doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.23.016

基于推-抛-覆协同的条带免耕立式清秸装置优化设计与试验

陈桂斌[1,2]　张　震[1]　刘志杰[1,2]　杨福增[1,2]　刘正道[1,2]　黄玉祥[1,2]　王庆杰[3]

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;
2.农业农村部北方农业装备科学观测实验站,陕西杨凌 712100;3.中国农业大学工学院,北京 100083)

摘要:针对东北黑土区条耕作业时常因春秋大风导致已清理秸秆回移播种带,造成清秸效果差、地温提升慢和播种质量下降等问题,本文设计了一种基于推-抛-覆协同的立式清秸装置,通过清秸弹齿实现地表秸秆的推移与侧抛,将秸秆靶向输送至清秸挡板处,利用覆土耙齿在疏松种床土壤的同时将部分表土均匀覆盖至被清理秸秆上,实现秸秆定位。通过理论分析确定了清秸弹齿与覆土耙齿的关键结构与作业参数,其中弹齿弯折角为 160°,直径为 6 mm,扭簧有效圈数为 4.5,装置转速为 300 r/min;利用 RecurDyn 仿真确定了弹齿材料为琴钢丝,优化弹齿数为 6 组对称排布。为验证装置弹齿耐用性、结构和工作参数的合理性,以弹齿塑性变形量、清秸率和压土量为指标开展田间试验。结果表明:琴钢丝弹齿塑性变形量为 8.3 mm,远低于 82B 的 31.8 mm 和 65Mn 钢的 20.3 mm,装置清秸率为 97.1%,清秸宽度为 38.2 cm,覆土带内秸秆压土量为 1.19 kg/m^2,能够有效抑制大风引起的秸秆回移,上述参数满足设计需求。可为条耕技术在东北黑土区的推广应用提供有效的技术与装备支撑。

关键词:条带耕作;秸秆清理;立式清秸装置;运动学仿真;田间试验

中图分类号:S224.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)23-0171-10　　**OSID**:

Optimization Design and Experiment of Strip Tillage Vertical Straw Cleaning Device Based on Push – Throw – Cover Collaboration

Chen Guibin[1,2]　Zhang Zhen[1]　Liu Zhijie[1,2]　Yang Fuzeng[1,2]　Liu Zhengdao[1,2]　Huang Yuxiang[1,2]　Wang Qingjie[3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *Scientific Observing and Experimental Station of Agricultural Equipment for the Northern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
3. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of poor straw cleaning effect, slow increase of ground temperature, and decrease of sowing quality caused by spring and autumn gales in strip tillage operation in the black soil area of Northeast China, a vertical straw cleaning device based on push – throw – cover synergy was designed. Straw cleaning spring teeth realized the surface of the straw's movement and side throwing, and the straw was transported to the straw cleaning baffle. The straw was positioned using the soil covering rake teeth to cover part of the topsoil evenly on the cleaned straw while loosening the seedbed soil. The key structure and operation parameters of straw cleaning spring teeth and soil-covering rake teeth were determined by theoretical analysis. Among them, the bending angle of spring teeth was 160°, diameter was 6 mm, effective number of turns of torsion spring was 4.5, and the device speed was 300 r/min. RecurDyn simulation determined that the elastic teeth material was piano wire, and the number of elastic teeth was optimized to be six groups in a symmetrical arrangement. In order to verify the durability of spring-teeth, the rationality of structure and working parameters of the device, the field test was carried out with plastic deformation of spring-teeth, straw cleaning rate, and amount of soil pressure as indices. The results showed that plastic deformation of spring-teeth of piano wire was 8.3 mm, which was much lower than that of 82B material, 31.8 mm, and 65Mn steel, 20.3 mm. The straw cleaning rate

收稿日期:2025-08-21　修回日期:2025-09-03

基金项目:国家自然科学基金项目(32501807)、国家重点研发计划项目(2024YFD1500400)和陕西省重点研发计划项目(2025NC-YBXM-218)

作者简介:陈桂斌(1997—),男,副教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail:chenguibin@nwafu.edu.cn

通信作者:刘正道(1992—),男,副教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail:liuzd@nwafu.edu.cn

of the device was 97.1%, straw cleaning width was 38.2 cm, and amount of soil pressure in soil covering belt was 1.19 kg/m^2, which could effectively inhibit the straw returning caused by strong wind. The above parameters met the design requirements. The research results could provide adequate technical and equipment support for the popularization and application of strip tillage technology in the black soil area of Northeast China.

Key words: strip tillage; straw cleaning; vertical straw cleaning device; kinematics simulation; field test

0 引言

东北黑土区应用保护性耕作技术开展秸秆全量还田作业,能够培肥地力,提高土壤有机质含量,抑制黑土地退化[1-2]。条耕作业是提高免少耕播种质量的重要技术手段,但东北黑土区春秋季节条耕整地期间大风频发,极易将已清理的秸秆吹回到清秸带,造成播种条带秸秆回移、清秸效果差,出现播种条带地温提升慢,免耕播种质量差等问题[3-5]。

目前针对条带清秸防堵技术的研究主要以提高秸秆全量还田条件下播种带的清秸率为目标,清秸作业方式主要有驱动式和被动式两类[6-7]。其中,驱动式作业过程是通过旋耕刀、灭茬刀对播种带土壤和秸秆浅旋处理[8-9];被动式一次作业可同时完成破茬、清秸、松土、挤压覆土、镇压碎土等复合作业[10-11]。被动式清秸装置主要依靠切断方式实现破茬导流防堵,驱动式清秸装置将种床内的秸秆进行条混、粉抛、斜拨作业[12-13]。被动式在秸秆量较大的地表容易出现仿形适应性差、导流不畅、易出现堵塞问题,驱动式易发生切抛秸秆过程的土-秸混埋问题。国内外学者对条带清秸装置进行了相关研究,在土壤-秸秆-清秸部件间互作关系方面,张银平等[14]构建了麦秸-土壤模型,研究了动力补偿自适应装置的结构参数与运动参数;王韦韦等[15]建立了秸秆覆盖离散元模型,优化了仿生立式螺旋锯齿刀的驱动式秸秆移位防堵装置;Zhu 等[16]构建了旋耕刀辊-秸秆-土壤耦合的水稻田旋耕仿真模型;Tamas 等[17]建立了土层与作物根系耦合的仿真模型,并利用土壤耕作试验进行了验证;Ucgul 等[18]利用所标定的土槽离散元模型对犁耕、深松和旋耕等作业方式进行了系统研究。在条带耕作关键部件研究方面,王奇等[19]设计了星齿凹面盘式清秸防堵装置,基于秸秆-土壤模型优化了装置结构参数;黄玉祥等[20]针对免耕播种时作物残茬、杂草缠绕堵塞,设计了一种切茬导草组合式的防堵装置,实现驱动切茬和被动导草;齐鹏等[21]研究了缺口圆盘刀空间位置和机组作业速度对开沟质量的影响情况。上述研究为条带秸秆高效清理提供了一定的理论和技术支撑,但目前针对播种带内秸秆清理定位的相关研究匮乏,制约了条带耕作的进一步推广应用。

