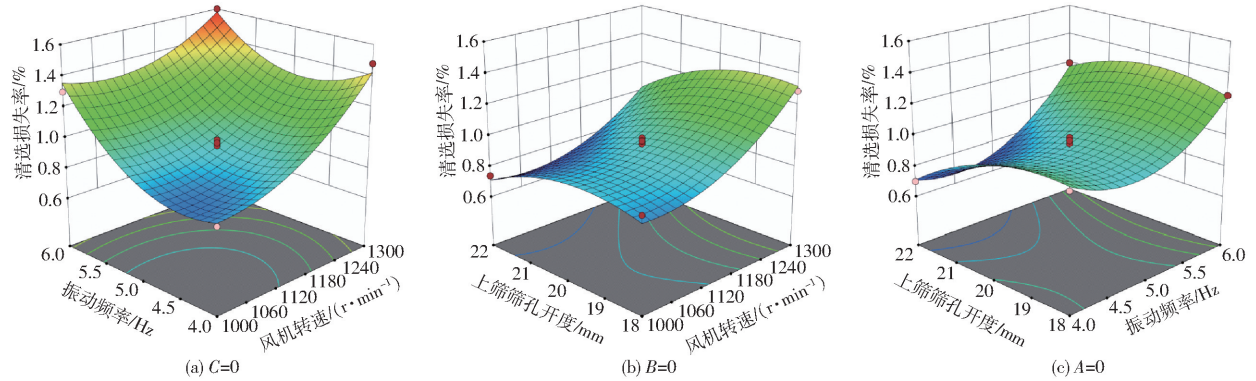


图 17　因素交互作用对清选损失率影响的响应曲面

Fig. 17　Response surfaces of influence of factor interaction on cleaning loss rate

一定时，籽粒含杂率随着风机转速的增加而逐渐减小，出现这种情况的原因是：风机转速增加，风量随之增加，风量越大玉米脱出物中杂质容易被吹出机体外。由图 16b 可知，当风机转速一定时，籽粒含杂率随着上筛筛孔开度的增加而逐渐增加，出现这种情况的原因是：随着上筛筛孔开度的不断增加，玉米脱出物中较大杂质会随籽粒一起进入粮仓导致籽粒含杂率增大；当上筛筛孔开度一定时，籽粒含杂率随着风机转速的增加而逐渐减小。由图 16c 可知，当振动频率一定时，籽粒含杂率随着上筛筛孔开度的增加而逐渐增加；当上筛筛孔开度一定时，籽粒含杂率随着振动频率的增加而逐渐减小。

由图 17a 可知，当风机转速一定时，清选损失率随着振动频率的增加而逐渐增加，出现这种情况的原因是：提高振动频率可以增大振动筛振动强度，但过大的振动频率会把籽粒和杂质一起筛出机体外，导致清选损失率增加；当振动频率一定时，清选损失率随着风机转速的增加而逐渐增加，出现这种情况的原因是：风机转速增加风量随之增加，但过大的风量会把籽粒和杂质一起吹出机体外，从而导致清选损失率增加。由图 17b 可知，当风机转速一定时，清选损失率随着上筛筛孔开度的增加而逐渐减小，出现这种情况的原因是：上筛筛孔开度增加玉米脱出物中籽粒容易透筛进入粮仓，清选损失率降低；当上筛筛孔开度一定时，清选损失率随着风机转速的增加而逐渐增加。由图 17c 可知，当振动频率一定时，清选损失率随着上筛筛孔开度的增加而逐渐减小；当上筛筛孔开度一定时，清选损失率随着振动频率的增加而逐渐增加。

3.4.4　参数优化与验证

采用 Design-Expert 12 优化模块进行优化求解[24-25]，优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min Z(A,B,C) \\ \min S(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{38}$$

优化得出较优组合为：风机转速 1 202.50 r/min、振动频率 5.41 Hz、上筛筛孔开度 18 mm，在此条件下籽粒含杂率为 0.79%，清选损失率为 1.10%。

2022 年 9 月验证试验于新疆维吾尔自治区昌吉市四畦村一队进行了 3 次，试验结果如表 5 所示，结果取均值，田间验证试验如图 18 所示。考虑田间试验准确性，将工作参数调节为风机转速 1 200 r/min、振动频率 5 Hz、上筛筛孔开度 18 mm。此时籽粒含杂率为 0.82%，清选损失率为 1.14%，试验值与优

