

免耕播种机侧向清秸覆秸秸秆比例回收装置设计与试验

陈海涛 邹 震 王 星 史乃煜 韩广新 侯守印

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为解决中国麦玉豆主产区在利用秸秆促进作物绿色增产增效、保护耕地的同时,轻简化回收多余秸秆促进其资源化利用等问题,基于原茬地免耕精量播种机侧向清秸覆秸原理,设计了一种秸秆比例回收装置,借助秸秆被免耕播种机播前清理具有的机械能使其沿导流板滑移至机械能耗尽,弹齿“顺势”将其抛送至挤压装置进行回收。应用高速摄像技术探明了秸秆侧向抛撒运动规律,通过理论分析确定了影响装置工作性能的关键结构与作业参数及其取值范围,并采用三因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验方法,以作业速度、滚筒转速和弹齿偏角为试验因素,以秸秆回收比率和含杂率为评价指标,实施参数组合优化试验,结果表明:在参数组合为作业速度 5.4 ~ 7.2 km/h、滚筒转速 95 r/min、弹齿偏角 49°时,秸秆回收比率大于 94%、含杂率小于 5%。研究结果为研制原茬地免耕播种秸秆覆盖还田同步比例回收复式作业机提供了理论和技术支持。

关键词: 免耕播种; 玉米秸秆; 清秸覆秸; 比例回收装置

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)04-0120-10 OSID: 

Design and Experiment of Straw Proportional Recovery Device for Clearing and Covering Straw of No-tillage Planter

CHEN Haitao ZOU Zhen WANG Xing SHI Naiyu HAN Guangxin HOU Shouyin

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

Abstract: To solve the problem of recycling surplus straw in a lightened and simplified way and promote its resource utilization, as well as using crop straw to increase crop yield and benefit and protect arable land in main producing areas of wheat-maize-soybean in China, a straw proportion recovery device was designed based on principle of lateral straw clearing and covering of no-tillage precision planter applied in original stubble field. Using the mechanical energy of the lateral casting of straw by no-tillage planter to efficiently clean and recycle the excess straw. The straw lateral throwing movement rule was proven by applying high-speed camera technology, the key structure and operation parameters influencing performance of device and their value range were determined by theoretical analysis. Three factors five levels quadratic regression orthogonal rotary center combination experiment method was applied to carry out parameters combination optimization experiment with operation speed, drum rotating speed and spring-tooth deviation angle as experimental factors, and straw recycling rate and impurity content as the evaluation indexes. The results showed that the primary and secondary order of influencing factors on straw recovery ratio was working speed, spring tooth deviation angle and drum speed, and the primary and secondary order of influencing factors on impurity ratio was spring tooth deviation angle, working speed and drum speed. When operation speed was 5.4 ~ 7.2 km/h, drum rotation speed was 95 r/min, and spring-tooth deviation angle was 49°, straw recycling rate was more than 94% and impurity content was less than 5%. The results provided theoretical and technical support for the development of the simultaneous proportional recovery compound machine for no-tillage seeding and straw mulching.

Key words: no-tillage seeding; corn straw; clear and cover straw; proportional recovery unit

收稿日期: 2021-04-17 修回日期: 2021-05-10

基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(GARS-04)和国家重点研发计划项目(2018YFD0201004)

作者简介: 陈海涛(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业装备及生物质材料研究,E-mail: htchen@neau.edu.cn

通信作者: 侯守印(1986—),男,高级工程师,主要从事旱作农业装备研究,E-mail: houshouyin.cn@163.com

0 引言

秸秆覆盖还田技术是保护性耕作的重要组成部分,具有蓄水保墒、培肥地力、提高作物产量等优点^[1-4]。其中,秸秆覆盖量作为秸秆覆盖还田技术的关键,对作物生长、土壤微生物活性等均具有显著影响^[5-7]。现有研究表明^[8-11],统一采用秸秆全量还田并非最佳方式,根据不同耕地的土质和积温等情况将秸秆以适宜的比例进行覆盖还田,有利于作物增产、耕地有机状况改善。

国内外学者开展了大量秸秆回收技术相关研究^[12-15],而关于秸秆比例回收相关技术未见报道。为实现免耕播种秸秆覆盖还田同步回收多余秸秆,陈海涛团队^[16-17]建立了秸秆侧抛动力学模型,为秸秆同步回收装置的设计提供了理论依据,同时,探明了调控挡板参数对秸秆还田比例的影响规律,实现了秸秆覆盖还田比例的调控。已有研究集中于秸秆还田比例调控上,对秸秆同步回收技术仍需进一步深化研究。

本文在前期研究的原茬地免耕精量播种机^[18-19]和秸秆调比还田装置^[17]的基础上,为满足秸秆还田量和综合利用的技术要求,利用秸秆被侧向抛撒具有的机械能进行多余秸秆的高效清洁回收,设计一种秸秆比例回收装置。通过理论分析确定关键部件的结构与工作参数及其取值范围,同时应用三因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验方法进行参数组合优化,以期为免耕播种秸秆覆盖还田同步比例回收复式作业机具的研制提供理论和技术支持。

1 结构与工作原理

1.1 总体结构与工作原理

原茬地免耕精量播种机(以下简称免耕播种机)增设秸秆比例回收装置(以下简称回收装置)总体方案如图 1a 所示,主要由挤压装置、清秸装置、回收装置、调控挡板、限深地轮 5 部分组成。

免耕播种机侧向清秸覆秸原理如图 1b 所示,免耕播种时清秸装置将作业幅宽地表秸秆侧向清除并抛撒至相邻作业幅宽待播地表,实现播前秸秆清理构建优质种床,回程时将前程作业侧向抛撒的秸秆抛送回前程已播作业幅宽地表,同时实现本作业幅宽播前侧向清秸和前程作业幅宽的播后覆秸。本文基于免耕播种机侧向清秸覆秸原理,利用调控挡板设置回收口的方式将清秸装置侧向抛撒秸秆分流为还田秸秆和多余秸秆两部分,还田秸秆与调控挡板发生碰撞后均匀覆盖于相邻作业幅宽已播地表,多

余秸秆借助其被清秸刀侧向抛撒的机械能经回收装置输送至挤压装置。从而,实现秸秆比例覆盖还田和多余秸秆同步回收。

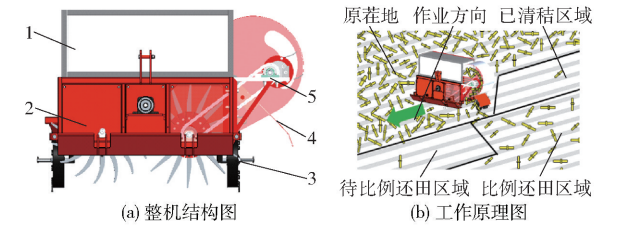


图1 原茬地免耕播种覆秸同步秸秆比例回收作业机结构示意图

Fig.1 Schematics of synchronous straw recovery machine for no-tillage seeding in stubble field