针对播种带内秸秆回移、清秸效果差等问题,本文优化设计一种基于推-抛-覆协同的立式清秸装置,旨在将秸秆定向移位清理的同时实现覆土定位,抑制秸秆回移。通过对清秸装置进行理论和仿真分析,得到其关键结构参数,通过弹齿耐用性测试,确定材料类型,在此基础上以清秸率和压土量为指标验证装置的田间作业效果,以期为条带耕作秸秆高效清理提供技术与装备支撑。

1 立式清秸装置结构及工作原理

1.1 整体结构

针对东北地区条耕整地期间大风频发,极易将被清理的秸秆吹回至清秸带,造成秸秆回移、清秸效果差等问题,设计立式清秸装置。装置的安装位置和主要结构如图 1 所示,其在作业过程中可安装于条带免耕有机肥条施机下侧或免耕播种机前方,配合机具完成条带耕整、免耕播种等作业环节。立式清秸装置主要由传动链轮、清秸弹齿、覆土耙齿、弹齿安装架、弹齿限位片等组成,弹齿固定在安装座上并由限位片进行限位,弹齿安装座通过螺栓连接固定于弹齿安装架。

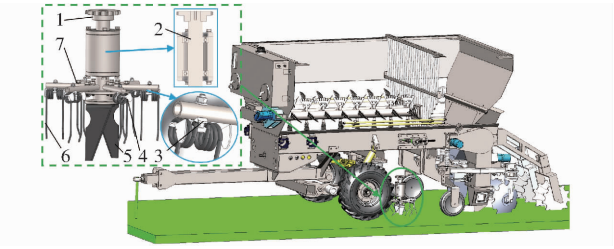


图 1 基于推-抛-覆协同的立式清秸装置结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of vertical straw cleaning device based on push - throw - cover collaboration

1. 传动链轮 2. 传动中心轴 3. 弹齿安装座 4. 弹齿限位片 5. 覆土耙齿 6. 清秸弹齿 7. 弹齿安装架

1.2 工作原理

如图 2 所示,待耕区域为秸秆全量还田地表,作业区域为秸秆的推移-侧抛-匀覆作业过程,已耕区域为装置作业效果。作业时拖拉机后输出轴利用万向节将动力传递至变速箱,后通过链传动将动力传递至中心轴处驱动清秸弹齿与覆土耙齿同步转动,清秸弹齿弯曲形变产生推移-侧抛动作驱使地表秸秆群靶向运移至清秸挡板处完成秸秆的定向清理,

覆土耙齿整备种床的同时将播种带内的部分表土匀覆至被清理秸秆群处完成秸秆的覆土定位。作业过程中装置推移-侧抛-匀覆各动作间耦合协同，实现被清理秸秆群的“靶向移定”。装置作业后清理出清秸带，并对播种带内的土壤进行疏松整备，以提高后续免耕播种质量。

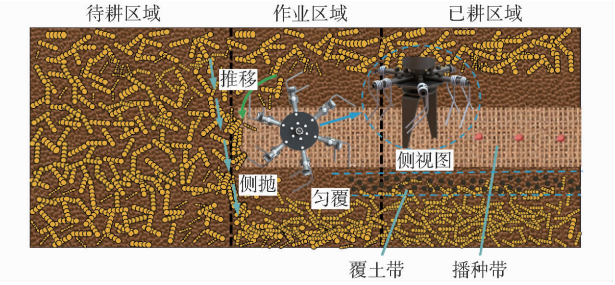


图 2　立式清秸装置作业原理图

Fig. 2　Working principle diagram of vertical straw cleaning device

2　关键部件设计

推-抛-覆清秸装置将地表秸秆高效清理至非播种带并均匀覆土，弹齿与耙齿对作业质量有直接影响，因此，本节对装置清秸弹齿与覆土耙齿进行结构与作业参数的优选设计。

2.1　清秸弹齿结构设计

清秸弹齿主要由扭簧和齿杆两部分组成，弹齿结构参数直接影响清秸作业质量和弹齿使用寿命。弹齿参数应满足将播种带内秸秆推抛至覆土带，在顺利完成秸秆脱附的基础上具备抗冲击能力，避免地表起伏和石块对弹齿的疲劳破坏。因此，需要对弹齿的结构参数和弹齿安装保护机构进行设计，其结构示意图如图 3 所示。

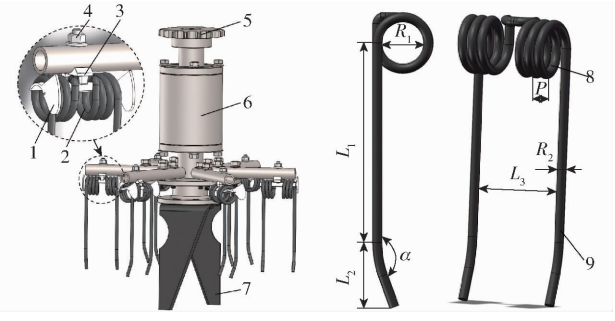


图 3　清秸弹齿结构示意图

Fig. 3　Structure schematics of spring-teeth of straw cleaning

1. 弹齿限位座　2. 清秸弹齿　3. 弹齿安装座　4. 定位螺栓　5. 传动链轮　6. 中心轴架　7. 覆土耙齿　8. 扭簧　9. 齿杆

弹齿接地总长决定安装架的离地高度，同时弹齿长度须大于秸秆覆盖层厚度，作业过程中弹齿弯折部位向地表秸秆施力，为使秸秆运动方向保持一致，减少秸秆间运移轨迹相互干涉，顺利实现推-抛-覆运动过程，弯折竖直投影长度必须大于秸秆覆盖厚度。基于田间试验测定的秸秆最大覆盖厚度 100 mm，设计弹齿接地总长 $l_1 = L_1 + L_2 = 164$ mm ≥ 100 mm，弯折部位竖直投影长度 L_2 为 40 mm。

弹齿根部弯折角可增加与地表秸秆的接触面积，促进秸秆推移-侧抛。弯折角过小易导致秸秆缠绕，弯折角过大则削弱弹齿穿透秸秆层能力。参照现有搂草机等装备的实际作业表现，弹齿弯折角度 α 设计为 160°[22-24]。秸秆粉碎还田后地表秸秆长度主要分布在 0 ~ 50 mm 区间内，未被完全粉碎的秸秆长轴最大直径均值为 36.4 mm。两弹齿中心间距过小易使秸秆横架齿间造成积堵，过大则造成齿间漏清，兼顾两者并考虑安装空间，两弹齿的中心间距 L_3 设计为 62 mm。

