

# 仿生分拨草防堵装置的设计与试验

朱惠斌,张旭,洪洋,白丽珍,赵浩然,马世鳌

(昆明理工大学现代农业工程学院,云南昆明650500)

**摘要:**针对我国西南地区小麦秸秆覆盖地玉米免耕播种机内被动式清秸防堵装置作业时存在的易缠绕堵塞、种沟清秸率低、作业不稳定等问题,基于仿生学原理,以白星花金龟前后肢轮廓曲线及后肢运动轨迹曲线为仿生原型,设计了一种高清秸率、不易堵塞的仿生分拨草防堵装置。通过运动学分析,研究了关键结构参数对清秸防堵效果的影响规律,并得出最优参数组合:拨草轮运动偏角 $\delta$ 为 $30^\circ$ ,轮盘直径 $D$ 为204 mm,拨草轮爪数量 $N$ 为13个;利用Design-Expert软件和Box-Behnken试验优化设计方法,建立了拨草轮入土深度( $A$ )、机具前进速度( $B$ )、分草挡板偏角( $C$ )与清秸率 $Y$ 的回归数学模型,分析表明三因素对清秸率均有显著影响,且显著性 $C>B>A$ ,经过优化求解获得了最优作业参数组合:拨草轮入土深度 $T$ 为11 mm,机具前进速度 $v$ 为 $4\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,分草挡板偏角 $\alpha$ 为 $35^\circ$ 。田间验证试验表明,整机的通过性良好,土壤扰动量及其变异系数分别为20.00%和5.30%,实际秸秆清除率及其变异系数分别为90.58%和1.20%,作业质量稳定,符合免耕播种机作业的农艺和技术要求。

**关键词:**少免耕播种机;分拨草防堵装置;仿生;白星花金龟;图像处理;离散元仿真

**中图分类号:**S223.2 **文献标志码:**A

## Design and experiment of bionic shifting and diffidence straw anti-blocking device

ZHU Huibin, ZHANG Xu, HONG Yang, BAI Lizhen, ZHAO Haoran, MA Shiao

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

**Abstract:** In the wheat straw covered land in Southwest China, the passive straw cleaning and anti-blocking device on the corn no tillage planter is prone to some problems during operation, such as winding and blocking, low straw cleaning rate in the seed ditch, and low operational stability. Based on the principle of bionics, the contour curve of the front and rear limbs and the movement trajectory curve of the rear limbs of the *Potosia brevitarsis* were taken as the bionic prototype. A bionic shifting and diffidence straw anti-blocking device was designed. Through kinematics analysis, the influence law of key structural parameters on straw cleaning and anti-blocking effect was studied. It was determined that the movement deflection angle of the grass wheel was  $30^\circ$ , the wheel disc diameter was 204 mm, and the number of grass wheel claws was 13. Using Design-Expert software and Box-Behnken experiment optimization design method, the regression mathematical model of the depth of grass wheel ( $A$ ), the forward speed of the machine ( $B$ ), the deflection angle of the dividing baffle ( $C$ ) and the straw cleaning rate ( $Y$ ) were established. The analysis showed that each factor had a significant influence on the straw cleaning rate, and the significance was  $C>B>A$ . The optimization results showed that with the depth of the straw wheel of 11 mm, the forward speed of  $4\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , and the grass dividing baffle deflection angle of  $35^\circ$ , the straw cleaning and anti-blocking device had the best working performance. The field verification experiment showed that the machine had good trafficability, the actual straw cleaning rate and its coefficient of variation were 90.58% and 1.20%, the average soil disturbance and its coefficient of variation were 20.00% and 5.30%. The operation quality was stable, which met the

收稿日期:2022-10-27

修回日期:2023-02-10

基金项目:国家自然科学基金(52265033,51865022)

作者简介:朱惠斌(1974-),男,山西五台人,博士,教授,主要从事丘陵山区保护性耕作技术研究。E-mail:hbzhu113@163.com

通信作者:白丽珍(1975-),女,山西五台人,高级实验师,主要从事智能农业装备测控技术研究。E-mail:lzhbai@qq.com

agronomic and technical requirements of no-till planter operation.

