doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.22.018

玉米条带少耕仿生清秸装置设计与试验

衣淑娟[1]　邹风旭[1]　李衣菲[1]　王　淞[1]　周　涛[1]　韩成全[2]　邢舍雷[3]

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 黑龙江北大荒现代农业服务集团众荣农机有限公司, 哈尔滨 150400;
3. 大庆油田昆仑集团绿色生态产业公司, 大庆 163453)

摘要: 针对东北黑土区春季玉米秸秆覆盖条件下,条带少耕作业中传统清秸圆盘清秸率偏低、秸秆横向抛掷能力不足等问题,以东北大黑鳃金龟后足跗节主爪为仿生原型,设计了一种玉米条带少耕仿生清秸装置。提取主爪轮廓曲线,建立仿生盘齿模型,并开展清秸圆盘参数设计与空间运动学分析。构建"仿生清秸圆盘-秸秆-土壤"离散元互作模型,以机具作业速度、前倾角和侧倾角为试验因素,以清秸率和秸秆横向最大抛掷距离为评价指标,开展单因素试验和三因素五水平二次回归正交旋转组合试验。结果表明,最优参数组合为机具作业速度 7.13 km/h、前倾角 27.73°、侧倾角 14.05°,此时仿真预测清秸率为 90.16%,秸秆横向最大抛掷距离为 30.00 cm。对仿生清秸圆盘与普通缺口式清秸圆盘进行离散元仿真分析,结果表明,仿生清秸圆盘作用下秸秆高速度区域分布更连续,横向运动趋势更明显。台架试验结果表明,在取整后最优参数组合下,装置实测清秸率为 89.38%,秸秆横向最大抛掷距离为 27.52 cm;当秸秆覆盖量不高于 1.5 kg/m^2 时,装置仍能满足清秸作业要求。田间试验结果表明,在作业速度 6~8 km/h 区间内,仿生清秸圆盘清秸率均不低于 84.74%,较普通缺口式清秸圆盘最高提高 5.99 个百分点,相对提升 7.61%;秸秆横向最大抛掷距离最高增加 3.95 cm。研究结果表明,该装置能够改善东北黑土区春季玉米秸秆覆盖条件下的清秸效果和秸秆横向抛掷性能。

关键词: 条带少耕; 清秸装置; 仿生清秸圆盘; 东北大黑鳃金龟; 离散元仿真

中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)22-0211-14　　**OSID**:

Design and Experiment of Bionic Straw-cleaning Device for Maize Strip Reduced Tillage

Yi Shujuan[1]　Zou Fengxu[1]　Li Yifei[1]　Wang Song[1]　Zhou Tao[1]　Han Chengquan[2]　Xing Hanlei[3]

(1. *College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing* 163319, *China*
2. *Zhongrong Agricultural Machinery Co., Ltd., Heilongjiang Beidahuang Modern Agricultural Service Group, Harbin* 150400, *China*
3. *Green Ecological Industry Company of Daqing Oilfield Kunlun Group Co., Ltd., Daqing* 163453, *China*)

Abstract: Aiming to address the low straw-cleaning rate and insufficient transverse straw-throwing capacity of conventional straw-cleaning discs under spring maize straw coverage in the black soil region of Northeast China, a bionic straw-cleaning device for maize strip reduced tillage was designed by using the hind tarsal main claw of *Holotrichia diomphalia* Bates as the bionic prototype. The claw contour was extracted to establish a bionic disc tooth model, followed by parameter design and spatial kinematic analysis. A discrete element model of interactions among the bionic straw-cleaning disc, straw and soil was developed. Operating speed, forward inclination angle and lateral inclination angle were selected as experimental factors, with straw-cleaning rate and maximum transverse straw-throwing distance as evaluation indices. Single-factor tests and a three-factor five-level quadratic regression orthogonal rotational combination test were conducted. The optimal operating speed, forward inclination angle and lateral inclination angle were 7.13 km/h, 27.73° and 14.05°, respectively. The predicted straw-cleaning rate and maximum transverse straw-throwing distance were 90.16% and 30.00 cm, respectively. Comparative simulations showed that the bionic disc produced more continuous high-velocity

收稿日期: 2026-05-09　修回日期: 2026-05-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1501000)、黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目(YJSCX2025-XCZX16)和中国科学技术协会青年人才培育工程博士生专项计划项目(156-O-416-0000259-2)

作者简介: 衣淑娟(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: yishujuan_2005@126.com

regions of straw particles and more pronounced transverse movement than the conventional notched straw-cleaning disc. Bench tests using the rounded optimal parameters produced a straw-cleaning rate of 89.38% and a maximum transverse straw-throwing distance of 27.52 cm. The device met straw-cleaning requirements when straw coverage did not exceed 1.5 kg/m^2. Field tests showed that the straw-cleaning rate remained at or above 84.74% at operating speeds of 6 ~ 8 km/h. Compared with the conventional notched straw-cleaning disc, the maximum increase in straw-cleaning rate was 5.99 percentage points, corresponding to a relative increase of 7.61%, while the maximum increase in transverse straw-throwing distance was 3.95 cm. The device improved straw-cleaning performance and transverse straw-throwing capacity under spring maize straw coverage conditions in Northeast China.

Key words: strip reduced tillage; straw-cleaning device; bionic straw-cleaning disc; *Holotrichia diomphalia*; discrete element simulation

0 引言

条带少耕作为保护性耕作的一种主要技术模式[1-2],通过秸秆集行形成的清秸带与秸秆带两者相间的地表环境,可减少作业时土壤扰动、提升地温、降低成本[3-4]。东北黑土区玉米种植面积大,秸秆全量覆盖还田后,次年春季田间作业时易受地表剩余秸秆干扰,难以形成符合农艺要求的洁净播种带,导致作业质量下降。清秸装置的作业性能直接决定清秸带的形成质量与机具通过性。因此,设计一种高效可靠的清秸装置,是实现高质量条带耕作、保障后续作业效果的关键。

目前,适用于东北黑土区的清秸装置按动力来源可分为主动式与被动式2类[5]。主动式清秸装置清秸能力较强,但需配置相应传动机构,结构较复杂,动力消耗和维护成本较高。被动式清秸装置依赖牵引作业时与地表秸秆产生相互作用力,具有结构简单、土壤扰动小、功耗低的优势,更符合保护性耕作要求。针对被动式清秸装置的优化,国内外学者们开展了相关研究。袁盼盼等[6]提出了一种滴灌区宽窄行玉米免耕播种带秸秆残茬分区清理装置,利用纵向错位布置拨草机构对播种带秸秆进行清理,提升播种带清秸率与机具通过性。王奇等[7]设计了一种星齿凹面盘式清秸防堵装置,将星齿结构与凹面盘结合,增强了对秸秆的抓取和横向抛掷能力。侯守印等[8]设计了一种适配免耕播种单体的清秸装置,采用具备秸秆轴向加速推送功能的清秸轮与助推螺旋结构,通过轴向推送完成种带秸秆清理。Torbert 等[9]设计了一种前置式秸秆防堵装置,采用2根聚乙烯软管在拨草轮齿作业前预先推移秸秆,以降低后续工作部件的直接负荷,实现分步清理。综上所述,研究人员虽对清秸装置进行了局部参数优化,但在应对东北黑土区秸秆量大、秸秆粗壮等作业条件时,传统清秸装置仍存在清秸率偏低、秸秆横向抛掷能力不足等问题。因此,亟须对其进行针对性改进。

近年来,仿生学已在农业工程领域得到了广泛应用,为清秸装置作业效果的提升提供了技术参考。李名伟等[10]设计了一种仿生鼹鼠前肢自适应清秸装置,通过模仿鼹鼠前肢的运动形态与爪趾结构进行仿生机构设计,解决了传统机构在厚秸秆层中投掷力不足、作业不稳定的问题。Wang 等[11]受鼹鼠挖掘运动启发,提出了一种由弯曲齿与侧向抛送扭簧组成的仿生弹性清秸装置,通过 MBD - DEM 耦合仿真技术优化了清秸作业参数,提高清秸率并降低工作阻力。综合分析,现有清秸装置无法满足东北黑土区全量秸秆覆盖下量大、粗壮秸秆的清理需求,缺乏针对性强的清秸圆盘仿生优化方案。

为提升条带少耕清秸装置在东北黑土区玉米秸秆覆盖条件下作业性能,本文结合东北大黑鳃金龟后足跗节主爪的爪形轮廓曲线结构特征进行清秸圆盘齿形仿生设计。通过理论分析、离散元仿真与田间试验,评价清秸装置作业性能及其适用性,以期提高清秸率和秸秆横向抛掷性能。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

2BMF - 4C 型玉米条带少耕施肥机采用对称式4单体布局,通过三点悬挂系统与拖拉机连接。每个作业单体均包含切茬装置、清秸装置、深松铲、圆盘耙、施肥装置及镇压轮等核心部件。其中清秸装置是实现高效清秸的关键部分,主要由连接架、仿形弹簧组件、安装架和仿生清秸圆盘等构成。仿形弹簧组件内含弹簧与下端开放的连接管,使清秸圆盘能随地形起伏保持稳定贴地与压力。入土深度可通过连接架与主机机架的不同安装孔位调节。整机及清秸装置结构如图1所示。

1.2 工作原理

拖拉机牵引机具作业时,切茬装置先切断残茬破开表土,随后清秸装置向两侧拨除秸秆,清理出清

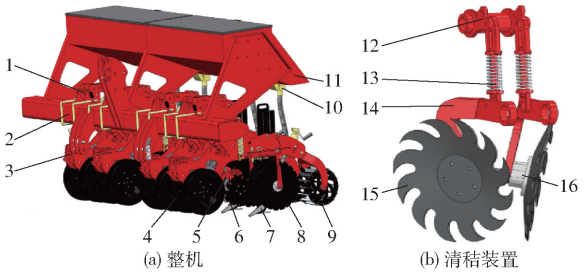


图 1　2BMF－4C 型玉米条带少耕施肥机及清秸装置结构

Fig. 1　Structure diagrams of 2BMF－4C maize strip-tillage fertilizer applicator and straw-cleaning device

