

切流式油葵脱粒筛分机设计与试验

郝建军^{1,2} 魏文波^{1,2} 秦家辉^{1,2} 朱志民^{1,2} 律秀燕³ 杨淑华^{1,2}

(1. 河北农业大学机电工程学院, 保定 071001; 2. 河北省智慧农业装备技术创新中心, 保定 071001;

3. 黄骅市农业农村局, 黄骅 061100)

摘要: 针对油葵脱粒生产中存在的油葵籽粒含杂率、损失率高等问题,设计了一种切流式油葵脱粒筛分机。利用 RecurDyn 软件建立了振动筛动力学模型,以筛面质心点为对象分析了筛面运动规律。结果表明,该振动筛的运动有利于油葵籽粒向前输送和分散,可有效避免堆积堵塞现象。通过单因素试验确定了滚筒转速、喂入量、预设脱粒间隙的取值范围;以滚筒转速、喂入量、预设脱粒间隙为试验因素,油葵籽粒含杂率、损失率为评价指标,设计 Box - Behnken 试验,运用 Design-Expert 10.0.7 软件对 Box - Behnken 试验结果进行方差分析,建立了评价指标与试验因素的回归模型。以降低油葵籽粒含杂率、损失率为目标,对滚筒转速、喂入量、预设脱粒间隙进行多目标寻优求解,获得了较优工作参数组合:滚筒转速 264 r/min、喂入量 1.9 kg/s、预设脱粒间隙 36 mm。脱粒试验结果表明,油葵籽粒含杂率、损失率分别为 1.94%、2.64%,满足脱粒要求。

关键词: 油葵; 脱粒装置; 筛分装置; 切流式; 参数优化

中图分类号: S225.2⁺9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)02-0139-10

OSID:



Design and Test of Cut-flow Type Oil Sunflower Threshing and Screening Machine

HAO Jianjun^{1,2} WEI Wenbo^{1,2} QIN Jiahui^{1,2} ZHU Zhimin^{1,2} LÜ Xiuyan³ YANG Shuhua^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China

2. Technology Innovation Center of Intelligent Agricultural Equipment of Hebei Province, Baoding 071001, China

3. Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Huanghua City, Huanghua 061100, China)

Abstract: Aiming at the problems of high impurity rate and high loss rate of oil sunflower seeds in oil sunflower threshing production, a cut-flow oil sunflower threshing and screening machine was designed. The dynamic model of the vibrating screen was established by using RecurDyn software, and the motion law of the screen surface was analyzed with the center of mass point of the screen surface as the object. The results showed that the movement of the vibrating screen was conducive to forward transportation and dispersion of oil sunflower seeds, and it can effectively avoid the phenomenon of accumulation and clogging. The value range of drum speed, feeding amount, and preset threshing gap were determined through single factor test. Taking drum speed, feeding amount, and preset threshing gap as test factors, oil sunflower seeds impurity rate and loss rate were evaluation indicators, the Box - Behnken test was designed, and the Design-Expert 10.0.7 software was used to analyze the variance of the Box - Behnken test results, and a regression model of evaluation indicators and test factors was established. In order to reduce the impurity rate and loss rate of oil sunflower seeds, multi-objective optimization of the drum speed, feeding amount, and preset threshing gap was carried out, and a better combination of working parameters was obtained as follows: drum speed was 264 r/min, feeding amount was 1.9 kg/s, and the preset threshing gap was 36 mm. The results of the threshing test showed that the impurity rate and loss rate of oil sunflower seeds were 1.94% and 2.64%, respectively, which met the requirements of threshing.

Key words: oil sunflower; threshing device; screening device; cut-flow type; parameter optimization

收稿日期: 2021-10-24 修回日期: 2021-11-16

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系创新团队项目(HBCT2018090206)

作者简介: 郝建军(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化技术与装备研究,E-mail: hjpaper@163.com

0 引言

油葵,即油用向日葵,以抗旱耐碱盐、适应性强的特点广泛种植于世界各地,是中国重要的油料作物之一。目前,在油葵种植较为分散的地区多采用分段收获^[1-4],而分段收获模式下,油葵的脱粒和筛分过程对油葵籽粒的含杂率和损失率具有重要影响。油葵籽粒紧密附着在柔性油葵盘上,且附着力较小,易脱落。油葵盘质软易破碎,经脱粒破碎后的油葵盘与籽粒极易混杂在一起,筛分难度增大,导致油葵籽粒含杂率、损失率增高。

近年来,科技工作者针对脱粒筛分装置开展了大量研究。如,张学军等^[5]针对传统油葵脱粒机脱粒适应性差问题,设计了一种变隙式油葵脱粒装置;马少腾等^[6]、李茜等^[7]分析了脱粒滚筒形式和工作参数对脱粒效果的影响;李耀明等^[8-9]、WANG等^[10]通过试验证实了多滚筒脱粒装置具有脱分时间长、脱粒柔和、破碎率小等优点;李心平等^[11]、王占滨等^[12]相关研究表明纵轴流式脱粒装置适合谷物、玉米等不易破碎的农作物;王立军等^[13-16]对玉米籽粒收获机的筛选装置进行了大量研究,分析了振动筛结构、运动形式、筛孔类型等对筛分性能的影响;栗晓宇等^[17]通过建立玉米籽粒在振动筛上运动的数学模型,分析了振动筛工作参数与籽粒运动的关系;卢琦等^[18]利用 Adams 软件建立了振动筛动力学模型,并分析了振动筛筛面的运动特性。上述相关研究成果为油葵脱粒筛分装置研发提供了借鉴。

针对油葵籽粒含杂率、损失率高等问题,本文基于“轻击打、重揉搓”的作业方式,设计一种切流式油葵脱粒筛分机。利用单因素试验与 Box - Behnken 试验,对其工作参数进行优化,通过样机试验验证机器的作业效果。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

切流式油葵脱粒筛分机主要由脱粒装置和筛分装置组成,如图 1 所示(为展示整机内部结构,将上盖、侧板隐藏)。其中脱粒装置主要由 4 级脱粒滚筒、组合式凹板筛、脱粒间隙调节机构等构成,4 级脱粒滚筒采用串联工作方式,其两端由轴承座固定于机架上,由 B 型带顺次连接;组合式凹板筛由 4 个凹板筛组成,利用铰接轴依次穿入错位排布的铰接套,将相邻凹板筛活动铰接;脱粒间隙调节机构由提升丝杠、弹簧、螺母、套筒组成,弹簧套在提升丝杠上,由螺母压紧,提升丝杠下端焊接有套筒,由套筒与铰接轴连接。筛分装置主要由上层振动筛、下层

振动筛、偏心轮、摇杆、连杆组件、摆动臂等构成。偏心轮与第 1 级脱粒滚筒同轴,上、下层振动筛由摇杆悬挂在机架上,由偏心轮带动连杆组件驱动摆动臂控制两层振动筛保持方向始终相反的运动。

