

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.20.021

振动筛-螺旋输送机耦合式玉米秸秆输送除土装置设计与试验

赵海明^{1,2} 薛钊^{1,2} 付君^{1,2} 靳继威^{1,2} 徐希森³

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学农业农村部高效播种收获装备重点实验室, 长春 130022; 3. 吉林天朗农业装备股份有限公司, 长春 130500)

摘要: 针对玉米秸秆捡拾输送过程土壤-秸秆分离难的问题,本文提出了一种“振动筛分-螺旋输送机输送”协同除土方法,并设计了一种振动筛-螺旋输送机耦合式玉米秸秆输送除土装置,在实现输送过程同步除土的同时精简后续除土工序。通过构建土壤与秸秆在耦合场中运动学及动力学模型,明确了影响输送除土性能的关键作业参数。通过单因素试验与响应面试验,阐明了振动幅度、振动频率、螺旋输送机转速及交互项对秸秆损失率和含土率的影响规律,并获得了最优作业参数组合。结果表明,各因素及交互作用对损失率及含土率具有显著影响,最优参数组合为:振动幅度 19.55 mm、振动频率 3.75 Hz、螺旋输送机转速 991.23 r/min。在最优参数下开展台架试验,结果表明,含土率从传统固定筛分装置的 11.19% 降低至 4.65%,降低约 58.45%。田间验证结果表明,平均损失率为 2.87%,平均含土率为 4.75%,满足低损高净作业要求。研究结果表明振动-输送耦合作用能够有效实现玉米秸秆输送过程同步除土,可为玉米秸秆低损高净捡拾输送一体化作业装备研发提供参考。

关键词: 玉米秸秆; 输送; 除土; 振动筛; 参数优化

中图分类号: S225.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)20-0239-10 OSID: 

Design and Experiment of Vibratory Screening – Auger Coupled Conveying Device for Soil Removal in Maize Straw

Zhao Haiming^{1,2} Xue Zhao^{1,2} Fu Jun^{1,2} Jin Jiwei^{1,2} Xu Xisen³

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China
2. Key Laboratory of Efficient Sowing and Harvesting Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jilin University, Changchun 130022, China
3. Jilin Tianlang Agricultural Equipment Co., Ltd., Changchun 130500, China)

Abstract: Aiming to address the difficulty of soil-straw separation during the pickup and conveying process of maize straw, a vibration screening – auger conveying coordinated soil removal method was proposed. A coupled vibration screen – auger conveying device for maize straw transportation and soil removal was designed to achieve effective soil removal while simplifying subsequent cleaning processes. By establishing kinematic and dynamic models of soil and straw in a coupled field, the key operating parameters affecting conveying and soil removal performance were identified. Based on this, single-factor experiments and response surface methodology were conducted to investigate the effects of vibration amplitude, vibration frequency, auger rotational speed, and their interaction effects on straw loss rate and soil impurity rate. The results showed that both individual factors and their interactions had significant effects on loss rate and soil impurity rate. The optimal parameter combination was determined as a vibration amplitude of 19.55 mm, a vibration frequency of 3.75 Hz, and an auger rotational speed of 991.23 r/min. Under these conditions, comparative bench tests indicated that the soil impurity rate was reduced from 11.19% for a conventional fixed screening device to 4.65%, representing a reduction of approximately 58.45%. Field validation results showed that the average loss rate was 2.87% and the average impurity rate was 4.75%, meeting the operational requirements of low loss and high cleanliness.

收稿日期: 2026-05-01 修回日期: 2026-06-11
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2002102)和吉林省农机研发制造推广应用一体化试点项目(3D5260554418)
作者简介: 赵海明(1998—),男,博士生,主要从事玉米秸秆收获技术与装备研究,E-mail: zhaohm24@mails.jlu.edu.cn
通信作者: 薛钊(1995—),男,助理研究员,主要从事玉米秸秆收获技术与装备研究,E-mail: xuez@jlu.edu.cn

The results demonstrated that the vibration – conveying coupling mechanism can effectively achieve synchronous soil removal during maize straw conveying, providing a reference for the development of integrated equipment for low-loss and high-cleanliness pickup and conveying of maize straw.

Key words: maize straw; conveying; soil removal; vibratory screening; parameter optimization

0 引言

玉米秸秆是我国重要的生物质资源,年产量超 3×10^8 t,饲料化利用能有效缓解优质饲草短缺并提高资源利用效率^[1-4]。捡拾输送是秸秆饲料化利用的首要环节^[5-6]。然而,在该过程中,秸秆与土壤易相互夹带、混合,形成混合物料,导致土壤分离困难、秸秆捆含土率高,严重制约饲料化利用品质。现有输送装置多采用底部开孔的固定筛板,仅能实现底层土壤透筛,而中上层土壤被秸秆包裹,难以分离^[7-9]。这种被动分离方式难以解决混合过程形成的包裹问题,即混合物料中上层土壤难以从秸秆间隙分离,整体除土效果有限。因此,突破被动分离方式的局限,探索输送过程主动除土方法,是降低秸秆含土率、提升饲料化利用效益的重要途径。

针对混合物料高效分离问题,国内外学者从不同技术路径开展了大量研究,主要包括气流式、机械式及组合式。在气流分离方面,杨猛等^[10]设计了兼具分级、清土、输送和除膜功能的风筛膜秧分离装置,并通过台架试验证实了可行性,但气流分离对风速和物料含水率较为敏感,当物料含土率高时,土块难以被有效吹离,且易造成轻质秸秆等物料随气流损失。在机械分离方面,滚筒筛、振动筛和离心筛是典型的分离装置。张胜伟等^[11]研究表明滚筒筛对油莎豆-土壤混合物分离效果显著,但结构复杂、占用空间大,且湿粘土壤易堵塞筛孔,需频繁清理。国内天朗、顺邦等企业通过在秸秆捡拾打捆机整机上加装离心转筛,利用高速抛送物料对自转筛网的冲击作用,实现了高效除土^[12]。然而,该方式属于输送后独立工序,增加了整机工序与能耗。振动筛分是国内外广泛采用的除土、除杂方式,付乾坤等^[13]通过振动试验台试验和高速摄像分析,揭示了振动除土规律。Zhang 等^[14]提出一种变幅柔性筛分装置,可显著提高虎坚果块茎-土壤混合物筛分效率并降低含土率。可见,振动筛具有较好的分离能力,但作为独立除土单元时,需与输送装置配合使用。在组合式分离方面,Long 等^[15]将振动筛与气流结合,利用振动抛掷配合气流吹送,解决单一方式的局限;王鹏杰等^[16]将固定筛与螺旋输送机组合,在输送同时实现筛分。然而,各单元仍相对独立,结构复杂,且缺乏对物料层内部土壤的主动剥离机制。