化值相对误差均小于5%,满足作业要求。

表5 优化后试验结果

Tab.5 Test results after optimization %

序号	籽粒含杂率	清选损失率
1	0.79	1.09
2	0.85	1.18
3	0.83	1.15
均值	0.82	1.14



图18 田间验证试验

Fig.18 Field validation test

3.5 对比试验

采用牧神4YZL-13型玉米籽粒机为载体,更换两种不同类型的清选装置进行试验,传统双层清选装置结构如图19所示(传统双层清选装置在玉米脱出物喂入量为8 kg/s时,最优工作参数为风机转速1 070 r/min、振动频率4 Hz、上筛筛孔开度18 mm、下筛筛孔开度15 mm)。机器分别以6、7、8、9 km/h的速度前进(对应玉米脱出物喂入量分别为12、14、16、18 kg/s),作业幅宽为6 m,滚筒转速400 r/min,凹板间隙30 mm,风机转速1 200 r/min,振动频率5 Hz,上筛筛孔开度18 mm,下筛筛孔开度15 mm,其他条件均保持不变,每组试验进行3次,结果取均值,如表6、7所示。带预清选的清选装置可以有效把脱出物中的杂质吹出机体外且清选损失率较低,行进速度为6、7、8、9 km/h时籽粒含杂率分别比传统双层清选装置降低1.12、1.52、2.07、2.27个百分点;清选损失率分别比传统双层清选装置降低1.29、1.66、2.13、2.16个百分点。因此,在玉米籽粒收获作业中,选择带有预清选功能的清选装置更优。

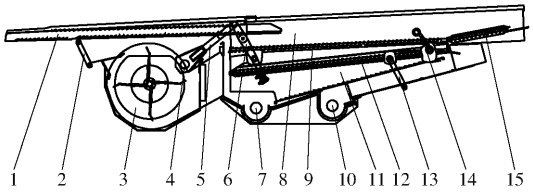


图19 传统双层清选装置结构示意图

Fig.19 Diagram of traditional double-layer cleaning device

1.抖动板 2.支杆 3.风机 4.曲柄 5.连杆 6.双臂摇杆 7.输粮螺旋输送器 8.上清选筛箱 9.上清选筛 10.杂余螺旋输送器 11.下清选筛箱 12.下清选筛 13.下清选筛吊杆 14.上清选筛吊杆 15.尾筛

表6 带预清选清选装置试验结果

Tab.6 Test results of cleaning device with pre-cleaning %

序号	籽粒含杂率 Z				清选损失率 S			
	6 km/h	7 km/h	8 km/h	9 km/h	6 km/h	7 km/h	8 km/h	9 km/h
1	0.67	0.82	0.78	0.99	1.07	1.35	1.10	1.96
2	0.75	0.76	0.85	1.17	0.99	1.24	1.18	1.84
3	0.74	0.79	0.84	1.11	1.03	1.22	1.14	1.81
均值	0.72	0.79	0.82	1.09	1.03	1.27	1.14	1.87

表7 传统双层清选装置试验结果

Tab.7 Test results of traditional double-layer cleaning device %

序号	籽粒含杂率 Z				清选损失率 S			
	6 km/h	7 km/h	8 km/h	9 km/h	6 km/h	7 km/h	8 km/h	9 km/h
1	1.91	2.38	2.94	3.42	2.40	3.01	3.31	3.98
2	1.82	2.27	2.85	3.32	2.29	2.87	3.26	4.08
3	1.79	2.28	2.88	3.34	2.27	2.91	3.24	4.03
均值	1.84	2.31	2.89	3.36	2.32	2.93	3.27	4.03

4 结论

(1)设计了具有预清选功能的清选装置,玉米脱出物在预清选筛部位初步进行筛分,有效地减少了杂质进入振动筛的可能,能够减轻振动筛筛分压力,降低籽粒含杂率和清选损失率。

(2)通过单因素试验确定风机转速、振动频率、上筛筛孔开度取值范围。通过正交试验可得,籽粒含杂率因素影响由大到小为:风机转速、上筛筛孔开度、振动频率;对清选损失率因素影响由大到小为:风机转速、振动频率、上筛筛孔开度。

(3)通过Design-Expert 12软件,得到较优组合为:风机转速1 202.50 r/min、振动频率5.41 Hz、上筛筛孔开度18 mm,在此条件下,籽粒含杂率为0.79%,清选损失率为1.10%。验证试验表明:玉米脱出物喂入量为16 kg/s,风机转速1 200 r/min、振动频率5 Hz、上筛筛孔开度18 mm时,籽粒含杂率为0.82%,清选损失率为1.14%,试验值与优化值相对误差小于5%。与传统双层往复振动筛清选装置相比籽粒含杂率降低2.07个百分点,清选损失率降低2.13个百分点,表明清选装置设计合理,为研究大喂入量谷物联合收获机清选装置提供了理论依据。

参 考 文 献

[1] 陈庆文,韩增德,崔俊伟,等. 自走式谷物联合收割机发展现状及趋势分析[J]. 中国农业科技导报, 2015,17(1):109-114.

