

适配条带耕整地单体的动力清秸装置设计与试验

侯守印 黄昊 张涵飞 金博 纪文义

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对在玉米秸秆地表覆盖条件下被动秸秆清理条带耕整地机清秸率低、防堵性能差等问题,本文设计了一种具有仿形功能的主动秸秆清理条带耕整地单体,并对其核心部件动力清秸装置进行了设计。通过理论分析与随机区组试验,确定了影响动力清秸装置性能的结构与工作参数。以刃口初始滑切角、螺距、刀辊转速为试验因素,清秸率和功耗为评价指标,采用二次回归正交旋转中心组合试验与离散元仿真相结合方法进行参数组合优化,结果表明,各因素对评价指标均具有显著性影响,当刃口初始滑切角为 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 、螺距为185~220 mm、刀辊转速为370 r/min时,清秸率大于88%、当量功耗小于750 W。根据参数组合优化结果完成样机试制,并进行了田间验证试验,结果表明,当螺距为190、200、210 mm、刃口初始滑切角为 50° 、刀辊转速为370 r/min时,清秸率不小于85.2%、当量功耗不大于750 W,田间验证试验与仿真优化结果相对误差在允许范围内。研究结果为主动式条带耕整地机设计与优化提供了参考。

关键词: 条耕整地; 清秸装置; EDEM 仿真; 设计; 试验

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)10-0022-11 OSID: 

Design and Test of Power Straw Clearance Device for Strip Tillage Unit

HOU Shouyin HUANG Hao ZHANG Hanfei JIN Bo JI Wenyi

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Aiming at the problems of low straw clearance rate and poor anti-clogging performance of passive straw cleaning strip tillage machines under corn straw surface mulching conditions, an active straw cleaning strip tillage unit with contour-following functionality was designed and its core component was developed—the power-driven straw clearance device. Through theoretical analysis and randomized block experiments, the structural and operational parameters affecting the performance of the power-driven straw clearance device were determined. Using the initial cutting angle of the blade, pitch, and cutter roll speed as experimental factors, and straw clearance rate and power consumption as evaluation metrics, a parameter combination optimization was conducted by integrating quadratic regression orthogonal rotation central composite experiments with discrete element simulations. The results indicated that all factors significantly influenced the evaluation metrics. When the initial cutting angle of the blade was $45^{\circ}\sim 55^{\circ}$, the pitch was 190 mm, 200 mm, 210 mm, and the cutter roll speed was 370 r/min, the straw clearance rate exceeded 88% while the power consumption was below 750 W. Based on the parameter combination optimization results, a prototype was manufactured and field validation tests were conducted. The findings showed that with a pitch of 185~220 mm, an initial cutting angle of 50° , and a cutter roll speed of 370 r/min, the straw clearance rate was no less than 85.2% and the power consumption did not exceed 750 W. The relative error between field validation tests and simulation optimization results remained within the acceptable range. These findings can provide a reference for the design and optimization of active strip tillage machines.

Key words: tilling and leveling the field; straw cleaning device; EDEM simulation; design; experiment

0 引言

黑龙江省早作保护性耕作采用“两免一翻”技术模式^[1-3],主要是由于该地区玉米秸秆量大、气温低,导致秸秆全量地表覆盖条件免耕播种质量差、出苗晚、出弱苗。该技术核心是秸秆翻埋还田,对抑制土壤侵蚀、水肥流失效果并不显著。而条带耕整地技术可以在秋季作物机械收获后,地表秸秆全量覆盖条件下完成播种带处耕整地与施肥作业,能够实现区域散寒增温、蓄水保墒、种床整备等功能,兼具保护性耕作与精耕细作优势^[4-6]。

清秸装置是条带耕整地机核心部件,根据工作原理,主要分为从动式和主动式 2 种^[7]。从动式清秸装置依靠地表摩擦力和重力驱动,主要包括切茬和拨茬部件。张银平等^[8]设计了一种动力补偿自适应清秸装置,通过分析清秸盘前倾角和安装夹角、作业速度和清秸盘转速等参数对清秸作业效果的影响,确定了清秸装置结构和运动参数取值;SIEMENS 等^[9]针对秸秆覆盖量大的问题,设计了一种锐角开沟器配套使用秸秆清秸装置;SARAUSKIS 等^[10]为降低清秸装置受力与功耗,分析了倾斜角、盘齿入土深度以及作业速度对清秸装置的影响,优化了双侧清秸盘工作参数。根据上述研究,从动式清秸装置作业性能依赖于装置与地面及秸秆之间的相互作用,导致装置对秸秆切割和拨动力受限,在东北地区秸秆覆盖量较大条件下作业时,难以达到理想清秸效果。主动式清秸装置主要依靠高速旋转部件对地表秸秆进行条带清理,根据旋转方式分为正旋、水平旋、侧向旋、立式旋等,对不同工作环境适应性较强。侯守印等^[11]针对 2BMFJ 型原茬地免耕覆秸精量播种机宽幅作业时玉米碎秸多级横向运移过程滞留问题,通过分析玉米碎秸单级抛撒运动规律,设计了玉米碎秸横向运移整流装置;张仕林等^[12]针对西北地区玉米秸茬覆盖地小麦免少耕宽幅沟播时,由于玉米根茬阻碍秸秆流动导致秸茬聚集壅堵、土壤扰动大、种带清洁率低、播种质量差等问题,提出先被动切割、后主动抛撒的种带清理方法,设计了一种切抛组合式破茬清秸防堵装置;赵宏波等^[13]针对我国华北平原一年两熟区玉米秸秆覆盖地小麦少免耕播种机作业时存在易堵塞、种床清洁率低等问题,设计了一种条带型行间侧抛清秸防堵装置。根据上述研究,现有主动式清秸装置普遍缺少独立仿形功能。由于田间地表存在不规则起伏,机具作业时各清秸装置难以保持一致的入土深度。为达到预期清秸效果,需保证各清秸刀齿具有足够入土深度,导致部分作业行中刀齿入土过深,从而引起土壤扰动加剧、作

业功耗显著上升。此外,多数清秸装置采用后抛方式处理秸秆,易造成秸秆在后续深松、施肥及合墒部件处堆积堵塞,进而降低机具整体作业质量与可靠性。

针对上述问题,本文结合黑龙江省黑土地保护实际生产条件与技术需求,设计一种适用于全量秸秆覆盖地表的主动式条带耕整地单体。通过理论分析与随机区组试验确定清秸装置主要结构与工作参数,基于响应曲面法与离散元仿真相结合对关键参数组合进行优化,并进行田间试验对优化结果进行验证。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