1. 挤压装置 2. 清秸装置 3. 限深地轮 4. 调控挡板 5. 回收装置

1.2 秸秆比例回收装置结构与工作原理

回收装置结构如图 2a,主要由导流板、弹齿、输送机构、传动部件等组成。工作原理如图 2b 所示,多余秸秆经调控挡板回收口进入回收装置,利用清秸刀将秸秆侧向抛撒的机械能沿导流板滑移,清秸装置仅将秸秆进行侧向等幅宽抛撒^[18],致使秸秆拥有的机械能无法使其沿导流板滑移进入挤压装置,在图示位置形成秸秆堆积。设置输送机构,采用弹齿滤除秸秆中混有的杂质并“顺势”将堆积的秸秆输送至挤压装置。

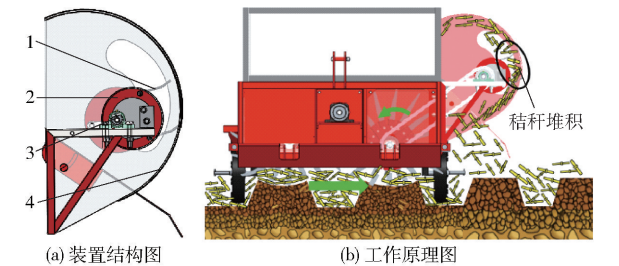


图2 回收装置结构及工作原理图

Fig.2 Recycling device structure and working principle diagrams

1. 弹齿 2. 输送机构 3. 传动部件 4. 导流板

2 关键部件设计

2.1 导流板设计

2.1.1 安装倾角分析

秸秆以导流板切线方向速度进入回收装置,可减小秸秆与导流板碰撞次数,充分利用秸秆被侧向抛撒的机械能。如图 3 所示,建立以清秸刀回转中心为原点的坐标系对秸秆侧向抛撒运动进行分析。并做出如下假设:秸秆为等密度物体,秸秆与清秸刀接触时初始速度为零,忽略清秸刀携运秸秆过程空气阻力对其的影响^[16]。

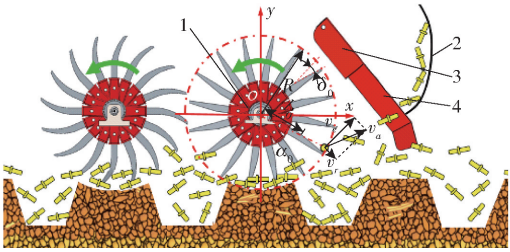


图 3 秸秆侧抛运动分析图

Fig. 3 Straw side casting force diagram

1. 清秸刀 2. 导流板 3. 调控挡板 4. 回收口

秸秆的速度方程为

$$\begin{cases} v_r = \left[\frac{\cos(\alpha_0 - \delta_0 + \varphi)g}{\cos\varphi} + \left(\frac{n\pi}{30} \right)^2 (\mu_1 R \sin\delta_0 + l_0) \right] t \\ v_e = \frac{n\pi}{30} R \end{cases} \quad (1)$$

式中 v_r ——秸秆沿刀刀相对运动速度, m/s
 v_e ——秸秆与清秸刀牵连速度, m/s
 α_0 ——初相位角, ($^\circ$)
 δ_0 ——清秸刀倾角, ($^\circ$)
 φ ——当量摩擦角, ($^\circ$)
 n ——清秸刀转速, r/min
 μ_1 ——清秸刀与秸秆摩擦因数
 R ——清秸刀回转半径, m
 l_0 ——秸秆初始位移, m
 t ——秸秆沿清秸刀滑移时间, s

秸秆脱离清秸刀绝对速度方程为

$$v_a = \sqrt{v_r^2 + v_e^2 - 2v_r v_e \sin\delta_0} \quad (2)$$

式中 v_a ——秸秆脱离清秸刀绝对速度, m/s

秸秆脱离清秸刀时速度与 x 方向夹角 θ 为

$$\theta = \alpha_0 + \zeta - \arctan \frac{v_r \cos\delta_0}{v_e - v_r \sin\delta_0} \quad (3)$$

其中 $\zeta = \frac{n\pi}{30} t_0$

式中 ζ ——秸秆抛出角, ($^\circ$)

t_0 ——秸秆与清秸刀接触至抛出时间, s

清秸刀将秸秆斜向抛出进入回收装置过程中受重力和空气阻力影响。因清秸刀厚度为 6 mm, 忽略清秸刀旋转对空气流动影响。秸秆脱离清秸刀后在空中速度方程^[16,20]为

$$\begin{cases} v_x = v_{x0} - \frac{k_x C_a P v_{x0}^2}{2m} t_1 \\ v_y = v_{y0} - k_y \left(g + \frac{C_a P v_{y0}^2}{2m} \right) t_1 \end{cases} \quad (4)$$

其中 $v_{x0} = \sqrt{v_r^2 + v_e^2 - 2v_r v_e \sin\delta_0} \cos\theta$

$v_{y0} = \sqrt{v_r^2 + v_e^2 - 2v_r v_e \sin\delta_0} \sin\theta$

式中 v_{x0} ——斜抛运动起始 x 方向速度分量, m/s

v_{y0} ——斜抛运动起始 y 方向速度分量, m/s

k_x ——秸秆 x 方向加速度修正因数

C ——阻力因数

m ——秸秆质量, kg

a_s ——秸秆平均特征面积, m^2

k_y ——秸秆 y 方向加速度修正系数

P ——空气密度, kg/m^3

t_1 ——秸秆脱离清秸刀后空中运动时长, s

秸秆在进入回收装置时与 x 方向夹角 γ 为

$$\gamma = \arctan \frac{2mv_{y0} - (2mg + C_a P v_{y0}^2) k_y t_1}{2mv_{x0} - k_x t_1 C_a P v_{x0}^2} \quad (5)$$

由式(5)可知, 在作业环境风阻因数、清秸刀结构和工作参数确定后, 秸秆进入回收装置速度方向与其脱离清秸刀速度相关。根据式(1)知在清秸刀结构和工作参数确定后, 秸秆脱离清秸刀速度与脱离初相位角、当量摩擦角、秸秆初始位移相关。如图 4 所示, 采用高速摄像进行未知参数标定。