2.2　弹齿扭簧段参数设计

扭簧可保证弹齿具备更好的弹性和韧性，当作业中遇到石块或地表起伏导致扭矩过载时，扭簧通过弹性形变吸收冲击能量，防止弹齿损坏，并确保形变过程中始终保持对地表秸秆层紧密接触，持续有效清理秸秆[25]。

基于地表摩擦力、扭簧作用力和地表支持力开展受力分析，对扭簧结构参数进行设计。弹齿直径需满足

$$R_2 \geqslant \sqrt[3]{\frac{32\,(F_1^2 + f^2)^{\frac{1}{2}} l_1 K}{\pi \sigma_{Bp}}} \tag{1}$$

其中

$$K = \frac{4C-1}{4C-4} \qquad C = \frac{R_1}{R_2}$$

式中　K——扭簧曲度系数

σ_{Bp}——扭簧材料许用弯曲应力，MPa

C——扭簧旋绕比

R_1——扭簧内径，mm

R_2——弹齿直径，mm

F_1——地表支持力，N

f——地表摩擦力，N

l_1——弹齿接地总长，mm

如图 4 所示，清秸装置在田间作业过程中，清秸弹齿本体被地表顶升，扭簧所受载荷达到峰值，两根弹齿端部保持触地。此时，地表支持力 F_1 等于清秸弹齿安装构件与驱动机构的自重总和，F_1 为 95 N。

利用摩擦系数仪测得土壤滑动摩擦因数为 0.383，摩擦阻力 f 为 36.4 N；查找文献[26]得到碳素扭簧丝的抗拉强度为 1 320 ~ 1 420 MPa，许用弯曲应力 σ_{Bp} 取 0.8 倍抗拉强度，σ_{Bp} 取值为 1 056 MPa；选取扭簧内径 $R_1 = 29$ mm，为使结构紧凑旋绕比 C 取整为 6，经公式(1)计算得清秸弹齿直径 $R_2 \geqslant 5.7$ mm。

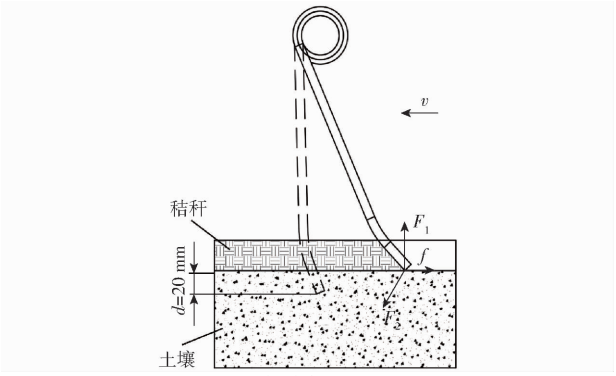


图 4 弹齿端部受力分析图

Fig. 4 Force analysis diagram at end of teeth

因此,最终选取弹齿直径 $R_2=6$ mm,确定扭簧节距 $P=7$ mm。扭簧有效圈数 m 过大时导致刚度降低,弹齿更易随地表起伏而变形,但会降低单圈扭矩载荷,达到保护作用,最终选取扭簧的有效圈数 $m=4.5$。

2.3 覆土耙齿结构设计

覆土耙齿为清秸装置的覆土机构,其结构参数对秸秆覆土定位性能存在显著影响。因此,为保证装置的种床整备和覆土质量,需要对耙齿结构参数进行设计。

采用双耙齿对称布置构型,耙齿在作业过程中围绕回转中心作定轴旋转运动,同时随整机沿前进方向平移,复合运动使土壤受到渐进式切割作用,实现种床整备和匀覆土。耙齿结构参数如图 5 所示,为保证耙齿强度,防止应力集中,其背侧设计弧形凹槽。综合考虑耙齿强度以及耙齿与弹齿的安装方式,确定耙齿的厚度为 8 mm,宽度为 53 mm,高度为 208 mm,耙齿侧面与安装面间的折弯角度为 90°。

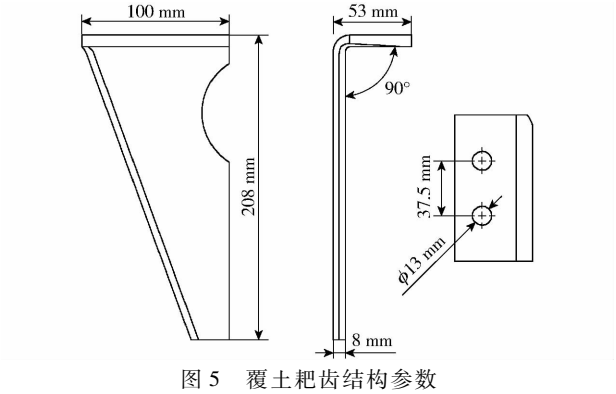


图 5 覆土耙齿结构参数

Fig. 5 Structural parameters of soil-covering rake teeth

2.4 弹齿清秸作业参数分析

弹齿的转速与前进速度是决定清秸装置作业性能的关键运动参数。当转速过低时,秸秆会在弹齿旋转作用下被带回到清秸带内,无法完成有效的清秸作业[27]。当前进速度过高时,弹齿对秸秆的作用时间缩短,导致推移-侧抛不充分,降低清秸率。因此,结合弹齿运动时端部中点的运动轨迹,如图 6 所示,对其关键作业参数进行分析。

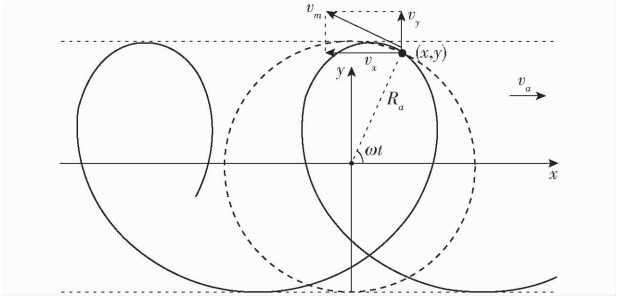


图 6 弹齿端部中点运动轨迹

Fig. 6 Movement trajectory of midpoint of action end of elastic teeth

假设弹齿运动轨迹上任意一点坐标为(x,y),以此建立其运动轨迹方程

$$\begin{cases} x = v_a t + R_a \cos(\omega t) \\ y = R_a \sin(\omega t) \end{cases} \tag{2}$$