**Keywords:** minimum and no-till planter; shifting and diffluence straw anti-blocking device; biomimetic; *Potosia brevitarsis*; image processing; DEM simulation

保护性耕作可以降低土壤的风蚀水蚀、改善土壤结构、蓄水保墒、增加土壤肥力,是一种节本增效的农业生产方式<sup>[1-4]</sup>。西南地区是中国三大玉米产区之一,前茬作物小麦秸秆粉碎覆盖还田量大,保护性耕作模式下在秸秆覆盖地进行少、免耕播种作业时,易发生残茬缠绕,造成机器堵塞,降低播种作业质量及工作效率。因此,提高清秸防堵技术水平是保护性耕作少免耕播种机作业的关键<sup>[5-6]</sup>。

目前清秸防堵装置按动力来源可分为主动式和被动式<sup>[7-8]</sup>:主动式清秸防堵装置主要通过施加动力将秸秆高速切断粉碎或者抛送到种沟两侧及后方,从而避免发生缠绕堵塞,其综合防堵性能好,但结构复杂,功耗较大,因此主动式清秸防堵机具无法适应我国西南地区地块较小且坡耕地较多的作业环境<sup>[9]</sup>;被动式清秸防堵装置主要使用圆盘式、星型除草轮式清秸部件等,依靠机具牵引力与地表秸秆摩擦力的共同作用完成拨抛防堵,其具有结构简单、土壤扰动量小、功耗低等优点<sup>[10-11]</sup>,此类装置对坡耕地免耕播种机具有较好的适用性。近年来国内外学者对被动式清秸防堵装置进行了一系列研究,赵淑红等<sup>[12]</sup>设计了一种多功能集成式播种开沟器,采用典型的双圆盘开沟装置,此类防堵装置在秸秆半量还田条件下作业质量较好,当秸秆覆盖量过大时,因其对秸秆的抛送速度不足,清秸率降低,且圆盘的入土角为钝角,要求机具具有较大重量;范旭辉等<sup>[13]</sup>设计了一种仿形爪式防堵清茬机构,运用拨禾行星轮原理,在双圆盘开沟器基础上设计了星型轮爪式拨草轮,可同时完成秸秆残茬的拨动以及侧向分离;刘正平等<sup>[14]</sup>设计了一种从动型旋转齿盘分草装置,对星型轮爪式清秸部件进行了优化,配合设计分草栅条工作,进一步提高了拨草及分草性能。但由于机具结构的限制,上述清秸防堵装置仍存在作业稳定性差、拨离速度不足、漏清、秸秆回流等问题,清秸防堵能力有限。

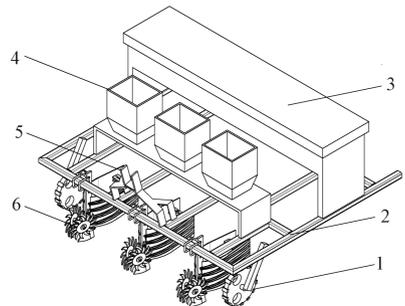
本文基于仿生学原理,结合免耕播种机清秸防堵装置的工作原理与白星花金龟(*Potosia brevitarsis*)前、后肢在秸秆层中的拨草、分草机理,在结构形态仿生的基础上进行运动形态仿生<sup>[15-16]</sup>,设计一种仿生爪式拨草轮、分草挡板、分草栅条相结合的分拨草防堵装置,通过理论分析确定仿生分拨草防堵装置的主要结构参数,通过离散元仿真试验

获得最佳作业参数组合,并进行田间试验验证,以为高性能免耕播种机清秸防堵装置的研究和发展提供参考。

## 1 仿生分拨草防堵装置的设计

### 1.1 整机结构与作业原理

仿生分拨草防堵装置通过U型螺栓安装于免耕播种机机架上,随播种机的前进进行分拨草开沟防堵作业(图1)。机器前进过程中,仿生拨草轮轮爪插入秸秆层中,在拖拉机牵引力与地表秸秆层摩擦阻力形成的力偶作用下向后转动,将秸秆拨起并向侧后方抛出。随后仿生分草挡板将秸秆进一步向两侧分流,同时由仿生分草栅条增大秸秆的流动性。



1. 限深轮;2. 机架;3. 肥箱;4. 种箱;  
5. 悬挂装置;6. 仿生分拨草防堵装置

1. Depth limiting wheel; 2. Rack; 3. Fertilizer box; 4. Seed box;  
5. Suspension device; 6. Biomimetic shifting and diffluence straw anti-blocking device