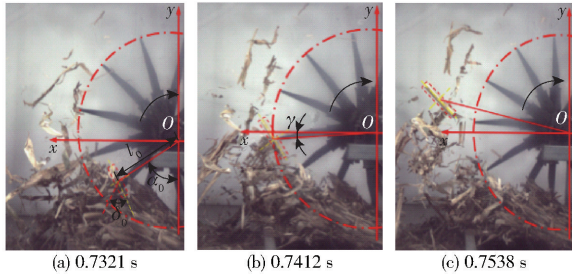


图 4 秸秆运动高速摄像图

Fig. 4 High-speed camera of straw movement

试验工况为: 玉米秸秆平均长度 386.3 mm, 含水率 30.1%, 清秸刀回转半径 370 mm、清秸刀倾角 13° 、刀轴转速 480 r/min。对秸秆质心进行标定获取了秸秆脱离初相位角为 $23^\circ \sim 34^\circ$ 、秸秆初始位移为 220 ~ 280 mm、当量摩擦角为 $18^\circ \sim 21^\circ$ 。将上述数据代入式(5)可知秸秆进入回收装置速度与 x 方向夹角为 $28.5^\circ \sim 40.4^\circ$ 。

导流板与调控挡板装配关系如图 5 所示, 根据文献[17]确定调控挡板与重力方向夹角 α 为 45° , 导流板起始位置切线与水平方向夹角 β 为 35° 。

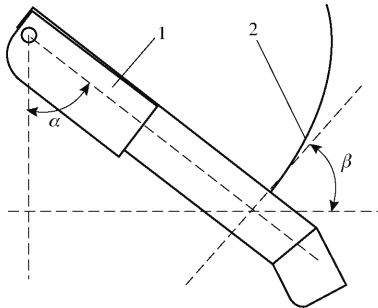


图 5 导流板与调控挡板装配图

Fig. 5 Assembly drawing of guide plate and control baffle

1. 调控挡板 2. 导流板

2.1.2 结构参数分析

为减小秸秆沿导流板滑移对其机械能的消耗,依据最速降线分簇性^[21]对导流板进行反向设计,即秸秆刚进入回收装置时速度较大,此时导流板轨迹较为平直,减小摩擦力做功,后阶段秸秆速率较小、曲率较大,减小摩擦力做功。将导流板曲线设计为倾斜直引线、最速降线和二者光滑过渡线。其中,倾斜直引线较短,作用是将秸秆引送至最速降线段。

最速降线应用于工程领域时需考虑摩擦阻力和离心力的作用^[22-23]。如图6所示,秸秆质点受力方程为

$$\begin{cases} -mgsin\sigma - \mu F_N = m \frac{dv}{dt} \\ -mgcos\sigma + F_N = \frac{mv^2}{r} \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\omega = \frac{d\sigma}{dt} \quad \frac{dv}{dt} = \omega \frac{dv}{d\sigma}$$

式中 σ ——秸秆瞬时速度与水平线夹角, ($^\circ$)

μ ——秸秆与导流板间摩擦因数

F_N ——导流板对秸秆支持力, N

v ——秸秆滑移瞬时速度, m/s

ω ——秸秆角速度, rad/s

r ——最速降线曲率半径, m

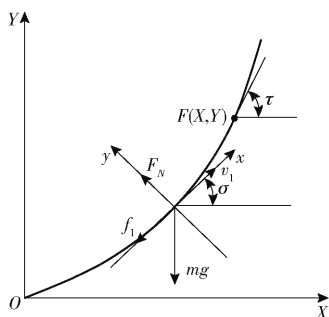


图6 最速降线图

Fig. 6 Diagram of the most rapid drop

由式(6)得

$$\omega = -g \frac{(\sin\sigma + \mu\cos\sigma) d\sigma}{dv + \mu v d\sigma} \quad (7)$$

根据欧拉-拉格朗日方程得

$$dv + \mu v = -\frac{g}{\omega} (\sin\sigma + \mu\cos\sigma) \quad (8)$$

最速曲线解析方程为

$$\begin{cases} X = \int_0^\tau \frac{v\cos\sigma}{\omega} d\sigma \\ Y = \int_0^\tau \frac{v\sin\sigma}{\omega} d\sigma \end{cases} \quad (9)$$

式中 (X, Y) ——导流板任意点 F 坐标

τ ——导流板点 F 切线与水平线夹角, ($^\circ$)

联立式(8)、(9)得

$$\begin{cases} X = a[b(\sin(2\tau) + 2\tau) + d\cos(2\tau) + b\pi] + \\ \quad a[c(\mu\cos\tau - \sin\tau) - \mu(2\mu^2 - 6)] \\ Y = a[b\cos(2\tau) + (\sin(2\tau) - 2\tau - \pi)] + \\ \quad a[c(\cos\tau + \mu\sin\tau) + \mu^2(\mu^2 + 8) - 1] \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} a &= \frac{g}{4\omega^2(1+\mu^2)^2} & b &= 1 + \mu^2 \\ c &= 8\mu e^{-\mu(\tau + \frac{\pi}{2})} & d &= 2\mu(1 + \mu^2) \end{aligned}$$

根据免耕播种机和挤压装置空间结构,确定最速降线终点位置后求解 σ 和 ω 。考虑秸秆沿导流板滑移耗能随秸秆与导流板摩擦因数增大而增大,确定导流板材料为不锈钢^[24]。将上述参数代入式(10),利用 Matlab 软件拟合曲线确定导流板结构。

2.2 输送机构设计

2.2.1 弹齿角度调控机构

为顺势无回带输送秸秆,设计一种多连杆弹齿角度调控机构。其结构简图如图7a所示, O 为偏心圆环圆心, O_1 为滚筒圆心, $M-M'$ 为弹齿轴,其上固装弹齿 MK , 滚筒在点 M 与弹齿轴 $M-M'$ 铰接,在弹齿轴 $M-M'$ 的一端伸出曲柄 MA , 偏心圆环与曲柄 MA 在点 A 铰接。

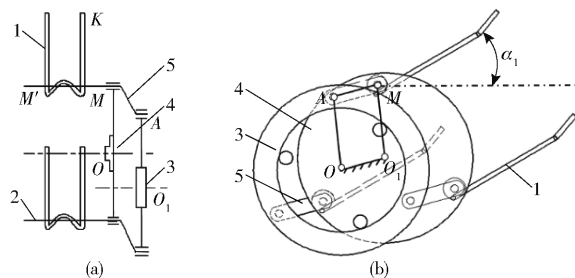


图7 输送机构示意图

Fig. 7 Schematics of throwing mechanism

1. 弹齿 2. 弹齿轴 3. 偏心圆环 4. 滚筒 5. 曲柄

如图7b所示,滚筒半径和偏心圆环半径相等,偏心距 l_{OO_1} 和曲柄 AM 长度相等,输送机构由3组平行四杆机构构成,偏心圆环可绕 O_1 转动,当改变偏心圆环位置,即改变 OO_1 与 O_1M 的相对位置,曲柄 AM 和其上固装的弹齿轴 $M-M'$ 、弹齿 MK 也随之改变其空间角度,调整弹齿角度后固定偏心圆环(固定偏心距 l_{OO_1}),滚筒旋转过程中 AM 与 OO_1 始终平行,弹齿角度保持调整好的偏角,即运动过程中弹齿偏角 α_1 恒定不变。