主动式条带耕整地单体(条耕单体)结构组成如图 1 所示,主要包括平行四杆仿形机构、清秸装置、深松施肥铲、合墒器、镇压辊、物料整流器以及传动系统等部分。

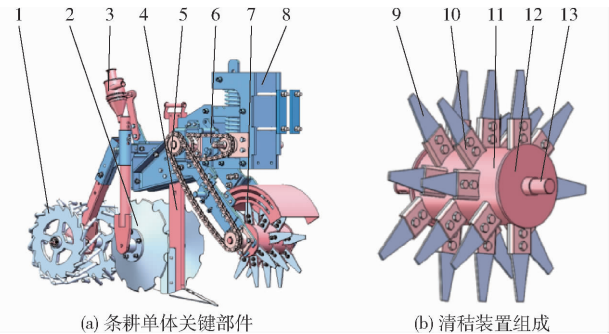


图 1 条耕单体结构组成

Fig. 1 Strip tillage monostructure composition

1. 镇压辊 2. 合墒器 3. 物料整流器 4. 深松施肥铲 5. 第 2 级链传动 6. 第 1 级链传动 7. 清秸装置 8. 平行四杆仿形机构 9. 清秸刀齿 10. 刀座 11. 滚筒 12. 腹板 13. 刀辊轴

平行四杆仿形机构通过前卡板与机器主机架固定连接,通过后卡板与主梁固连,深松施肥铲、合墒器、镇压辊、物料整流器固定连接在主梁上。清秸装置可转动装配在平行四杆仿形机构后卡板下支臂上,下支臂与后卡板固定连接。条耕单体上配有两级链传动,第 1 级链传动的两链轮中心连线与平行四杆仿形机构的连杆平行,同时,中心距等于连杆长度,确保条耕单体工作仿形过程传动的稳定性。第 2 级链传动以第 1 级链传动从动轮为主链轮,两级从动链轮与清秸装置刀辊轴固定连接,同时,通过调节下支臂调整清秸装置相对镇压辊相对位置,从而确保清秸刀齿清秸深度满足技术要求。清秸装置主要由清秸刀齿、刀辊、刀辊轴和刀座组成。刀辊通过滚筒、腹板、刀辊轴焊接而成,刀座按螺旋排布焊接于刀辊上,清秸刀齿采用紧固件固定

装配于刀座上。

1.2 工作原理

机具作业时,通过调节清秸装置、深松施肥铲、合墒器与镇压辊相对位置,设定清秸、深松、合墒和施肥理论深度。条耕单体在拖拉机牵引下匀速直线前进,触土部件在平行四杆仿形机构与镇压辊作用下随地表仿形,保持作业深度;同时,传动系统将动力输出轴转矩与转速传至清秸装置,使其高速匀速逆时针旋转,如图 2a 所示。清秸刀齿与秸秆接触后将沿清秸装置前进方向抛撒。

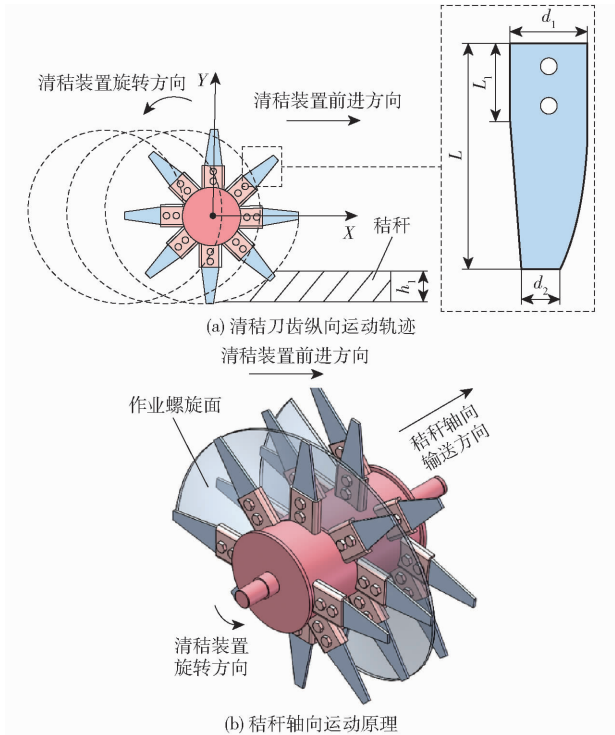


图 2 清秸装置工作原理

Fig. 2 Working principle of straw cleaning device

清秸刀齿按螺旋线布置于刀辊上,高速旋转形成具有轴向推运作用的螺旋面^[14],推动秸秆沿轴向连续输送,最终移至清秸条带两侧,如图 2b 所示。清秸装置逆向旋转可增大秸秆与深松铲、合墒器及镇压辊纵向间距,降低堵塞风险;且因秸秆尺寸大于土粒,被抛起的土粒可经刀齿间隙回落至清秸条带表面,减少土壤损失。

2 关键部件设计

2.1 关键参数确定

清秸装置作业过程,为避免秸秆堆积导致触土部件堵塞,理论上需保证清秸装置在单位时间内秸秆轴向输送量大于机具行驶距离清秸条带内秸秆覆盖量^[15],其数学模型可表示为

$$V_1 \geq V_2 \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} V_1 = qt \\ V_2 = vtlh_1 \\ q = \frac{60\pi(D^2 - d^2)Sn\rho\varphi}{4} \\ D = 2L + d \end{cases} \quad (2)$$

式中 V_1 ——单位时间内秸秆轴向输送量, m^3

V_2 ——机具行驶距离秸秆覆盖量, m^3

q ——螺旋输送效率, kg/h

D ——螺旋直径, mm

d ——刀辊直径, mm

S ——螺距, mm

n ——清秸装置转速, r/min

ρ ——秸秆密度, kg/m^3

φ ——填充百分比

t ——工作时间, h

l ——清秸条带宽度, mm

L ——清秸刀齿长度, mm

h_1 ——平均秸秆厚度, mm

v ——机具前进速度, m/s

整理式(1)、(2)可得

$$SnL(L + d) \geq \frac{vth_1}{60\pi\rho\varphi} \quad (3)$$

由式(3)可知,当机具前进速度一定时,影响秸秆清理质量的主要因素包括清秸刀齿长度、刀辊直径、螺距、清秸装置转速。

2.1.1 清秸刀齿长度

黑龙江省秋收玉米后地表秸秆覆盖厚度平均为 $40 \sim 50 \text{ mm}$ ^[16]。受地表起伏较大及条耕单体后仿形结构影响,为保证清秸效果,刀齿需具有一定入土深度;但入土越深土壤阻力越大、功耗越高。综合清秸质量与能耗,初步确定入土深度为 10 mm 。秸秆抛撒过程存在回流,为避免秸秆堆积增厚引起堵塞,地表以上刀齿长度应大于秸秆厚度 2 倍,因此刀齿长度可表示为

$$L = 2h_1 + h_2 + L_1 \quad (4)$$

式中 h_2 ——入土深度, mm

L_1 ——刀柄长度, mm

为便于清秸刀齿安装,刀柄长度取 40 mm ,将相关参数代入式(4)可得清秸刀齿长度为 140 mm 。参照文献[17],为保证清秸刀齿具有足够强度与刚度,清秸刀齿底宽 d_1 设计为 50 mm ,清秸刀齿顶宽 d_2 为 25 mm 。