式中 x——弹齿端部中点 x 方向坐标,m

y——弹齿端部中点 y 方向坐标,m

ω——清秸弹齿回转角速度,rad/s

v_a——装置前进速度,m/s

R_a——弹齿回转半径,m

t——装置运动时间,s

对式(2)进行微分,得到弹齿端部中点速度与时间的运动方程为

$$\begin{cases} v_x = v_a - R_a \omega \sin(\omega t) \\ v_y = R_a \omega \cos(\omega t) \end{cases} \tag{3}$$

式中 v_x——x 方向的水平分速度,m/s

v_y——y 方向的竖直分速度,m/s

弹齿端部中点绝对速度 v_m 为

$$v_m = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_a^2 + R_a^2\omega^2 - 2R_a\omega v_a \sin(\omega t)} \tag{4}$$

当弹齿端部中点坐标 y 值最大时,弹齿端部中点线速度方向与清秸装置前进速度方向相反,此时绝对速度 v_m 最小,为 $|R_a\omega - v_a|$。弹齿端部中点的线速度大于 2 m/s 时,清秸效果较好,清秸装置前进速度取 6 km/h,可得清秸装置转速 n 最小值为 200 r/min。理论上当弹齿转速越大、前进速度越小时,对应的秸秆漏清面积越小。因此为保证较好的清秸效果,提高作业效率,设定装置前进速度为 6 km/h,转速为 300 r/min。

3 仿真分析

上述研究通过理论分析,确定了清秸装置的关键参数。为进一步优化弹齿组数梯度和材料类型,本节基于弹齿结构参数和清秸作业参数,结合物理

试验，使用 RecurDyn 软件进行仿真分析。

3.1　弹齿组数梯度优化设计

弹齿组数是平衡秸秆清理效率与装置成本的核心设计参数。增加弹齿组数可提高秸秆接触频率和增强秸秆扰动，提高效率。但组数过多会提高制造成本，加大结构复杂性。

本研究参考收获机割台拨禾轮弹齿的分布，综合考虑清秸装置生产制造成本、安装难易程度和作业效果，选择 4、5、6 组弹齿。根据第 2 节理论分析结果，设定前进速度为 6 km/h，转速为 300 r/min，仿真时长为 0.4 s，通过 RecurDyn 仿真分析秸秆清理轨迹，得到其运动轨迹线如图 7 所示。结果表明，弹齿和耙齿的运动轨迹均为余摆线，弹齿旋转时端点的水平分速度与机器前进方向相反，弹齿能够向后抛运秸秆，耙齿能够向后切削土壤，满足清秸装置的基本作业需求。

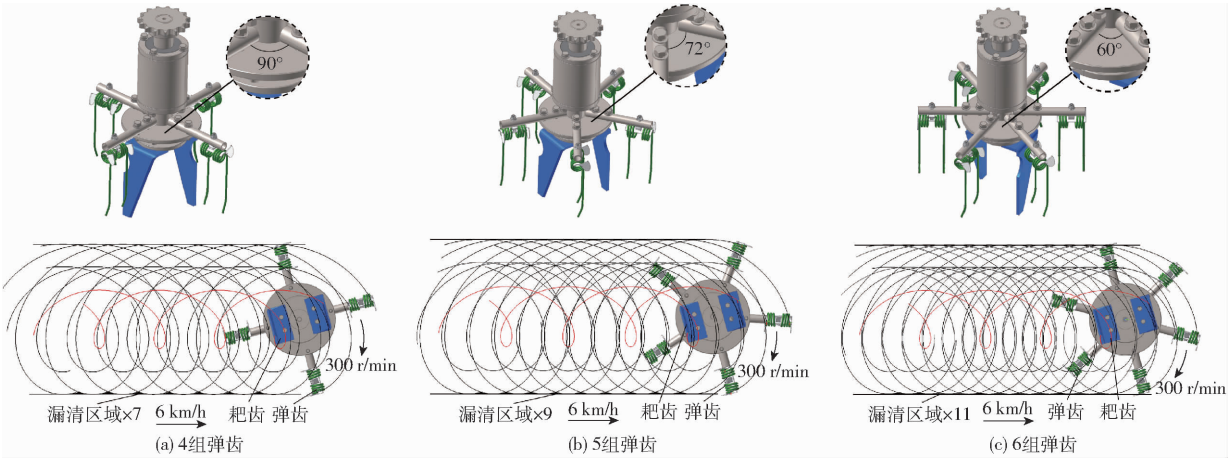


图 7　弹齿与耙齿运动轨迹线

Fig. 7　Motion trajectory line of elastic teeth and rake

为提高清秸率，图 8 中漏清区域 *ABC* 的面积应尽量小。通过弹齿轨迹上各点坐标，根据轨迹最低点和交点的坐标可计算得出漏捡宽度 d_m 和漏捡距离 l_m。

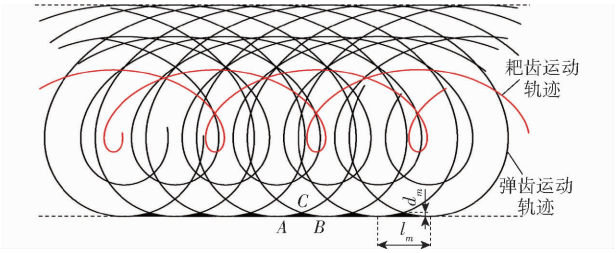


图 8　漏捡区域分析图

Fig. 8　Analysis diagram of missed detection area

漏捡区域 *ABC* 可近似为三角形，通过计算得到，4、5、6 组弹齿配置下漏捡宽度 d_m、漏捡距离 l_m 和漏捡区域面积 S，如表 1 所示。

表 1　漏捡区域参数

Tab. 1　Parameters of missed detection area

弹齿组数	漏捡宽度 d_m/mm	漏捡距离 l_m/mm	漏捡区域面积 S/mm²
4	2.9	83.4	1 693.0
5	1.8	66.6	1 078.9
6	0.9	52.9	523.7

通过对比分析得到 6 组弹齿漏清面积相较 4 组和 5 组分别下降了 69.1%、51.5%，考虑漏清区域的面积应尽量小以及装置的对称性和受力均衡性，最终弹齿组数选用 6 组对称排布。

3.2　弹齿材料参数标定

弹齿材料要求具有足够的强度和刚度以及良好的弹性恢复能力。频繁更换弹齿会增加使用成本，降低作业效率，选择更耐用的材料可显著降低维护成本。

3.2.1　仿真模型参数标定

82B、65Mn 钢和琴钢丝是较为常见的弹齿材料，三者均属于高碳钢范畴，具备较高的强度、硬度和弹性极限。为选取最优材料，本研究基于万能材料试验机和 RecurDyn 软件，进行齿杆弯曲物理与仿真试验，对比分析 82B、65Mn 钢和琴钢丝 3 种材质。