综上所述,现有主动除土方法虽能有效提高分离效率,但结构复杂且运行依赖独立动力,导致作业工序复杂、整机质量增加及能耗较高等问题。此外,组合式虽可实现功能集成,但各单元相对独立,缺乏主动扰动与输送深度耦合,尚未实现在输送过程同步完成高效除土。

针对上述问题,本文提出一种“振动筛-螺旋输送机”耦合式输送除土方法,并设计振动筛-螺旋输送机耦合式玉米秸秆输送除土装置。通过振动激励破坏秸秆-土壤裹挟状态,利用螺旋输送机螺旋推送实现秸秆输送,完成输送过程协同除土作业,以精简后续独立除土工序,实现整机紧凑化。结合运动学与动力学分析,明确关键作业参数,并通过单因素试验和 Box – Behnken 响应面试验,阐明振动幅度、振动频率、螺旋输送机转速及部分交互项对秸秆损失率和含土率的影响规律,优化作业参数,并通过台架与田间试验验证装置性能。

1 整体结构及工作原理

1.1 整体结构

捡拾输送除土装置主要结构如图 1 所示,包括传动装置、捡拾机构、螺旋输送机、振动除土装置、弹簧吊杆和抛送装置等,主要技术参数如表 1 所示。其中螺旋输送机和振动除土装置构成耦合式输送除土装置,如图 2 所示,主要包括轴承座、螺旋输送机叶片、螺旋输送机主轴、机架、粉碎装置、抛送装置、振动装置等,可 1 次性完成输送、除土、粉碎及抛送作业。

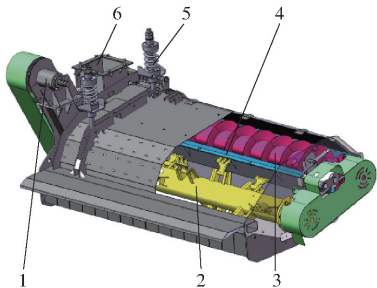


图 1 捡拾输送除土装置

Fig. 1 Picking and conveying soil removal device

1. 传动装置 2. 捡拾机构 3. 螺旋输送机 4. 振动除土装置
5. 弹簧吊杆 6. 抛送装置

1.2 工作原理

如图 3 所示,作业时,高速旋转的锤爪将地表散

表 1 捡拾输送除土装置主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of picking and conveying soil removal device

参数	数值
整体尺寸/(mm×mm×mm)	2 850×1 450×900
捡拾转速/(r·min ⁻¹)	0~2 200
输送转速/(r·min ⁻¹)	0~2 300
前进速度/(km·h ⁻¹)	0~10
捡拾幅宽/mm	2 200
捡拾高度/mm	0~150
喂入量/(kg·s ⁻¹)	0~2
捡拾装置总质量/kg	1 350

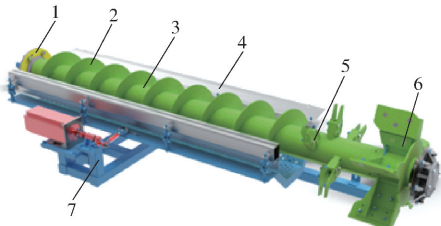


图 2 输送除土装置结构示意图

Fig.2 Structural diagram of conveying soil removal device

1. 轴承座 2. 螺旋输送机叶片 3. 螺旋输送机主轴 4. 机架
5. 粉碎装置 6. 抛送装置 7. 振动除土装置

落的玉米秸秆捡拾,并在粉碎刀协同作用下,实现秸秆初步切碎处理。同时,高速旋转的锤爪在机罩内半封闭空间内形成负压流场,将地表秸秆、土壤等同时吸入捡拾室内,使秸秆与土壤形成秸秆-土壤混合物,在锤爪的拨送作用及惯性力作用下被抛送至后方输送螺旋输送机区域。在螺旋输送机连续输送过程中,振动筛往复摆动对混合物料施加周期性激励,使其在筛面上产生跳跃、翻滚与相对滑移运动,从而促进秸秆与土壤分离。在物料回落过程,粒径较小、密度较大的土壤颗粒在重力作用下优先透过筛孔落回地面,而体积较大的秸秆由于难以通过筛孔而被保留在筛面上,并在螺旋输送机推送作用下继续向后输送至下一作业单元,完成后续 2 次粉碎及抛送作业。通过上述“振动除土-螺旋输送机输送”协同除土过程,可实现秸秆输送过程同步除土,进而有效降低含土率。

2 关键零部件设计与动力学分析

2.1 螺旋输送机

作业过程中,螺旋输送机转速对物料输送量以及内部物料运动速度具有直接影响^[17-18],为保证正常作业,螺旋输送机输送秸秆质量流量应大于捡拾部分所收集的秸秆质量流量。实际作业过程,地面秸秆铺草量约为 0.8 kg/m²,捡拾器作业幅宽为 2.2 m,捡拾率约为 95%,前进速度约为 0.8 m/s,喂

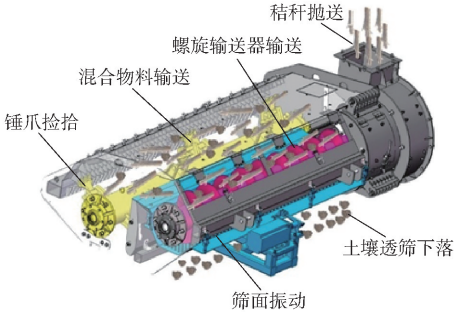


图 3 输送除土装置作业原理

Fig.3 Working principle of conveying and soil removal device

入量计算式为

$$Q_p = \eta_p q B v_f \tag{1}$$

式中 Q_p ——捡拾器收集秸秆喂入量,kg/s
 η_p ——捡拾率,%
 q ——秸秆铺草量,kg/m²
 B ——捡拾器幅宽,m
 v_f ——捡拾器前进速度,m/s

计算得捡拾器收集秸秆喂入量为 1.34 kg/s。因此螺旋输送机输送秸秆输送流量^[19-21]为

$$Q_v = 15 \pi D^2 S n \varphi \rho_b k_\alpha \tag{2}$$

式中 Q_v ——螺旋输送机输送秸秆输送流量,kg/s
 D ——螺旋输送机直径,m
 S ——螺旋输送机叶片螺距,m
 n ——螺旋输送机转速,r/min
 φ ——填充系数,取 0.2^[18]
 ρ_b ——秸秆堆积密度,kg/m³
 k_α ——螺旋输送机倾角修正系数,取 1