图1 整机结构示意图

Fig.1 Structure diagram of the whole machine

### 1.2 仿生曲线的提取

本文以白星花金龟为仿生对象,作为一种长期生活在玉米、小麦等秸秆层中的鞘翅目昆虫,白星花金龟前后肢对禾本类植物具有较高效的拨动分离能力,其在秸秆中爬行时,一对前肢呈“八”字型由前向后运动,将秸秆向侧后方拨离,后肢随后继续完成秸秆的分流,前后肢运动的清秸作用与免耕防堵开沟装置相似<sup>[17]</sup>,以此为启示,借助工程仿生技术手段和方法,设计仿生拨草轮、分草挡板、分草栅条,期望提高此类装置的秸秆清除率和防堵塞能力。

### 1.2.1 白星花金龟前后肢结构轮廓曲线的提取

提取白星花金龟前、后肢轮廓结构曲线分别作为仿生拨草轮爪和仿生分草挡板轮廓线<sup>[18-19]</sup>。曲线获取过程如下:将白星花金龟前、后肢置于 XTL-165 型连续变倍体视显微镜下观察,不断调焦使图像清晰,前、后肢样品调整至最佳位置后分别截图保存<sup>[20]</sup>,所得轮廓结构如图 2(见 325 页)所示。

使用 Matlab 软件的 `rgb2gray`、`imerode`、`imdilate`、`im2bw`、`Imfill`、`edge` 函数命令对图 2 的轮廓进行处理,使其由原始图像转换为二值图像,得出结构曲线轮廓的坐标点<sup>[20-23]</sup>。采用二阶拉普拉斯-高斯边缘提取算法将轮廓的坐标点绘制成边界图,所得结构完整,与原图基本一致。边界轮廓如图 3 所示。

依据设计需求将前肢内、外边界轮廓曲线和后肢外边界轮廓曲线使用 Origin 软件分别拟合,曲线方程的拟合优度决定了仿生设计精度与加工难度,精度过低,仿生设计不可靠;精度过高,则会增加机具的加工难度。经多次拟合对比,将前肢外、内结

构轮廓曲线拟合为最小二乘法五次多项式分别为  $y_1$ 、 $y_2$ ,将后肢外结构轮廓曲线拟合为最小二乘法七次多项式  $y_3$ ,拟合优度  $R^2$  分别为 0.95975、0.85285 和 0.99502,说明拟合程度较高。多项式方程如下:

$$y_1 = -916.46716 + 21.78817x - 0.13697x^2 + 4.29792 \times 10^{-4}x^3 - 6.71029 \times 10^{-7}x^4 + 4.13408 \times 10^{-10}x^5 \quad (1)$$

$$y_2 = 93.63063 + 3.77977x - 0.01874x^2 + 5.45324 \times 10^{-5}x^3 - 9.34981 \times 10^{-8}x^4 + 6.7427 \times 10^{-11}x^5 \quad (2)$$

$$y_3 = 459.48669 - 27.47246x + 1.09975x^2 - 0.02206x^3 + 2.50725 \times 10^{-4}x^4 - 1.63085 \times 10^{-6}x^5 + 5.63525 \times 10^{-9}x^6 - 7.9926 \times 10^{-12}x^7 \quad (3)$$

利用 Origin 软件将拟合函数绘制在直角坐标系中,获得轮廓曲线与拟合曲线对比图以及残差分布图,如图 4、图 5 所示,拟合曲线与原始轮廓基本一致,残差值均匀随机分布于 0 值两侧,且无异常点,拟合情况良好。

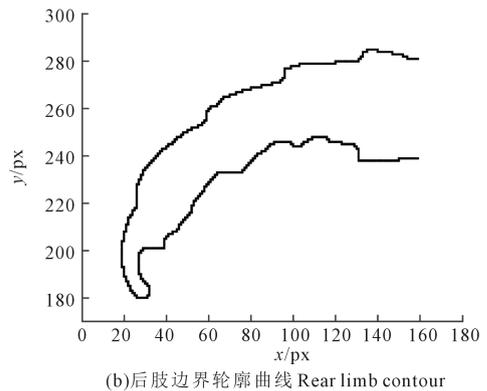
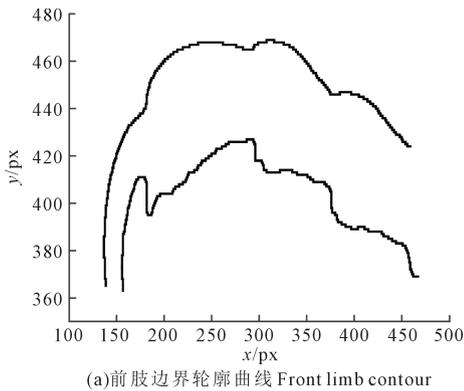