任选一组四杆机构进行运动分析,如图8所示。

弹齿位移方程为

$$\begin{cases} l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos\theta_2 = l_p + l_3 \cos\theta_3 \\ l_1 \sin\theta_1 + l_2 \sin\theta_2 = l_3 \sin\theta_3 \end{cases} \quad (11)$$

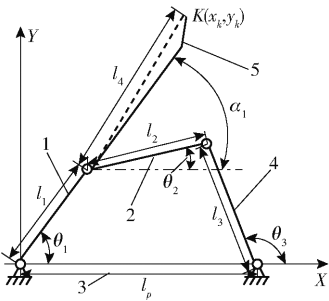


图 8 角度调控机构运动分析图

Fig. 8 Motion analysis diagram of angle control mechanism

1. 滚筒 2. 曲柄 3. 机架 4. 偏心圆环 5. 弹齿

式中 l_1 ——滚筒半径, m

θ_1 ——滚筒半径与圆心间连线夹角, ($^\circ$)

l_2 ——曲柄长度, m

θ_2 ——曲柄与水平方向夹角, ($^\circ$)

l_3 ——偏心圆环半径, m

θ_3 ——偏心圆环与 X 轴正方向夹角, ($^\circ$)

l_p ——滚筒与偏心圆环圆心连线长度, m

对式(11)求解可得

$$\theta_2 = \arctan \frac{l_3 \sin \theta_1 - l_1 \sin \theta_3}{l_3 \cos \theta_1 - l_1 \cos \theta_3} \quad (12)$$

则弹齿末端 K 轨迹方程为

$$\begin{cases} x_k = l_1 \cos \theta_3 + l_4 \cos (\theta_2 + \alpha_1) \\ y_k = l_1 \sin \theta_3 + l_4 \sin (\theta_2 + \alpha_1) \end{cases} \quad (13)$$

式中 (x_k, y_k) ——弹齿末端点 K 坐标, m

l_4 ——弹齿长度, m

弹齿末端点 K 的速度方程为

$$\begin{cases} v_{kx} = -l_1 \omega_3 \sin \theta_3 - l_4 \omega_2 \sin (\theta_2 + \alpha_1) \\ v_{ky} = l_1 \omega_3 \cos \theta_3 + l_4 \omega_2 \cos (\theta_2 + \alpha_1) \end{cases} \quad (14)$$

式中 v_{kx} ——弹齿末端点 K 水平速度, m/s

v_{ky} ——弹齿末端点 K 竖直速度, m/s

ω_2 ——曲柄角速度, rad/s

ω_3 ——偏心圆环角速度, rad/s

由式(14)可知弹齿末端速度与滚筒半径、弹齿长度、滚筒转速相关,考虑无回带顺势输送秸秆的设计要求,使滚筒半径和偏心圆环半径相等。

2.2.2 弹齿设计

设计秸秆回收比例调节范围为 30% ~ 70%, 为保证秸秆 70% 回收的性能, 参照现有秸秆捡拾弹齿确定秸秆长度为 175 mm^[15,25]。生产实践表明, 弹齿端部向旋转方向折弯可避免秸秆滑动脱落, 对弹齿运移秸秆进行受力分析。因弹齿运移的秸秆其姿态多为横向放置, 且考虑玉米秸秆直径相对于弹齿回转半径较小, 将其简化成一个质点, 玉米秸秆被捡拾时其受力情况如图 9 所示。

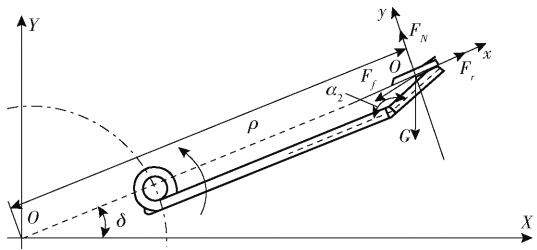


图 9 秸秆受力分析图

Fig. 9 Straw stress analysis diagram

为保证秸秆在经弹齿运移过程中不脱落, 秸秆与弹齿间摩擦力需大于重力和离心力在弹齿端部分力之和。对秸秆受力分析得

$$F_f + mg \sin (180^\circ - \alpha_2) \geq F_r \cos (180^\circ + \delta - \alpha_2) \quad (15)$$

其中

$$F_f = \mu_2 mg (180^\circ - \alpha_2)$$

$$F_r = m \left(\frac{n_1 \pi}{30} \right)^2 \rho$$

式中 F_f ——弹齿与秸秆间摩擦力, N

n_1 ——滚筒转速, r/min

μ_2 ——秸秆与弹齿摩擦因数

ρ ——秸秆运移回转半径, m

α_2 ——弹齿折弯角, ($^\circ$)

F_r ——秸秆运移离心力, N

δ ——弹齿偏角, ($^\circ$)

依据对弹齿运动轨迹分析, 弹齿与水平方向夹角为 45° 时与秸秆分离输送, 可在相同滚筒转速下获得最大输送距离, 对式(15)求解得

$$n_1 \leq \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{\sqrt{2} g (\mu_2 \cos \alpha_2 + \sin \alpha_2)}{\rho [\cos \alpha (\mu_2 - 1) - \sin \alpha (\mu_2 + 1)]}} \quad (16)$$

由式(16)可知弹齿折弯角与滚筒转速、秸秆与弹齿间摩擦因数相关。

2.2.3 滚筒转速

弹齿末端线速度随滚筒直径增大而增大, 虽增大秸秆输送效率, 但大幅增加装置能耗, 造成装置整体尺寸过大、机体臃肿; 滚筒直径过小易造成秸秆缠绕、堵塞而降低输送效率, 严重时甚至损坏装置^[26-27]。为满足弹齿从滚筒内部通过的设计要求, 参照弹齿长度确定滚筒直径为 200 mm。

对弹齿输送秸秆过程进行运动学分析, 如图 10 所示, 秸秆脱离弹齿分离瞬时速度为

$$\begin{cases} v_{sx} = \frac{n_1 \pi}{30} l_4 \sin \delta \\ v_{sy} = \frac{n_1 \pi}{30} l_4 \cos \delta \end{cases} \quad (17)$$