初步确定螺旋输送机螺旋直径为 0.24 m,螺距为 0.2 m,秸秆堆积密度为 60 kg/m³,计算结果表明,螺旋输送机转速最小值为 743 r/min 能达到理论输送量。

2.2 振动除土装置

振动除土装置主要由步进电机、曲柄、摇臂、吊臂、机架、筛体组成,如图 4 所示。吊臂上下连接处通过关节轴承以及螺母固定,用于调节筛面倾角,步进电机安装在机架上,并通过曲柄、摇臂以及吊臂控制筛体运动。振动除土装置用于清除螺旋输送机输

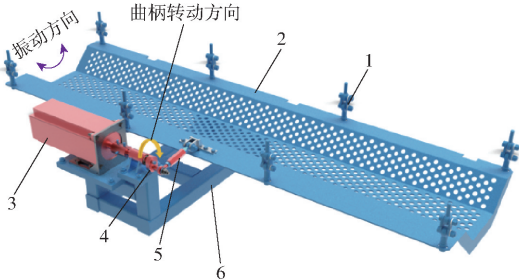


图 4 振动除土装置结构示意图

Fig.4 Schematic of vibration soil removal device

1. 吊臂 2. 筛体 3. 步进电机 4. 曲柄 5. 摇臂 6. 机架

送过程中混合物料的土壤等杂余部分,从而获得清洁度较高的秸秆、苞叶等。振动筛选用传统固定筛结构设计,筛面总长度为 1.86 m,总宽度为 0.525 m,开孔率为 41.14%。

2.2.1 传动部件设计

振动筛采用曲柄-摇臂-筛体的激振形式,并通过双吊臂与机架连接。由于捡拾装置总体尺寸已在前期布局中确定,并且筛体与螺旋输送机之间间隙为 25 mm,为了避免工作过程发生干涉碰撞,同时保证混合物料输送效率,设定摇臂长度为 150 mm,曲柄回转半径为 10~35 mm,吊臂长度为 40 mm。

2.2.2 驱动电机

为保证振动除土装置在实际作业条件下能够稳定运行,需对驱动电机进行合理选型,振动筛由曲柄连杆机构驱动,运动形式可近似为简谐复合运动,电机输出转矩用于克服振动筛面物料在往复运动中惯性载荷,正常作业下筛面物料与筛体总质量为 50 kg,驱动电机转速为 300 r/min,驱动系统所需克

服的最大转矩为

$$T_{\max} = m_0 r_0^2 \left(\frac{2\pi n_0}{60} \right)^2 \tag{3}$$

式中 $T_{\max}$ ——最大惯性转矩, N·m
 m_0 ——物料与筛体总质量, kg
 r_0 ——曲柄回转半径, m
 n_0 ——驱动电机转速, r/min

计算得最大惯性转矩为 19.7 N·m,考虑机械摩擦、物料分布不均等问题,引入安全系数 2~3,在额定转速下驱动电机所需转矩为 39.4~59.1 N·m。

2.3 混合物料运动规律分析

在秸秆输送除土装置作业过程,对混合物料运动轨迹及受力状况进行分析,假设混合物料为质点,不发生任何形变。混合物料运动过程可分为 3 个阶段^[21]:①物料沿筛面上滑或下滑。②物料被筛面抛起。③物料被螺旋输送机叶片接触并输送,最后输送后的物料落入筛面上继续进行第①阶段,在不同阶段混合物料受力状态如图 5 所示。

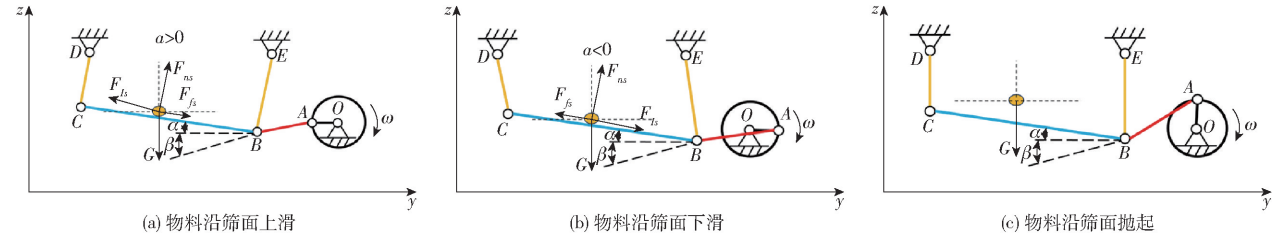


图 5 混合物料在筛面不同运动状态受力分析

Fig. 5 Force analysis of mixed materials under different motion states on sieve

2.3.1 混合物料在筛面滑移分析

如图 5a 所示,颗粒在振动筛表面运动时,主要受到重力 G 、筛面支撑力 F_{ns} 、筛面摩擦力 F_{fs} 以及由于筛面周期振动引起的惯性力 F_{ls} 。设定筛面与水平面夹角为 α ,以沿筛面方向为切向,垂直筛面方向为法向,则颗粒在法向方向满足

$$F_{ns} + G\cos\alpha - F_{lsn} = 0 \tag{4}$$

其中

$$\begin{cases} F_{lsn} = ma_s(t) \\ a_s(t) = -A(2\pi f)^2 \sin(2\pi ft) (\cos\beta + \sin\beta) \\ G = mg \end{cases} \tag{5}$$

式中 F_{lsn} ——法向惯性力, N

$a_s(t)$ ——筛面振动法向加速度, m/s²

A ——振动筛振动幅度, m

f ——振动筛振动频率, Hz

β ——振动方向角, (°)

m ——混合物料质量, kg

将式(5)代入式(4)可得筛面对物料的支撑力为

$$F_{ns} = m(g\cos\alpha - a_s(t)) \tag{6}$$

沿筛面切向方向,物料动力学方程为

$$m\ddot{s} = F_{lss} + G_s - \mu_s k F_{ns} \tag{7}$$

其中
$$\begin{cases} F_{lss} = mA(2\pi f)^2 \sin(2\pi ft) \cos(\beta - \alpha) \\ G_s = -mg\sin\alpha \end{cases} \tag{8}$$

式中 s ——混合物料沿筛面位移, mm

μ_s ——混合物料与筛面间摩擦因数

k ——方向系数,当 $k = -1$ 时,物料沿筛面上滑, $k = 1$ 时,物料沿筛面下滑

F_{lss} ——切向惯性力, N

G_s ——物料重力切向分力, N

将式(8)代入式(7)可得物料沿筛面加速度为

$$\ddot{s} = -g\sin\alpha + A(2\pi f)^2 \sin(2\pi ft) \cos(\beta - \alpha) - \mu_s k [g\cos\alpha - A(2\pi f)^2 \sin(2\pi ft) \sin(\beta - \alpha)] \tag{9}$$