2.1.2 刀辊直径

刀辊直径与清秸刀齿长度关系式为

$$d = (0.2 \sim 0.35)D \quad (5)$$

由式(5)可得刀辊直径为 $175 \sim 215 \text{ mm}$,为缩小

清秸装置整体尺寸,需尽可能减小刀辊直径,设计刀辊直径为 175 mm。

2.1.3 螺距

如图 3 所示建立直角坐标系分析秸秆轴向输送受力。将秸秆简化为质点并取为原点 O ,垂直地表为 Y 轴,秸秆轴向输送方向为 X 轴正向,清秸装置前进方向为 Z 轴正向。

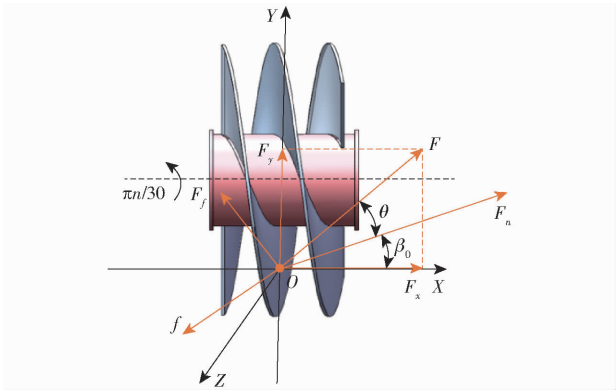


图 3 秸秆受力分析
Fig. 3 Straw force analysis

在 XOY 平面内,秸秆受清秸装置法向推力 F_n 、切向摩擦力 F_f 以及地表摩擦力 f 。清秸装置对秸秆的合力 F 受摩擦影响偏离法向形成摩擦角 θ ,将 F 分解为轴向分力 F_x 和径向分力 F_y ,计算式为

$$\begin{cases} F_y = F \cos(\theta + \beta_0) \\ F_x = F \sin(\theta + \beta_0) \end{cases} \quad (6)$$

式中 β_0 ——螺旋升角, $(^\circ)$

为确保秸秆能轴向运输,需满足

$$F_n \cos \beta_0 > F_f \sin \beta_0 + f \sin(90 - \beta_0 - \theta) \quad (7)$$

整理式(7)可得

$$F_n \cos \beta_0 > F_n \tan \theta \sin \beta_0 \quad (8)$$

金属与秸秆的静摩擦角一般为 $23^\circ \sim 33^\circ$ ^[18],取 θ 为 33° 代入式(8)可得 $\beta_0 < 57^\circ$ 。

螺旋升角可表示为^[19]

$$\tan \beta_0 = \frac{S}{\pi d} \quad (9)$$

将刀辊直径和螺旋升角代入式(9)得螺距小于 800 mm。螺距过大将增大相邻刀齿轴向间距、降低螺旋曲面连续性,导致秸秆输送不连续并削弱轴向推运效果;螺距过小则降低输送效率,且受刀座轴向尺寸限制易发生结构干涉。综合考虑,确定螺距为 150 ~ 275 mm,由试验确定具体取值。

2.1.4 清秸装置转速

清秸装置作业时,转速变化会改变刀齿运动规律并影响清秸效果。为优化作业性能,需分析转速与清秸刀齿作业规律的关系。为便于研究,将同一纵向平面内的刀齿划分为一组,如图 4 所示。

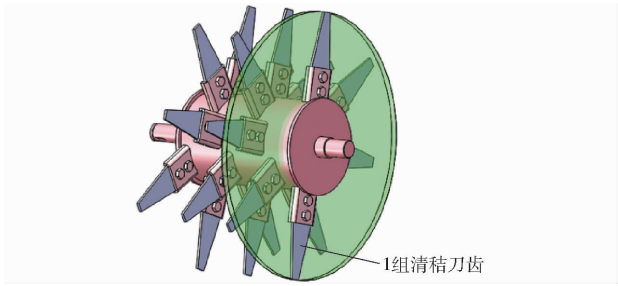


图 4 清秸刀齿分组
Fig. 4 Grouping of straw cleaning blade teeth

1 组内相邻清秸刀齿连续打击时段内,清秸装置前进距离 W_1 为

$$W_1 = \frac{60v}{nN_1} \quad (10)$$

式中 N_1 ——1 组清秸刀齿齿数

轴向相邻清秸刀齿连续打击时段内,清秸装置前进距离 W_2 为

$$W_2 = \frac{60v}{nN_1N_2} \quad (11)$$

式中 N_2 ——单个螺距内清秸刀齿组数

为降低清秸装置作业过程附加载荷波动,提升单体作业性能,清秸刀齿作业需满足^[20]

$$h_3 - W_2 = \varepsilon W_1 \pm W_2 \quad (12)$$

式中 h_3 ——清秸刀齿轴向间距, mm

ε ——组距系数

整理可得

$$n = \frac{10^5 \varepsilon v}{6h_3N_1} \text{ 或 } n = \frac{10^5 (\varepsilon N_2 + 2) v}{6h_3N_1N_2} \quad (13)$$

为防止轴向相邻刀齿间秸秆堵塞,间距应不小于秸秆最大直径。黑龙江地区粉碎后玉米秸秆最大直径小于 25 mm^[21];同时为避免漏清并提高清秸率,间距不宜超过 1.5 倍秸秆直径。综合确定轴向刀齿间距为 37.5 mm。

为保证多倍螺距范围内刀齿分布连续,单螺距内刀齿组数应等于刀齿间隔数,因此螺距、刀齿组数与相邻刀齿轴向间距关系可表示为

$$N_2 = \frac{S}{h_3} \quad (14)$$

由式(14)可得单个螺距内清秸刀齿组数为 4 ~ 11。黑龙江地区动力驱动耕整地机械作业速度通常小于 2 m/s,组距系数按需取值^[22],取 0.1。将已知参数代入式(13),得清秸装置转速为 300 ~ 500 r/min。

2.2 刃口曲线设计

清秸作业中易发生秸秆回带,回带过大可能引起后续触土部件堵塞;若收获粉碎质量差,还可能出现秸秆缠绕刀辊,导致功耗增加、清秸效果下降。合理设计刀齿刃口曲线可有效缓解上述问题^[23]。

常见秸秆处理刀具刃口曲线有阿基米德螺旋、

对数螺旋和正弦指数螺旋^[24]。其中正弦指数螺旋刃口防缠绕效果好、阻力小,且可通过调节初始滑切角、滑切角增量和极角比例系数等参数生成具有不同滑切特性的刃口轮廓^[25],便于参数化设计与优化。因此,选用正弦指数曲线作为清秸刀齿刃口曲线,并建立其极坐标方程,如图5所示。

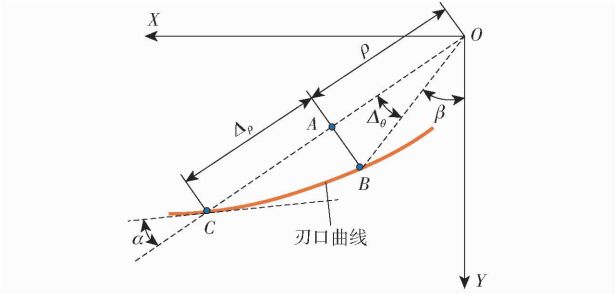


图5 清秸刀齿刃口曲线
Fig. 5 Curved blade profile of straw cutter

当极角增加 Δ_θ 时,极径增量为 Δ_ρ ,根据极角和极径的几何关系可得

$$l_{OC} - l_{OB} = \frac{l_{AB}}{\tan \angle ACB} \tag{15}$$

其中

$$\begin{cases} l_{AB} = \rho \sin \Delta_\theta \\ l_{OC} = \rho + \Delta_\rho \\ l_{OB} = \rho \cos \Delta_\theta \end{cases} \tag{16}$$