式中 v_{sx} ——秸秆脱离弹齿水平速度, m/s

v_{sy} ——秸秆脱离弹齿竖直速度, m/s

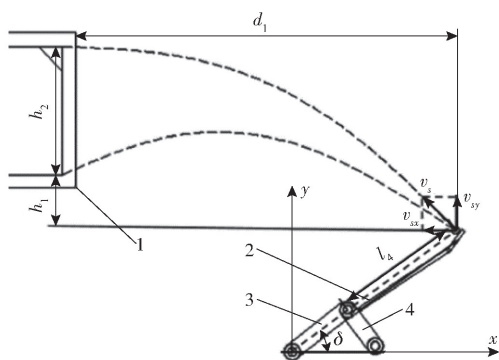


图10 秸秆输送过程分析图

Fig. 10 Analysis diagram of straw scattering process

1. 挤压装置 2. 弹齿 3. 滚筒 4. 曲柄

空气阻力对秸秆输送过程的额外加速度为

$$a_k = \frac{Ca_s P v_s}{2m} \quad (18)$$

式中 v_s ——秸秆输送起始点绝对速度, m/s

则秸秆上升和下降过程所用时长为

$$\begin{cases} t_2 = \frac{v_{sy}}{-g - a_k} \\ t_3 = \frac{v_{sx} - \sqrt{v_{sx}^2 - 2a_k d_1}}{a_k} - \frac{v_{sy}}{-g - a_k} \end{cases} \quad (19)$$

式中 t_2 ——秸秆上升阶段时长, s t_3 ——秸秆下降阶段时长, s d_1 ——秸秆输送起始点与挤压装置水平距离, m

秸秆进入挤压装置时与秸秆输送起始位置纵向距离为

$$h_1 = v_{sy} t_2 - \frac{(g + a_k) t_2^2 + (g - a_k) t_3^2}{2} \quad (20)$$

联立式(17)~(20)得

$$h_1 = \frac{n_1 \pi l_4 \sin \delta (30m - n_1 \pi l_4 \sin \delta)}{15(n_1 \pi C a_s P l_4 + 60mg)} - \frac{C a_s P (n_1 \pi l_4 \sin \delta)^2}{1800m} - g - \frac{2m C a_s}{\sin \delta} + \frac{\sqrt{m n_1 \pi l_4 (n_1 \pi l_4 m \sin^2 \delta - 30 C a_s P d_1)}}{30m} \quad (21)$$

秸秆进入挤压装置的条件为

$$h_2 \leq \frac{n_1 \pi l_4 \sin \delta (30m - n_1 \pi l_4 \sin \delta)}{15(n_1 \pi C a_s P l_4 + 60mg)} - \frac{C a_s P (n_1 \pi l_4 \sin \delta)^2}{1800m} - g - \frac{2m C a_s}{\sin \delta} + \frac{\sqrt{m n_1 \pi l_4 (n_1 \pi l_4 m \sin^2 \delta - 30 C a_s P d_1)}}{30m} \leq h_2 + h_3 \quad (22)$$

式中 h_2 ——输送机构与挤压装置上端距离, m h_3 ——输送机构与挤压装置下端距离, m由式(21)可知, 秸秆进入挤压装置与起始纵向距离 h_1 与弹齿偏角 δ 、弹齿长度 l_4 、秸秆阻力因数 C 、秸秆平均特征面积 a_s 、秸秆质量 m 、空气密度

P 、秸秆输送起点与挤压装置水平距离 d_1 、输送装置与挤压装置上端距离 h_2 、输送装置与挤压装置下端距离 h_3 、滚筒转速 n_1 相关。前文已知弹齿偏角 δ 为 45° 、弹齿长度 l_4 为 175 mm, 参考相关文献确定秸秆阻力因数 C 为 0.1308、平均特征面积 a_s 为 $1.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 、质量 m 为 0.0303 kg、空气密度 P 为 1.293 kg/m^3 [16,20], 结合前期秸秆沿导流板滑移试验和挤压装置结构参数确定 d_1 为 950 mm、 h_2 为 240 mm、 h_3 为 510 mm。

在确定上述参数后可知, 秸秆进入挤压装置时与起始位置纵向距离 h_1 仅与滚筒转速 n_1 相关。结合秸秆进入挤压装置的条件, 利用 Maple 18 求解得滚筒转速范围为 79.6 ~ 160.3 r/min。根据转速理论中心处计算弹齿折弯角 α_2 应小于 171° , 秸秆回带量随折弯角减小而增大, 选定折弯角为 171° 。

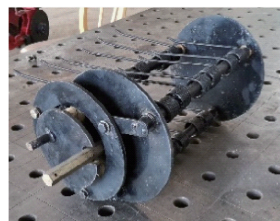
3 田间试验

3.1 试验条件与仪器设备

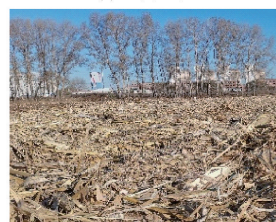
试验于 2020 年 10 月 26—30 日在东北农业大学实验实习基地实施, 试验地为垄距 65 cm 机收秸秆未粉碎玉米原茬地。土壤类型为黑黏土, 0 ~ 8 cm 土层平均土壤硬度 28.6 kg/cm^2 , 含水率 23.1%; 秸秆含水率 30.1%, 覆盖量 1.2 kg/m^2 , 平均直径 21.7 mm, 平均长度 386.3 mm, 留茬高度 110 mm。如图 11 所示。



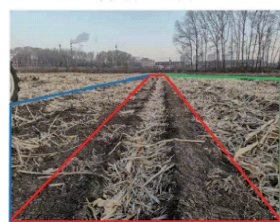
(a) 田间试验



(b) 输送机构



(c) 作业前地况



(d) 作业后地况

图11 田间试验与作业效果图

Fig. 11 Field trial and operation renderings

试验装置和仪器: 奔野 324 型拖拉机、2BMFJ-BL2 型免耕精量播种机清结装置、秸秆比例回收装置、便携式高速摄像机、土壤硬度测试仪、土壤含水率测试仪、弹簧秤、5 m 卷尺和取样袋若干。

3.2 试验设计与方法

采用三因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验方法 [28]。选取作业速度、滚筒转速和弹齿偏角

为试验因素,秸秆回收比率和含杂率为评价指标。共实施 23 组试验,每组试验重复 3 次取平均值,采用 Design-Expert 8. 0. 6 对试验结果进行数据处理。

参照 2BMFJ-BL2 型免耕精量播种机作业速度技术参数^[29],选取作业速度试验区间为 5.4 ~ 7.2 km/h;通过前文理论分析和试验要求确定滚筒转速试验区间为 80 ~ 160 r/min;弹齿偏角在 45°时可在同等转速下获得最大输送距离,选取弹齿偏角试验区间为 30°~60°,弹齿与弹齿轴固定装配,试验过程通过定位螺钉调整弹齿轴与曲柄安装角进行弹齿偏角的调节。为保证清秸装置构建的种床质量,参照原茬地免耕精量播种机技术参数确定清秸刀入土深度为 55 mm^[30]。确定各试验因素编码如表 1 所示,试验方案如表 2 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 1 试验因素编码
Tab.1 Factors and codes of test