1. 四连杆连接架　2. 三点悬挂　3. 机架　4. 限深轮　5. 切茬装置　6. 清秸装置　7. 深松铲　8. 圆盘耙　9. 镇压轮　10. 施肥装置　11. 肥箱　12. 连接架　13. 仿形弹簧　14. 安装架　15. 仿生清秸圆盘　16. 圆盘底座

秸带，深松铲打破犁底层开沟，施肥装置精准深施肥料，圆盘耙碎土聚拢覆肥，最后由镇压轮将土壤压实。清秸装置安装在切茬装置后方，随拖拉机前进方向移动。作业时，仿生清秸圆盘在牵引力与摩擦力形成的转矩作用下被动旋转，盘齿交错布置，秸秆在盘齿作用下沿圆盘面向后导送，以斜抛轨迹向两侧抛出，落于清理区域之外，形成两侧秸秆堆积带与中间洁净清秸带。清秸装置工作原理如图 2 所示，红色框线内为清秸带。机具以前进速度 v_0 持续工作，实现秸秆有效分离与抛撒。

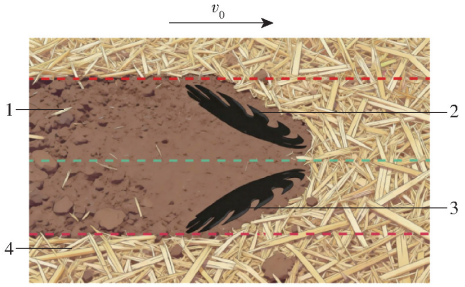


图 2　清秸作业过程示意图

Fig. 2　Schematic of straw-cleaning operation process

1. 清秸带残留秸秆　2. 左清秸圆盘　3. 右清秸圆盘　4. 秸秆带秸秆

2　仿生清秸装置设计

2.1　仿生轮廓曲线提取与齿形仿生设计

清秸装置中盘齿是影响秸秆清理与横向抛掷效果的关键结构。作业时，盘齿随圆盘被动旋转，并与地表秸秆及浅层土壤发生相互作用，齿形结构直接影响秸秆的接触、抓取、拨送、脱附和横向抛掷过程，进而影响清秸率与秸秆横向最大抛掷距离。东北大黑鳃金龟属昆虫纲、鞘翅目、鳃金龟科，整体形态及后足跗节主爪局部结构如图 3 所示。东北大黑鳃金龟常活动于秸秆与土壤交错环境中，后足跗节主爪在钻行过程可对周围秸秆与土壤形成抓附、牵引和拨移作用，并通过弧形爪体减少秸秆附着，促进脱附。其中，主爪弧形轮廓有利于在接触过程形成连续牵引作用，使被作用物沿爪体外缘逐步滑移，爪体外缘的曲率变化有利于降低秸秆缠挂和滞留，促进秸秆脱离接触表面，根部较宽的支撑形态可增强作业过程受力稳定性。该作用过程与清秸装置对秸秆的抓取、拨送、脱附和横向抛掷过程具有一定相似性。将东北大黑鳃金龟成虫后足跗节主爪（简称金龟主爪）轮廓特征引入盘齿设计，可为仿生清秸装置齿形优化提供设计依据。

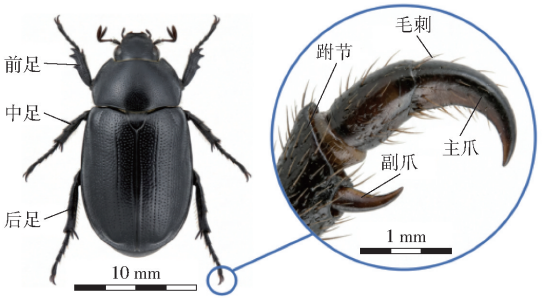


图 3　东北大黑鳃金龟后足跗节主爪结构

Fig. 3　Morphology of main claws on hind tarsus of *Holotrichia diomphalia*

为准确获取金龟主爪几何轮廓特征，采用高分辨率工业相机及电子显微镜采集主爪侧面图像，并将图像导入计算机进行处理。图像采集、预处理及轮廓提取流程如图 4 所示。通过 Matlab 软件对原始图像依次完成灰度化、高斯滤波降噪与 Otsu 全局阈值分割，运用数学形态学开运算去除表面毛刺干扰，通过 Moore 邻域边界跟踪算法提取主爪外侧边界轮廓的离散坐标点阵。

通过 Matlab 软件提取金龟主爪的轮廓曲线，根据相对位置坐标点，基于分段多项式曲线拟合原理进行数学分析，获得各段轮廓曲线拟合方程。所提取的轮廓曲线如图 5 所示。

以决定系数 R^2 评价各曲线段拟合方程的拟合效果，轮廓曲线拟合方程如表 1 所示。由表 1 可知，决定系数 R^2 均不小于 0.98，拟合精度较高。将曲线拟合方程导入 Solidworks 三维设计软件，利用软件内“方程式驱动曲线工具”生成封闭草图并完成仿生清秸装置盘齿的三维绘制，三维建模结果如图 6 所示。

2.2　仿生清秸圆盘参数设计

设计的仿生清秸圆盘应用于玉米条带少耕施肥机，在春季播种前作业，此时地表玉米秸秆厚度一般为 30～40 mm[5]。清秸圆盘作业深度需到达秸秆残留层以下，总深度 H 为圆盘从地表至作业最深点的垂直距离，由秸秆层厚度与入土深度组成。如图 7 所示。

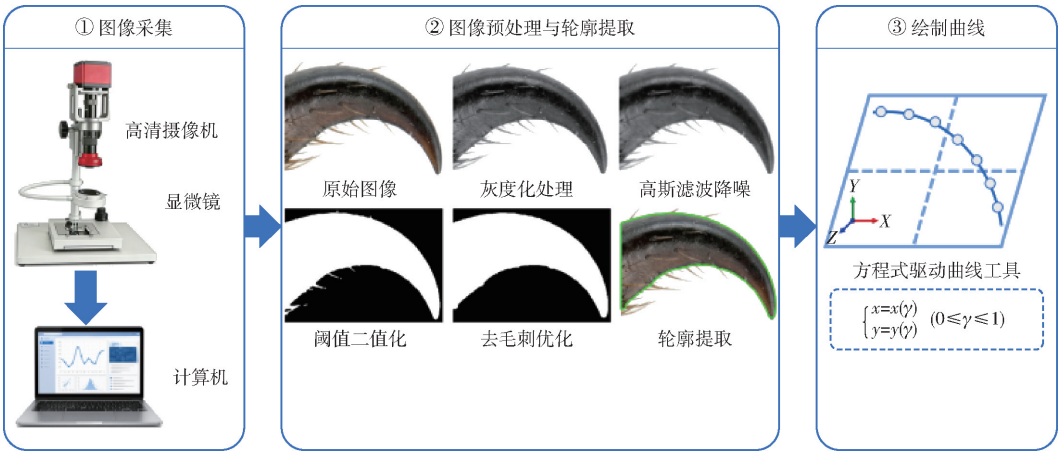


图 4 东北大黑鳃金龟后足跗节主爪图像采集与轮廓提取流程

Fig. 4 Image acquisition and contour extraction workflow of main claw on hind tarsus of *Holotrichia diomphalia*

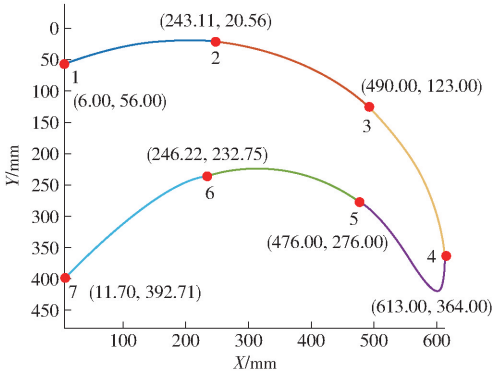


图 5 轮廓曲线拟合示意图

Fig. 5 Schematic of profile curve fitting

表 1 轮廓曲线拟合方程

Tab. 1 Fitted equations of contour curves

曲段	曲线拟合方程	R^2
1 ~ 2	$x(\gamma)=4.18\times10^{-16}\gamma^3-1.11\times10^{-15}\gamma^2+2.37\times10^2\gamma+6.00$ $y(\gamma)=4.79\gamma^3+48.40\gamma^2-88.63\gamma+56.00$	0.99
2 ~ 3	$x(\gamma)=4.18\times10^{-16}\gamma^3-1.11\times10^{-15}\gamma^2+2.47\times10^2\gamma+243.11$ $y(\gamma)=23.90\gamma^3+51.30\gamma^2+27.24\gamma+20.56$	0.99
3 ~ 4	$x(\gamma)=22.90\gamma^3-1.46\times10^2\gamma^2+2.46\times10^2\gamma+490.00$ $y(\gamma)=-6.25\gamma^3+11.80\gamma^2+2.35\times10^2\gamma+123.00$	0.99
4 ~ 5	$x(\gamma)=52.60\gamma^3-1.92\times10^2\gamma^2+2.40\gamma+613.00$ $y(\gamma)=5.14\times10^2\gamma^3-1.06\times10^3\gamma^2+4.58\times10^2\gamma+364.00$	0.98
5 ~ 6	$x(\gamma)=-4.18\times10^{-16}\gamma^3+1.11\times10^{-15}\gamma^2-2.30\times10^2\gamma+476.00$ $y(\gamma)=-16.80\gamma^3+1.43\times10^2\gamma^2-1.69\times10^2\gamma+276.00$	0.99
6 ~ 7	$x(\gamma)=34.00\gamma^3-25.90\gamma^2-2.43\times10^2\gamma+246.22$ $y(\gamma)=-1.19\times10^2\gamma^3+2.47\times10^2\gamma^2+31.96\gamma+232.75$	0.99