根据钢材各向同性性质，在 RecurDyn 建立弹齿有限元柔性体模型时，使用弹性/各向同性材料进行建模，以物理试验中齿杆受压变形的位移与载荷结果为响应值，对不同材料的弹齿模型参数进行标定。试样截面直径 d_c 为 6 mm。测量弹齿与下压探头的静摩擦因数为 0.284，动摩擦因数为 0.178。

齿杆弯曲物理试验的载荷-位移曲线如图 9 所示，通过曲线可得到曲线线性变化阶段斜率，进而弹性模量为

$$E=\frac{32S_0a^2(3L-a)}{3\pi d_c^4} \tag{5}$$

式中　E——弹性模量，MPa

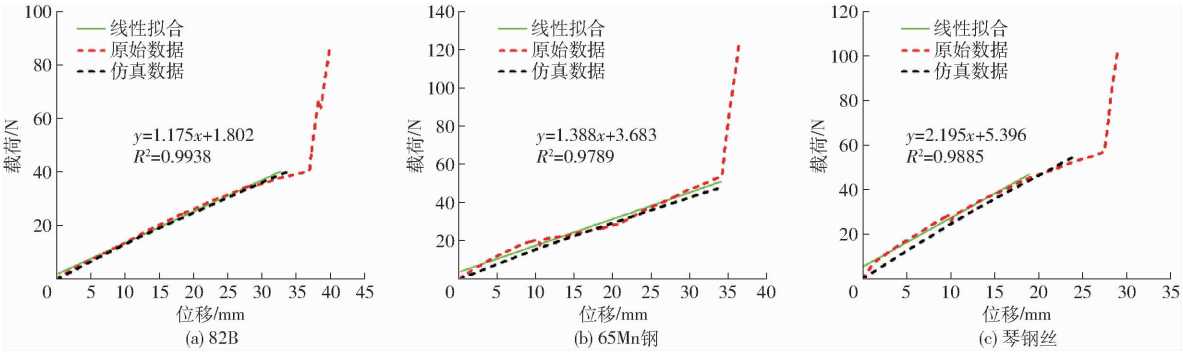


图 9 载荷-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves

S_0——载荷-位移曲线线性段斜率,N/mm

L——悬臂梁总长度,mm

a——固定端到加载点的距离,mm

d_c——截面直径,mm

将该曲线线性变化阶段斜率,代入式(5)中得到 82B、65Mn 钢和琴钢丝 3 种材质的弹性模量分别为 62 014.8、73 256.6、115 848.9 MPa。

3.2.2 弹齿弯曲仿真

材料的阻尼比常数是影响弹齿力学行为的关键参数之一,然而阻尼比难以通过试验直接获取,通过标定试验获取阻尼比常数具有一定的容错性,能够补偿仿真模型中其他参数造成的误差[28]。将上述齿杆弯曲试验理论分析得到的弹性模量代入 RecurDyn 软件中的弹齿模型,并以齿杆弯曲试验相同条件建立齿杆弯曲仿真试验模型,如图 10 所示。通过试错法,确定以单元类型 solid10 和阻尼比 0.001 建立弹齿柔性体模型,将最大元素设为 3,最小元素设为 0.5,构建的模型含有 14 989 个计算节点和 7 717 个单元,最后得到弹齿仿真与物理试验的载荷-位移曲线,准确标定材料模型的单元类型和阻尼比,可较好地表征弹齿形变行为。

试验结果表明,琴钢丝弹性模量比 65Mn 钢高 58.1%,比 82B 高 86.8%,表明在同等载荷条件下,琴钢丝发生的弹性变形更小,强度更高,能更有效地传递作用力,提升秸秆清理的效率。同时,琴钢丝较高的弹性模量可确保其在高频往复作业中迅速恢复形变,保证清秸装置作业的持续稳定性。此外,琴钢丝兼具优异的强度与良好的韧性,既保证了清理秸秆所需的强度,又提高了对复杂田间工况的适应能力。因此,选用琴钢丝为弹齿材料。

3.2.3 弹齿应力分析

为分析作业过程中弹齿的受力状态,选取琴钢丝弹齿进行分析,设置云图颜色显示范围为 0~400 MPa,分别截取下压位移为 10、20、30 mm 时的弹齿受力有限元云图进行分析,如图 11 所示。