由式(9)可知,颗粒在筛面上的加速度与迁移方向由振动加速度 $a_s(t)$ 与重力分量 $mg\sin\alpha$ 决定,筛面倾角 α 、振动幅度 A 以及振动频率 f 是控制颗粒滑移行为的主导因素。当筛面对物料支持力减小至零时,颗粒与筛面脱离,进入抛掷阶段,即

$$a_s(t) \geq g\cos\alpha \tag{10}$$

2.3.2 物料脱离筛面抛掷动力学分析

物料脱离筛面后,与筛面的接触力消失,此时物

料仅受重力作用,其动力学行为可视为自由抛体运动。物料在空间中运动方程为

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + v_{x0}t \\ y(t) = y_0 + v_{y0}t \\ z(t) = z_0 + v_{z0}t - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad (11)$$

其中 (x_0, y_0, z_0) 和 (v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}) 为物料离开筛面瞬间位置和速度,由上一阶段的解 $s(t)$ 、 $\dot{s}(t)$ 及筛面瞬时运动速度共同确定。因此筛面物料大小与方向受振动幅度 A 、振动频率 f 以及筛面倾角 α 的共同影响,物料抛掷轨迹决定其是否能够进入螺旋输送机有效捕获区域,从而直接影响螺旋输送机入料连续性与瞬时填充率。若颗粒未被螺旋输送机捕获,则会再次落回筛面,形成多次“滑移-抛掷-再接触”周期性过程。

2.3.3 物料在螺旋输送机中输送动力学分析

物料进入螺旋输送机后,在叶片与筒壁的约束下运动。如图 6 所示,此阶段仅从物料受力角度进行分析,物料主要受到重力 G 、螺旋叶片支撑力 F_{nc} 、摩擦力 F_{fc} 以及由螺旋输送机旋转引起的惯性力 F_{lc} ,沿螺旋线方向,物料动力学方程可写为

$$m\ddot{\xi} = F_{lc} - mg\sin\varepsilon - \mu_c F_{nc} \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} F_{lc} = m\omega^2 R \sin\theta \\ F_{nc} = m\omega^2 R \end{cases} \quad (13)$$

式中 ξ ——物料沿螺旋线方向位移, m
 F_{lc} ——螺旋输送机旋转引起的沿螺旋方向的惯性驱动力, N
 ε ——螺旋线与水平面夹角, ($^\circ$)
 μ_c ——物料与螺旋叶片间摩擦因数
 ω ——螺旋输送机角速度, rad/s
 R ——螺旋输送机等效半径, m
 θ ——螺旋输送机叶片倾角, ($^\circ$)

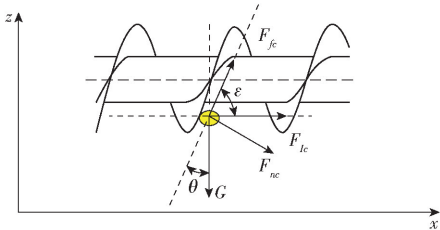


图 6 混合物料接触螺旋输送机受力分析
Fig. 6 Force analysis of mixed material contacting auger conveyor

在稳定输送工况下,颗粒沿螺旋线方向呈准稳态运动,因此 $\ddot{\xi}$ 等于零,将式(13)代入式(12)可得

$$\omega^2 R (\sin\theta - \mu_c) = g\sin\varepsilon \quad (14)$$

此时,螺旋输送机旋转产生的惯性驱动力与

重力及摩擦阻力达到平衡。在叶片约束下,物料圆周切向速度可近似取为螺旋输送机表面线速度。结合螺旋几何关系,物料沿螺旋输送机输送轴向速度为

$$v_x = \frac{2\pi n R}{60} \tan\theta \quad (15)$$

式中 v_x ——物料输送轴向速度, m/s

可得物料轴向输送速度与螺旋输送机角速度呈正相关。由上述分析可知,振动筛运动参数直接影响物料在筛面上抛掷、分层及输送状态,而螺旋输送机输送性能则关系到筛分后物料能否及时排出。因此,仅从单一部件角度确定结构和运动参数,难以全面反映装置连续作业性能,还需进一步分析振动筛与螺旋输送机之间的耦合匹配关系。

2.3.4 振动筛与螺旋输送机耦合匹配机理

振动筛与螺旋输送机是影响装置作业性能的 2 个关键部件,二者之间存在筛分、输送的耦合匹配关系,如图 7 所示。作业过程中,在振动筛作用下物料产生松散、分层和定向运动,符合筛分条件的物料通过筛孔完成分离,未及时通过筛孔或筛分后物料继续沿筛面运动,并进入螺旋输送机输送区域。螺旋输送机则通过螺旋叶片旋转作用对物料进行轴向输送,使筛分后物料能够及时排出,从而保证筛分过程连续性和稳定性。

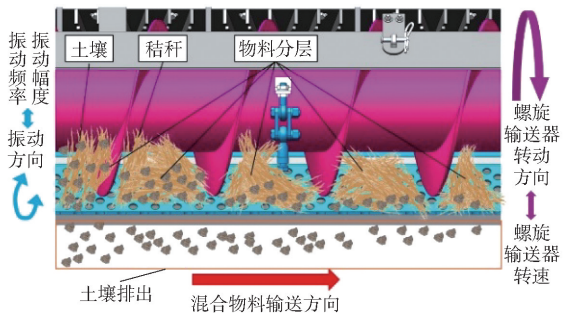


图 7 振动筛与螺旋输送机耦合匹配机理

Fig. 7 Coupling mechanism of vibrating screen and auger conveyor

振动筛振动频率和振幅影响物料在筛面上运动速度、抛掷强度和筛分时间,主要决定物料抛掷状态、筛面停留时间和筛分输出量。螺旋输送机转速、螺距和叶片结构影响物料进入输送段后轴向输送能力,主要决定物料输送速度。当振动筛筛分输出量大于螺旋输送机输送能力时,物料在筛面末端发生堆积,导致筛分效率下降,严重时会造成堵塞;当螺旋输送机输送能力过大时,物料被快速带离筛分区域,造成筛分不充分。因此,振动筛与螺旋输送机之间需保持合理的物料供给与输送平衡。