注:参数 γ 取[0,1]。

盘齿作业轨迹始于接触点 M,终于分离点 A。为保证有效清理秸秆、避免堵塞,设定 H 为 65 mm。

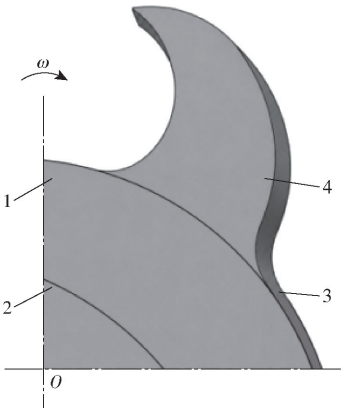


图 6 仿生清秸装置盘齿三维图

Fig. 6 Three-dimensional diagram of tooth of bionic straw-cleaning device

1. 环形凹面过渡区 2. 安装面 3. 盘面厚度 4. 盘齿

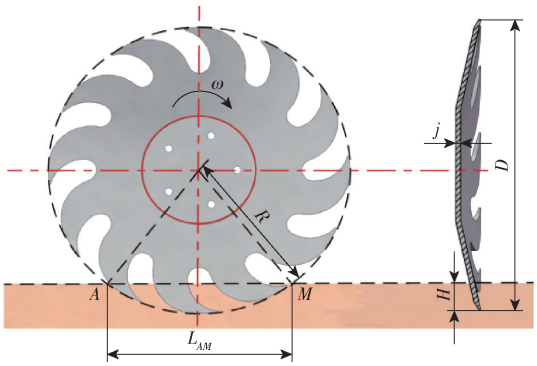


图 7 清秸圆盘工作参数示意图

Fig. 7 Schematic of straw-cleaning disc

参照《农业机械设计手册》[12],仿生清秸圆盘直径计算式为

$$D=KH \tag{1}$$

式中 K——径深比 D——清秸圆盘直径,mm

参照星齿凹面清秸盘直径的设计方法,圆盘直径可按径深比关系进行初步确定,且结构尺寸还需满足整机安装与作业空间要求[7,13]。径深比 K 过小时,圆盘直径偏小,盘齿接触秸秆和浅层土壤的有效

作用范围不足；K 过大时，圆盘直径增大，会增加安装空间需求，并影响整机结构布置。结合条带少耕清秸作业深度、秸秆覆盖厚度和整机结构布置要求，选取径深比 K 为 5，最终确定清秸圆盘直径 D 为 325 mm。

单个清秸圆盘在 1 次入土过程与地面接触的弦长，称为有效作业长度 L_{AM}，计算式为

$$L_{AM}=2\sqrt{H(2R-H)} \tag{2}$$

式中　R——清秸圆盘半径，mm

盘面厚度是影响圆盘刚度与耐用性的关键结构参数。参照文献[14]，厚度 j 计算式为

$$j=0.008D+1 \tag{3}$$

由确定的清秸圆盘直径 325 mm 计算可得，盘面厚度为 3.6 mm。考虑东北地区春季土壤黏重、秸秆残留量大，清秸圆盘在作业过程需承受秸秆拨送、浅层入土及土壤摩擦等复合作用。为增强圆盘刚度、耐磨性及对复杂田间条件的适应性，对盘面厚度圆整，最终确定清秸圆盘盘面厚度 j 为 4 mm。

盘齿数量需兼顾清秸效率与连续拨送能力。齿数过少易导致秸秆拖挂堆积，过多则会增加制造难度与成本。盘齿数量 n 计算式为

$$n=\frac{\pi D}{p} \tag{4}$$

式中　p——盘齿齿距，即相邻盘齿齿尖沿圆盘外缘圆周方向的弧长距离，mm

盘齿齿距是影响盘齿数量、齿间容秸空间和连续拨送能力的重要参数。齿距较小时，盘齿密度较高，对地表秸秆的抓取限位和连续拨送能力更强，更适配秸秆量大、土壤黏重的作业工况；齿距较大时，齿间容秸空间增大，作业阻力相对降低，田间通过性较好。传统折角齿形受限于齿间刚性过渡结构，选取较小齿距时易压缩齿间有效容秸空间，引发秸秆拖挂堆积，影响作业稳定性。综合圆盘直径、秸秆覆盖量、齿间容秸空间及盘齿结构布置要求，将相邻盘齿沿圆周方向的齿距 p 初步确定为 80 ~ 110 mm。为确保盘齿对秸秆具有充分的抓取、连续拨送与横向导送作用，并兼顾作业稳定性和清秸效率，选取较小齿距 p 为 85 mm，代入式(4)计算并取整后，确定盘齿数量 n 为 12。

条带少耕仿生清秸装置采用对称式双圆盘布置，如图 8 所示。为保证秸秆通过空间，并避免间距过大影响作业连续性，两圆盘之间需设置合理的安装间距，以保障秸秆拨送过程顺畅稳定。圆盘间距直接影响作业质量：间距过大易造成秸秆清理不彻底，出现漏清；间距过小则会压缩秸秆导送空间，引发秸秆拖挂堆积，影响作业稳定性。结合圆盘直径、盘齿入秸入土后有效作用范围及整机安装空间，将两圆盘安装间距 i 按圆盘直径的 0.4 ~ 0.6 倍进行初步设计。由清秸圆盘直径 325 mm 可得，安装间距理论初选范围为 130 ~ 195 mm。在满足清秸要求前提下，为兼顾秸秆拨送效果与作业稳定性，并考虑整机结构布局合理性，最终确定安装间距 i 为 150 mm。

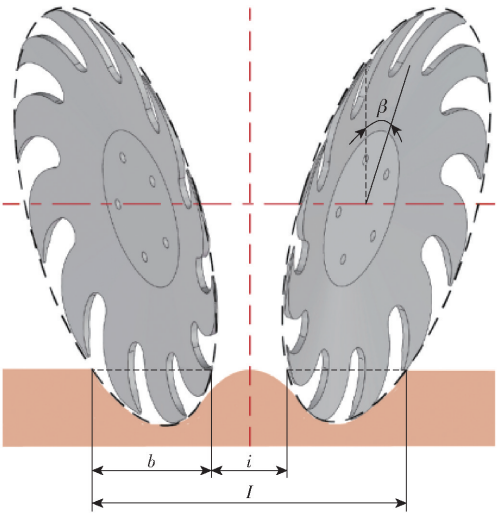


图 8　清秸幅宽示意图

Fig. 8　Schematic of straw-cleaning width

此外，清秸装置清秸幅宽决定单次作业有效范围，其大小与清秸圆盘直径、侧倾角及安装间距 i 密切相关[15-18]。对于对称布置的双圆盘，单个圆盘在机具前进方向垂直平面上有效作业投影宽度取决于有效作业长度 L_{AM} 和侧倾角 β，计算式为

$$b=L_{AM}\sin\beta=2\sin\beta\sqrt{H(2R-H)} \tag{5}$$

式中　b——圆盘有效作业投影宽度，mm

结合图 7、8 可知，装置总清秸幅宽 I 由 2 个圆盘有效投影宽度与安装间距 i 共同构成，并结合式(2) ~ (5)得到，计算式为

$$I=2b+i=4\sin\beta\sqrt{H(2R-H)}+i \tag{6}$$

由式(6)可知，总清秸幅宽由单圆盘有效作业长度、侧倾角及双圆盘安装间距共同决定。其中，有效作业长度主要受圆盘半径和入秸入土总深度影响，安装间距决定双圆盘中部秸秆通过空间，侧倾角则改变圆盘在横向方向上的有效作用投影。合理确定上述参数，有利于保证清秸装置覆盖目标清秸区域，并形成秸秆横向拨送所需的作业空间。由于侧倾角不仅影响总清秸幅宽，还会改变盘齿与秸秆接触后横向作用方向，因此有必要进一步结合前倾角、侧倾角和机具作业速度，对仿生清秸圆盘空间运动及秸秆抛掷过程进行分析。

2.3　仿生清秸圆盘运动学分析

仿生清秸圆盘工作位置示意图如图 9 所示，圆

盘中心为坐标原点 O,X 轴为机具前进方向,Y 轴垂直于机具前进方向,Z 轴为垂直地面方向。图 9b 为清秸圆盘侧视图,得到其在 YOZ 面上投影,清秸圆盘与垂直方向的夹角为前倾角 α。图 9c 为清秸圆盘俯视图,得到其在 XOY 面上投影,清秸圆盘与机具前进方向的夹角为侧倾角 β。将清秸圆盘被动旋转过程等效为以角速度 ω 绕自身轴线转动,机具作业速度为 v_0[19]。忽略圆盘轴心在 Y、Z 方向微小运动,以圆盘轴心初始位置为参考点,盘齿顶点相对于圆盘轴心的初始位置由安装角决定。为简化分析,考虑 1 个位于圆盘边缘的典型盘齿。