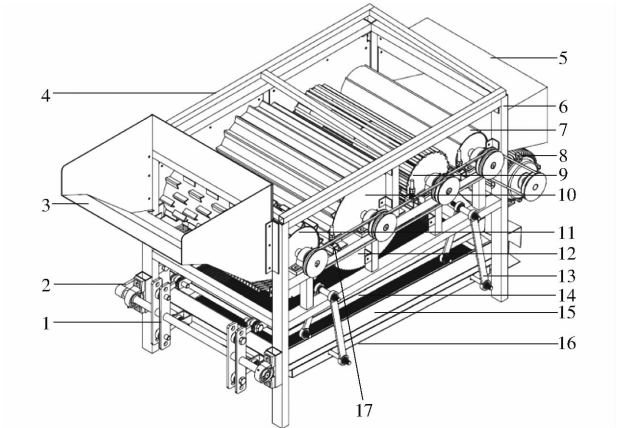


图 1 切流式油葵脱粒筛分机结构示意图
Fig.1 Schematic of structure of cut-flow type oil sunflower threshing and screening machine

1. 摆动臂 2. 连杆组件 3. 喂料口 4. 上盖 5. 脱粒装置排杂口 6. 机架 7. 第 4 级脱粒滚筒 8. 电机 9. 第 3 级脱粒滚筒 10. 第 2 级脱粒滚筒 11. 第 1 级脱粒滚筒 12. 组合式凹板筛 13. 摇杆 14. 上层振动筛 15. 下层振动筛 16. 导土盒 17. 脱粒间隙调节机构

1.2 工作原理

切流式油葵脱粒筛分机由电机提供动力驱动脱粒滚筒和双层异向振动筛。油葵脱粒过程如图 2 所示,工作时,采用径向喂入、径向排出的方式,油葵盘沿垂直脱粒滚筒轴的方向连续喂入,被第 1 级脱粒滚筒卷入脱粒滚筒与凹板筛组成的脱粒间隙中,受到脱粒滚筒与凹板筛的挤压、揉搓和击打作用。已脱粒的油葵盘和无法透过凹版筛的油葵盘破碎物由脱粒装置排杂口排出,油葵籽粒和可透过凹版筛的油葵盘破碎物靠重力作用落入筛分装置,由双层异向振动筛将油葵籽粒与杂质分离。

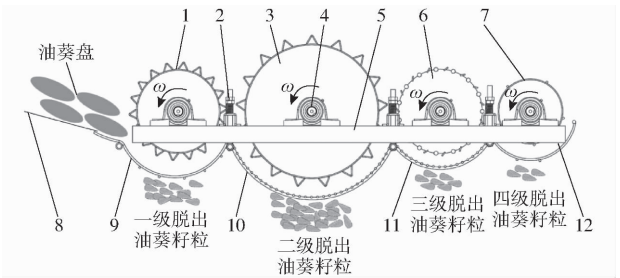


图 2 脱粒过程示意图

Fig.2 Schematic of threshing process

1. 第 1 级脱粒滚筒 2. 脱粒间隙调节机构 3. 第 2 级脱粒滚筒 4. 轴承座 5. 机架 6. 第 3 级脱粒滚筒 7. 第 4 级脱粒滚筒 8. 喂料口 9. 第 1 级凹板筛 10. 第 2 级凹板筛 11. 第 3 级凹板筛 12. 第 4 级凹板筛

机器主要设计参数如表 1 所示。

表 1 切流式油葵脱粒筛分机主要参数

Tab.1 Main parameters of cut-flow type oil sunflower threshing and screening machine

参数	数值/型式
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 227×850×1 255
电机功率/kW	4
脱粒滚筒型式	切流多级串联式
凹板筛型式	组合式
喂入量/(kg·s ⁻¹)	1~3
脱粒间隙调节范围/mm	15~84

2 脱粒装置设计

2.1 脱粒方案

脱粒装置主要靠冲击、揉搓、碾压、梳刷等方式完成对农作物的脱粒工作^[19-20]。油葵盘质软易碎，油葵籽粒对油葵盘的附着力较小，易脱落，故“轻击打、重揉搓”的脱粒方式可减轻油葵盘在脱粒过程中的破碎程度、降低筛分难度、提高脱粒性能。多级脱粒滚筒的脱分行程长，对葵盘的击打柔和，脱粒干净且分离性能好^[21-22]，因此本文采用“揉搓为主，击打为辅”的多级滚筒串联式脱粒方案。

2.2 脱粒滚筒

脱粒滚筒长度和直径是影响脱粒效果和生产率的重要因素。滚筒直径太小，脱粒行程短，脱粒不彻底；滚筒直径太大，脱粒装置体积和重量大、整机尺寸大、功耗高。结合油葵盘直径和纹杆滚筒标准^[21,23]，脱粒滚筒直径需满足

$$D \geq \frac{1.5D_1}{\pi} \tag{1}$$

式中 D ——脱粒滚筒直径,mm

D_1 ——油葵盘直径,120~257 mm

由公式(1)计算可知,脱粒滚筒直径应大于123 mm,大直径的脱粒滚筒脱分行程长,且在同样的脱粒负荷下,大直径脱粒滚筒脱粒功耗比小直径脱粒滚筒稍小^[21,24]。根据 GB/T 3091—2015,直径大于123 mm的常见直缝钢管型号主要有 DN150、DN200、DN250、DN300、DN400 等。结合结构和整机尺寸设计要求,确定第1、3级脱粒滚筒直径为250 mm,第2级脱粒滚筒直径为主脱粒滚筒,在满足整机尺寸设计要求的前提下,应选择较大直径以保证该段的脱分时间,第2级脱粒滚筒直径设定为400 mm。当油葵盘输送至第4级脱粒滚筒时,油葵盘上油葵籽粒较少,应适当降低油葵盘的停留过程,因此选取第4级脱粒滚筒直径为200 mm。

切流式脱粒滚筒采用径向喂入的方式,故滚筒越长处理量越大,但过长会导致功耗增加。脱粒滚

筒长度范围的确定公式为

$$L \geq q/q_0 \tag{2}$$

式中 L ——脱粒滚筒长度,m
 q ——脱粒装置喂入量,取 3 kg/s
 q_0 ——脱粒滚筒单位长度允许承担的喂入量,经试验测得范围为 4~5 kg/(s·m)

由公式(2)计算获得脱粒滚筒长度范围为 600~750 mm,结合葵盘直径并参考双滚筒式脱粒装置滚筒长度标准^[19,21],脱粒滚筒长度拟定为 700 mm,结构如图 3 所示。