根据弹齿受力云图可以得,当齿杆受压时,应力

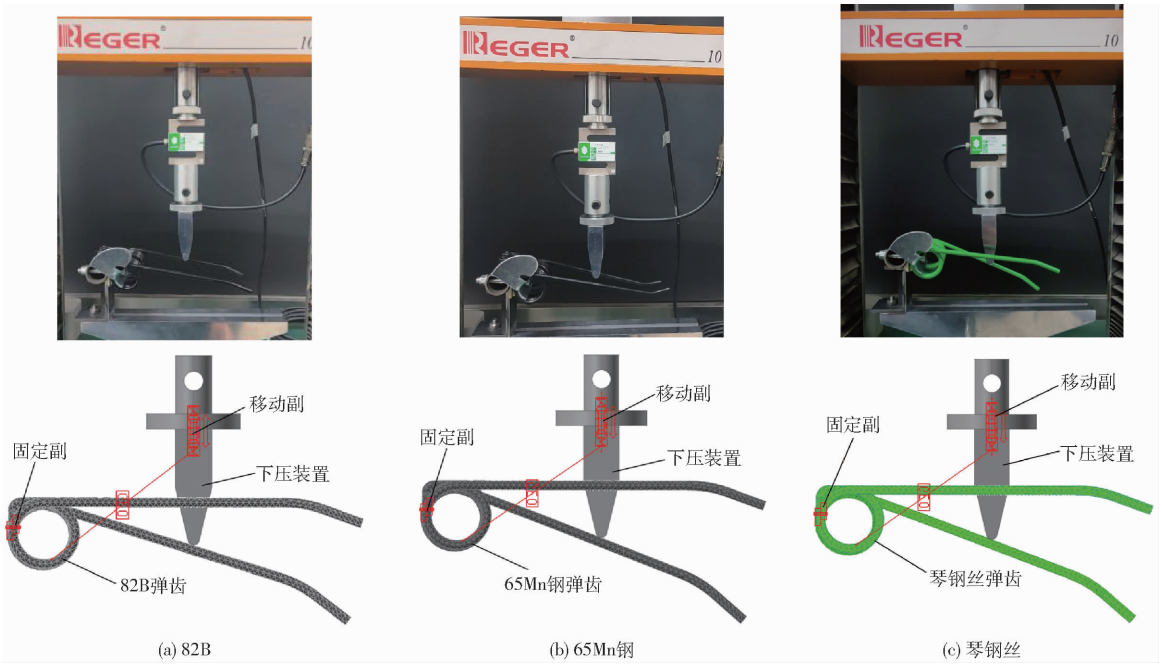


图 10 物理试验和仿真试验

Fig. 10 Physical experiments and simulation experiments

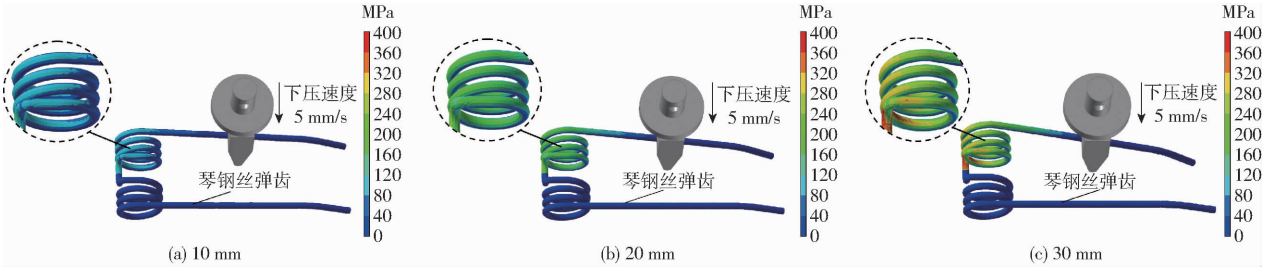


图 11　弹齿受力云图

Fig. 11　Cloud diagrams of force on elastic teeth

主要集中于扭簧部位，当齿杆下压到一定程度时，弹齿固定处出现应力集中，且扭簧内外圈远离齿端的一侧相较于扭簧其他部位所受应力更大。因此，在弹齿安装过程中定位螺栓材料应选用经过热处理的高强度螺栓。

4　田间试验

为验证所设计的推-抛-覆协同立式清秸装置的田间作业性能，于山东天盛机械科技股份有限公司试验地和辽宁省新民市公主屯镇中国农业大学保护性耕作试验田内分别开展了弹齿耐用性测试和田间验证试验。

4.1　不同类型弹齿耐用性测试

如图 12a～12c 所示，在天盛机械有限公司试验场地内人工铺设秸秆使其秸秆覆盖量达到 1.2 kg/m^2，试验地土壤类型为壤土，试验所用秸秆含水率为 7.6%，土壤含水率为 12.5%，使用雷沃欧豹 M1004 型拖拉机输出动力，通过传动链轮为立式清秸装置提供动力，装置转速为 300 r/min，控制机具前进速度为 6 km/h。



图 12　不同类型弹齿耐用性测试过程

Fig. 12　Durability testing process of different types of elastic teeth

试验弹齿所用材料分别为 82B、65Mn 钢、琴钢丝 3 种材质，试验中将不同类型弹齿按相同材质每 6 个划分一组，将其固定于弹齿安装架上进行田间耐用性测试。测试时拖拉机牵引机具，使每种类型弹齿累计清秸长度均为 100 m（图 12d），作业完成后开展时长为 60 min 的模拟田间作业的转动测试试验。

试验完成后以弹齿齿杆偏离原位置的最大塑性变形量（ΔL）为评价指标，对不同类型弹齿的耐用性进行评价，测试弹齿变形量如图 12e 所示。其变形量计算式为

$$\Delta L = (L_a + L_b)/2 \tag{6}$$

式中　L_a——弹齿 a 作用端变形量，mm

L_b——弹齿 b 作用端变形量，mm

3 组弹齿的平均形变量对比如图 13 所示，测试结果表明，82B 弹齿平均变形量为 31.8 mm，65Mn 钢弹齿平均变形量为 20.3 mm，琴钢丝弹齿平均变形量为 8.3 mm。琴钢丝材料弹齿相较于 82B 和 65Mn 钢弹齿变形量分别减少 23.5 mm 和 12 mm。田间测试结果表明，琴钢丝材料弹齿的变形量较小，耐用性更好，能够适用于东北地区大地块长时间作业需要。因此，在后续东北黑土区秸秆清理田间测试过程中选用琴钢丝材料弹齿，可有效提升装置的耐用性和作业效果。

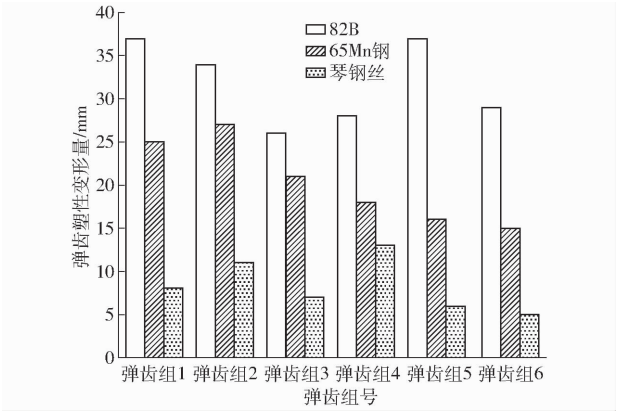


图 13　不同类型弹齿塑性变形量

Fig. 13　Plastic deformation amounts of different types of elastic teeth

4.2　装置性能测试试验

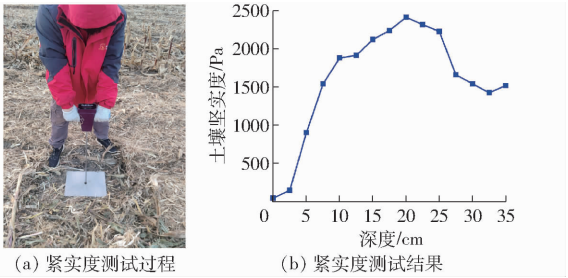
为验证所设计推-抛-覆协同的立式清秸装置结

构参数的合理性和田间作业性能,在弹齿材料选用琴钢丝基础上开展田间测试试验。

4.2.1 试验仪器与试验地

试验地秸秆覆盖量为 1.5 kg/m^2,秸秆含水率为 9.1%,0~25 cm 土壤含水率为 15.6%。试验过程中使用瑞得 RD2104 型拖拉机牵引机具作业并由后输出轴为清秸装置提供动力。其他试验仪器为电子秤、密封袋、卷尺和卡尺、SC900 型 Cone-index 土壤紧实度仪、50 cm×50 cm 框架和 ϕ50.46 mm×50 mm 取土环刀。

如图 14a 所示,使用土壤紧实度仪测量 3 个不同位置的黑土层土壤,取平均值。试验结果表明(图 14b),在 0~20 cm 处随着探针深度增加,土壤紧实度增加,在土壤表层 0~10 cm 内增加尤为明显。依据测量结果,可判断在 20~25 cm 有犁底层存在,清秸装置作业深度为 15 cm,因此,作业过程不会触碰犁底层,耙齿使用螺栓连接强度满足要求。