式中 ρ ——极径,mm
当极角增量 Δ_θ 无穷小,另 $\angle ACB$ 为 α ,整理式(15)可得

$$d_r = \frac{\rho \Delta_\theta}{\tan \alpha} \tag{17}$$

其中 $\alpha = \alpha_0 + K\beta$ (18)

式中 α ——滑切角, (°)
 α_0 ——初始滑切角, (°)
 K ——滑切角与极角比例系数
 β ——极角, (°)

整理式(17)可得

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{\sin(\alpha_0 + K\beta)}{\sin \alpha_0} \right)^{\frac{1}{K}} \tag{19}$$

式中 ρ_0 ——初始极径,mm
由式(19)可知,正弦指数曲线形状主要由初始极径、初始滑切角、滑切角与极角比例系数、极角4个因素决定。

参照文献[26],为防止清秸装置缠绕秸秆,滑切角需满足

$$\alpha < 90^\circ - \theta_1 \tag{20}$$

式中 θ_1 ——秸秆与清秸刀齿的摩擦角, (°)

当比例系数 K 为 -0.1 时,正弦指数曲线具有最小功率消耗^[27]。金属与秸秆静摩擦角一般为 $23^\circ \sim 33^\circ$ ^[18],由式(20)可得,初始滑切角需小于 57° 以避

免秸秆缠绕。式(19)表明,初始滑切角增大时,刃口曲线曲率增大,接触面积增加,有助于提高清秸质量,但也会增大阻力。因此,初始滑切角定为 $35^\circ \sim 55^\circ$,通过试验确定具体数值。

清秸刀齿长度已经确定,为保证正弦指数曲线刃口与清秸刀齿长度相匹配,需满足

$$L - L_1 \geq \sqrt{(\rho \cos \alpha - \rho_0)^2 + (\rho \sin \alpha)^2} \tag{21}$$

其中 $\rho_0 = \frac{d}{2} + L_1$ (22)

结合式(21)、(22),可得正弦指数曲线初始极径为 137.5 mm ,极角为 $0^\circ \sim 35^\circ$ 。

通过上述分析,确定影响清秸装置性能的结构与工作参数及其范围,其中初始滑切角、转速、螺距及参数组合需通过试验确定。

2.3 清秸刀齿排布试验

为确保清秸作业有效实施,清秸装置需具备2个关键功能:①秸秆沿机具前进方向输送。②沿清秸装置轴向输送^[28]。因此,清秸刀齿采用螺旋排布方式安装于刀辊上。不同螺旋结构具有不同的力学特性和工作性能,为优化作业效果,需进一步研究并选择最佳螺旋结构类型。

根据螺距不同,螺旋可分为等距螺旋和渐开螺旋;根据传动方向,可分为单向螺旋和双向螺旋。将这些螺旋组合,得到4种清秸刀齿排布方案,如图6所示。图6a为等距单向螺旋排布,结构简单且成本低;图6b为等距双向螺旋排布,能加快轴向清理速度从而避免秸秆堆积、降低堵塞风险;图6c为渐开单向螺旋排布,其螺旋从最左侧的初始螺距(与图6a、6b保持一致)开始,沿轴向向右,螺距逐渐增加,至最右侧时达到初始螺距的1.5倍,能有效适应秸秆积累和负荷递增;图6d为渐开双向螺旋排布,兼具图6b、6c优点,但加工难度大、成本高。

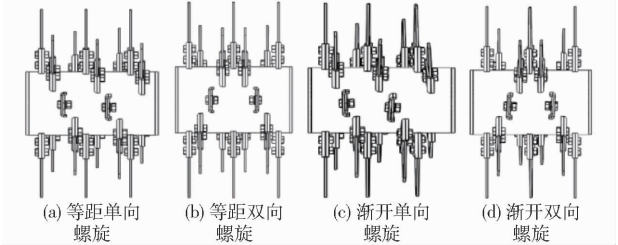


图6 清秸刀齿排布方案

Fig. 6 Arrangement of blade teeth for straw cleaning device

2.3.1 试验环境与材料

试验于2024年10月25日开始在黑龙江省齐齐哈尔市查哈阳农场实施。试验区以黑钙土为主。试验区玉米秋季机械收获后进行秸秆灭茬,垄距 650 mm 、垄高 110 mm 。试验前测量地表 $0 \sim 100\text{ mm}$ 土壤含水率为 18.9% ,土壤坚实度为 20.8 kg/cm^2 。

试验使用设备包括东方红 604 型拖拉机、主动逆旋清秸条耕机、DGG-9070 AD 型电热恒温鼓风干燥箱、SZ-3 型土壤硬度仪、TZS-1 型土壤水分测定仪、电子秤。所有清秸装置均采用初始滑切角为 50°的清秸刀齿,安装螺旋线初始螺距均为 250 mm。

2.3.2 试验方法

设定 4 个处理:等距单向螺旋(IUS)、等距双向螺旋(IBS)、渐开单向螺旋(GUS)、渐开双向螺旋(GBS),以转速 400 r/min 进行试验。每个处理在面积 50 m² 上重复 20 次,共 80 个试验小区。采用随机区组法安排试验,清秸率为评价指标。数据使用 Origin 软件处理和可视化,正态性、方差齐性和多重比较检验采用 Shapiro-Wilk、Levene 和 HSD 方法, $P < 0.05$ 为统计学显著差异。

2.3.3 性能评价指标测量

试验前,在每个小区对角线平均选取 4 个位置,测量 200 mm × 200 mm 区域内秸秆质量,测量后将秸秆铺回原位并标记。试验后,重新测量标定位置秸秆质量。清秸率为作业后条带区秸秆量与作业前秸秆量比值^[20],计算式为

$$Y_1 = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\% \tag{23}$$

式中 Y_1 ——清秸率,%
 M_2 ——测量区作业后秸秆量,kg
 M_1 ——测量区作业前秸秆量,kg

2.3.4 结果与分析

由图 7 可知,采集的试验数据均位于 Q-Q 图对角线附近,可以初步判定试验数据符合正态性。通过 Shapiro-Wilk 方法进一步检验,IUS、IBS、GUS、GBS P 均大于 0.05,可确定在 0.05 水平条件下所测量的试验数显著来自正态分布总体。