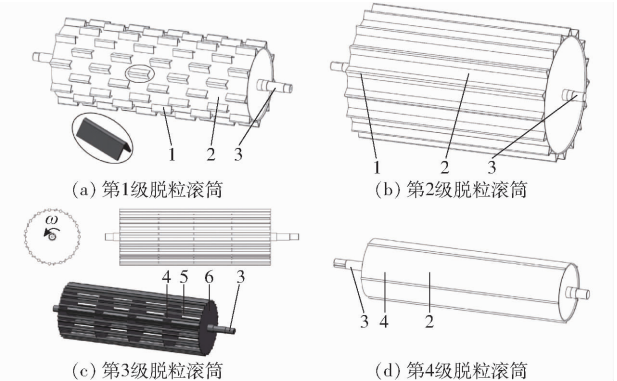


图 3 脱粒滚筒结构示意图

Fig.3 Schematics of threshing drum structure

1. 脱粒元件 2. 圆筒 3. 滚筒轴 4. 纹杆 5. 钢板 6. 辐板

图 3a 所示为第 1 级脱粒滚筒结构,顶端为弧形的 90 个脱粒元件交错排列焊接在圆筒上。弧形顶端和交错排列可减轻脱粒元件对油葵盘的击打程度,降低油葵盘的破碎程度,缓解筛分装置的筛分负担。图 3b 所示为第 2 级脱粒滚筒结构,脱粒元件(顶端为弧形折弯钢板,厚度 3 mm,长度 700 mm)等间距焊接在滚筒外壁,脱粒元件个数计算式为

$$z = \frac{\pi D}{l_1} \tag{3}$$

式中 z ——脱粒元件个数,个

l_1 ——脱粒元件中心距(以圆周弧长计),mm
由 $D=400$ mm, $l_1=74$ mm 计算并取整得 $z=17$ 。

图 3c 所示为第 3 级脱粒滚筒结构,由纹杆和条状钢板组成的脱粒元件交替焊接在辐板切槽处。纹杆揉搓油葵盘上的油葵籽粒,钢板击打油葵盘,揉搓和击打交替有利于油葵籽粒的脱落,且对油葵盘的损伤较小。经预试验观察,纹杆(直径 12 mm)与钢板(宽度 14 mm,厚度 3 mm)的间距设置为油葵盘厚度的一半以下时,油葵盘均无法进入开放式滚筒内,故纹杆与钢板间距(以钢板与纹杆的最小距离计)设置为 8 mm。图 3d 所示为第 4 级脱粒滚筒结构,脱粒元件等间距焊接在滚筒外壁。经过前 3 级脱粒,油葵盘上的未脱净油葵籽粒较少(大多处于油葵边缘和中心),油葵盘质地变得疏松易破碎,为避

免因油葵盘破碎而导致的油葵籽粒筛分难度增大现象,第4级脱粒滚筒上的脱粒元件沿滚筒圆周应分散设置。预试验结果表明,第4级脱粒滚筒的脱粒元件(直径12 mm的纹杆)为5个时脱粒效果最好。

2.3 组合式凹板筛

凹板筛主要作用为配合脱粒滚筒完成脱粒并将油葵籽粒与油葵盘及破碎物分离。油葵脱粒机上常用栅格式凹板筛,但其横隔板有棱角,在脱粒过程中棱角对油葵盘产生较大冲击,极易造成破碎,堵塞凹板筛筛孔,导致损失率与含杂率升高。为此,本文设计了一种组合式凹板筛(图4),由圆柱钢筛条和侧板组成,整体无棱角且增大了凹板筛的筛孔率,降低了凹板筛对油葵盘的碰撞强度,提高了凹板筛的通过性。前期预试验表明,筛条安装方向与物料运动方向垂直的凹板筛比筛条安装方向与物料运动方向相同的凹板筛脱粒时间延长了10%左右。故设定第1、4级凹板筛筛条安装方向与物料运动方向相同,降低此阶段油葵盘的前进阻力,保证喂料和排杂的顺畅;设定第2、3级凹板筛筛条方向与物料运动方向垂直,增大筛条对油葵盘行进的阻力,延长脱粒时间。各级凹板筛通过铰接轴连接,凹板筛更换便捷,且利于逐级调节。经预试验观察,当凹板筛的筛条间距设置为11.5 mm,油葵籽粒可轻松透过凹板筛,而油葵盘及较大的油葵盘破碎物无法透过凹板筛,故各级凹板筛筛条间距均设置为11.5 mm。

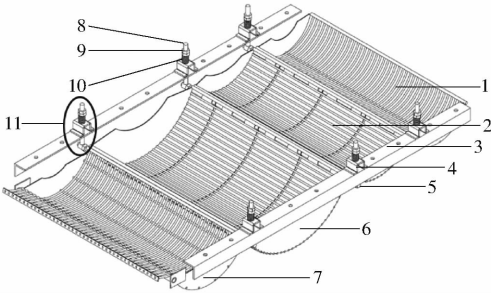


图4 组合式凹板筛和脱粒间隙调节机构结构示意图
Fig.4 Schematic of structure of combined concave plate screen and threshing gap adjustment mechanism

1. 第4级凹板筛 2. 第3级凹板筛 3. 机架 4. 脱粒间隙调节机构固定架 5. 铰接轴 6. 第2级凹板筛 7. 第1级凹板筛
8. 提升丝杠 9. 压紧螺母 10. 弹簧 11. 脱粒间隙调节机构

2.4 脱粒间隙调节机构

为提高脱粒装置对不同厚度油葵盘的脱粒适应能力,设计了一种脱粒间隙调节机构(图4),以实现脱粒间隙的手动调节和自适应微调。通过改变提升丝杠上端的压紧螺母位置实现脱粒间隙手动调节,具体调节方法:将压紧螺母向上调节时,凹板筛在重力作用下下落,脱粒间隙增大,将压紧螺母往下调节时,凹板筛随提升丝杠上升,脱粒间隙减小。油葵盘

厚度范围一般为17.4~25.6 mm,为保证油葵顺利进入脱粒间隙内,且保证脱分能力,脱粒间隙的手动调节范围设置为15~70 mm;凹板筛通过弹簧形变实现脱粒间隙自适应微调,微调量即为弹簧变形量,计算式为

$$s = \frac{8n\phi^3 F}{Gd^4} \tag{4}$$

- 式中 s ——弹簧变形量,mm
 n ——工作圈数
 ϕ ——弹簧中心直径,mm
 G ——剪切模量,MPa
 d ——弹簧线径,mm
 F ——弹簧负载,N