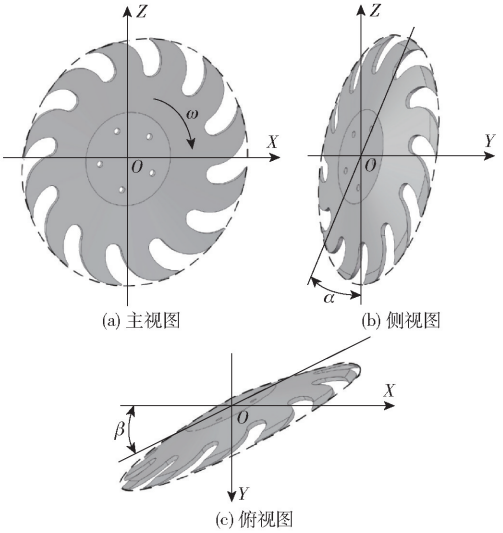


图 9 清秸圆盘工作位置示意图

Fig. 9 Schematics of working position of straw-cleaning disc

圆盘空间姿态由 α 和 β 共同决定[20-21],为描述盘齿顶点运动,将圆盘姿态变换为空间旋转与圆心平动的组合,并在固定坐标系中建立盘齿顶点位置方程,表达式为

$$\begin{cases} x(t) = v_0 t + R\cos(\omega t)\cos\beta - R\sin(\omega t)\sin\alpha\sin\beta \\ y(t) = R\cos(\omega t)\sin\beta + R\sin(\omega t)\sin\alpha\cos\beta \\ z(t) = R\sin(\omega t)\cos\alpha \end{cases} \tag{7}$$

式中 $x(t)$、$y(t)$、$z(t)$——盘齿顶点在坐标系中 X、Y、Z 轴坐标,m

t——时间,s

为了分析盘齿顶点运动速度,对位置方程中各分量分别对时间 t 求导。所得速度方程表示盘齿顶点在 3 个方向上瞬时速度分量,反映运动快慢和方向的变化规律。速度方程表达式为

$$\begin{cases} v_x(t) = v_0 - R\omega\sin(\omega t)\cos\beta - R\omega\cos(\omega t)\sin\alpha\sin\beta \\ v_y(t) = -R\omega\sin(\omega t)\sin\beta + R\omega\cos(\omega t)\sin\alpha\cos\beta \\ v_z(t) = R\omega\cos(\omega t)\cos\alpha \end{cases} \tag{8}$$

式中 $v_x(t)$、$v_y(t)$、$v_z(t)$——盘齿顶点 X、Y、Z 轴方向瞬时速度分量,m/s

由式(8)可知,前倾角 α 和侧倾角 β 会改变盘齿在竖直方向和横向方向速度分量,从而影响秸秆与盘齿接触后抬升、横向拨送及抛掷过程。侧倾角 β 增大时,盘齿横向作用分量增强,有利于提高秸秆横向抛掷能力;前倾角 α 则主要影响秸秆脱离圆盘时空间姿态和竖向速度分量。

为进一步探究前倾角和侧倾角对秸秆抛掷距离的影响,以右侧仿生清秸圆盘为例,秸秆抛掷示意图如图 10 所示,沿用图 9 中空间坐标系,对秸秆抛掷过程进行运动学分析。

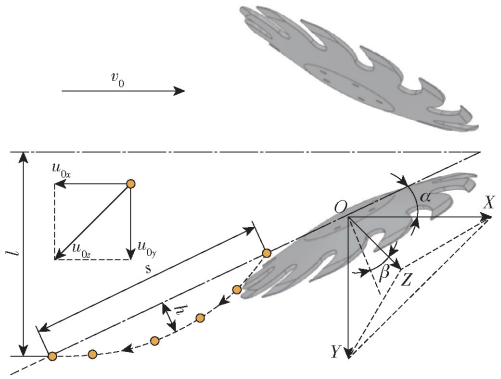


图 10 秸秆抛掷示意图

Fig. 10 Diagram of straw throwing

当圆盘盘齿与秸秆接触并施加作用力时,可认为秸秆在接触点获得瞬时速度,随后以抛体运动形式离开圆盘。在忽略秸秆与盘齿间相对滑移及空气阻力的条件下,假设秸秆脱离圆盘瞬间速度与盘齿顶点在该时刻的速度相同,则该瞬时速度可由式(8)给出的盘齿顶点速度分量决定。设脱离时刻为 t_0,则秸秆初速度分量分别为

$$\begin{cases} u_{0x} = v_x(t_0) \\ u_{0y} = v_y(t_0) \\ u_{0z} = v_z(t_0) \end{cases} \tag{9}$$

式中 u_{0x}、u_{0y}、u_{0z}——秸秆脱离瞬间 X、Y、Z 方向初速度,m/s

秸秆脱离后,在空中仅受重力作用,运动方程为

$$\begin{cases} x_s(t) = x(t_0) + u_{0x}(t - t_0) \\ y_s(t) = y(t_0) + u_{0y}(t - t_0) \\ z_s(t) = z(t_0) + u_{0z}(t - t_0) - \dfrac{1}{2}g(t - t_0)^2 \end{cases} \tag{10}$$

式中 $x_s(t)$、$y_s(t)$、$z_s(t)$——秸秆在空间中 X、Y、Z 轴坐标,m

$x(t_0)$、$y(t_0)$、$z(t_0)$——秸秆脱离瞬间 X、Y、Z 轴坐标,m

g——重力加速度,m/s^2

秸秆着地时满足 $z_s(t)=0$，由此可解得秸秆飞行时间 t_f，进而可求得秸秆在 Y 方向上横向抛掷距离 l 为

$$l=|y_s(t_f)-y(t_0)| \tag{11}$$

式中　$y_s(t_f)$——秸秆着地点 Y 轴坐标，m

水平位移 s 一般指秸秆在 XOY 平面内合位移水平投影，即

$$s=\sqrt{(x_s(t_f)-x(t_0))^2+(y_s(t_f)-y(t_0))^2} \tag{12}$$

式中　$x_s(t_f)$——秸秆着地点 X 轴坐标，m

最大抛掷高度 h 为

$$h=z(t_0)+\frac{u_{0z}^2}{2g} \tag{13}$$

由上述对秸秆抛掷运动的理论分析可知，前倾角 α 和侧倾角 β 是影响抛掷性能的关键参数。α 主要影响垂直方向速度分量，从而调节抛掷高度与落点分布；增大 β 则能增强横向速度分量，有利于增大横向抛掷距离，防止秸秆回落至已清理区域。两者协同作用，共同决定秸秆的空间运动轨迹，进而影响清秸作业均匀性与整体稳定性，最终直接关系到清秸效果。

参照玉米条带少耕作业农艺要求[22]及《农业机械设计手册》[12]对整地机械的设计要求，结合秸秆量大、黏重土壤地块的作业特性与低扰动少耕的技术目标，确定作业速度 v_0 为 5 ~ 9 km/h、前倾角 α 为 20° ~ 36°与侧倾角 β 为 8° ~ 20°。

3　离散元仿真

根据东北地区春季玉米播种前田间秸秆覆盖情况建立“仿生清秸圆盘-秸秆-土壤”离散元互作模型，模拟实际作业情况，探究各因素对作业效果的影响，寻求最优参数组合。

3.1　接触模型选取及离散元参数确定

东北黑土区春季土壤质地黏重，颗粒间存在一定黏结作用。为较准确模拟条带少耕清秸作业过程土壤颗粒间的黏结破坏及清秸圆盘、秸秆、土壤之间的接触作用，土壤颗粒间采用 Hertz - Mindlin with bonding V2 模型表征黏聚特性[23-25]，其余材料间接触均采用 Hertz - Mindlin with no slip 模型模拟接触碰撞与摩擦行为。清秸圆盘材料设为 65Mn 钢。参照文献[26 -27]，在 EDEM 软件中设置各接触参数如表 2 所示。

3.2　仿真模型建立

采用 EDEM 离散元仿真软件构建虚拟土槽模型。结合条带少耕实际工况，设定土槽几何尺寸：长 1 700 mm、宽 800 mm、高 200 mm。在虚拟土槽上方设置颗粒生成工厂，生成 100 mm 厚土壤颗粒层，形成土壤离散元模型。

表 2　离散元模型参数

Tab. 2　Discrete element model parameters

项目	参数	数值
清秸圆盘	泊松比	0.30
	密度/(kg·m^{-3})	7 800
	剪切模量/Pa	7.0×10^{10}
土壤颗粒	泊松比	0.38
	密度/(kg·m^{-3})	1 850
	剪切模量/Pa	1.0×10^{6}
秸秆颗粒	泊松比	0.40
	密度/(kg·m^{-3})	180
	剪切模量/Pa	1.0×10^{6}
土壤颗粒-清秸圆盘	恢复系数	0.04
	静摩擦因数	0.50
	动摩擦因数	0.04
秸秆颗粒-清秸圆盘	恢复系数	0.30
	静摩擦因数	0.30
	动摩擦因数	0.01
秸秆颗粒-秸秆颗粒	恢复系数	0.30
	静摩擦因数	0.30
	动摩擦因数	0.01
土壤颗粒-土壤颗粒	恢复系数	0.20
	静摩擦因数	0.40
	动摩擦因数	0.25
	临界法向应力/kPa	200
	临界切向应力/kPa	68
	法向刚度/(N·m^{-3})	3.4×10^{8}
	切向刚度/(N·m^{-3})	1.5×10^{8}
土壤颗粒-秸秆颗粒	恢复系数	0.50
	静摩擦因数	0.30
	动摩擦因数	0.05

条带少耕仿生清秸圆盘作业对象为玉米秸秆，需构建贴合实际的玉米秸秆颗粒模型。结合实地测量数据及文献[28]，采用 10 个球体组合成长圆线型玉米秸秆颗粒模型。单个球体直径 20 mm，相邻球心间距 10 mm，组合后模型长度 110 mm。仿真中，在虚拟土槽内堆积形成约 40 mm 厚秸秆覆盖层，模拟真实的秸秆覆盖场景。