(a) 紧实度测试过程 (b) 紧实度测试结果

图 14 土壤紧实度测试过程与测试结果

Fig. 14 Process and results of soil compaction test

4.2.2 试验过程与结果

试验过程如图 15a 所示,琴钢丝弹齿安装位置如图 15b 所示,试验时机具的作业速度控制在 6 km/h,清秸作业试验长度均为 100 m。选取试验区作业已耕区域两段 10 m 长度范围作为采样区,间隔 1 m 取样一次,两清秸条带内共计 20 个取样点。

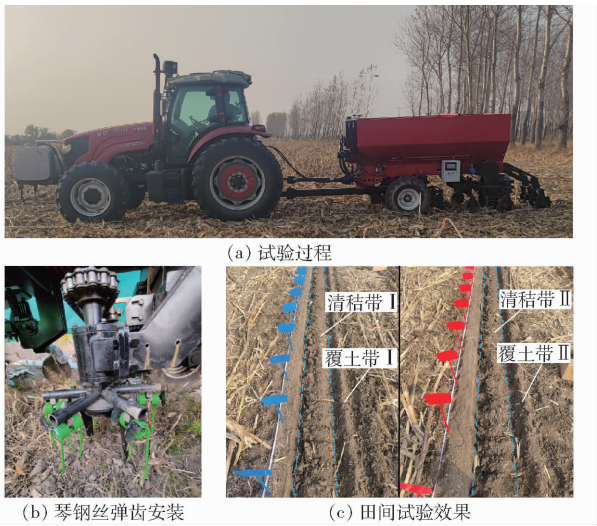
装置作业时秸秆与表土进行单侧推-抛-覆,清秸带的秸秆清理效果测量方法为使用卷尺测量清秸宽度,以条带中心宽度 35 cm、长度 50 cm 的范围内计算残留在清秸条带的秸秆量,并对其进行称量,清秸带的清秸率 Q_j 计算式为

$$Q_j = \frac{Q - Q_l}{Q} \times 100\% \tag{7}$$

式中 Q——作业前秸秆总质量,g

Q_l——作业后秸秆残留质量,g

覆土带内秸秆压土量测量方法为在清秸带取样点覆土位置一侧将压土量的测量区划分为长度 20 cm、宽度 15 cm 的小区,共计 20 个测量小区。通过对比作业前后覆土带内土壤质量的增加量,计算得到每平方米的秸秆压土量,计算式为



(a) 试验过程

(b) 琴钢丝弹齿安装 (c) 田间试验效果

图 15 田间试验过程与试验效果

Fig. 15 Field experiment process and experiment effect

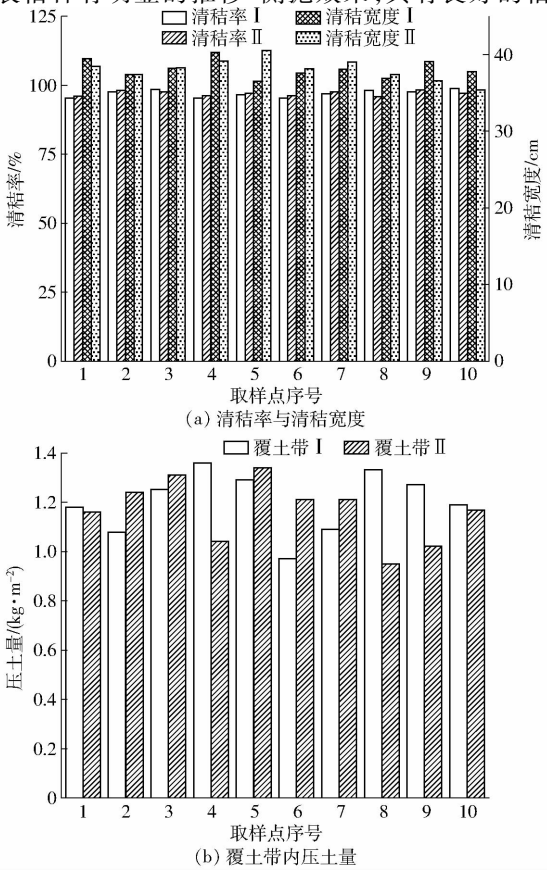
$$Q_t = \frac{Q_a}{A} \tag{8}$$

式中 Q_t——覆土带秸秆压土质量,kg/m^2

Q_a——覆土带土壤增加质量,kg

A——覆土带测量面积,m^2

装置田间试验效果如图 15c 所示,清秸带Ⅰ和清秸带Ⅱ的清秸率平均值为 97.1%,清秸宽度均值为 38.2 cm,如图 16a 所示。试验结果表明,装置对地表秸秆有明显的推移-侧抛效果,具有良好的秸秆



(a) 清秸率与清秸宽度

(b) 覆土带内压土量

图 16 田间试验结果

Fig. 16 Field experiment results

清理能力，作业后播种带内地表秸秆量有效降低，可避免后续免耕播种过程秸秆堵塞，满足免少耕播种时秸秆清理要求。

压土量测试结果如图 16b 所示，覆土带Ⅰ和覆土带Ⅱ的压土量均值为 1.19 kg/m^2，清秸装置作业后对清理后的秸秆具有良好的匀覆土效果，作业时能够将部分表土有效匀覆到清理后的秸秆层上，避免秸秆因大风吹回播种带。

5　结论

（1）针对东北黑土区春秋大风导致已清理秸秆回移播种带的问题，设计了一种基于推-抛-覆协同的立式清秸装置，该装置通过清秸弹齿实现秸秆定向推移-侧抛，结合覆土耙齿同步完成种床整备与秸秆覆土定位，能够有效抑制大风导致的秸秆回移。

（2）通过理论分析，设计弹齿弯折角为 160°，直径为 6 mm，扭簧有效圈数为 4.5，接地长度为 164 mm；利用 RecurDyn 仿真优化，确定弹齿采用琴钢丝材料，弹性模量比 65Mn 钢高 58.1%，对弹齿组数梯度优化设计，得到 6 组对称弹齿布局，漏清面积降至 523.7 mm^2，较 4 组减少了 69.1%。

（3）田间试验结果表明，琴钢丝材料可使弹齿塑性变形量降低至 8.3 mm，相较于 82B 和 65Mn 钢分别减少 23.5 mm 和 12 mm；装置清秸率为 97.1%，清秸带宽度为 38.2 cm，秸秆压土量为 1.19 kg/m^2，具有良好的清秸覆土效果，满足设计要求。