当尺寸较大的油葵盘进入脱粒装置后,油葵盘对凹板筛产生向下的压力,凹板筛的铰接轴通过提升丝杠向下压缩弹簧,脱粒间隙微增,当尺寸较大的油葵通过该部分后,凹板筛在弹簧的带动下恢复预设的脱粒间隙,故脱粒间隙的微调量应大于油葵盘最大厚度与最小厚度的差值(8.2 mm)。凹板筛自身重量对弹簧有一定的压缩,经试验测得凹板筛自身重量使弹簧(材质65Mn,线径2 mm,中心直径20 mm)产生的变形量为5.5 mm,故所选弹簧的最大变形量应大于13.7 mm。经测试,自由高度80 mm、最大变形量14 mm的端部并紧磨平型弹簧(HB362-65)满足要求。

3 筛分装置设计

筛分装置主要以筛体振动的方式将籽粒与杂质分离,是影响油葵籽粒含杂率与损失率的重要因素之一。为避免筛分过程中因筛体晃动大而导致整机振动大、运行不平稳等现象,设计了双层异向振动筛分装置,如图5所示。根据整机结构和尺寸设计要求,确定上层振动筛筛体长度为1200 mm、筛面宽度为676 mm、筛体高度110 mm,下层振动筛筛体长度为1300 mm、筛面宽度为706 mm、筛体高度110 mm。

筛分装置的偏心轮与脱粒装置的第1级脱粒滚筒同轴,即偏心轮转速与第1级脱粒滚筒转速相同,转速越高振动筛振动频率越快。偏心轮驱动连杆机构带动摆动组件实现周期性扭转运动,摆动臂焊接在摆动组件上,摆动臂的上端和下端分别连接上层振动筛和下层振动筛。上、下两层振动筛平行放置,由摇杆悬挂于机架上,且两筛的初始振动相位角相差180°,使上、下两层振动筛始终保持运动方向相反,降低了整机的晃动程度,保持机器平稳运行。工作时,大杂质留在上层振动筛,经上层振动筛排杂口排出,油葵籽粒落入下层振动筛,经下层振动筛出料

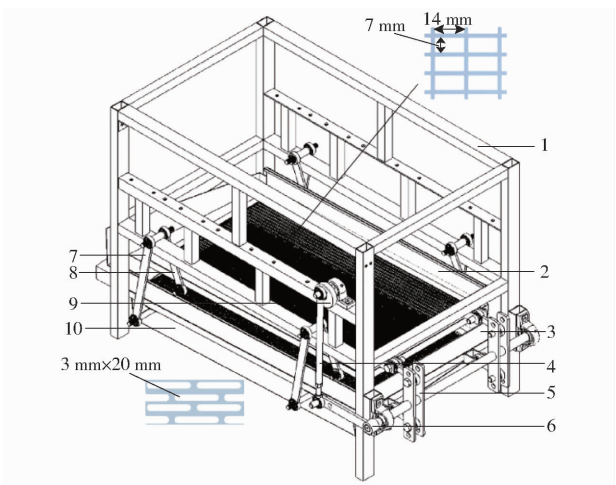


图 5 双层异向振动筛分装置结构示意图

Fig.5 Schematic of structure of double-deck vibrating screen with opposite movement direction

1. 机架 2. 上层振动筛 3. 下层振动筛 4. 连杆机构 5. 摆动臂 6. 摆动组件 7. 下层振动筛摇杆 8. 上层振动筛摇杆 9. 偏心轮 10. 导土盒

口排出,尘土透过下层振动筛经导土盒排出,实现油葵籽粒与杂质分离。

油葵籽粒相对于筛面有 3 种运动状态:滑移、抛起、静止,运动状态由油葵籽粒在筛面上的受力决定。油葵籽粒透筛过程主要发生在上层振动筛,故本文以上层振动筛为模型,利用 RecurDyn 软件对振动筛的运动进行分析。将振动筛三维模型简化,导入 RecurDyn 软件中添加与实际运动一致的运动副与驱动力建立动力学模型,如图 6 所示。设置仿真时间为 0.5 s,步数为 100,以筛面质心点 A 为研究对象分析筛面的运动。图 7a 为质心点 A 沿 x 和 y 方向上的位移随时间变化曲线,结果表明,质心点 A 沿 x 和 y 方向上的位移均呈规律的周期性变化, x 方向上位移变化范围为 0 ~ 28.7 mm, y 方向上位移变化范围为 0 ~ 10.9 mm,即筛面沿 x 方向的运动比 y 方向运动强烈。图 7b 为质心点 A 沿 x 和 y 方向上加速度随时间变化曲线,结果表明,质心点 A 沿 x 和 y 方向上的加速度均呈规律的周期性变化, x 方向上加速度变化范围为 $-8\,663.9 \sim 9\,539.2\text{ mm/s}^2$, y 方向上加速度变化范围为 $-3\,513.7 \sim 2\,537.7\text{ mm/s}^2$,即油葵籽粒在 x 方向的受力大于 y 方向的受力。以