使用 Solidworks 构建清秸装置三维模型。简化模型去除非关键结构，仅保留 2 个清秸圆盘。将清秸圆盘模型转换为 .igs 格式文件，导入 EDEM 离散元仿真软件，如图 11 所示。设定清秸圆盘旋转方向、角速度、前倾角及侧倾角，开展条带清秸过程仿真。

3.3　评价指标

根据仿生清秸圆盘的理论分析结果，确定以机具作业速度、清秸圆盘前倾角、侧倾角为试验因素。同时，参照文献[29 -31]并结合实际玉米条带少耕

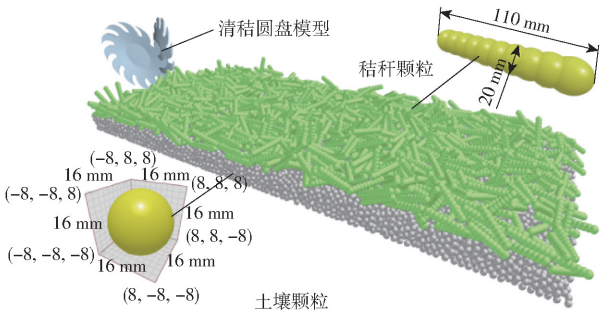


图 11 离散元仿真模型

Fig. 11 Discrete element simulation model

作业技术要求,选取清秸率和秸秆横向最大抛掷距离作为试验指标。

清秸率是指在清秸幅宽范围内,清秸圆盘作业后清理出的秸秆量与作业前原秸秆量比值。如图 12 所示,在 EDEM 软件中可借助后处理模块 Total Mass Sensor 功能完成清秸率量化测量,通过直接选取整个清秸幅宽区域作为测量区域,分别获取该区域作业前原秸秆质量与作业后剩余秸秆质量,据此计算得到清秸率。

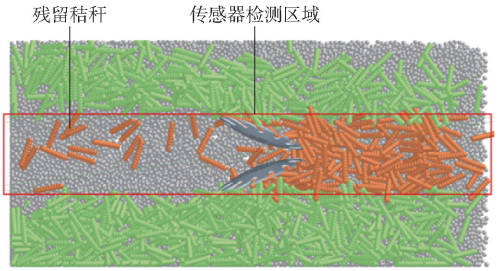


图 12 清秸率检测

Fig. 12 Clearing straw rate detection

每组仿真结束后,在后处理中导出数据,清秸率计算式为

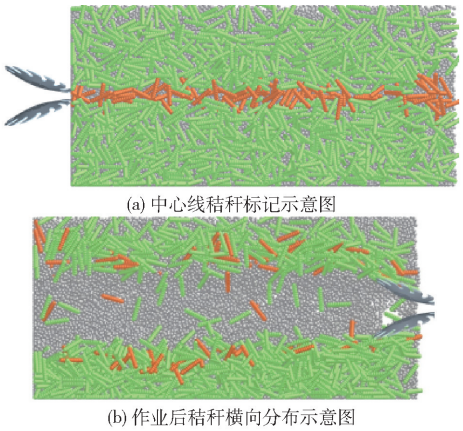
$$\eta = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\% \tag{14}$$

式中 η——清秸率,%

M_0——测量区域作业前秸秆质量,kg

M_1——测量区域作业后秸秆质量,kg

由式(11)可知,秸秆横向最大抛掷距离指原位于播种带中心线上秸秆受清秸圆盘拨离后所产生的最大横向绝对位移。在 EDEM 后处理模块中,以圆盘行进中心线为基准,用 Manual Selection 功能标记中心线上秸秆颗粒(图 13);仿真结束颗粒静止后,追踪并导出最终位置坐标,计算各颗粒横向坐标与初始中心线的差值,取最大绝对值。每组重复测 5 次,取平均值作为最终结果。



(a) 中心线秸秆标记示意图

(b) 作业后秸秆横向分布示意图

图 13 秸秆横向抛掷距离测定示意图

Fig. 13 Diagrams of straw throwing distance measurement

3.4 单因素仿真试验结果与分析

为探究机具作业速度、清秸圆盘前倾角、侧倾角对评价指标的影响,设定各单因素范围为:机具作业速度 5 ~ 9 km/h、前倾角 20° ~ 36°、侧倾角 8° ~ 20°。研究单一因素对评价指标的影响时,其余因素取中间水平,单因素仿真结果如图 14 所示。

3.4.1 机具作业速度

如图 14a 所示,清秸率与秸秆横向最大抛掷距离随机具作业速度增加整体呈上升后逐渐平缓变化趋势。当作业速度由 5 km/h 增至 7 km/h 时,2 项指标提升幅度较大:清秸率从 75.42% 提高至 90.48%,横向最大抛掷距离由 22.1 cm 增至 29.5 cm。原因在于作业速度的提升使秸秆获得更大的动能,秸秆能被抛掷更远并移出清秸带。在 7 ~ 9 km/h 区间,受秸秆空间分布密度的限制,抛掷距离增速放缓并趋于稳定。参照玉米条带少耕清秸装置

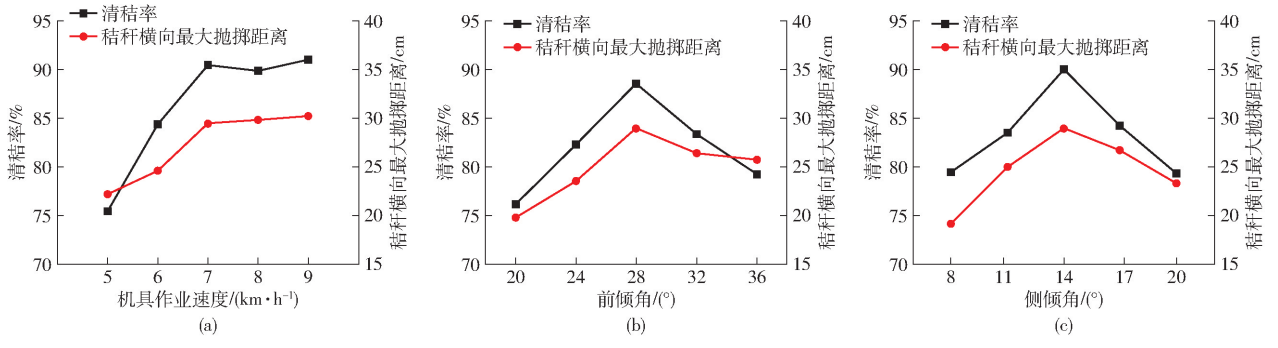


图 14 单因素仿真结果

Fig. 14 Single-factor simulation results

清秸率不小于 80% 的标准，选取指标较稳定且符合要求的 6 ~ 8 km/h 作为多因素试验作业速度范围。

3.4.2　前倾角

由图 14b 可知，清秸率与秸秆横向最大抛掷距离随清秸圆盘前倾角的增大，均呈先升后降趋势。当前倾角由 20°增至 28°时，2 项指标明显提高，清秸率由 76.15% 升至 88.48%，横向最大抛掷距离由 19.8 cm 增至 28.9 cm。原因在于适度增大前倾角改善了抬升力不足的问题，避免了秸秆堆积。在 28° ~ 36°区间，前倾角过大使秸秆过早坠落，不利于有效抛离，2 项指标逐渐下降，清秸率降至 79.23%，抛掷距离缩短至 25.7 cm。综合考量前倾角在 26° ~ 30°区间清秸率保持 83% 以上且抛掷距离较远，正交试验选取 26° ~ 30°作为前倾角取值范围。

3.4.3　侧倾角

图 14c 显示清秸率与秸秆横向最大抛掷距离随清秸圆盘侧倾角的增大同样表现为先升后降。当侧倾角由 8°增至 14°时，由于横向作用力逐步增强，2 项指标同步提升，清秸率从 79.52% 升至 90.15%，横向最大抛掷距离从 19.2 cm 增至 29.0 cm。在 14° ~ 20° 区间 2 项指标缓慢回落，清秸率降至 79.38%，抛掷距离缩短至 23.4 cm。综合考量侧倾角在 12° ~ 16°区间清秸率保持 85% 以上且抛掷距离达 26.8 cm 以上，正交试验选取 12° ~ 16°作为侧倾角取值范围。

3.5　正交试验结果与分析

3.5.1　试验方案

在单因素仿真结果基础上，采用三因素五水平试验方法设计试验以确定清秸圆盘最佳参数组合，建立试验因素编码如表 3 所示。

表 3　试验因素编码

Tab.3　Codes of test factors

编码	因素		
	机具作业速度/(km·h^{-1})	前倾角/(°)	侧倾角/(°)
1.682	8.00	30.00	16.00
1	7.59	29.19	15.19
0	7.00	28.00	14.00
−1	6.41	26.81	12.81
−1.682	6.00	26.00	12.00

3.5.2　试验结果与分析

利用 Design-Expert 13.0 软件对结果进行回归分析，试验结果如表 4 所示，X_1、X_2、X_3 为因素编码值，方差分析结果如表 5 所示。

由表 5 可知，清秸率 Y_1 回归模型中 X_1、X_2、X_3、X_1^2、X_2^2、X_3^2 均为极显著，X_1X_2 为显著，其余项为不显著；秸秆横向最大抛掷距离 Y_2 回归模型中 X_1、X_2、X_3、X_1X_2、X_2^2、X_3^2 均为极显著，X_1X_3、X_1^2 为显著，其余为不显著；剔除回归模型中不显著项并对保留项重新进行回归拟合后，得到二次回归方程为