因此,综合考虑各因素对筛分效率、输送稳定性

和堵塞情况的影响,以振动频率、振动幅度及螺旋输送机转速为关键作业参数,通过单因素试验以及响应面试验方法探寻最优作业性能。

3 台架试验

3.1 试验材料与评价指标

为验证输送除土装置结构合理性及较优参数组合,设计了玉米秸秆捡拾输送除土装置试验台(图8),开展秸秆输送除土性能试验。试验前,在吉林大学农业试验基地人工收集玉米秸秆样本(玉米品种为“飞天358”,含水率为9.63%,平均长度为40 cm)与土壤(含水率为13.82%,砂壤土,土壤粒径小于0.2 mm)。为保证各组试验喂入条件一致,每次试验取秸秆4 kg,并依据前期田间停机取样结果按土壤质量占比约10%混入0.4 kg土壤。试验采用输送带定量连续喂入,控制输送带线速度为0.8 m/s,以保证喂入均匀性和平均喂入速度基本一致。每组试验重复3次,取平均值。

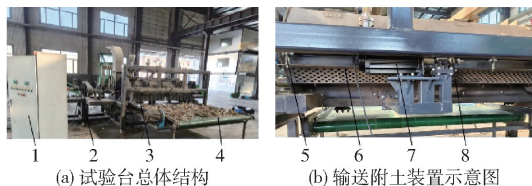


图8 输送除土装置试验台

Fig. 8 Conveying soil removal device test bench

1. 电气柜 2. 机架 3. 捡拾装置 4. 输送带 5. 吊臂 6. 振动筛 7. 电机 8. 曲柄

为更加全面了解输送除土装置作业性能,根据GB/T 25423—2023《方草捆打捆机》和NY/T 3883—2021《秸秆收集机质量评价技术规范》,以秸秆损失率 Y_s 和含土率 Y_t 作为输送除土装置作业评价指标,计算式为

$$Y_s = \frac{m_j}{m_t + m_j} \times 100\% \quad (16)$$

$$Y_t = \frac{W_t}{W_y} \times 100\% \quad (17)$$

式中 m_j ——振动去除土壤损失秸秆质量,kg
 m_t ——作业后收集的秸秆总质量,kg
 W_t ——作业后混合物料中土壤质量,kg
 W_y ——作业后混合物料质量,kg

3.2 单因素试验

3.2.1 振动幅度对作业性能的影响

当振动频率为4 Hz、螺旋输送机转速为1 000 r/min时,选取振动幅度为10、15、20、25、30、35 mm共计6个水平,开展输送除土装置振动幅度变化单因素试验,试验结果如图9所示。

由图9可知,随着振动幅度增大,损失率逐渐增

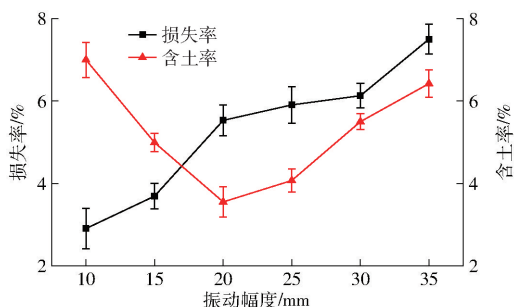


图9 振动幅度对输送除土性能的影响

Fig. 9 Influence of vibration amplitude on separation performance of conveying

加,含土率先急降后缓升,综合考虑损失率和含土率,振动幅度在15~20 mm区间内表现较优。当振动幅度小于20 mm时,随着振动作用增强,有利于土壤与物料分离,含土率明显下降;但随着振动幅度继续增大,物料跳动和抛撒加剧,导致损失率持续升高,同时含土率再次上升,该规律与已有振动筛分研究结果一致^[22]。

3.2.2 振动频率对作业性能的影响

设定振动幅度为20 mm、螺旋输送机转速为1 000 r/min,选取输送除土装置振动频率分别为1、2、3、4、5、6 Hz共计6个水平,得到振动频率对作业性能的影响,如图10所示。

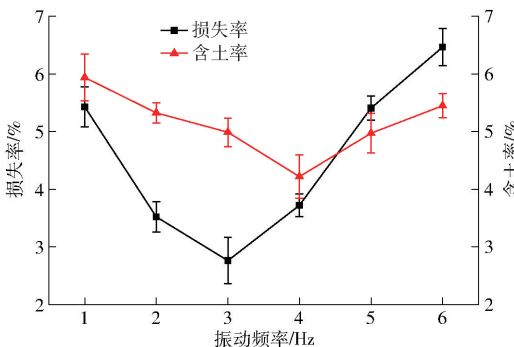


图10 振动频率对输送除土性能的影响

Fig. 10 Influence of vibration frequency on separation performance of conveying

由图10可知,随着振动频率逐渐增加,损失率和含土率均呈先降低后升高趋势;振动频率小于3 Hz时,物料层受振动作用逐渐均匀分散,土壤与物料分离效果增强;而过强振动会加剧物料跳动与抛撒,导致损失率明显升高,同时部分土块和杂质被再次裹挟,含土率也出现回升。该规律与张学军等^[23]关于振动筛分过程的研究结论一致。

3.2.3 螺旋输送机转速对作业性能的影响

设定振动幅度为20 mm、振动频率为4 Hz,选取输送除土装置螺旋输送机转速分别为800、900、1 000、1 100、1 200、1 300 r/min,得到螺旋输送机转速对作业性能的影响,如图11所示。

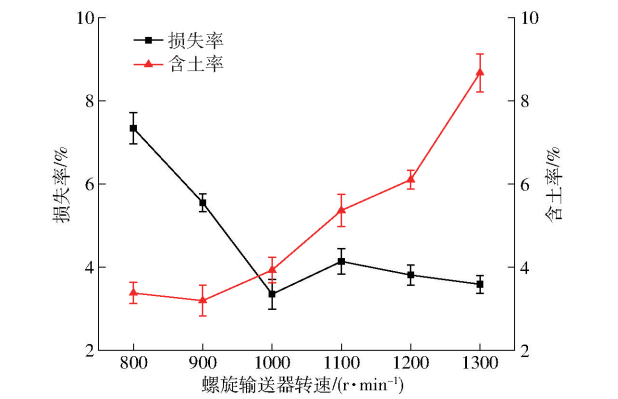


图 11 螺旋输送机转速对输送除土性能的影响

Fig. 11 Influence of auger rotation speed on separation performance of conveying

由图 11 可知,损失率随转速增加总体呈先降后趋稳变化规律,而含土率则整体呈上升趋势。当螺旋输送机转速小于 1 000 r/min 时,物料输送更加连续稳定,除土过程得到改善,损失率明显下降;继续提高转速后,损失率变化幅度较小,但含土率显著增加。说明过高转速会增强土壤和杂质的裹挟作用,削弱分离效果。