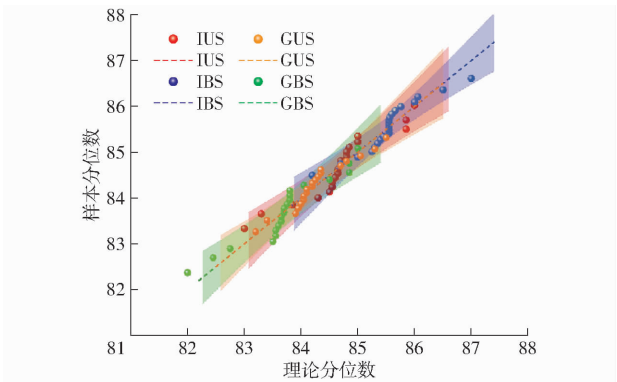


图 7 正态分布 Q-Q 图

Fig. 7 Normal distribution Q-Q diagram

对试验数据进行单因素方差分析,在 0.05 水平条件下,模型总体均值显著不同,采用 HSD 方法对各处理进行多重比较,结果如图 8 所示。图中 NS 表示不显著($P > 0.05$),* 表示显著($0.01 \leq P <$

0.05),** 表示极显著($P < 0.01$)。

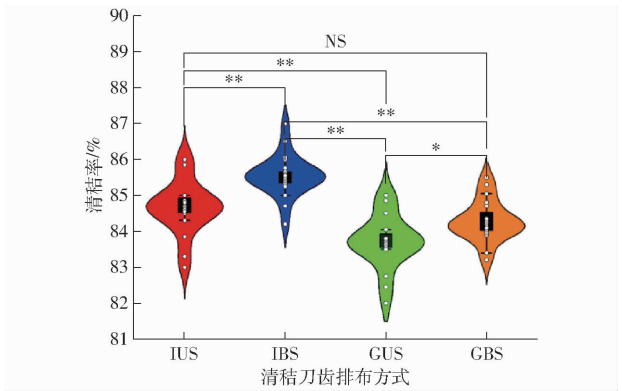


图 8 清秸率箱线与小提琴图

Fig. 8 Stubble clearing rate violin plot

对于清秸率,除等距单向螺旋与渐开双向螺旋之间外,其余 4 种不同刀齿排布两两之间均有显著性差异,并且等距螺旋优于渐开螺旋,双向螺旋优于单向螺旋,其中等距双向螺旋平均清秸率最高。同时从箱线图分布及小提琴纵向尺寸可以看出,等距双向螺旋箱线图较短、小提琴图更加扁平,说明该种清秸刀齿排布方式清秸率较稳定,因此最终清秸装置清秸刀齿采用等距双向螺旋排布方式。

等距双向螺旋清秸刀齿排布方式相较于其他排布方式具有更优作业性能的主要原因为:首先,在渐开式清秸刀齿排布结构中,随着螺距逐渐增大,清秸刀齿分布密度相应降低,导致秸秆遗漏现象加剧,从而影响清秸率。其次,双向螺旋结构能够实现秸秆同时向苗带区两侧分流,有效缩短秸秆轴向位移路径。这种设计不仅加快了秸秆向苗带间区转移速度,还增加了秸秆输送量,从而在提升清秸稳定性的同时,提高了整体清秸效率。

3 清秸装置作业参数优化仿真

为探究清秸装置关键参数对工作性能的影响规律,确定参数优化组合,采用基于 EDEM 软件的离散元数值仿真与二次回归正交旋转中心组合试验相结合方法进行仿真。

3.1 EDEM 仿真平台建立

(1) 清秸装置模型建立

采用 Solidworks 三维建模软件对清秸装置进行实体建模。在保证关键结构特征的前提下,去除对离散元仿真结果影响较小的细节特征。将优化后模型以 STEP 格式导入 EDEM 离散元仿真软件中,设置仿真模型材料参数为:材料选用 Q235 碳钢,密度为 7 850 kg/m³,泊松比为 0.30,剪切模量为 7.9 × 10¹⁰ Pa。

(2) 土槽模型建立

利用 EDEM 软件建立秸茬-土壤离散元模型。

虚拟土槽尺寸设置为 2 000 mm(长)×900 mm(宽)×100 mm(高),以匹配实际田间作业条件。田间实测表明,秸秆长度为 50 ~ 110 mm^[29]。为提高计算效率并保持秸秆物理特性,采用 8 个直径为 10 mm 的球形颗粒按球心距 10 mm 线性排列,拼接成 80 mm 的秸秆模型^[30]。材料参数设置为:泊松比 0.4,密度 180 kg/m³,剪切模量 1 × 10⁶ Pa。为平衡计算精度与效率,土壤颗粒选用直径 8 mm 的球形颗粒,材料参数设定为:密度 1 850 kg/m³,泊松比 0.38,剪切模量 1 × 10⁶ Pa^[31]。颗粒生成后,在重力作用下自由沉降至土槽底部,随后施加垂直载荷以校准土壤密实度,使其与实际田间土壤容重一致,确保仿真结果可靠性。仿真材料接触参数如表 1 所示^[32],秸秆-土壤-清秸装置仿真系统模型如图 9 所示。

表 1 接触参数
Tab.1 Contact parameters

参数	Q235	秸秆	土壤
滚动摩擦因数(与秸秆)	0.05	0.01	0.05
静摩擦因数(与秸秆)	0.37	0.30	0.30
碰撞恢复系数(与秸秆)	0.58	0.30	0.50
滚动摩擦因数(与土壤)	0.11	0.05	0.25
静摩擦因数(与土壤)	0.65	0.30	0.40
碰撞恢复系数(与土壤)	0.60	0.50	0.20

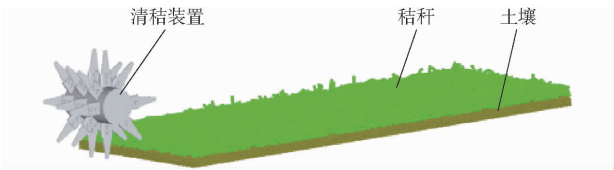


图 9 秸秆-土壤-清秸装置仿真系统模型
Fig. 9 Straw - soil - clearing straw device system model

3.2 仿真试验方案

为探究清秸装置参数优化组合,以初始滑切角、清秸装置转速、螺距为试验因素,以清秸率和当量功耗为评价指标,进行三因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验。根据理论分析确定试验因素为:清秸装置转速 300 ~ 500 r/min、螺距 150 ~ 270 mm、初始滑切角 35° ~ 55°。试验因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码
Tab.2 Experimental factors and coding

编码	因素		
	初始滑切角	清秸装置转速	螺距
	$X_1/(^{\circ})$	$X_2/(r \cdot \min^{-1})$	X_3/mm
-2	35	300	150
-1	40	350	180
0	45	400	210
1	50	450	240
2	55	500	270

3.3 性能评价指标

选取 2 000 mm × 300 mm × 300 mm 网格,使用 Export Results Data 功能输出作业前后的秸秆数量,仿真作业过程如图 10 所示。

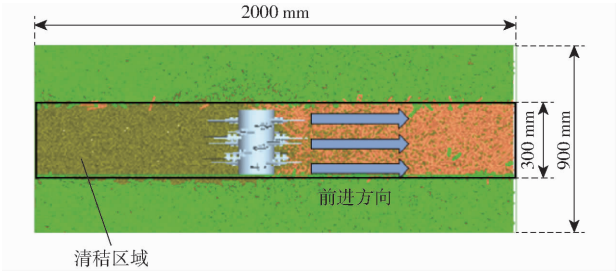


图 10 仿真作业过程
Fig.10 Simulation working process

通过 EDEM 中 Analyst 模块可获得清秸装置实时转矩,稳定作业阶段计算转矩平均值,根据转矩、转速与功率的关系进行求解,当量功耗可表示为

$$Y_3 = \frac{Tn}{9\,550}$$
 (24)