编码	因素		
	作业速度/ (km·h ⁻¹)	滚筒转速/ (r·min ⁻¹)	弹齿偏角/ (°)
1. 682	7. 2	160	60
1	6. 8	144	54
0	6. 3	120	45
-1	5. 8	96	36
-1. 682	5. 4	80	30

表 2 试验方案与结果
Tab.2 Test design and results

序号	因素			评价指标	
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	-1	-1	-1	92. 7	4. 9
2	1	-1	-1	91. 9	7. 5
3	-1	1	-1	94. 7	5. 3
4	1	1	-1	94. 3	5. 3
5	-1	-1	1	96. 6	2. 6
6	1	-1	1	94. 1	3. 3
7	-1	1	1	94. 8	4. 5
8	1	1	1	92. 6	4. 2
9	-1. 682	0	0	97. 0	2. 8
10	1. 682	0	0	94. 1	4. 9
11	0	-1. 682	0	93. 1	2. 2
12	0	1. 682	0	96. 4	5. 2
13	0	0	-1. 682	91. 3	6. 1
14	0	0	1. 682	92. 7	2. 5
15	0	0	0	96. 7	3. 5
16	0	0	0	96. 7	2. 8
17	0	0	0	96. 1	2. 1
18	0	0	0	95. 9	3. 0
19	0	0	0	96. 6	3. 7
20	0	0	0	96. 7	3. 5
21	0	0	0	95. 6	2. 8
22	0	0	0	95. 9	3. 3
23	0	0	0	97. 1	2. 4

参照 GB/T 34390—2017《自走式秸秆收获方捆压捆机》和秸秆综合利用企业收储标准制定评价指标为秸秆回收比率 Y_1 和含杂率 Y_2 。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 试验结果

试验结果如表 2 所示。

3.3.2 模型建立与显著性分析

方差分析结果如表 3 所示。各试验因素对秸秆回收比率影响主次顺序为作业速度、弹齿偏角、滚筒转速,对含杂率影响主次顺序为弹齿偏角、作业速度、滚筒转速。在置信度为 0. 05 条件下进行 F 检验,剔除不显著项后得到回归模型为

$$\begin{cases} Y_1 = 96. 19 - 0. 79X_1 + 0. 49X_2 + 0. 5X_3 - \\ \quad 0. 96X_2X_3 - 0. 57X_2^2 - 1. 54X_3^2 \\ Y_2 = 3 + 0. 48X_1 + 0. 44X_2 - 1. 06X_3 + 0. 58X_2X_3 + \\ \quad 0. 44X_1^2 + 0. 39X_2^2 + 0. 6X_3^2 \end{cases}$$

(23)

表 3 方差分析
Tab.3 Analysis of variance

评价指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
Y_1	模型	68. 25	9	7. 58	21. 90	<0. 000 1 **
	X_1	8. 50	1	8. 50	24. 56	0. 000 3 **
	X_2	3. 24	1	3. 24	9. 35	0. 009 2 **
	X_3	3. 44	1	3. 44	9. 93	0. 007 6 **
	X_1X_2	0. 061	1	0. 061	0. 18	0. 680 9
	X_1X_3	1. 53	1	1. 53	4. 42	0. 055 5
	X_2X_3	7. 41	1	7. 41	21. 40	0. 000 5 **
	X_1^2	1. 32	1	1. 32	3. 83	0. 072 3
	X_2^2	5. 19	1	5. 19	14. 99	0. 001 9 **
	X_3^2	37. 87	1	37. 87	109. 36	<0. 000 1 **
	残差	4. 50	13	0. 35		
	失拟	2. 48	5	0. 50	1. 97	0. 188 6
	误差	2. 02	8	0. 25		
Y_2	总和	72. 75	22			
	模型	37. 00	9	4. 11	8. 43	0. 000 4 **
	X_1	3. 12	1	3. 12	6. 41	0. 025 1 *
	X_2	2. 68	1	2. 68	5. 49	0. 035 7 *
	X_3	15. 30	1	15. 30	31. 37	<0. 000 1 **
	X_1X_2	1. 62	1	1. 62	3. 32	0. 091 4
	X_1X_3	0. 61	1	0. 61	1. 24	0. 285 5
	X_2X_3	2. 65	1	2. 65	5. 42	0. 036 6 *
	X_1^2	3. 08	1	3. 08	6. 32	0. 025 9 *
	X_2^2	2. 38	1	2. 38	4. 89	0. 045 6 *
	X_3^2	5. 71	1	5. 71	11. 71	0. 004 6 **
	残差	6. 34	13	0. 49		
	失拟	4. 01	5	0. 80	2. 76	0. 097 7
	误差	2. 33	8	0. 29		
	总和	43. 34	22			

注: * 表示差异显著 (0. 01 < P < 0. 05), ** 表示差异极显著 (P < 0. 01)。

3.3.3 因素对性能指标影响分析

如图 12a 所示,当弹齿偏角处于设计中心点(45°)时,秸秆回收比率随作业速度增大呈减小趋势,且减小趋势逐渐明显,这是由于随作业速度增大,单位时间进入回收装置秸秆量增大造成秸秆损失增多;秸秆回收比率随滚筒转速增大呈先增大后减小的趋势,这是由于在滚筒转速 80 ~ 120 r/min 区间内,随滚筒转速增大,弹齿回收秸秆频率增多导致秸秆回收比率增大,随滚筒转速进一步增大,弹齿回带秸秆量增大造成秸秆回收比率减小。

如图 12b 所示,当作业速度处于中心点(6.3 km/h)时,秸秆回收比率随弹齿偏角的增加呈先增大后减小的趋势,这是由于弹齿偏角处于 45° 时可在同滚筒转速下获得最大的输送距离,弹齿偏角增大或减小造成秸秆输送距离减小,使部分秸秆无法进入挤压装置造成秸秆回收比率减小。秸秆回收比率随滚筒转速呈现增大后缓慢减小的趋势,这是由于在滚筒转速 80 ~ 120 r/min 区间内随滚筒转速增大,弹齿回收秸秆频率增大导致秸秆回收比率增大,而随滚筒转速进一步增大,弹齿回带秸秆增多造成秸秆回收比率下降。

如图 13a 所示,当弹齿偏角处于设计中心点(45°)时,含杂率随作业速度增大呈增大趋势,这是由于随作业速度增大单位时间内进入回收装置土壤等杂质增多造成含杂率增大;含杂率随滚筒转速增大呈增大趋势,这是由于随滚筒转速增大,秸秆与杂质未能有效分离便被弹齿输送至挤压装置,造成含杂率增大。