参　考　文　献

[1] 敖曼，张旭东，关义新. 东北黑土保护性耕作技术的研究与实践[J]. 中国科学院院刊，2021，36(10)：1203－1215.
Ao Man，Zhang Xudong，Guan Yixin. Research and practice of conservation tillage in black soil region of northeast China[J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences，2021，36(10)：1203－1215.（in Chinese）

[2] 蒋发辉，钱泳其，郭自春，等. 基于 Meta 分析评价东北黑土地保护性耕作与深耕的区域适宜性：以作物产量为例[J]. 土壤学报，2022，59(4)：935－952.
Jiang Fahui，Qian Yongqi，Guo Zichun，et al. Evaluating the regional suitability of conservation tillage and deep tillage based on crop yield in the black soil of northeast China：a Meta-analysis[J]. Acta Pedologica Sinica，2022，59(4)：935－952.（in Chinese）

[3] 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 of no/minimum tillage corn seeding technology and machine in northeast black land of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(10)：1－15.（in Chinese）

[4] 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）

[5] 陈桂斌，卢彩云，何进，等. 秸秆条带捡拾粉碎深埋装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(10)：16－27.
Chen Guibin，Lu Caiyun，He Jin，et al. Design and experiment of straw pickup-crushed and deep buried device under strip-tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(10)：16－27.（in Chinese）

[6] 王星，张颖，付闯，等. 大型净作精播机配套折叠式种床整备装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(4)：174－185，240.
Wang Xing，Zhang Ying，Fu Chuang，et al. Design and experiment of front straw clearing and blocking device for wide conventional planters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(4)：174－185，240.（in Chinese）

[7] 史乃煜，陈海涛，王星，等. 弹齿式清秸装置防止残茬回带机构设计与试验优化[J]. 农业机械学报，2019，50(4)：84－91.
Shi Naiyu，Chen Haitao，Wang Xing，et al. Design and experiment optimization of prevent bring back stubble mechanism of spring-tooth type cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(4)：84－91.（in Chinese）

[8] Hou S Y，Zhu Y F，Zhu X X，et al. Design and experiment of a straw clearing mulching no-tillage planter[J]. Biosystems Engineering，2022，221：69－80.

[9] 史乃煜，陈海涛，叶俊宏，等. 华东稻麦轮作区立旋自走电驱动式定角度清秸机设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(8)：127－137.
Shi Naiyu，Chen Haitao，Ye Junhong，et al. Design and experiment of vertical rotating self-propelled fixed-angle straw cleaning machine in east China rice and wheat crop rotation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(8)：127－137.（in Chinese）

[10] 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）

[11] 王雪松. 清秸深松组合式条带耕作机的设计与试验[D]. 北京：中国农业大学，2021.
Wang Xuesong. Design and experiment of combined strip cultivator with straw cleaner and subsoiler[D]. Beijing：China

Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[12] 张仕林, 黄玉祥, 赵宏波, 等. 切抛组合式小麦宽幅沟播破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 antiblocking device for wide-seedbed seeding of wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 40 - 52. (in Chinese)
[13] 陈海涛, 高伟, 王星, 等. 玉豆带状复合种植免耕精量播种覆秸一体机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(4): 202 - 212, 223.
Chen Haitao, Gao Wei, Wang Xing, et al. Design and experiment of integrated machine for no-till precision seeding and straw mulching for corn and soybean strip compound planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 202 - 212, 223. (in Chinese)
[14] 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)
[15] 王韦韦, 朱存玺, 陈黎卿, 等. 玉米免耕播种机主动式秸秆移位防堵装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 10 - 17.
Wang Weiwei, Zhu Cunxi, Chen Liqing, et al. Design and experiment of active straw-removing anti-blocking device for maize no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 10 - 17. (in Chinese)
[16] Zhu D Q, Shi M H, Yu C Y, et al. Tool-straw-paddy soil coupling model of mechanical rotary-tillage process based on DEM - FEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108410.
[17] Tamas K, Bernon L. Role of particle shape and plant roots in the discrete element model of soil-sweep interaction[J]. Biosystems Engineering, 2021, 211: 77 - 96.
[18] Ucgul M, Saunders C, Li P L, et al. Analyzing the mixing performance of a rotary spader using digital image processing and discrete element modelling (DEM)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 151: 1 - 10.
[19] 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 automatic width control row cleaners[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 25 - 35. (in Chinese)
[20] 黄玉祥, 高鹏洋, 张庆凯, 等. 免耕播种机切茬导草组合式草土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 67 - 78.
Huang Yuxiang, Gao Pengyang, Zhang Qingkai, et al. Design and experiment of grass soil separation device with combination of stubble cutting and grass guiding used for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 67 - 78. (in Chinese)
[21] 齐鹏, 高富强, 邱立春. 基于 Abaqus 的缺口圆盘刀开沟作业有限元仿真及分析[J]. 农机化研究, 2016, 38(9): 64 - 68, 73.
Qi Peng, Gao Fuqiang, Qiu Lichun. The finite element analysis and simulation of the gap disc trenching based on Abaqus[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(9): 64 - 68, 73. (in Chinese)
[22] 梅方炜, 张志毅, 李旭东, 等. 果园秸秆覆盖机弹齿式解捆防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 25 - 34.
Mei Fangwei, Zhang Zhiyi, Li Xudong, et al. Spring-tooth type unbaling anti-blocking device for orchard straw mulching machine[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(11): 25 - 34. (in Chinese)
[23] 安晶, 李聪, 刘小福, 等. 牧草秸秆捡拾装置设计[J]. 林业机械与木工设备, 2021, 49(4): 70 - 75.
An Jing, Li Cong, Liu Xiaofu, et al. Design of forage straw pickup device[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2021, 49(4): 70 - 75. (in Chinese)
[24] 王泽云, 郭志平, 武文亮, 等. 水平旋转式搂集装置弹齿静力学分析与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(12): 8 - 14, 21.
Wang Zeyun, Guo Zhiping, Wu Wenliang, et al. Dynamic analysis and test of elastic teeth in horizontal rotary assembly[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(12): 8 - 14, 21. (in Chinese)
[25] 曹鑫鹏, 王庆杰, 李洪文, 等. 主动旋转集行式清秸装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 26 - 34.
Cao Xinpeng, Wang Qingjie, Li Hongwen, et al. Design and experiment of active rotating collective straw-cleaner[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(6): 26 - 34. (in Chinese)
[26] GB/T 23935—2009 圆柱螺旋弹簧设计计算[S].
[27] Chen G B, Wang Q J, Li H W, 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.
[28] 沈聪聪, 马帅, 谭好超, 等. 基于多柔体动力学的葡萄挑藤机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(16): 24 - 33.
Shen Congcong, Ma Shuai, Tan Haochao, et al. Parameter optimization and experiment of grapevines picking-up mechanism using multi-flexible-body dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(16): 24 - 33. (in Chinese)