表 4　试验方案与结果

Tab.4　Test scheme and results

编号	因素			清秸率/%	秸秆横向最大抛掷距离/cm
	X_1	X_2	X_3		
1	−1	−1	−1	78.25	21.45
2	1	−1	−1	85.36	28.76
3	−1	1	−1	80.14	25.41
4	1	1	−1	89.42	30.12
5	−1	−1	1	80.07	24.19
6	1	−1	1	88.29	29.43
7	−1	1	1	80.73	27.35
8	1	1	1	90.85	30.92
9	−1.682	0	0	77.58	24.17
10	1.682	0	0	92.23	32.81
11	0	−1.682	0	81.04	24.43
12	0	1.682	0	84.42	28.58
13	0	0	−1.682	81.53	24.35
14	0	0	1.682	84.21	26.67
15	0	0	0	89.36	30.62
16	0	0	0	89.14	28.97
17	0	0	0	89.52	30.21
18	0	0	0	88.97	29.65
19	0	0	0	90.45	29.43
20	0	0	0	90.29	29.84
21	0	0	0	89.93	29.68
22	0	0	0	89.61	29.59
23	0	0	0	90.18	30.10

$$Y_1 = 89.69 + 4.35X_1 + 1.09X_2 + 0.825\,8X_3 + 0.508\,8X_1X_2 - 1.49X_1^2 - 2.26X_2^2 - 2.21X_3^2 \quad (15)$$

$$Y_2 = 29.78 + 2.59X_1 + 1.24X_2 + 0.736\,0X_3 - 0.533\,7X_1X_2 - 0.401\,2X_1X_3 - 0.345\,2X_1^2 - 1.05X_2^2 - 1.40X_3^2 \quad (16)$$

为探究各试验因素之间交互作用对清秸率和秸秆横向最大抛掷距离的影响，根据方差分析结果，对显著交互项进行响应曲面分析，由表 5 可知，X_1X_2 对清秸率 Y_1 影响显著，说明机具作业速度与清秸圆盘前倾角之间存在协同作用；X_1X_2、X_1X_3 对秸秆横向最大抛掷距离 Y_2 影响显著，表明机具作业速度分别与前倾角、侧倾角共同影响秸秆横向抛掷效果。故选取上述显著交互项开展响应曲面分析，明确不同因素组合条件下评价指标的变化规律，并开展参数优化，各试验因素交互作用对评价指标影响的响应曲面如图 15 所示。

图 15a 为机具作业速度和清秸圆盘前倾角对清秸率的响应面分析结果，在一定范围内，随着前倾角

表 5 回归模型方差分析

Tab. 5 Analysis of variance of regression models

指标	来源	平方和	自由度	F	P
清秸率(Y_1)	模型	478.60	9	124.23	<0.000 1 **
	X_1	258.08	1	602.93	<0.000 1 **
	X_2	16.16	1	37.75	<0.000 1 **
	X_3	9.31	1	21.76	0.000 4 **
	X_1X_2	2.07	1	4.84	0.046 5 *
	X_1X_3	0.475 3	1	1.11	0.311 2
	X_2X_3	0.931 6	1	2.18	0.163 9
	X_1^2	35.32	1	82.51	<0.000 1 **
	X_2^2	81.15	1	189.58	<0.000 1 **
	X_3^2	77.63	1	181.36	<0.000 1 **
	残差	5.56	13		
	失拟项	3.37	5	2.46	0.123 9
	误差	2.19	8		
	总和	484.17	22		
秸秆横向最大抛掷距离(Y_2)	模型	173.52	9	85.54	<0.000 1 **
	X_1	91.56	1	406.20	<0.000 1 **
	X_2	21.04	1	93.33	<0.000 1 **
	X_3	7.40	1	32.82	<0.000 1 **
	X_1X_2	2.28	1	10.11	0.007 2 **
	X_1X_3	1.29	1	5.71	0.032 7 *
	X_2X_3	0.056 1	1	0.248 9	0.626 2
	X_1^2	1.89	1	8.40	0.012 4 *
	X_2^2	17.42	1	77.28	<0.000 1 **
	X_3^2	31.09	1	137.94	<0.000 1 **
	残差	2.93	13		
	失拟项	1.09	5	0.951 4	0.498 5
	误差	1.84	8		
	总和	176.45	22		

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

增大，清秸率逐渐提高，当前倾角继续增大后，清秸率提升趋势减弱并出现下降趋势，因适宜的前倾角能优化秸秆抛送轨迹，配合对应速度提供的动能，减少秸秆回落与堆积，提升清秸效果。

图 15b 为侧倾角为中心水平时机具作业速度和前倾角对秸秆横向最大抛掷距离的响应面分析结果，随着机具作业速度和前倾角在合理范围内增大，秸秆横向最大抛掷距离呈增加趋势，因作业速度为秸秆抛掷提供动能，适宜的前倾角能避免秸秆过早或过晚被抛出，确保横向分力有效作用。

图 15c 为机具作业速度和清秸圆盘侧倾角对秸秆横向最大抛掷距离的响应面分析结果，随着侧倾角由低水平增加至中间水平，秸秆横向最大抛掷距离增大，当侧倾角继续增大时，过强的横向作用使秸秆过早脱离圆盘，导致抛掷距离增幅减小，因侧倾角调控秸秆抛送方向，配合作业速度提供的动能，低速时二者作用时间长，侧倾角对抛送效果的影响明显。

3.5.3 参数优化与验证试验

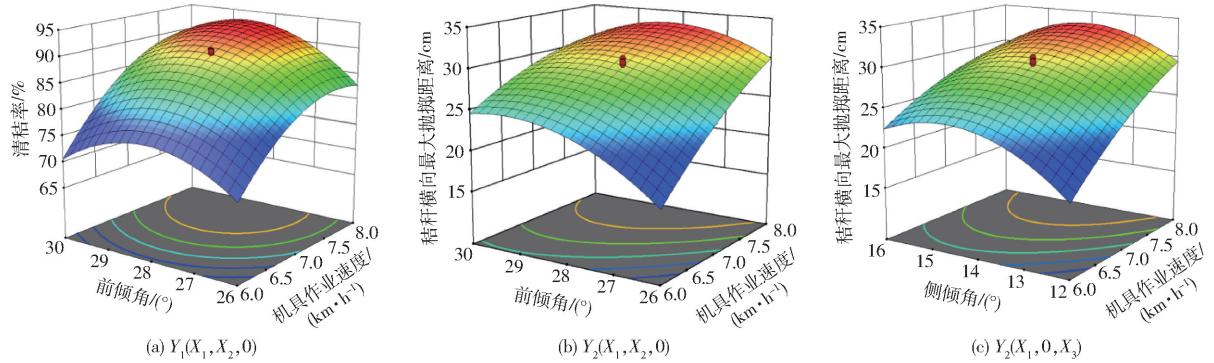
为得到仿生清秸圆盘最优工作参数，利用 Design-Expert 13.0 软件中 Numerical 模块，对影响清秸率 Y_1 和秸秆横向最大抛掷距离 Y_2 的各因素进行优化设计，结合实际作业要求，遵循在秸秆横向抛掷不发生相互影响条件下提高清秸率的原则，构建非线性规划参数模型为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ 15\ \text{cm} \leqslant Y_2(X_1, X_2, X_3) \leqslant 30\ \text{cm} \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1.682 \leqslant X_1 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_2 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_3 \leqslant 1.682 \end{cases} \end{cases} \tag{17}$$

在满足清秸率不低于作业要求且秸秆横向抛掷距离控制在合理范围内约束条件下，求解得到最优参数组合为机具作业速度 7.13 km/h、前倾角 27.73°、侧倾角 14.05°，此时清秸率为 90.16%，秸秆横向最大抛掷距离为 30.00 cm。为了验证优化结果的可靠性，对最优参数取整，在机具作业速度 7 km/h、前倾角 28°、侧倾角 14° 参数组合下进行仿真试验，结果表明清秸率为 89.64%、秸秆横向最大抛掷距离为 28.31 cm，验证试验结果接近预测结果，参数优化结果可靠。

3.6 仿生清秸圆盘离散元分析

为探究仿生清秸圆盘的清秸与秸秆抛掷效果，通过离散元仿真对仿生清秸圆盘和普通缺口式清秸



(a) $Y_1(X_1, X_2, 0)$ (b) $Y_2(X_1, X_2, 0)$ (c) $Y_2(X_1, 0, X_3)$

图 15 试验因素交互作用对评价指标影响的响应曲面

Fig. 15 Response surfaces of interaction effects of test factors on evaluation indicators

圆盘进行仿真，设置作业速度为 6～8 km/h，入土深度为 25 mm。秸秆速度分布如图 16 所示，仿生清秸圆盘作用下秸秆颗粒高速度区域分布更连续，横向运动趋势更明显，说明其具有较强的横向抛掷能力。经 EDEM 后处理统计，在作业速度 6、7、8 km/h 下，仿生清秸圆盘清秸率分别为 86.81%、89.64% 和 85.92%，较普通缺口式清秸圆盘提高 4.33、5.62、6.31 个百分点；秸秆横向最大抛掷距离为 27.90、28.31、29.10 cm，增加 3.70、2.66、1.24 cm。结果表明，仿生盘齿可改善清秸与秸秆横向抛掷效果。