如图 13b 所示,当作业速度处于中心点(6.3 km/h)时,在弹齿偏角较小时,含杂率随着滚筒转速增大呈减小趋势,而当弹齿偏角较大时,含杂率随滚筒转速增大而减小的趋势逐渐转换为随滚筒转速增大而增大,这是由于在弹齿偏角较小时,随滚筒转速增大,杂质相较于秸秆密度大、风阻小而与回收装置发生碰撞弹射,未能进入挤压装置造成含杂率下降,当弹齿偏角较大,滚筒转速较低时,杂质因无法获得足够初速度进入挤压装置,而随滚筒转速增大获得足够的速度进入挤压装置,含杂率呈增大趋势;含杂率在滚筒转速较低时随弹齿偏角增大呈减小趋势,这主要是由于在滚筒转速较低时,随弹齿偏角的增大杂质脱离弹齿瞬时竖直速度分量逐渐减小,杂质无法进入挤压装置造成含杂率下降。

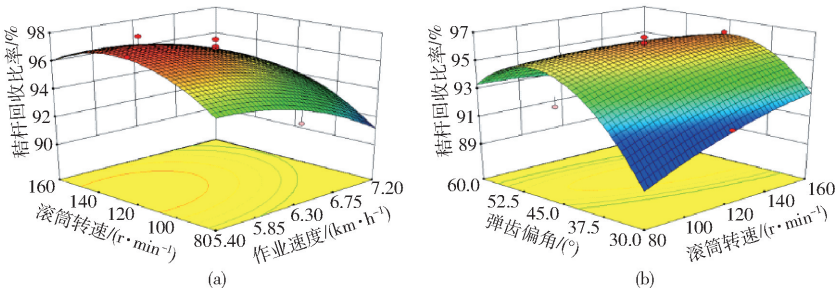


图 12 因素交互作用对秸秆回收比率影响的响应曲面
Fig. 12 Response surface of factors interaction influence on straw recovery ratio

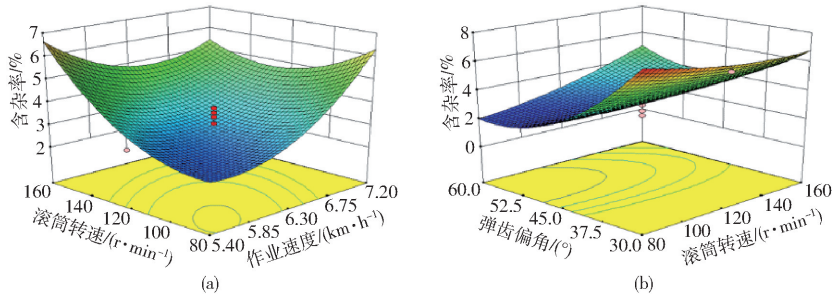


图 13 因素交互作用对含杂率影响的响应曲面
Fig. 13 Response surface of factors interaction influence on impurity rate

3.4 参数优化与验证

3.4.1 参数优化

按照高秸秆回收比率、低含杂率的优化原则,兼顾回收装置与免耕播种机的作业速度匹配,以各因素水平区间为约束条件,利用 Design-Expert 8.0.6 软件 Optimization 模块的多目标变量优化算法进行

求解。由前文因素对性能指标影响分析可知:作业速度与弹齿偏角、滚筒转速均无显著交互作用,且秸秆回收比率随作业速度增大而减小、含杂率随作业速度增大而增大,因此选取作业速度在 7.2 km/h 时进行优化。结果如图 14 所示,图中黄色区域为最佳工作区域,考虑滚筒转速增大会加剧振动、增加

能耗,选取滚筒转速为 95 r/min。增大弹齿偏角可减小携运秸秆时长,提高弹齿使用寿命,选取弹齿偏角为 49°。

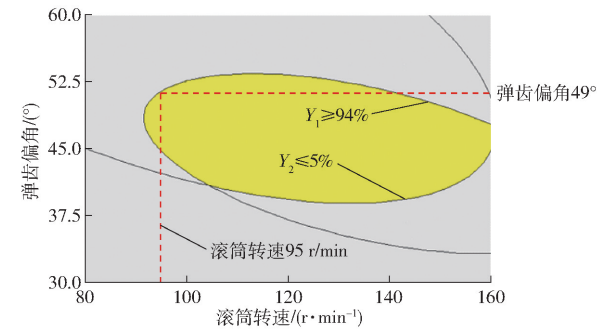


图 14 优化结果

Fig. 14 Optimization result

3.4.2 验证试验

为验证优化试验结果,在滚筒转速 95 r/min、弹齿偏角 49°,作业速度 5.4、6.3、7.2 km/h 条件下进行验证试验。每组试验重复 3 次取平均值为最终结果。试验结果如表 4 所示,秸秆回收比率大于 94%、含杂率小于 5%。各试验结果与预测值吻合,相对误差小于等于 3.7%,优化结果真实可信。

4 结论

(1)设计了一种免耕播种机侧向清秸覆秸秸秆

表 4 验证试验结果

Tab.4 Validation test results %

参数	作业速度/(km·h ⁻¹)		
	5.4	6.3	7.2
秸秆回收比率预测值	96.8	95.5	94.2
秸秆回收比率试验值	97.7	96.4	95.2
秸秆回收比率相对误差	0.9	0.9	1.1
含杂率预测值	3.3	2.6	4.2
含杂率试验值	3.4	2.7	4.3
含杂率相对误差	2.9	3.7	2.3

比例回收装置,实现了免耕播种秸秆覆盖还田同步比例回收复式作业。阐述了装置的整体结构与工作原理;对装置接收、输送秸秆过程进行了理论分析,明确了影响装置工作性能的关键结构与作业参数及其取值范围。

(2)各因素对秸秆回收比率影响的主次顺序为作业速度、弹齿偏角、滚筒转速,对含杂率影响主次顺序为弹齿偏角、作业速度、滚筒转速。

(3)在土壤硬度 28.6 kg/cm²、含水率 23.1%,秸秆含水率 30.1%、覆盖量 1.2 kg/m²的玉米原茬地上,当作业速度 5.4 ~ 7.2 km/h、滚筒转速 95 r/min、弹齿偏角 49°时,秸秆回收比率大于 94%、含杂率小于 5%,满足设计要求。

参 考 文 献

[1] 丁晋利,武继承,杨永辉,等. 长期保护性耕作对冬小麦氮素积累和转运的影响[J]. 农业机械学报,2017,48(2):240-246,341.
DING Jinli, WU Jicheng, YANG Yonghui, et al. Effects of long-term conservation tillage on nitrogen accumulation and translocation of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 240-246, 341. (in Chinese)

[2] ZHAO X, LIU B Y, LIU S L, et al. Sustaining crop production in China's cropland by crop residue retention: a meta-analysis[J]. Land Degradation & Development, 2019, 31(6): 694-709.