3.3 响应面试验结果与分析

3.3.1 试验设计

运用 Design-Expert 13 软件设计 Box – Behnken 试验,选取振动幅度、振动频率、螺旋输送机转速为试验因素进行台架试验,试验因素编码如表 2 所示。

3.3.2 回归方程建立及显著性检验

试验方案与结果如表 3 所示。对试验结果进行数据处理,建立秸秆损失率 Y_s 和含土率 Y_t 回归方程,并进行方差分析,结果如表 4 所示。

表 2 试验因素编码			
Tab.2 Factors and codes of experiment			
编码	因素		
	振动幅度	振动频率	螺旋输送机转速
	x_1/mm	x_2/Hz	$x_3/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
-1	15	3	900
0	20	4	1 000
1	25	5	1 100

表 3 试验方案与结果					
Tab.3 Experiment plan and results					
序号	因素			$Y_s/\%$	$Y_t/\%$
	x_1/mm	x_2/Hz	$x_3/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$		
1	15	3	1 000	3.39	5.70
2	25	3	1 000	4.21	5.37
3	15	5	1 000	2.89	5.24
4	25	5	1 000	5.83	6.65
5	15	4	900	3.58	4.43
6	25	4	900	4.46	5.12
7	15	4	1 100	1.46	5.48
8	25	4	1 100	4.05	6.08
9	20	3	900	3.86	3.78
10	20	5	900	4.99	5.11
11	20	3	1 100	3.32	4.83
12	20	5	1 100	3.76	5.43
13	20	4	900	3.05	4.20
14	20	4	900	3.51	4.19
15	20	4	900	3.24	4.36
16	20	4	900	3.16	3.87
17	20	4	900	2.97	4.21

(1) 损失率回归模型与显著性检验

由表 4 可知,损失率模型显著性 $P<0.000\ 1$,表

表 4 方差分析								
Tab.4 Analysis of variance								
来源	损失率 Y_s				含土率 Y_t			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	14.250	9	39.34	<0.000 1 **	10.070	9	23.06	0.000 2 **
x_1	6.530	1	162.34	<0.000 1 **	0.702	1	14.47	0.006 7 **
x_2	0.905	1	22.47	0.002 1 **	0.945	1	19.48	0.003 1 **
x_3	2.310	1	57.42	0.000 1 **	1.430	1	29.43	0.001 0 **
x_1x_2	1.120	1	27.92	0.001 1 **	0.757	1	15.60	0.005 5 **
x_1x_3	0.731	1	18.16	0.003 7 **	0.002	1	0.04	0.843 9
x_2x_3	0.119	1	2.96	0.129 2	0.133	1	2.75	0.141 5
x_1^2	0.094	1	2.34	0.170 1	4.480	1	92.42	<0.000 1 **
x_2^2	2.330	1	57.98	0.000 1 **	1.240	1	25.49	0.001 5 **
x_3^2	0.011	1	0.282 9	0.611 3	0.027	1	0.55	0.483 0
残差	0.281	7			0.339	7		
失拟项	0.108	3	0.829 1	0.543 0	0.211	3	2.18	0.233 1
纯误差	0.174	4			0.129	4		
总和	14.53	16			10.410	16		

注:** 表示影响极显著($P<0.01$)。

明回归模型极显著,决定系数 $R^2 = 0.9806$,表明模型相关性较好,失拟项 $P = 0.543 > 0.05$,表明模型稳定,回归方程拟合较好。剔除不显著项建立损失率 Y_s 与振动幅度 x_1 、振动频率 x_2 和螺旋输送机转速 x_3 之间的回归模型为

$$Y_s = 41.758 - 1.333x_1 - 6.015x_2 - 0.026x_3 + 0.106x_1x_2 + 0.001x_1x_3 + 0.745x_2^2$$

(18)

(2)含土率回归模型与显著性检验

由表4可知,含土率模型显著性 $P = 0.0002$,表明回归模型极显著,决定系数 $R^2 = 0.9674$,表明模

型相关性较好,失拟项 $P = 0.2331 > 0.05$,表明模型稳定,回归方程拟合较好。剔除不显著项建立含土率 Y_t 与振动幅度 x_1 、振动频率 x_2 和螺旋输送机转速 x_3 之间的回归模型为

$$Y_t = 29.275 - 1.895x_1 - 3.907x_2 - 0.003x_3 + 0.087x_1x_2 + 0.041x_1^2 + 0.542x_2^2$$

(19)

3.3.3 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秸秆损失率和秸秆含土率的响应曲面,如图12所示。

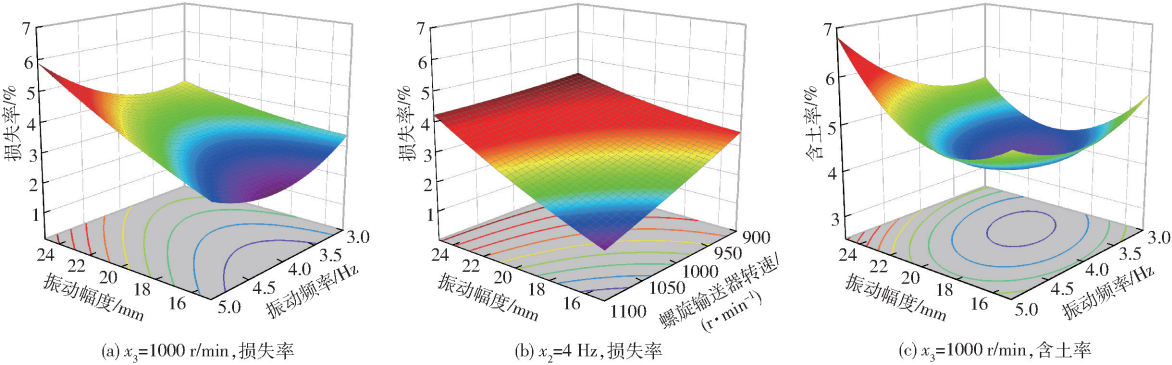


图 12 因素交互作用对指标影响的响应曲面

Fig. 12 Response surfaces of influence of factor interaction on index

如图12a所示,振动频率与振动幅度对损失率存在明显交互作用。由于振动幅度和振动频率共同决定筛面激振强度及物料受迫运动状态,当振动幅度15 mm、振动频率4 Hz时,损失率最低。激振作用有利于混合物料松散、分层及土壤颗粒向筛面迁移,从而提高透筛效率;而当振动幅度超过20 mm或振动频率不在4 Hz时,物料跳动和抛撒加剧,易导致已分离土壤再次被裹挟进入料层,从而削弱分离效果。该规律与已有振动筛分过程中物料分散与再混合特性的研究结果一致^[24]。由图12b可知,提高螺旋输送机转速有利于增强物料连续输送、减轻堆积,使振动筛分作用能够更稳定地作用于料层,从而降低损失率;但振动幅度为25 mm时会破坏输送稳定性,降低降损效果。由图12c可知,含土率随振动频率和振动幅度变化总体呈先降后升规律,且在振动幅度20 mm、振动频率4 Hz时出现明显低值区,表明振动除土设计对降低夹带土具有实际效果。这是因为适度振动有利于土壤脱落,而过强振动会使已分离的土壤再次裹挟混入物料。综合来看,振动频率、振动幅度与螺旋输送机转速需合理匹配,才能兼顾低损失率和低含土率。