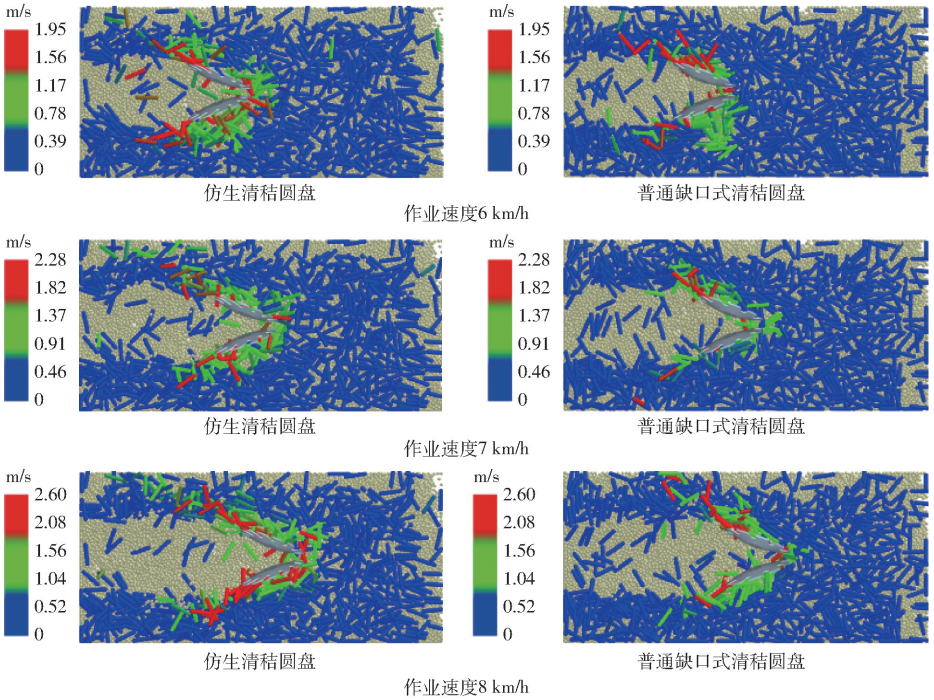


图 16　秸秆速度分布

Fig. 16　Straw velocity distribution

4　台架与田间试验

4.1　台架试验

4.1.1　台架试验条件与方法

为验证仿生清秸装置实际作业性能及离散元仿真可靠性，搭建玉米条带少耕仿生清秸装置性能试验台如图 17 所示。试验台由连接臂、行进电机、高度升降装置、导轨、土槽、控制系统、行走轮等组成，前端悬挂条带少耕施肥机单体，土槽内铺设与田间一致的黑黏土，上方均匀铺设厚度 40 mm 玉米粉碎秸秆层模拟真实全量还田作业条件。

试验所用玉米秸秆为东北黑土区秋季玉米收获后粉碎秸秆，与田间试验所用秸秆同源，基础参数为：长度 6～10 cm、平均直径 16.82 mm、含水率 15.2%。

4.1.2　台架试验指标

(1)清秸率

试验前，在台架运行区域的清秸幅宽范围内全覆盖均匀铺设秸秆，设定单次作业有效行程 3 m，取中间 2 m 稳定作业段为清秸率测试区，称量该范围秸秆质量 M_0；作业后，在同一范围收集剩余未清理秸秆，称量秸秆质量 M_1，每组试验重复 3 次取平均值。

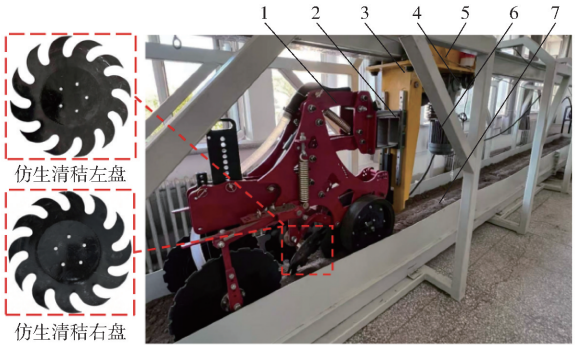


图 17　玉米条带少耕仿生清秸装置台架试验台

Fig. 17　Bench test rig for bionic straw-cleaning device for maize strip reduced tillage

1. 条带少耕施肥机单体　2. 高度升降装置　3. 连接臂　4. 行走轮　5. 导轨　6. 行进电机　7. 土槽

(2)秸秆横向最大抛掷距离

在台架土槽单次作业的中间 2 m 稳定作业段内，在播种带中心线，沿作业方向每 20 cm 等距布置 10 组示踪秸秆，每组秸秆采用防水油性马克笔进行独立编号标记示踪秸秆，标记不改变秸秆的外形、重量与运动特性；作业完成秸秆完全静止后，用钢直尺(精度 ±1 mm)测量每组示踪秸秆初始中心线位置与最终静止位置横向绝对位移，取每次试验中最大值作为该次试验的横向最大抛掷距离。每组试验条

件下重复 3 次取平均值。

4.1.3 台架试验结果与分析

根据仿真优化得到的最优工作参数组合,取整后为机具前进速度 7 km/h、前倾角 28°、侧倾角 14°,将仿生清秸圆盘安装于条耕机,并将入土深度调节至 25 mm。

台架试验结果表明,在取整后参数组合下,实测清秸率为 89.38%,秸秆横向最大抛掷距离为 27.52 cm。与验证仿真结果相比,清秸率相差 0.26 个百分点,相对误差为 0.29%;秸秆横向最大抛掷距离相差 0.79 cm,相对误差为 2.79%。2 项指标误差均较小,表明离散元模型及响应面优化结果具有较好的可靠性,仿生清秸圆盘具备良好的台架作业性能。

4.1.4 不同秸秆覆盖量梯度下清秸性能测试

田间实测结果表明,东北黑土区玉米秸秆全量还田后,受收获机具秸秆抛撒不均影响,地表秸秆覆盖量在 0.6 ~ 1.8 kg/m^2 范围内波动,直接影响清秸装置的作业效果与运行稳定性。田间工况受地表平整度、秸秆随机分布等不可控因素干扰,难以系统测试装置性能随覆盖量变化的衰减规律。依托可控台架环境,固定已验证的最优工作参数,以秸秆覆盖量为单一变量开展梯度验证试验,明确装置满足清秸要求的秸秆覆盖量上限。

结合区域实际工况,设置 5 个秸秆覆盖量梯度,0.6、0.9、1.2、1.5、1.8 kg/m^2,对应台架均匀铺设厚度依次为 20、30、40、50、60 mm。每个梯度开展 3 次重复试验,单次有效作业行程 3 m,取中间 2 m 稳定段为测试区,试验结果如表 6 所示。

表 6 不同秸秆覆盖量下清秸性能测试结果

Tab. 6 Results of straw cleaning performance under different straw mulching amounts

秸秆覆盖量/(kg·m^{-2})	清秸率/%	秸秆横向最大抛掷距离/cm
0.6	93.27	29.55
0.9	92.35	28.10
1.2	89.38	27.52
1.5	82.16	24.35
1.8	76.84	21.62

由表 6 可知,随着地表秸秆覆盖量梯度递增,清秸装置的作业性能呈持续降低趋势,清秸率与秸秆横向最大抛掷距离均随覆盖量升高逐步下降。当秸秆覆盖量为 0.6 ~ 0.9 kg/m^2 低覆盖水平时,清秸率稳定在 92% 以上,秸秆横向最大抛掷距离较大;当覆盖量增至 1.2 kg/m^2 时,清秸率降至 89.38%,作业性能出现一定下滑;当覆盖量进一步增至 1.5 kg/m^2 与 1.8 kg/m^2 高覆盖工况时,清秸率分别降至 82.16% 与 76.84%,秸秆横向最大抛掷距离亦同步缩短。

以清秸率不低于 80% 作为评价依据时,仿生清秸装置在秸秆覆盖量不高于 1.5 kg/m^2 条件下仍能满足清秸作业要求;当覆盖量增至 1.8 kg/m^2 时,清秸率降至 76.84%,难以满足稳定清秸要求。因此,1.5 kg/m^2 可作为本文试验条件下装置满足清秸要求的覆盖量上限。

4.2 田间试验

4.2.1 田间试验条件与方法

试验于 2026 年 5 月在黑龙江省五大连池市大庆农场(48°39′N,126°48′E)试验田进行,土壤类型为黑黏土,试验田秋季玉米收获时进行了全量秸秆粉碎覆盖还田,试验现场如图 18 所示。测得试验田平均秸秆覆盖量为 1.18 kg/m^2、秸秆长度为 6 ~ 10 cm、平均直径为 16.82 mm、含水率为 15.2%;土壤 0 ~ 100 mm 平均坚实度为 1.28 MPa、含水率为 18.6%。



图 18 田间试验

Fig. 18 Field test

以拖拉机为动力,拆除玉米条带少耕机清秸装置后方的深松与镇压部件,以普通缺口式清秸圆盘和仿生清秸圆盘为试验对象,固定二者前倾角 28°、侧倾角 14°、入土深度 25 mm,通过调整拖拉机挡位与油门设置 3 个作业速度梯度 6、7、8 km/h 开展田间试验。

4.2.2 田间试验指标

试验指标为清秸率与秸秆横向最大抛掷距离,清秸率测试点为稳定工作区内间隔 2 m 的连续 10 个测点,称量对应清秸幅宽内作业前秸秆质量与作业后剩余秸秆质量;秸秆横向最大抛掷距离测点布设与清秸率测定一致,在播种带中心线设编号示踪秸秆,作业后测量最大横向绝对位移,二者计算方法均与台架试验一致。

4.2.3 田间试验结果与分析

田间试验结果如表 7 所示。由表 7 可知,普通缺口式清秸圆盘的清秸率随作业速度升高呈先升后降趋势,当作业速度 6 km/h 时为 81.20%,8 km/h 时降至 78.75%,高速作业易出现秸秆拖挂堆积、种带清理不彻底问题;仿生清秸圆盘在 3 种作业速度下清秸率均不低于 84.74%,较普通缺口式清秸圆

盘最高提高 5.99 个百分点，相对提升 7.61%，种带清理效果优异且稳定。原因在于仿生盘齿的弧形外缘增强了对秸秆的抓取、导送和脱附作用，使秸秆在圆盘作用下更易形成连续横向运动并脱离清秸带，减少了拖挂和回落现象。秸秆横向抛掷性能方面，在作业速度 6、7 km/h 工况下，仿生清秸圆盘的秸秆横向最大抛掷距离均高于普通缺口式清秸圆盘，6 km/h 时最高增加 3.95 cm，二者差距随作业速度提升逐步缩小，8 km/h 时二者差值减小至 1.35 cm。