式中 Y_3 ——当量功耗,W
 T ——平均转矩,N·m

3.4 结果与分析

试验方案与结果如表 3 所示。共实施 22 组试验,每组试验重复 3 次取平均值,采用 Design-Expert 对试验结果进行数据处理。

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行方差分析,如表 4 所示。刀刃线初始滑切角、螺距和

表 3 试验方案与结果

Tab.3 Test program and results

序号	因素			清秸率 $Y_1/\%$	当量功耗 Y_2/W
	$X_1/(^{\circ})$	$X_2/(r \cdot \min^{-1})$	X_3/mm		
1	40	350	180	87.50	546
2	50	350	180	87.99	680
3	40	450	180	89.70	930
4	50	450	180	89.72	1 073
5	40	350	240	87.23	582
6	50	350	240	88.52	666
7	40	450	240	88.38	865
8	50	450	240	89.04	1 055
9	35	400	210	88.85	582
10	55	400	210	89.31	921
11	45	300	210	86.96	340
12	45	500	210	90.00	1 163
13	45	400	150	87.50	481
14	45	400	270	86.60	835
15	45	400	210	88.31	655
16	45	400	210	88.50	807
17	45	400	210	88.37	765
18	45	400	210	88.71	744
19	45	400	210	88.36	735
20	45	400	210	88.42	791
21	45	400	210	88.06	721
22	45	400	210	88.33	624

表 4 方差分析结果
Tab.4 Analysis of variance

指标	来源	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
清秸率	模型	15.44	9	31.66	<0.000 1 **
	<i>X</i> ₁	0.714 0	1	13.17	0.003 1 **
	<i>X</i> ₂	8.53	1	157.31	<0.000 1 **
	<i>X</i> ₃	0.783 2	1	14.45	0.002 2 **
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	0.151 2	1	2.79	0.118 7
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	0.259 2	1	4.78	0.047 6 *
	<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	0.638 4	1	11.78	0.004 5 **
	<i>X</i> ₁ ²	1.15	1	21.23	0.000 5 **
	<i>X</i> ₂ ²	0.077 0	1	1.42	0.254 5
	<i>X</i> ₃ ²	2.62	1	48.29	<0.000 1 **
	残差	0.704 5	13		
	失拟	0.469 4	5	3.19	0.070 4
当量功耗	模型	7.193 <i>E</i> × 10 ⁵	9	10.89	0.000 1 **
	<i>X</i> ₁	94 402.56	1	12.59	0.003 6 **
	<i>X</i> ₂	5.987 × 10 ⁵	1	79.85	<0.000 1 **
	<i>X</i> ₃	26 163.06	1	3.49	0.049 8 *
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	1 653.13	1	0.220 5	0.646 4
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	1.12	1	0.000 2	0.990 4
	<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	1 378.12	1	0.183 8	0.675 1
	<i>X</i> ₁ ²	3 959.83	1	0.528 1	0.480 3
	<i>X</i> ₂ ²	3 959.83	1	0.528 1	0.480 3
	<i>X</i> ₃ ²	3 721.03	1	0.496 3	0.493 6
	残差	97 468.8	13		
	失拟	66 668.58	5	3.46	0.058 2
	误差	30 800.22	8		
	总和	8.325 × 10 ⁵	22		

注: * 表示差异显著 (0.01 ≤ *P* < 0.05), ** 表示差异极显著 (*P* < 0.01)。

清秸装置转速对清秸率均具有极显著影响,影响由大到小为清秸装置转速、螺旋线螺距和刀刃线初始滑切角,刀刃线初始滑切角和螺距之间的交互作用对清秸率有显著影响,清秸装置转速和螺旋线螺距之间的交互作用对清秸率有极显著影响。刀刃线初始滑切角和清秸装置转速对当量功耗具有极显著影响,螺距对当量功耗具有显著影响,影响由大到小为清秸装置转速、刀刃线初始滑切角和螺距,各因素之

间交互作用对当量功耗无显著影响。

3.5 各因素对性能评价指标影响

刀刃线初始滑切角和螺距对清秸率的影响如图 11a 所示。当螺距不变时,清秸率随初始滑切角增大而增加,因为刀刃线长度增加,接触面积增大,清秸率提高。初始滑切角固定时,清秸率随螺距增大呈先增后降趋势,螺距过小时,轴向输送能力增强,效率提高;当螺距过大,刀齿数量减少,轴向间距增大,秸秆遗漏增多,清秸率下降。清秸装置转速和螺距对清秸率的影响如图 11b 所示。当螺距固定时,清秸率随转速增大而提高,转速增加使清秸次数增多,减少秸秆遗漏,提高清秸效率。