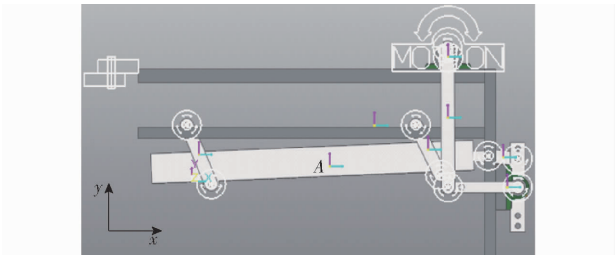


图 6 振动筛动力学模型

Fig.6 Dynamic model of vibrating screen

上结果表明,该振动筛的运动有利于油葵籽粒向前抛移和分散,有效避免了油葵籽粒在筛面上堆积与堵塞筛孔,降低油葵籽粒的筛分损失。

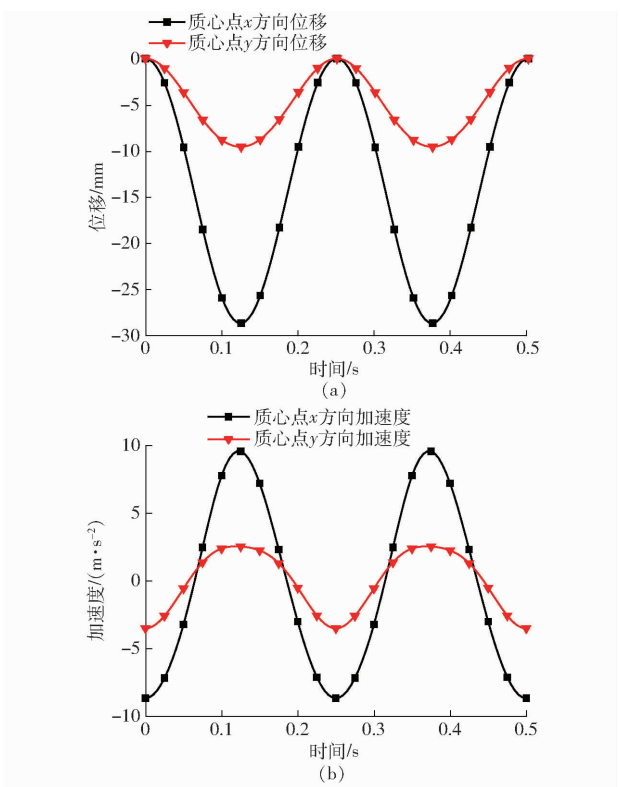


图 7 筛面质心点运动规律

Fig.7 Movement law of center of mass of screen surface

4 试验与结果分析

4.1 试验材料与方法

以河北省邢台市金沙河红薯岭基地油葵种植区的矮大头 567 油葵为试验材料,基本物理特性参数如表 2 所示。

表 2 油葵基本物理特性参数	
Tab.2 Basic physical parameters of oil sunflower	
参数	数值
油葵盘直径/mm	120 ~ 257
油葵盘厚度/mm	17.4 ~ 25.6
油葵盘含水率/%	27.4 ~ 33.4
油葵盘平均质量/g	320 ~ 494
油葵籽粒百粒质量/g	9.547
油葵籽粒含水率/%	10.13

利用本研究设计的切流式油葵脱粒筛分机(图 8)进行脱粒筛分试验,试验采用连续喂入方式,通过变频器控制输送带电机转速来调节油葵喂入量^[11-12]。以滚筒转速、喂入量、预设脱粒间隙为试验因素,含杂率、损失率为评价指标,设计单因素试验和 Box - Behnken 试验确定较优参数组合。其中,含杂率 y_1 、损失率 y_2 的计算式为

$$y_1 = \frac{m_1}{m} \times 100\% \tag{5}$$

$$y_2 = y_{21} + y_{22} \tag{6}$$

$$y_{21} = \frac{m_2}{m_0} \times 100\% \tag{7}$$

$$y_{22} = \frac{m_3}{m_0} \times 100\% \tag{8}$$

其中

- 式中 y_{21} ——脱粒装置未脱净损失率, %
 y_{22} ——筛分损失率, %
 m ——混合物总质量, g
 m_0 ——总籽粒质量, g
 m_1 ——杂质质量, g
 m_2 ——油葵盘上未脱净油葵籽粒质量, g
 m_3 ——筛分损失的油葵籽粒质量, g



图 8 切流式油葵脱粒筛分机实物图

Fig.8 Physical image of cut-flow type oil sunflower threshing and screening machine

4.2 单因素试验

根据前期预试验及机器的可调范围,单因素试验的因素取值区间为:滚筒转速 120 ~ 480 r/min、喂入量 1 ~ 3 kg/s、预设脱粒间隙 20 ~ 70 mm。试验因素对含杂率和损失率的影响如图 9 所示。

滚筒转速对油葵籽粒含杂率、损失率的影响如图 9a 所示。由图可知,随着滚筒转速的增大,油葵籽粒含杂率和损失率均呈先减小后增大的趋势。当滚筒转速在 120 ~ 200 r/min 时,油葵盘在脱粒装置内停留时间长,油葵盘被过度揉搓发生破碎现象,且带有籽粒的葵盘破碎物受挤压,穿过凹板筛落入上层振动筛,经上层振动筛排杂口排出,造成籽粒损

失;当滚筒转速大于 350 r/min 时,油葵盘受到的击打力增大,葵盘破碎程度加大,导致含杂率与损失率增大。因此,选取滚筒转速范围为 200 ~ 350 r/min。

喂入量对油葵籽粒含杂率、损失率的影响如图 9b 所示。由图可知,随着喂入量增大,油葵籽粒含杂率和损失率均呈增大趋势。当喂入量在 1.0 ~ 1.5 kg/s 时,随着喂入量的增大,含杂率和损失率明显上升;当喂入量在 1.5 ~ 2.5 kg/s 时,含杂率和损失率随喂入量增大的增幅较小;当喂入量大于 2.5 kg/s 时,油葵盘在脱粒间隙内发生堵塞现象,故含杂率和损失率随喂入量增大呈明显上升趋势。喂入量低于 1.5 kg/s 时,整机工作效率较低,为保证工作效率选取喂入量范围为 1.5 ~ 2.5 kg/s。

预设脱粒间隙对油葵籽粒含杂率、损失率的影响如图 9c 所示。由图可知,随着预设脱粒间隙增大,油葵籽粒含杂率呈明显减小趋势,油葵籽粒损失率呈先减小后明显增大趋势。随着预设脱粒间隙增大,位于脱粒间隙内的油葵盘受到的击打力与揉搓力减小,产生的杂质较少,但油葵盘上的油葵籽粒出现脱粒不完全现象,故含杂率下降,损失率上升。因此选取预设脱粒间隙范围为 25 ~ 45 mm。

4.3 Box - Behnken 试验

根据油葵脱粒单因素试验得到的各因素取值范围,运用 Design-Expert 10.0.7 软件进行 Box - Behnken 试验设计^[25-27]。对 15 组因素水平组合进行油葵脱粒试验,探究滚筒转速、喂入量、预设脱粒间隙对油葵籽粒含杂率 R_1 、损失率 R_2 的影响规律。因素编码如表 3 所示,Box - Behnken 试验方案与结果如表 4 所示, A、B、C 为因素编码值。通过对表 4 试验数据进行多元回归拟合分析,分别建立油葵籽粒含杂率 y_1 、损失率 y_2 与滚筒转速 A、喂入量 B、预设脱粒间隙 C 的回归模型

$$y_1 = 2.12 + 0.36A - 0.68C + 0.26A^2 + 0.29C^2 \tag{9}$$

$$y_2 = 2.51 - 0.22A + 1.04C - 0.29AC + 0.81A^2 + 0.42B^2 \tag{10}$$

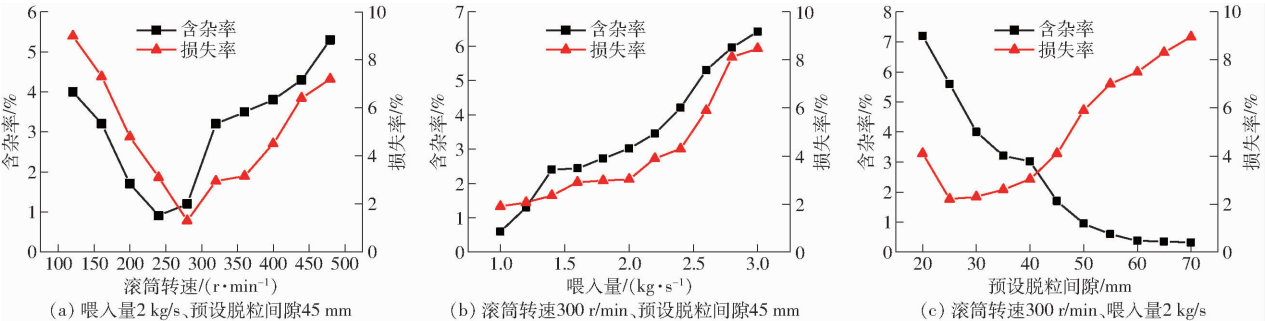


图 9 试验因素对含杂率和损失率的影响

Fig.9 Influence of test factors on impurity rate and loss rate

对表 4 数据进行方差分析,得到油葵籽粒含杂率回归模型方差分析结果,如表 5 所示,油葵籽粒损失率回归模型方差分析结果,如表 6 所示。

表 3 试验因素编码
Tab.3 Coding of test factors

编码	因素		
	滚筒转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	喂入量/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	预设脱粒间隙/ mm
-1	200	1.5	25
0	275	2.0	35
1	350	2.5	45