表 7　不同清秸圆盘田间试验结果

Tab.7　Field test results of different straw-cleaning discs

类型	机具作业速度/(km·h^{-1})	清秸率/%	秸秆横向最大抛掷距离/cm
普通缺口式清秸圆盘	6	81.20	23.55
	7	83.15	25.10
	8	78.75	27.40
仿生清秸圆盘	6	85.46	27.50
	7	88.50	28.35
	8	84.74	28.75

5　结论

（1）针对东北黑土区春季玉米秸秆覆盖条件下，条带少耕作业中传统清秸圆盘存在清秸率偏低、秸秆横向抛掷能力不足等问题，以东北大黑鳃金龟后足跗节主爪为仿生原型，设计了玉米条带少耕仿生清秸装置。通过主爪轮廓提取、盘齿建模、圆盘参数设计与空间运动学分析，明确了前倾角、侧倾角和机具作业速度对秸秆横向拨送、抛掷过程及清秸效果的影响，确定了装置关键结构参数与作业参数的合理取值范围，为仿生清秸圆盘参数优化提供了理论依据。

（2）构建了“仿生清秸圆盘-秸秆-土壤”离散元互作模型，优化得到最优参数组合为机具作业速度 7.13 km/h、前倾角 27.73°、侧倾角 14.05°，对应仿真预测清秸率为 90.16%，秸秆横向最大抛掷距离为 30.00 cm；验证仿真结果分别为 89.64% 和 28.31 cm。离散元仿真结果表明，仿生清秸圆盘作用下秸秆高速度区域分布更连续，横向运动趋势更明显，说明其可改善清秸与横向抛掷效果。

（3）台架试验结果表明，在取整后的最优参数组合下，仿生清秸装置清秸率为 89.38%，秸秆横向最大抛掷距离为 27.52 cm；当秸秆覆盖量不高于 1.5 kg/m^2 时，装置仍能满足清秸作业要求。田间试验结果表明，在作业速度 6～8 km/h 下，仿生清秸圆盘清秸率均不低于 84.74%，较普通缺口式清秸圆盘最高提高 5.99 个百分点、相对提升 7.61%，秸秆横向最大抛掷距离最高增加 3.95 cm。仿生清秸装置有效改善了春季玉米秸秆覆盖条件下的整体清秸质量，表明适用于东北黑土区玉米条带少耕清秸作业。

参　考　文　献

[1] 何进，李洪文，陈海涛，等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报，2018，49(4)：1－19.
He Jin，Li Hongwen，Chen Haitao，et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(4)：1－19.（in Chinese）

[2] 贾洪雷，马成林，李慧珍，等. 基于美国保护性耕作分析的东北黑土区耕地保护[J]. 农业机械学报，2010，41(10)：28－34.
Jia Honglei，Ma Chenglin，Li Huizhen，et al. Farmland protection in black soil region of Northeast China based on analysis of American conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2010，41(10)：28－34.（in Chinese）

[3] 王春雷，刘冲，林东洪，等. 东北黑土地保护性用养技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报，2025，56(4)：1－21.
Wang Chunlei，Liu Chong，Lin Donghong，et al. Research progress on conservation utilization and cultivation technologies and equipment for black soil in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(4)：1－21.（in Chinese）

[4] 王庆杰，曹鑫鹏，王超，等. 东北黑土地玉米免少耕播种技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报，2021，52(10)：1－15.
Wang Qingjie，Cao Xinpeng，Wang Chao，et al. Research progress on maize no-tillage and reduced-tillage sowing technologies and equipment for black soil in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(10)：1－15.（in Chinese）

[5] 段益平，吴明亮，吕江南，等. 免耕播种防堵技术研究现状及发展建议[J]. 中国农业科技导报，2022，24(2)：124－135.
Duan Yiping，Wu Mingliang，Lü Jiangnan，et al. Research status and development suggestions of anti-blocking technology for no-tillage seeding[J]. Journal of Agricultural Science and Technology，2022，24(2)：124－135.（in Chinese）

[6] 袁盼盼，李洪文，蒋贵菊，等. 滴灌区宽窄行玉米免耕播种带秸秆清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(6)：43－52.
Yuan Panpan，Li Hongwen，Jiang Guiju，et al. Design and experiment of stalk cleaning device for no-tillage sowing belt of maize with wide-narrow row in drip irrigation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(6)：43－52.（in Chinese）

[7] 王奇，贾洪雷，朱龙图，等. 免耕播种机星齿凹面盘式清秸防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2019，50(2)：68－77.
Wang Qi，Jia Honglei，Zhu Longtu，et al. Design and experiment of star-tooth concave disc straw cleaning and anti-blocking device for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(2)：68－77.（in

Chinese)
[8] 侯守印,纪张驰,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 experiment of straw cleaning device adapted to no-tillage seeding unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 111 - 122. (in Chinese)
[9] Torbert H A, Ingram J T, Prior S A. Planter aid for heavy residue conservation tillage systems[J]. Agronomy Journal, 2007, 99(2): 478 - 480.
[10] 李名伟,郭彩云,陈玉龙,等. 仿生鼹鼠前肢自适应清秸装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(8):320 - 332,389.
Li Mingwei, Guo Caiyun, Chen Yulong, et al. Design and experiment of bionic mole forelimb adaptive straw cleaning device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 320 - 332, 389. (in Chinese)
[11] Wang Q, Wang Z M, Zhang Z H, et al. Design and test of bionic elastic row cleaner with improved straw cleaning performance [J]. Agriculture, 2024, 14(2): 186.
[12] 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.
[13] 王奇. 行间清秸耕整关键技术及条带耕整机研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
Wang Qi. Research on key technologies of inter-row clean-tillage and its strip-till machine[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
[14] Raheman H, Sarkar P. Tillage machinery: passive, active and combination[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024.
[15] 贾洪雷,刘行,余海波,等. 免耕播种机凹面爪式清茬机构仿真与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(11):68 - 77.
Jia Honglei, Liu Xing, Yu Haibo, et al. Simulation and experiment of concave claw-type residue cleaning mechanism for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 68 - 77. (in Chinese)
[16] Matin M A, Fielke J M, Desbiolles J M A. Torque and energy characteristics for strip-tillage cultivation when cutting furrows using three designs of rotary blade[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 329 - 340.
[17] 范旭辉,贾洪雷,张伟汉,等. 免耕播种机仿形爪式防堵清茬机构参数分析[J]. 农业机械学报,2011,42(10):56 - 60.
Fan Xuhui, Jia Honglei, Zhang Weihan, et al. Parameter analysis of profiled claw-type anti-blocking and residue cleaning mechanism for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 56 - 60. (in Chinese)
[18] 王奇,唐汉,周文琪,等. 幅宽自动控制清秸防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(3):25 - 35.
Wang Qi, Tang Han, Zhou Wenqi, et al. Design and experiment of straw cleaning and anti-blocking device with automatic width control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 25 - 35. (in Chinese)
[19] 王淞, 衣淑娟, 赵斌, 等. 基于 IWHO - EKF 的高速免耕播种机播种深度监测系统研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 75 - 84.
Wang Song, Yi Shujuan, Zhao Bin, et al. High-speed no-till seeder seeding depth monitoring system based on IWHO - EKF [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 75 - 84. (in Chinese)
[20] 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 power-compensated adaptive straw cleaning device for maize no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 174 - 185. (in Chinese)
[21] Chen G, Wang Q, Li H, et al. Experimental research on vertical straw cleaning and soil tillage device based on soil-straw composite model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 216: 108510.
[22] 郝展宏,沙野,米国华. 东北地区玉米秸秆覆盖技术应用现状与对策[J]. 玉米科学,2021,29(3):100 - 110.
Hao Zhanhong, Sha Ye, Mi Guohua. Application status and countermeasures of maize straw mulching technology in Northeast China[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(3): 100 - 110. (in Chinese)
[23] Li X, Zhang Y P, He H J, et al. Design and experiment of row cleaner with staggered disc teeth for no-till planter[J]. Agriculture, 2023, 13(7): 1373.
[24] Liu W H, Su Q, Fang M, et al. Parameters calibration of discrete element model for corn straw cutting based on Hertz - Mindlin with bonding[J]. Applied Sciences, 2023, 13(2): 1156.
[25] Zhang S L, Zhao H B, Wang X Z, et al. Discrete element modeling and shear properties of the maize stubble-soil complex [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107519.
[26] 赵淑红,赵国鹏,冷明新,等. 与深松铲互作锯齿式灭茬刀设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(4):151 - 162.
Zhao Shuhong, Zhao Guopeng, Leng Mingxin, et al. Design and experiment of sawtooth stubble-breaking blade interacting with subsoiling shovel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 151 - 162. (in Chinese)
[27] 姚文燕,赵殿报,徐广飞,等. 条带对行主动式玉米免耕播种防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):55 - 62,71.
Yao Wenyan, Zhao Dianbao, Xu Guangfei, et al. Design and experiment of active anti-blocking device for maize no-tillage seeding with strip row alignment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 55 - 62, 71. (in Chinese)
[28] 王韦韦,蔡丹艳,谢进杰,等. 玉米秸秆粉料致密成型离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报,2021,52(3):127 - 134.
Wang Weiwei, Cai Danyan, Xie Jinjie, et al. Parameter calibration of discrete element model for densification forming of maize straw powder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 127 - 134. (in Chinese)
[29] GB/T 20865—2017 免(少)耕施肥播种机[S].
[30] NY/T 1409—2025 玉米平作机械化保护性耕作技术规范[S].
[31] DB23/T 2678—2020 玉米秸秆覆盖条耕技术规程[S].