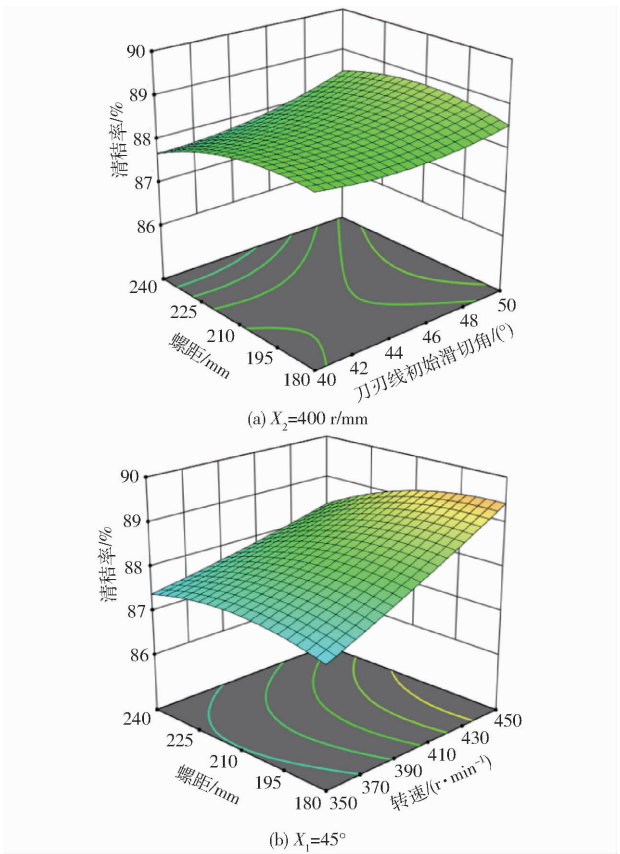


图 11 各因素对清秸率的影响
Fig. 11 Influence of factors on straw clearing rate

刀刃线初始滑切角、清秸装置转速和螺距对当量功耗的影响如图 12 所示。在其他条件相同的情

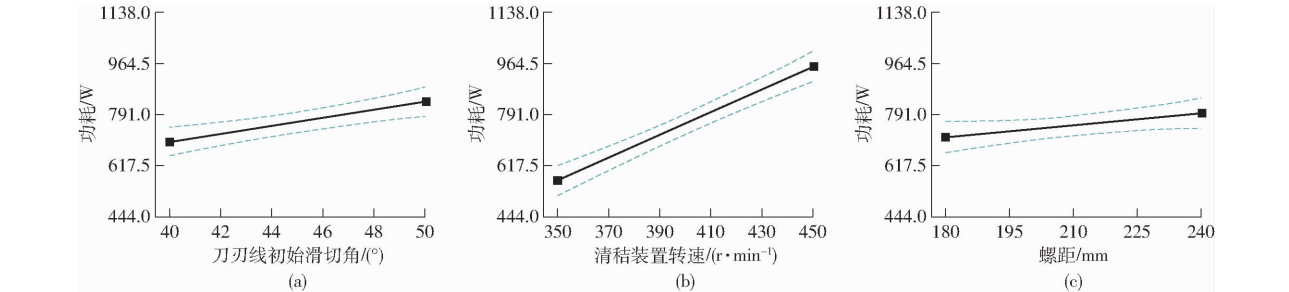


图 12 各因素对功耗的影响
Fig. 12 Influence of factors on power consumption

况下,当量功耗与刀刃线初始滑切角、清秸装置转速和螺距成正比。随着初始滑切角增大,刀刃线长度增加,接触面积增大,刀齿所受阻力增大,导致当量功耗增加。转速提高时,单位时间内清秸装置消耗能量增加,当量功耗上升。螺距增大时,轴向输送量增加,清秸装置对秸秆的做功增多,当量功耗也随之增加。

3.6 参数组合优化

根据实际作业条件和工作要求,确定目标函数和约束条件,目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t. } \begin{cases} 35^\circ \leq X_1 \leq 55^\circ \\ 300 \text{ r/min} \leq X_2 \leq 500 \text{ r/min} \\ 150 \text{ mm} \leq X_3 \leq 270 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (25)$$

利用 Design-Expert 8.0.6 软件中 Optimization 模块对目标函数进行求解。优化结果如图 13 所示,当刀刃线初始滑切角为 45°~55°、螺距为 185~220 mm、清秸装置转速为 370 r/min 时,当量功耗小于 750 W,清秸率大于 88%。

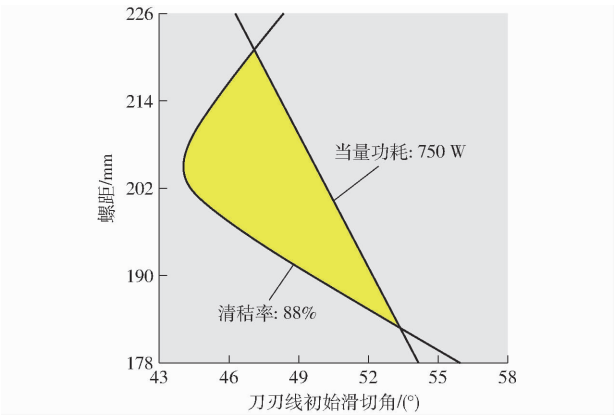


图 13 优化结果

Fig. 13 Optimization results

4 田间试验

4.1 试验条件与仪器设备

根据优化参数完成样机试制与调试后,开展田间验证试验,如图 14 所示。试验于 2024 年 10 月 30 日在黑龙江省齐齐哈尔市查哈阳农场实施,试验区以黑钙土为主,秋季进行秸秆灭茬,垄距 650 mm、垄高 110 mm。试验前测量地表 0~100 mm 土壤含水率为 17.7%,土壤坚实度为 25.4 kg/cm²。主要设备包括东方红 604 型拖拉机、主动逆旋清秸条耕机、电热恒温干燥箱、土壤硬度仪、水分测定仪、传感器、数据采集装置、取样框和电子秤。

4.2 性能评价指标

(1) 清秸率

试验前,在测试长度 20 m 内平均选取 4 个位



图 14 试验仪器设备与作业效果

Fig. 14 Experimental equipment and operational effectiveness

置,测量 200 mm×200 mm 区域内秸秆质量,测量结束后将秸秆铺放回原位并做好标记,试验后,对标定位置秸秆质量再次测量,计算清秸率,取 4 组数据平均值为最终试验结果。

(2) 当量功耗

通过固定于拖拉机与试验装置之间的拉力传感器测量牵引方向拉力,拖拉机与传动轴之间的转矩传感器测量清秸转矩,并通过实时数据采集装置进行数据采集和储存。当量功耗计算式为

$$Y_2 = \frac{T_2 \omega + F_2 v}{12} \quad (26)$$

式中 T_2 ——测量转矩,N·m
 F_2 ——测量拉力,N

4.3 验证试验

为验证仿真试验参数优化组合结果正确性,加工刀刃线初始滑切角为 50°的清秸刀齿,以螺距 190、200、210 mm 安装,并在清秸装置转速 370 r/min 下进行试验,结果如表 5 所示。由表 5 可知,清秸率和当量功耗随螺距增大而增加,但螺距差异不超过 10 mm 时无显著性差异。清秸率不小于 85.2%,当量功耗不大于 750 W。由于仿真模型较为理想化,难以完全模拟田间复杂土壤-秸秆-机具关系,且自然风等因素可能导致回流,影响清秸率测量,故田间

表 5 试验结果
Tab.5 Test results

螺距/mm	清秸率/%	当量功耗/W
190	85.2 ^b	687 ^b
200	86.3 ^{ab}	723 ^{ab}
210	87.6 ^a	750 ^a

注:相同评价指标不同小写字母表示置信度为 0.05 条件下差异显著。

试验清秸率略低于仿真结果,但功耗基本相同。总体而言,实测值与仿真结果误差在合理范围内。

5 结论

(1)提出了一种适用于重度秸秆地表覆盖条件的具有独立仿形功能的主动式条带耕整地单体。通过理论分析与随机区组试验确定了清秸装置主要结构与工作参数及其取值范围。

(2)仿真试验结果表明,当刃口初始滑切角为45°~55°、螺距为185~220 mm、刀辊转速为370 r/min时,清秸率大于88%、当量功耗小于750 W。根据参数优化结果完成样机试制,并进行了田间验证试验,结果表明,当螺距为190、200、210 mm,刃口初始滑切角为50°,刀辊转速370 r/min时,清秸率不小于85.2%,当量功耗不大于750 W,田间验证试验与仿真结果相对误差在允许范围内。

参 考 文 献

[1] REZA A K, MAJID D. Sustainability assessment of corn production in conventional and conservation tillage systems[J]. Journal of Cleaner Production,2022,351:131508.

[2] 秦猛,董全中,薛红,等.我国保护性耕作的研究进展[J].河南农业科学,2023,52(7):1-11.
QIN Meng, DONG Quanzhong, XUE Hong, et al. Research progress of conservation tillage in China[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2023,52(7):1-11. (in Chinese)

[3] SHA Y, HUANG Y, HAO Z, et al. Maize yield in a strip-till system can be increased by increasing nitrogen accumulation, plant growth, and ear development around silking stage in Northeast China[J]. The Crop Journal,2025,13(1):257-268.