表 4 Box – Behnken 试验方案与结果
Tab.4 Box – Behnken test design and results

试验序号	A	B	C	$y_1/\%$	$y_2/\%$
1	-1	0	-1	2.88	2.10
2	0	-1	1	1.63	3.90
3	0	1	1	1.85	4.03
4	0	0	0	2.14	2.61
5	1	0	-1	3.62	2.45
6	0	0	0	2.07	2.43
7	-1	-1	0	2.07	4.31
8	0	-1	-1	3.13	1.55
9	0	0	0	1.93	2.64
10	0	1	-1	3.26	2.06
11	1	-1	0	2.61	3.39
12	1	1	0	2.78	3.49
13	-1	0	1	1.45	4.69
14	1	0	1	2.52	3.89
15	-1	1	0	2.28	3.91

表 5 含杂率回归模型方差分析
Tab.5 Analysis of variance in regression model of impurity rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	5.39	9	0.60	26.03	0.001 1 **
A	1.02	1	1.02	44.09	0.001 2 **
B	0.067	1	0.067	2.89	0.149 7
C	3.70	1	3.70	160.64	<0.000 1 **
AB	0.000 4	1	0.000 4	0.017	0.900 3
AC	0.027	1	0.027	1.18	0.326 5
BC	0.002 025	1	0.002 025	0.088	0.778 7
A ²	0.27	1	0.27	11.62	0.019 1 *
B ²	0.052	1	0.052	2.28	0.191 7
C ²	0.34	1	0.34	14.59	0.012 4 *
残差	0.12	5	0.023		
失拟	0.092	3	0.031	2.69	0.282 6
纯误差	0.023	2	0.011		

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

由表 5 可知, R_1 回归模型组间差异显著性检验 $P = 0.001\ 1$,失拟项 $P = 0.282\ 6$,决定系数 $R^2 = 0.979\ 1$,回归模型显著,失拟项不显著,决定系数接

表 6 损失率回归模型方差分析
Tab.6 Analysis of variance of loss rate regression model

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	12.51	9	1.39	28.29	0.000 9 **
A	0.40	1	0.40	8.15	0.035 6 *
B	0.014	1	0.014	0.29	0.611 0
C	8.72	1	8.72	177.30	<0.000 1 **
AB	0.063	1	0.063	1.27	0.310 7
AC	0.33	1	0.33	6.73	0.048 6 *
BC	0.036	1	0.036	0.73	0.430 6
A ²	2.40	1	2.40	48.83	0.000 9 **
B ²	0.62	1	0.62	12.55	0.016 5 *
C ²	0.026	1	0.026	0.53	0.500 5
残差	0.25	5	0.049		
失拟	0.22	3	0.073	5.68	0.153 3
纯误差	0.026	2	0.013		

近 1,表明 R_1 回归模型拟合度较好。变异系数越小时试验数据可靠性越强, R_1 回归模型的变异系数为 6.28%,表明该试验数据可靠。运用 Design-Expert 软件进行 Box – Behnken 试验设计时,当精确度大于 4,模型具有较好的预测性^[28-29], R_1 回归模型的精确度为 16.727,表明 R_1 回归模型可较好地预测含杂率。由表 5 可知,对油葵籽粒含杂率的影响,A、C 为极显著,A²、C²为显著,影响显著性由大到小为:C、A、C²、A²。试验因素 A、B 与油葵籽粒含杂率之间具有二次非线性关系,且交互作用对油葵籽粒含杂率影响不显著,油葵籽粒含杂率与各试验因素之间的关系响应曲面如图 10 所示。

由图 10a 可知,在试验因素取值区间内,随着滚筒转速和喂入量的增大,油葵籽粒含杂率呈上升趋势,且滚筒转速对油葵籽粒含杂率的影响大于喂入量。由等高线和响应曲面可知,滚筒转速和喂入量的交互作用对油葵籽粒含杂率影响较小且交互作用不显著;由图 10b 可知,在试验因素取值区间内,油葵籽粒含杂率随预设脱粒间隙增大而减小,且预设脱粒间隙对油葵籽粒含杂率的影响明显大于滚筒转速。滚筒转速和预设脱粒间隙的交互作用对油葵籽粒含杂率有一定影响但影响不显著。由图 10c 可知,在试验因素取值区间内,预设脱粒间隙对油葵籽粒含杂率的影响明显大于喂入量,喂入量和预设脱粒间隙的交互作用对油葵籽粒含杂率影响较小且交互作用不显著。

由表 6 可知, R_2 回归模型组间差异显著性检验 $P = 0.000\ 9$,失拟项 $P = 0.153\ 3$,决定系数 $R^2 = 0.980\ 7$,回归模型显著,失拟项不显著,决定系数接近 1,表明该回归模型拟合度高。 R_2 回归模型的变

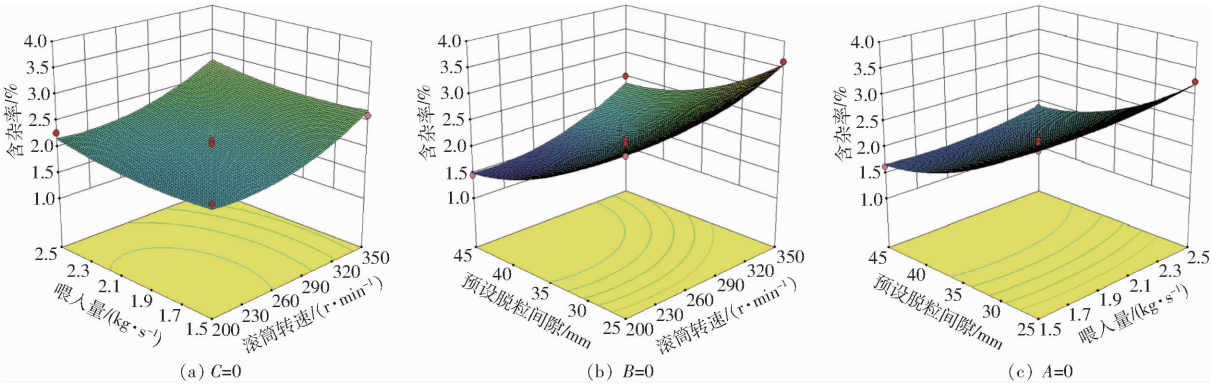


图 10 油葵籽粒含杂率响应曲面

Fig. 10 Response surfaces of oil sunflower seeds impurity rate

异系数为 7.01%,表明试验数据可靠。 R_2 回归模型的精确度为 17.311,表明 R_2 回归模型可较好地预测油葵籽粒损失率。由表 6 可知,对油葵籽粒损失率的影响, C 、 A^2 为极显著, A 、 AC 、 B^2 为显著,影响显著性由大到小为: C 、 A^2 、 B^2 、 A 、 AC 。试验因素 A 、 B 与油