CHEN Qingwen, HAN Zengde, CUI Junwei, et al. Development status and trend analysis of self-propelled grain combine harvester[J]. China Agricultural Science and Technology Review, 2015, 17(1): 109 - 114. (in Chinese)

[2] 李心平,孟亚娟,张家亮,等. 辊搓圆筒筛式谷子清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 92 - 102, 136.
LI Xinping, MENG Yajuan, ZHANG Jialiang, et al. Design and experiment of grain cleaning device with roller rolling cylinder and sieve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 92 - 102, 136. (in Chinese)

[3] 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, MOU Xiaodong, ZHANG Guodong, et al. Mechanism analysis and optimization experiment of wheat combine cleaning[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(1): 219 - 230. (in Chinese)

[4] 江涛,李海同,关卓怀,等. 油菜收获清选筛面物料匀散导流装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 146 - 158.
JIANG Tao, LI Haitong, GUAN Zhuohuai, et al. Design and experiment of uniform dispersion diversion device for screen surface material in rape harvest cleaning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 146 - 158. (in Chinese)

[5] 樊荣,崔清亮,卢琦,等. 风筛式清选装置筛下物料分布规律研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(1): 142 - 151.
FAN Rong, CUI Qingliang, LU Qi, et al. Study on distribution law of materials under screen in air screen cleaning device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(1): 142 - 151. (in Chinese)

[6] 侯俊铭,任兆坦,朱红杰. 双层倾斜振动风筛式蓖麻清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2): 39 - 51.
HOU Junming, REN Zhaotan, ZHU Hongjie. Design and experiment of double-layer tilting vibrating air screen castor cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 39 - 51. (in Chinese)

[7] IVANOV N M, FEDORENKO I Y, ZAKHAROV S E, et al. Evaluating grain feed at separation by planetary cylindrical sieve with round holes[J]. Siberian Herald of Agricultural Science, 2017, 47(5): 72 - 79.

[8] LAWINSKA K, MODRZEWSKI R. Analysis of sieve holes blocking in a vibrating screen and a rotary and drum screen[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2017, 53(2): 812 - 828.

[9] LI Z, TONG X, ZHOU B, et al. Design and efficiency research of a new composite vibrating screen[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018(2): 1 - 8.

[10] 王立军,刘伟腾,李懿航,等. 大喂入量玉米籽粒收获机清选系统双层筛孔抖动板研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 92 - 102.
WANG Lijun, LIU Weiteng, LI Yihang, et al. Research on double-layer jitter plates in large-feeding mass cleaning system of maize grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 92 - 102. (in Chinese)

[11] 冯鑫,王立军,于琨蒙,等. 玉米籽粒清选波浪筛机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 142 - 154.
FENG Xin, WANG Lijun, YU Kunmeng, et al. Design and experiment of wave screen mechanism for corn grain cleaning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 142 - 154. (in Chinese)

[12] 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]. 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-layer different direction cleaning device for longitudinal axial flow combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 239 - 248. (in Chinese)

[13] 王立军,马杨,冯鑫,等. 玉米籽粒收获机分段式振动筛清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 89 - 100.
WANG Lijun, MA Yang, FENG Xin, et al. Design and experiment of sectional-type vibrating screen cleaning device for corn grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 89 - 100. (in Chinese)

[14] 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.

[15] 周杨,秦代林,李奇强,等. 基于 EDEM 薏苡振动筛清选装置优化设计与试验[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(11): 68 - 76.
ZHOU Yang, QIN Dalin, LI Qiqiang, et al. Optimization design and test of vibration screen cleaning device based on EDEM[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(11): 68 - 76. (in Chinese)

[16] 王立军,段良坤,郑招辉,等. 三移动两转动振动筛驱动机构优化与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 138 - 145.
WANG Lijun, DUAN Liangkun, ZHENG Zhaohui, et al. Optimization and test of driving mechanism of three-movement and two-rotation shaker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 138 - 145. (in Chinese)

[17] 李菊,曾氢菲,邓嘉鸣,等. 多维并联振动筛筛分过程解析与筛面运动形式优选[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 399 - 407.
LI Ju, ZENG Qingfei, DENG Jiaming, et al. Analysis of screening process and optimization of screen surface motion pattern of multi-dimensional parallel vibrating screen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 399 - 407. (in Chinese)