图 3 白星花金龟前、后肢边界轮廓曲线

Fig.3 Boundary contour curve of front and rear limbs of *Potosia brevitarsis*

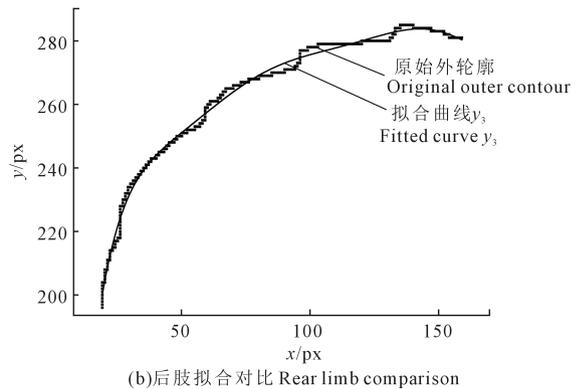
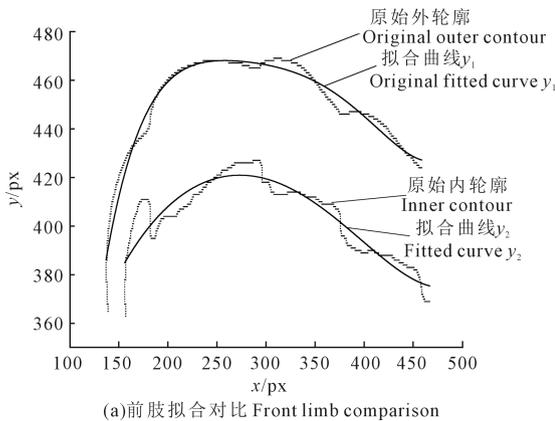


图 4 白星花金龟前、后肢边界轮廓曲线与拟合曲线对比图

Fig.4 Comparison between boundary contour curve and fitting curve of front and rear limbs of *Potosia brevitarsis*

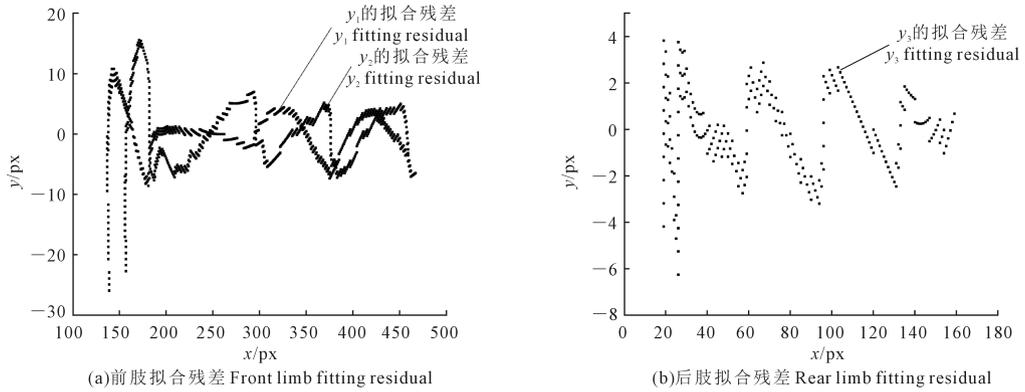


图 5 白星花金龟前、后肢拟合曲线残差图

Fig.5 Residual diagram of front and rear limbs fitting curves of *Potosia brevitaris*