葵籽粒损失率之间具有二次非线性关系,滚筒转速与预设脱粒间隙交互项对油葵籽粒损失率影响显著,其余交互作用对油葵籽粒损失率影响不显著,油葵籽粒损失率与各试验因素之间的关系响应曲面如图 11 所示。

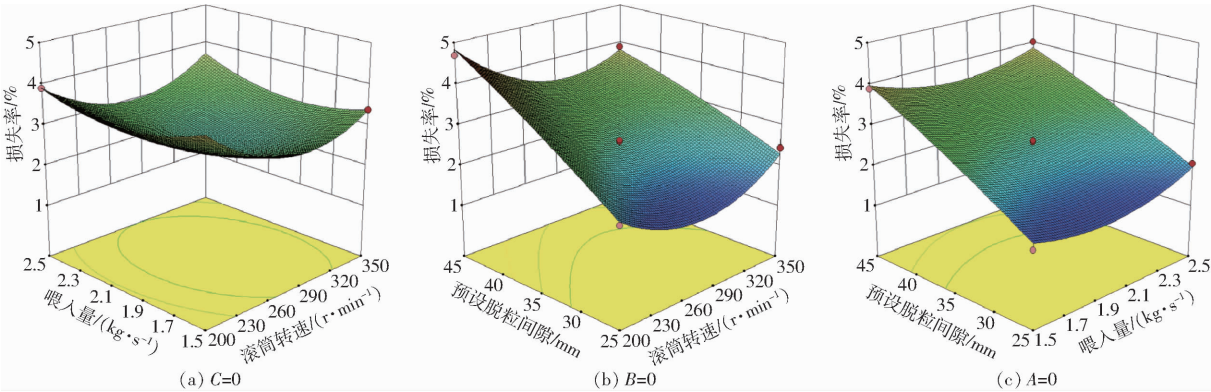


图 11 油葵籽粒损失率响应曲面

Fig. 11 Response surfaces of oil sunflower seeds loss rate

由图 11a 可知,在试验因素取值区间内,随着滚筒转速的增大,油葵籽粒损失率呈先下降后上升趋势。随着喂入量的增大,油葵籽粒损失率亦呈先下降后上升趋势,但与油葵籽粒损失率随滚筒转速的变化趋势相比较为平缓。滚筒转速和喂入量的交互作用对油葵籽粒损失率有一定影响但影响不显著。由图 11b 可知,在试验因素取值区间内,油葵籽粒损失率随预设脱粒间隙增大的上升趋势较明显,且预设脱粒间隙对油葵籽粒损失率的影响明显大于滚筒转速。滚筒转速和预设脱粒间隙的交互作用对油葵籽粒损失率影响显著。由图 11c 可知,在试验因素取值区间内,预设脱粒间隙对油葵籽粒损失率的影响明显大于喂入量,喂入量和预设脱粒间隙的交互作用对油葵籽粒损失率影响较小且交互作用不显著。

4.4 脱粒装置参数优化与验证试验

利用 Design-Expert 10.0.7 的 Optimization 数值优化功能,以降低油葵籽粒含杂率、损失率为目标,对滚筒转速、喂入量、预设脱粒间隙进行多目标寻优

求解,目标函数约束条件为

$$\begin{cases} \min R_1(A, B, C) \\ \min R_2(A, B, C) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \\ -1 \leq C \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

经优化求解确定较优参数组合为:滚筒转速 264 r/min,喂入量 1.9 kg/s,预设脱粒间隙 36 mm,此时油葵籽粒含杂率与损失率预测值分别为 1.95%、2.62%。根据优化所得参数组合对样机进行 5 组重复脱粒试验,得到油葵籽粒含杂率、损失率分别为 1.94%、2.64%,相对误差分别为 0.52%、0.76%,结果表明验证试验油葵籽粒含杂率、损失率与预测结果相对误差较小,在误差允许范围内,证明结果具有一定的可靠性。

5 结论

(1)设计了一种集脱粒、筛分于一体的切流式

油葵脱粒机。该机采用多级脱粒滚筒,脱分行程长、脱粒柔和;脱粒间隙可手动调节和自适应微调,提高了该机对不同厚度油葵盘的脱粒适应能力;设计了双层异向振动筛,上下两层振动筛始终保持运动方向相反,降低了整机的晃动程度,保持机器平稳运行。

(2)通过单因素试验和 Box - Behnken 试验获得了滚筒转速、喂入量、预设脱粒间隙对油葵籽粒含

杂率、损失率的影响规律,建立了油葵籽粒含杂率和损失率的回归模型。

(3)以降低油葵籽粒含杂率、损失率为目标,对滚筒转速、喂入量、预设脱粒间隙进行多目标寻优求解,确定较优参数组合为:滚筒转速 264 r/min,喂入量 1.9 kg/s,预设脱粒间隙 36 mm。样机试验表明,油葵籽粒含杂率、损失率分别为 1.94%、2.64%,满足油葵脱粒要求。