3.4 优化验证试验

结合各试验因素边界条件,以降低秸秆损失率和含土率为目标,运用Design-Expert 13软件中优化功能对评价指标进行多目标寻优求解^[25],目标函数

约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_s \\ \min Y_t \\ 15 \text{ mm} \leq x_1 \leq 25 \text{ mm} \\ 3 \text{ Hz} \leq x_2 \leq 5 \text{ Hz} \\ 900 \text{ r/min} \leq x_3 \leq 1100 \text{ r/min} \end{cases}$$

(20)

求解可得输送除土装置较优作业参数组合为:振动幅度为19.55 mm、振动频率为3.75 Hz、螺旋输送机转速为991.23 r/min,此时损失率为3.18%,含土率为4.07%。基于优化参数组合开展台架验证试验,为便于设定作业参数,取振动幅度为20 mm、振动频率为4 Hz、螺旋输送机转速为990 r/min,此时秸秆损失率为3.03%,含土率为4.24%,试验值与优化值相对误差均小于5%。

3.5 验证试验

为进一步验证响应面优化所得参数组合下输送除土装置的作业性能,并明确振动筛分机构对玉米秸秆除土效果的实际贡献,在台架条件下开展验证试验。以响应面优化得到的最佳参数组合作为试验组,以固定筛分装置作为对照组,在其余试验条件一致的情况下,对2组工况下装置秸秆损失率和含土率进行对比,每组重复进行5次,结果如图13所示。

由图13可知,与对照组(4.65%)相比,试验组(11.19%)含土率降低58.45%,秸秆损失率基本没

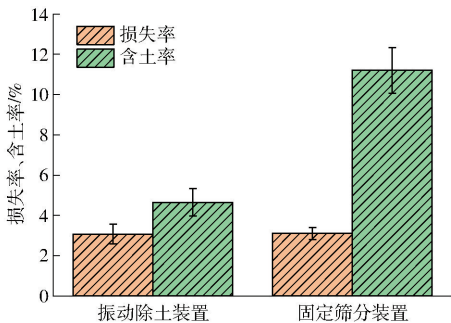


图 13 验证试验结果

Fig. 13 Verification test results

有变化。结果表明,振动除土装置对降低玉米秸秆输送过程中的含土率具有显著效果。所设计的振动除土装置能有效改善捡拾物料输送与分离状态,在输送过程中实现除土作业;在响应面优化所得参数组合下,其作业性能最佳,相比无振动输送工况具有更低的含土率和更优的作业效果,验证了该装置在捡拾环节完成除土工序的有效性。

4 田间试验

为验证玉米秸秆输送除土装置台架优化试验结果,2025 年 12 月在吉林省长春市九台区二道沟村玉米种植试验田开展田间验证试验,如图 14 所示。试验材料选取含水率为 10.34% 的玉米秸秆和地表含水率 11.52% 的土壤。试验时关闭捡拾打捆机转筛,控制整机前进速度为 0.8 m/s,选取振动筛振动幅度为 20 mm、振动频率为 4 Hz,螺旋输送机转速为 990 r/min。依据 GB/T 25423—2023《方草捆打捆机》,记录 1 个打捆周期内,人工收集地面损失的秸



图 14 田间验证试验

Fig. 14 Field validation test

秆以及打捆作业完成后的草捆,通过筛分、称量后,计算秸秆损失率和含土率。试验重复 5 次取平均值,试验结果见表 5。田间试验结果表明,玉米秸秆输送除土装置平均损失率为 2.87%,平均含土率为 4.75%,优化参数条件下,输送除土装置除土效果满足低损高净作业标准。

表 5 田间试验结果

Tab. 5 Field experiment results

%

序号	损失率	含土率
1	2.74	5.43
2	3.11	4.28
3	3.29	4.89
4	2.42	5.61
5	2.77	3.54
均值 ± 标准差	2.87 ± 0.34	4.75 ± 0.85

5 结论

(1)揭示了振动筛分-螺旋输送机输送耦合作用下秸秆-土壤混合物的分层透筛规律。研究结果表明,振动作用能够促进混合物料松散、翻动与分层,使土壤颗粒向筛面附近迁移并优先透筛排出,而秸秆在螺旋输送机连续推送作用下实现保留输送;振动幅度与振动频率对含土率存在显著交互作用,当振动幅度 20 mm、振动频率 4 Hz 时有利于土壤离散与透筛。响应面优化结果表明,装置较优参数组合为振动幅度 19.55 mm、振动频率 3.75 Hz、螺旋输送机转速 991.23 r/min。

(2)提出了一种振动筛分-螺旋输送机输送耦合式玉米秸秆输送除土方法,并设计了相应的输送除土装置,实现了秸秆输送与除土同步进行。台架试验结果表明,当振动幅度 20 mm、振动频率 4 Hz、螺旋输送机转速 990 r/min 时,装置秸秆损失率为 3.03%,含土率为 4.24%,且试验值与优化预测值相对误差小于 5%;与固定筛分装置相比,优化后装置含土率进一步降低 58.45%。田间验证结果表明,装置平均损失率为 2.87%,平均含土率为 4.75%,满足玉米秸秆低损高净捡拾输送作业要求。

参 考 文 献

[1] Zhao X, Li R, Liu W, et al. Estimation of crop residue production and its contribution to carbon neutrality in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2024, 203:107450.