[18] 张黎骅,邱清宇,秦代林,等. 大豆玉米兼用清选装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 21 - 30.
ZHANG Lihua, QIU Qingyu, QIN Dailin, et al. Design and experiment of simultaneous cleaning device for soybean and corn[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(15): 21 - 30. (in Chinese)

(下转第 166 页)

HUANG Wenyue, WEI Xinhua, WANG Anzhe, et al. Straight line path tracking control of agricultural tractortrailer based on fuzzy fast sliding mode[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 415 - 422. (in Chinese)

[18] 周兵,徐蒙,袁希文,等. 基于滑模极值搜索算法的车辆驱动防滑控制策略[J]. 农业机械学报,2015,46(2):307 - 311,42.
ZHOU Bing, XU Meng, YUAN Xiwen, et al. Acceleration slip regulation based on extremum seeking control with sliding mode [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 307 - 311,42. (in Chinese)

[19] BRACH R. Adhesion, hysteresis and the peak longitudinal tire force[D]. Notre Dame: University of Notre Dame, 2006.

[20] 李雪栋, 贺林, 叶炜, 等. 电动汽车 TCS 滑模控制器设计[J]. 计算机仿真, 2020, 37(2): 144 - 148,230.
LI Xuedong, HE Lin, YE Wei, et al. Design of the sliding mode controller of TCS for electric vehicle[J]. Computer Simulation, 2020, 37(2): 144 - 148,230. (in Chinese)

[21] 张鹏, 张金鹏. 变结构控制的抖振问题研究[J]. 航空兵器, 2013(2): 9 - 13.
ZHANG Peng, ZHANG Jinpeng. Study on chattering of variable structure control[J]. Aero Weaponry, 2013(2): 9 - 13. (in Chinese)

[22] 刘壮壮. 基于 LOS 视线导引法的农机路径跟踪系统滑模控制策略研究[D]. 镇江:江苏大学, 2022.
LIU Zhuangzhuang. Research on sliding mode control strategy of agricultural tractor part tracking system based on LOS guidance method[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)

[23] 陈雨. 高地隙喷雾机独立式立轴空气悬架设计方法与特性研究[D]. 北京:中国农业大学, 2017.
CHEN Yu. Research on design methods and characteristics of independent strut type air suspension system for high clearance sprayer[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[24] 薛涛, 李伟, 杜岳峰, 等. 大型高地隙喷雾机喷杆主动悬架自适应模糊滑模控制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 47 - 56.
XUE Tao, LI Wei, DU Yuefeng, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control of spray boom active suspension for large high clearance sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 47 - 56. (in Chinese)

[25] LIU H, YAN S, SHEN Y, et al. Model predictive control system based on direct yaw moment control for 4WID self-steering agriculture vehicle[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(2): 175 - 181.

(上接第 147 页)

[19] 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 of double-cone centrifugal cleaning fan for semi-fed combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 193 - 202. (in Chinese)

[20] 李佳峻,王军,蒋博彦,等. 控制周向截面积分布的风机蜗壳优化设计方法[J]. 工程热物理学报, 2018,39(12):2665 - 2669.
LI Jiajun, WANG Jun, JIANG Boyan, et al. Optimal design method of fan volute controlling circumferential cross-sectional area distribution[J]. Chinese Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(12): 2665 - 2669. (in Chinese)

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

[22] 崔涛. 油莎豆收获机风选除杂部件的试验研究[D]. 长春:吉林农业大学,2022.
CUI Tao. Experimental study on air separation and impurity removal components of oil bean harvester[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[23] 杨洋,孙步功,张鹏,等. 4LZY - 7 型全喂入油菜联合收获机的设计与试验[J]. 干旱地区农业研究, 2019,37(3): 283 - 290,298.
YANG Yang, SUN Bugong, ZHANG Peng, et al. Design and experiment of 4LZY - 7 all-feeding rapeseed combine harvester [J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2019, 37(3): 283 - 290,298. (in Chinese)

[24] 王立军,张传根,丁振军. 玉米收获机清选筛体结构优化[J]. 农业机械学报, 2016,47(9):108 - 114.
WANG Lijun, ZHANG Chuangen, DING Zhenjun. Optimization of sifter structure of corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 108 - 114. (in Chinese)

[25] 张佳喜,芮照钰,蔡佳麟,等. 前置式皮带夹持输送棉秆起拔机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(12):77 - 84,152.
ZHANG Jiaxi, RUI Zhaoyu, CAI Jialin, et al. Design and experiment of cotton straw puller for front-mounted belt holding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 77 - 84,152. (in Chinese)