参 考 文 献

- [1] 靳伟,丁幼春,白圣贺,等. 油葵收获机拨禾板式割台装置研制[J]. 农业工程学报, 2021,37(3):27-36.
JIN Wei, DING Youchun, BAI Shenghe, et al. Design and experiments of the reel board header device for an oil sunflower harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(3):27-36. (in Chinese)
- [2] 黄小毛,付俊鹏,马丽娜,等. 油葵割台分禾扶禾收集槽的设计与台架试验[J]. 安徽农业大学学报, 2020,47(4):664-673.
HUANG Xiaomao, FU Junpeng, MA Li'na, et al. Design and bench test of the dividing and supporting collecting tank on oil sunflower header[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020,47(4):664-673. (in Chinese)
- [3] 刘巍,黄小毛,马丽娜,等. 油葵联合收获机专用割台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(8):83-88.
LIU Wei, HUANG Xiaomao, MA Li'na, et al. Design and experiment of special header of oil sunflower combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(8):83-88. (in Chinese)
- [4] 马少腾,朱兴亮,张学军,等. 油葵籽粒物理特性的测定[J]. 农机化研究, 2020,42(8):192-196.
MA Shaoteng, ZHU Xingliang, ZHANG Xuejun, et al. Determination of physical properties of oil sunflower seeds[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(8):192-196. (in Chinese)
- [5] 张学军,马少腾,朱兴亮,等. 正多杆变隙式油葵脱粒装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020,36(4):26-33.
ZHANG Xuejun, MA Shaoteng, ZHU Xingliang, et al. Design and test of oil-sunflower threshing device with variable clearance [J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(4):26-33. (in Chinese)
- [6] 马少腾,张学军,朱兴亮,等. 油葵联合收获机脱粒装置的设计[J]. 甘肃农业大学学报, 2021,56(3):176-181.
MA Shaoteng, ZHANG Xuejun, ZHU Xingliang, et al. Design of threshing device of oil sunflower combined harvester[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021,56(3):176-181. (in Chinese)
- [7] 李茜,张学军,朱兴亮. 油葵联合收获机脱粒装置设计与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2019,40(9):6-12.
LI Qian, ZHANG Xuejun, ZHU Xingliang. Design and experimental study on threshing device of oil sunflower combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019,40(9):6-12. (in Chinese)
- [8] 李耀明,孙韬,徐立章. 油菜多滚筒脱粒分离装置的性能试验与分析[J]. 农业工程学报, 2013,29(8):36-43.
LI Yaoming, SUN Tao, XU Lizhang. Performance test and analysis of rape multi cylinder threshing and separating device[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(8):36-43. (in Chinese)
- [9] 李耀明,许太白,徐立章,等. 多滚筒脱粒分离装置试验台[J]. 农业机械学报, 2013,44(4):95-98.
LI Yaoming, XU Taibai, XU Lizhang, et al. Test-bed of threshing and separating unit with multi cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(4):95-98. (in Chinese)
- [10] WANG Qirui, MAO Hanping, LI Qinglin. Modelling and simulation of the grain threshing process based on the discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020,178:105790.
- [11] 李心平,王文哲,赵高源,等. 纵轴流双柔性碾搓式谷子脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(7):113-123.
LI Xinping, WANG Wenzhe, ZHAO Gaoyuan, et al. Design and experiment of longitudinal axial flow double flexible rolling and kneading threshing device for millet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(7):113-123. (in Chinese)
- [12] 王占滨,王振伟,张银平,等. 纵轴流柔性锤爪式玉米脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(增刊2):109-117.
WANG Zhanbin, WANG Zhenwei, ZHANG Yinping, et al. Design and test of longitudinal axial flexible hammer-claw corn thresher[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp.2):109-117. (in Chinese)
- [13] 王立军,马杨,冯鑫,等. 玉米籽粒收获机分段式振动筛精选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(9):89-100.
WANG Lijun, MA Yang, FENG Xin, et al. Design and experiment of segmented vibrating screen in cleaning device of maize grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(9):89-100. (in Chinese)
- [14] 王立军,李瑞,于泳涛,等. 玉米籽粒收获机双层不平行振动筛设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019,50(7):130-139.
WANG Lijun, LI Rui, YU Yongtao, et al. Design and test of double-layer non-parallel vibrating screens[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(7):130-139. (in Chinese)
- [15] 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 experiment on driving mechanism of vibrating

- screen with three translations and two rotations[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(6):138–145. (in Chinese)
- [16] 王立军,崔友强,郑招辉,等. 振动筛不同运动形式对颗粒群筛分的影响[J]. 农业机械学报, 2019,50(6):119–129. WANG Lijun, CUI Youqiang, ZHENG Zhaohui, et al. Effect of different motion forms of vibrating screen on screening of particle group[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(6):119–129. (in Chinese)
- [17] 栗晓宇,杜岳峰,牛兴成,等. 玉米清选装置结构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(增刊2):233–242. LI Xiaoyu, DU Yuefeng, NIU Xingcheng, et al. Optimization design and experiment of corn cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp. 2):233–242. (in Chinese)
- [18] 卢琦,徐兵,刘芸,等. 基于 ADAMS 的往复式谷物振动筛设计与试验[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2019,39(2):98–104. LU Qi, XU Bing, LIU Yun, et al. Design optimization and experimental evaluation of a reciprocating grain vibrating screen based on ADAMS[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Nature Science Edition), 2019,39(2):98–104. (in Chinese)
- [19] 张正中,谢方平,田立权,等. 国外谷物联合收割机脱粒分离系统发展现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2021,42(1):20–29. ZHANG Zhengzhong, XIE Fangping, TIAN Liquan, et al. Current situation and development trend of threshing and separating system of international grain combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(1):20–29. (in Chinese)
- [20] 付君,张屹晨,程超,等. 刚柔耦合式小麦脱粒弓齿设计及试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020,50(2):730–738. FU Jun, ZHANG Yichen, CHENG Chao, et al. Design and experiment of bow tooth of rigid flexible coupling for wheat threshing[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020,50(2):730–738. (in Chinese)
- [21] 陈志. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.
- [22] 徐立章,李耀明,王成红,等. 切纵流双滚筒联合收获机脱粒分离装置[J]. 农业机械学报, 2014,45(2):105–108. XU Lizhang, LI Yaoming, WANG Chenghong, et al. A combinational threshing and separating unit of combine harvester with a transverse tangential cylinder and an axial rotor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(2):105–108. (in Chinese)
- [23] 李耀明. 谷物联合收割机的设计与分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2014.
- [24] 谢干. 鼓形杆齿式纵轴流脱粒分离装置设计与试验研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2020. XIE Gan. Design and experimental research of drum-shaped rod-tooth longitudinal axial flow threshing and separating device [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [25] 戴飞,赵武云,付秋锋,等. 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(4):117–125. DAI Fei, ZHAO Wuyun, FU Qiufeng, et al. Parameter optimization and experiment on double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(4):117–125. (in Chinese)
- [26] 田立权,张正中,吕美巧,等. 半喂入联合收割机双速回转脱分装置设计与性能试验[J]. 中国农机化学报, 2020,41(9):8–15. TIAN Liquan, ZHANG Zhengzhong, LÜ Meiqiao, et al. Design and performance experiments of new threshing and separating device for head-feeding combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020,41(9):8–15. (in Chinese)
- [27] POWAR R V, AWARE V V, SHAHARE P U. Optimizing operational parameters of finger millet threshing drum using RSM [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019,56(7):3481–3491.
- [28] 葛宜元. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2015.
- [29] 徐向宏. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京:科学出版社, 2010.