[3] YIN H J, ZHAO W Q, LI T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: role of straw nutrient resources[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2695-2702.

[4] 王兴,祁剑英,井震寰,等. 长期保护性耕作对稻田土壤团聚体稳定性和碳氮含量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 121-128.
WANG Xing, QI Jianying, JING Zhenhuan, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil aggregate stability and carbon and nitrogen in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 121-128. (in Chinese)

[5] LI S H, GUO L J, CAO C G, et al. Effects of straw returning levels on carbon footprint and net ecosystem economic benefits from rice-wheat rotation in central China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(5): 5742-5754.

[6] 马永财,滕达,衣淑娟,等. 秸秆覆盖还田及腐解率对土壤温湿度与玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 90-99.
MA Yongcai, TENG Da, YI Shujuan, et al. Effects of straw mulching and decomposition rate on soil temperature and humidity and maize yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 90-99. (in Chinese)

[7] 张俊鹏,孙景生,刘祖贵,等. 不同麦秸覆盖量对夏玉米田棵间土壤蒸发和地温的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 95-100.
ZHANG Junpeng, SUN Jingsheng, LIU Zugui, et al. Effects of different straw mulching quantity on soil evaporation and soil temperature in summer corn field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(1): 95-100. (in Chinese)

[8] WANG J, FU X, SAINJU U M, et al. Soil carbon fractions in response to straw mulching in the Loess Plateau of China[J]. Biology & Fertility of Soils, 2018, 54(4): 423-436.

[9] 范雷雷,史海滨,李瑞平,等. 秸秆覆盖对沟灌盐盐迁移与玉米水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 283-293, 319.
FAN Leilei, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effects of straw mulching on soil water-salt transportation and water use efficiency of maize under furrow irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 283-293, 319. (in Chinese)

[10] 张静,温晓霞,廖允成,等. 不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010,

- 16(3):612-619.
- ZHANG Jing, WEN Xiaoxia, LIAO Yuncheng, et al. Effects of different amount of maize straw returning on soil fertility and yield of winter wheat[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(3):612-619. (in Chinese)
- [11] 刘鹏飞, 红梅, 美丽, 等. 不同玉米秸秆还田量的土壤大型动物夏季群落动态特征[J]. 土壤学报, 2020, 57(3):760-772.
- LIU Pengfei, HONG Mei, MEI Li, et al. Dynamics of soil macrofauna community in farmlands different in corn stalk returning rate[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3):760-772. (in Chinese)
- [12] SHINNERS K J, BOETTCHER G C, HOFFMAN D S, et al. Single-pass harvest of corn grain and stover: performance of three harvester configurations[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(1):51-60.
- [13] MARALDI M, MOLARI L, REGAZZI N, et al. Analysis of the parameters affecting the mechanical behaviour of straw bales under compression[J]. Biosystems Engineering, 2017, 160:179-193.
- [14] ZHAO Zhan, HUANG Hedong, YIN Jianjun, et al. Dynamic analysis and reliability design of round baler feeding device for rice straw harvest[J]. Biosystems Engineering, 2018, 174:10-19.
- [15] 郑智旗, 何进, 王庆杰, 等. 秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7):87-96.
- ZHENG Zhiqi, HE Jin, WANG Qingjie, et al. Design and experiment on straw pickup-chopping and ditch-burying integrated machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):87-96. (in Chinese)
- [16] 陈海涛, 李昂, 史乃煜, 等. 玉米秸秆残茬侧向抛出动力学模型建立与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5):76-83.
- CHEN Haitao, LI Ang, SHI Naiyu, et al. Kinetics modeling and experiment of lateral throwing of corn straws[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):76-83. (in Chinese)
- [17] 史乃煜, 陈海涛, 魏志鹏, 等. 玉米原茬地秸秆还田比例调节装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21):11-22.
- SHI Naiyu, CHEN Haitao, WEI Zhipeng, et al. Design and experiment of stalk returning proportion adjusting device for corn original stubble[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(21):11-22. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 章志强. 玉米秸秆粉碎抛撒还田机的设计与秸秆运动特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- ZHANG Zhiqiang. Research on corn straw chopping and spreading machine design and dynamic characteristic of straw[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [21] 尤明庆. 最速降线求解和摩擦力影响的研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2005, 24(1):83-88.
- YOU Mingqing. Study on the solution of brachistochrone and the effect of friction[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2005, 24(1):83-88. (in Chinese)
- [22] ASHBY N, BRITTIN W E, LOVE W F, et al. Brachistochrone with coulomb friction[J]. American Journal of Physics, 1975, 43(10):902-906.
- [23] 邢家省, 杨义川. 最速降线问题解的充分条件的证明[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2019, 40(2):1-4.
- XING Jiasheng, YANG Yichuan. Proof of sufficient conditions for brachistochrone problem solution[J]. Journal of Jishou University (Natural Sciences Edition), 2019, 40(2):1-4. (in Chinese)
- [24] 卢彩云. 免耕播种机滑板压秆旋切式防堵技术与装置研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- LU Caiyun. Study on anti-blocking technology and device of rotary cutting with slide plate pressing straw for no-till planter[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [25] 郁志宏, 王文明, 莫日根毕力格, 等. 弹齿滚筒式捡拾器捡拾性能试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3):106-112.
- YU Zhihong, WANG Wenming, Morigenbilige, et al. Experiment on performance of spring-finger cylinder pickup collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):106-112. (in Chinese)
- [26] 许涛. 弹齿式花生捡拾装置设计及试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- XU Tao. Design and experiment study on the spring-finger type of peanut pickup device[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [27] 王伯凯, 顾峰玮, 于昭洋, 等. 轴流式全喂入花生收获机捡拾机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10):132-141, 169.
- WANG Bokai, GU Fengwei, YU Zhaoyang, et al. Design and experiment of picking-up mechanism of axial-flow full-feed peanut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10):132-141, 169. (in Chinese)
- [28] 穆桂脂, 辛青青, 玄冠涛, 等. 甘薯秧蔓回收机仿垄切割粉碎抛送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12):53-62.
- MU Guizhi, XIN Qingqing, XUAN Guantao, et al. Design and experiment of knife roller and throwing device for sweet potato vine recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12):53-62. (in Chinese)
- [29] 侯守印, 陈海涛, 邹震, 等. 玉米原茬地侧向清茬刀设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2):59-69.
- HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of lateral stubble cleaning blade for corn stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(2):59-69. (in Chinese)
- [30] 侯守印, 陈海涛, 邹震, 等. 原茬地种床整备侧向滑切清秸刀齿设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6):41-51, 217.
- HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6):41-51, 217. (in Chinese)