[2] 刘俊杰,严晓斌,张美怡,等. 中国农作物秸秆资源产量分布及利用分析[J]. 农业资源与环境学报,2025,42(3): 751-760. Liu Junjie, Yan Xiaobin, Zhang Meiyi, et al. Analysis of yield distribution and utilization of crop straw resources in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2025, 42(3): 751-760. (in Chinese)

[3] 霍丽丽,姚宗路,赵立欣,等. 秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究[J]. 农业机械学报,2022,53(1):349-359. Huo Lili, Yao Zonglu, Zhao Lixin, et al. Contribution and potential of comprehensive utilization of straw in GHG emission reduction and carbon sequestration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1):349-359. (in Chinese)

[4] 李胜男,纪雄辉,邓凯,等. 区域秸秆资源分布及全量化利用潜力分析[J]. 农业工程学报,2020,36(12):221-228.

- Li Shengnan, Ji Xionghui, Deng Kai, et al. Analysis of regional distribution patterns and full utilization potential of crop straw resources[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(12): 221–228. (in Chinese)
- [5] 贾彭程,徐福东,王金武,等. 轻简型水稻秸秆捡拾打捆一体机设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(11):298–307. Jia Pengcheng, Xu Fudong, Wang Jinwu, et al. Design and test of light-weight rice straw picking and baling integrated machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(11):298–307. (in Chinese)
- [6] 全振伟,李洪文,卢彩云,等. 直注式秸秆捡拾粉碎深埋机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(7):83–95. Tong Zhenwei, Li Hongwen, Lu Caiyun, et al. Design and experiment of direct-injection straw picking and crushing deep burying machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(7):83–95. (in Chinese)
- [7] 邱硕,孙喜月,白雪卫,等. 玉米秸秆捡拾制粒机的成型装置设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报,2022,53(1):55–62. Qiu Shuo, Sun Xiyue, Bai Xuewei, et al. Design and experiment on the molding device for a corn stalk picking and pelleting machine[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2022,53(1): 55–62. (in Chinese)
- [8] 李大鹏. 黄贮玉米秸秆高离地间隙吸附捡拾技术与试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023. Li Dapeng. Study and test on the adsorption picking technology under high ground clearance of yellow-storage maize stalk[D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2023. (in Chinese)
- [9] 肖子卿,田海清,张涛,等. 玉米秸秆饲料除尘筛出物离散元数值模拟参数标定[J]. 中国农业大学学报,2022,27(7):172–183. Xiao Ziqing, Tian Haiqing, Zhang Tao, et al. Parameter calibration of discrete element numerical simulation for the dedusting sieve of corn straw feed[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(7):172–183. (in Chinese)
- [10] 杨猛,张延化,张冲,等. 先揉切后分离风筛组合式花生膜秧分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(12):112–121. Yang Meng, Zhang Yanhua, Zhang Chong, et al. Design and experiment of fan-sieve combined peanut film-seedling separating device based on shredding and separating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(12):112–121. (in Chinese)
- [11] 张胜伟,张瑞雨,曹庆秋,等. 油莎豆收获机双层滚筒筛式果杂分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3):148–157. Zhang Shengwei, Zhang Ruiyu, Cao Qingqiu, et al. Design and experiment of double-deck roller sieve type fruit impurity separation device for tiger nut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(3):148–157. (in Chinese)
- [12] 肖子卿. 秸秆饲料收获机筛分-机械输送一体化除尘技术及试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2025. Xiao Ziqing. Integrated dust removal technology and experimental study on the screening-mechanical conveying system of straw fodder harvesters[D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2025. (in Chinese)
- [13] 付乾坤,付君,陈志,等. 秸秆捡拾打捆机振动去土作业参数优化[J]. 农业工程学报,2018,34(8):26–33. Fu Qiankun, Fu Jun, Chen Zhi, et al. Optimization of working parameters on soil removal of stover pickup baler by vibration[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(8): 26–33. (in Chinese)
- [14] Zhang S, Yuan H, Cao Q, et al. Numerical simulation of improving the dispersion and migration characteristics of tiger nut tuber-soil mixture with a novel variable-amplitude flexible screen[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 225: 109291.
- [15] Long S, Wei W, Li D, et al. Study on separation of the tuber-soil binary mixture based on vibration and airflow coupling[J]. Biosystems Engineering, 2024, 239: 13–24.
- [16] 王鹏杰,刘江涛,王泽河,等. 玉米秸秆回收机除土装置的设计与试验[J]. 农机化研究,2026,48(5):242–249. Wang Pengjie, Liu Jiangtao, Wang Zehe, et al. Design and test of soil removal device for corn straw recycling machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2026, 48(5): 242–249. (in Chinese)
- [17] 袁全春,徐丽明,牛丛,等. 果园有机肥深施机土肥混合分层回填装置研制[J]. 农业工程学报,2021,37(5):11–19. Yuan Quanchun, Xu Liming, Niu Cong, et al. Development of soil-fertilizer mixing layered backfiller for organic fertilizer deep applicator in orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 11–19. (in Chinese)
- [18] 刘庆举,连政国,王东伟,等. 花生秧果兼收联合收获机割秧输送装置的设计与试验[J]. 农机化研究,2025,47(5):59–66. Liu Qingju, Lian Zhengguo, Wang Dongwei, et al. Design and test of cutting conveyor device for peanut seedling and fruit combined harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(5): 59–66. (in Chinese)
- [19] 中国农业机械化学研究院. 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.
- [20] 张秀丽,刘云鹏,李连豪,等. 有机肥生产中的多段式搅龙设计与性能试验[J]. 农业工程学报,2018,34(3):49–56. Zhang Xiuli, Liu Yunpeng, Li Lianhao, et al. Design and performance experiment of multi-segment type conveyor in process of organic fertilizer production[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 49–56. (in Chinese)
- [21] 黄学群. 运输机械选型设计手册[M]. 2版. 北京:化学工业出版社,2011.
- [22] 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 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)
- [23] 张学军,张云赫,史增录,等. 油菜联合收获机清选装置结构优化与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):103–113. Zhang Xuejun, Zhang Yunhe, Shi Zenglu, et al. Optimization and experiment of oil sunflower combined harvester cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 103–113. (in Chinese)
- [24] 张齐东,孙松林,陈俊伟,等. 基于 EDEM 的黑水虻虫沙振动分选装置参数研究[J]. 中国农机化学报,2025,46(11):214–221,228. Zhang Qidong, Sun Songlin, Chen Junwei, et al. Parameters of vibration sorting device for black soldier fly insect sand based on EDEM[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(11): 214–221, 228. (in Chinese)
- [25] 薛钊,付君,陈志,等. 青饲玉米收获机械切碎装置参数优化试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2020,50(2):739–748. Xue Zhao, Fu Jun, Chen Zhi, et al. Optimization experiment on parameters of chopping device of forage maize harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(2): 739–748. (in Chinese)