[4] 施印炎,罗伟文,胡志超,等.全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(4):58-67.
SHI Yinyan, LUO Weiwen, HU Zhichao, et al. Design and test of equipment for straw crushing with strip-laying and seed-belt classification with cleaning under full straw mulching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):58-67. (in Chinese)

[5] MA Y, LI Z, XU Y, et al. The development of no-tillage seeding technology for conservation tillage—a review [J]. Sustainability,2025,17(5):1808.

[6] WANG Q, WANG B, SUN M, et al. Design and testing of an automatic strip-till machine for conservation tillage of corn[J]. Agronomy,2023,13(9):2357.

[7] 陈海涛,侯磊,侯守印,等.大垄玉米原茬地免耕播种机防堵装置设计与优化试验[J].农业机械学报,2018,49(8):59-67.
CHEN Haitao, HOU Lei, HOU Shouyin, et al. Design and optimization experiment of anti-blocking mechanism of no-tillage planter for grand ridge with raw corn stubble[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(8):59-67. (in Chinese)

[8] 张银平,郝泽华,徐婷,等.玉米免耕播种机动力补偿自适应清秸装置设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(1):174-185.
ZHANG Yinping, HAO Zehua, XU Ting, et al. Design and experiment of dynamic compensation adaptive straw removal device for corn no-till seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(1):174-185. (in Chinese)

[9] SIEMENS M C, WILKINS D E, CORREA R F. Development and evaluation of a residue management wheel for hoe-type no-till drills[J]. Transactions of the ASABE,2004,47(2):397-404.

[10] SARAUSKIS E, VAITAUSKIENE K, ROMANECKAS K, et al. Research in strip tillage machine row cleaner technology process[J]. Engineering for Rural Development, 2015,5:20-22.

[11] 侯守印,邹震,魏志鹏,等.玉米碎秸多级横向运移整流装置设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(3):45-56.
HOU Shouyin, ZOU Zhen, WEI Zhipeng, et al. Design and experiment of rectifier for multi-stage lateral movement of corn straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(3):45-56. (in Chinese)

[12] 张仕林,黄玉祥,赵宏波,等.切抛组合式小麦宽幅沟播茬清秸防堵装置设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(5):40-52.
ZHANG Shilin, HUANG Yuxiang, ZHAO Hongbo, et al. Design and experiment of cutting and throwing combined anti-blocking device for wide-seedbed seeding of wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(5):40-52. (in Chinese)

[13] 赵宏波,何进,郑智旗,等.少免耕播种机条带型行间侧抛清秸防堵装置研究[J].农业机械学报,2020,51(12):24-34.
ZHAO Hongbo, HE Jin, ZHENG Zhiqi, et al. Strip tillage inter-row residue side-throwing device of no/minimum-till seeder for anti-blocking and seedbed-cleaning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(12):24-34. (in Chinese)

[14] 张学军,康梦晨,史增录,等.双滚筒式收后地表残膜回收机设计与试验[J].农业工程学报,2024,40(14):1-13.
ZHANG Xuejun, KANG Mengchen, SHI Zenglu, et al. Design and experiments of a double drum surface residual film recycling machine after harvest[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(14):1-13. (in Chinese)

[15] 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)

[16] 侯守印,纪张弛,薛东辉,等.适配免耕播种单体的清秸装置改进设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(7):111-122.

- HOU Shouyin, JI Zhangchi, XUE Donghui, et al. Improved design and test of straw cleaning device suitable for no-tillage seeding unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 111–122. (in Chinese)
- [17] 高振, 卢彩云, 位旭阳, 等. 协拨组合式玉米条带秸秆清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 68–79.
- GAO Zhen, LU Caiyun, WEI Xuyang, et al. Design and experiment of co-stirring combined corn strip straw cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 68–79. (in Chinese)
- [18] 张青松, 齐涛, 敖倩, 等. 油菜机械直播机开沟浅旋装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 58–67, 104.
- ZHANG Qingsong, QI Tao, AO Qian, et al. Design and experiment of rapeseed direct seeding machine with furrow opener and shallow plowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 58–67, 104. (in Chinese)
- [19] 张佳, 谢建华, 杜亚坤, 等. 滚刀-轴流滚筒组合式膜杂混合物切碎分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(6): 409–421, 456.
- ZHANG Jia, XIE Jianhua, DU Yakun, et al. Design and experiment of rotary knife – axial flow drum combined[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 409–421, 456. (in Chinese)
- [20] HOU S, XUE D, JI Z, et al. Parameter combination optimization of the lateral straw clearing and throwing knife based on discrete element simulation[J]. Agronomy, 2023, 13(4): 1059.
- [21] WANG L, WAN Y, ZHANG Z, et al. Performance evaluation of a maize stalk chopping device based on field tests[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2019, 35(6): 997–1008.
- [22] 陈海涛, 张昭, 王星, 等. 大豆垄三栽培配套播种机种床整理装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 54–63.
- CHEN Haitao, ZHANG Zhao, WANG Xing, et al. Design and experiment of seedbed perfect device for “three-soybean” cultivation mode matching seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 54–63. (in Chinese)
- [23] GENG G, CHEN T, XIAO M, et al. The design and testing of a new antitangling and antisticking knife for a wet clay soil environment[J]. Agriculture, 2025, 15(10): 1102.
- [24] ZHANG S, HUANG Y, GAO X, et al. Evaluating the influence of straight-plain types of rotary tiller blades with various edge curves on maize residue using DEM[J]. Biosystems Engineering, 2025, 250: 49–61.
- [25] 廖庆喜, 谢昊明, 张青松, 等. 驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 99–110, 195.
- LIAO Qingxi, XIE Haoming, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of driven disc plow and double-edged rotary tillage combined tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 99–11, 195. (in Chinese)
- [26] 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.
- [27] 梁方, 王德成, 尤泳, 等. 草地切根施肥补播复式改良机设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(1): 231–241.
- LIANG Fang, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Design and experiment of root-cutter with fertilization and reseeded compound remediation machine for grassland[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(1): 231–241. (in Chinese)
- [28] DUN G, CHEN H, LI A, et al. Effect of rotation direction of knife teeth configuration on clearing straw unit performance for no-tillage and straw mulching precision seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 48–56.
- [29] SHOUYIN H, SHENGZHE W, ZHANGCHI J, et al. Design and test of the clearing and covering of a minimum-tillage planter for corn stubble[J]. Agriculture, 2022, 12(8): 1209.
- [30] WU P, ZHANG X, CHEN Y. Simulation of the micro-dynamics in soil-cornstalk-disc interactions using the discrete element method[J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 11: 100984.
- [31] 赵鹏飞, 巨晓腾, 杨鹏琨, 等. 肥管前置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 12–21.
- ZHAO Pengfei, JU Xiaoteng, YANG Pengkun, et al. Design and experiment of fertilizer pipe front-mounted wheat wide seedlingbelt rotary tillage fertilization plante[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(20): 12–21. (in Chinese)
- [32] LIN J, LIAO Q, WANG X, et al. Exploring straw movement through the simulation of shovel-type seedbed preparation machine-straw-soil interaction using the DEM – MBD coupling method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 226: 109465.