1.2.2 白星花金龟后肢运动轨迹曲线的提取 白星花金龟实际行进过程中后肢做空间运动,而前述获取的后肢内外轮廓结构曲线仅可用于静态结构仿生,为了进一步还原白星花金龟的运动状态,提高分草挡板的分草清秸效果,提取白星花金龟后肢根部、中部及尾部 3 点(如图 2 所示,见 325 页)动态运动轨迹曲线并设计分草栅条应用于仿生分草防堵装置上。使用高速摄像机拍摄记录白星花金龟的运动过程,利用高速视频目标跟踪测量软件 V 1.0,通过白平衡、亮度对比度调节、透视、畸变矫正对拍摄的后肢运动视频进行图像处理,以白星花金龟后肢根部、中部及尾部上 3 点为运动初始点进行跟踪<sup>[19]</sup>,按照上述相同方法使用 Matlab 软件处理图像,得出选定目标的运动轨迹如图 6 所示。

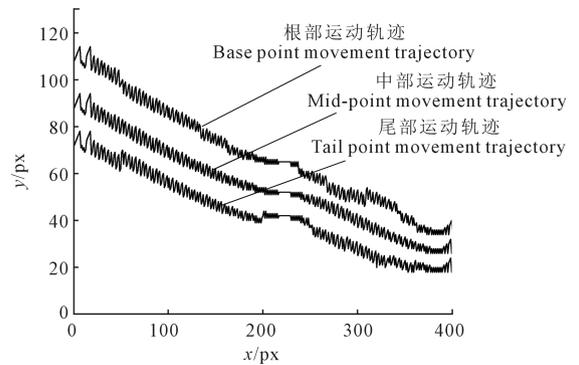


图 6 白星花金龟后肢 3 个点位运动轨迹

Fig.6 Movement trajectory of three parts of hind limbs of *Potosia brevitaris*

将上述曲线使用 Origin 软件分别拟合,经多次拟合比较,确定后肢 3 个点位运动轨迹曲线拟合为最小二乘法七次多项式,根部、中部及尾部拟合曲线分别为  $y_4$ 、 $y_5$  和  $y_6$ 。拟合优度  $R^2$  分别为 0.98660、0.97938 和 0.97311,拟合程度较高。多项式方程如下:

$$y_4 = 111.33972 - 0.16936x - 0.0027x^2 + 3.08872 \times 10^{-5}x^3 - 1.75971 \times 10^{-7}x^4 + 6.07712 \times 10^{-10}x^5 - 1.18327 \times 10^{-12}x^6 + 9.6257 \times 10^{-16}x^7 \quad (4)$$

$$y_5 = 90.14843 - 0.09003 - 0.0027x^2 + 1.38998 \times 10^{-5}x^3 + 3.98935 \times 10^{-8}x^4 - 4.58713 \times 10^{-10}x^5 + 1.14763 \times 10^{-12}x^6 - 9.19282 \times 10^{-16}x^7 \quad (5)$$

$$y_6 = 73.15929 - 0.01338x - 0.00342x^2 + 1.86646 \times 10^{-5}x^3 + 2.39678 \times 10^{-8}x^4 - 4.45859 \times 10^{-10}x^5 + 1.19097 \times 10^{-12}x^6 - 9.8802 \times 10^{-16}x^7 \quad (6)$$

利用 Origin 软件将拟合函数绘制在直角坐标系中获得原运动轨迹与运动轨迹拟合曲线对比图以及残差分布图,如图 7、图 8(见 325 页)所示,拟合曲线与原始轨迹基本一致,残差值均匀随机分布于 0 值两侧,且无异常点,拟合情况良好。

### 1.3 仿生分拨草防堵装置的设计与建模

通过对白星花金龟肢、后肢轮廓结构以及后肢运动轨迹进行量化分析,根据拟合曲线构建了仿生分拨草防堵装置的三维模型。如图 9 所示,仿生分拨草防堵装置主要由铲式开沟器、固定支臂、仿生拨草轮、仿生分草挡板、仿生分草栅条、挡板偏角调节装置等部分组成,其中拨草轮轮爪轮廓线为  $y_1$ 、 $y_2$  曲线,分草挡板轮廓线为  $y_3$  曲线,分草栅条轮廓线分别为  $y_4$ 、 $y_5$ 、 $y_6$  曲线投影于分草挡板外侧面上形成,共 4 组均分布于仿生分草挡板外侧面上。2 个仿生拨草轮通过转轴呈“八”字型安装于固定支臂上,固定支臂与铲式开沟器支架相连接,挡板偏角调节装置由与开沟器支架相连接的固定支架、固定圆环、固定板组成;2 个仿生分草挡板与开沟器支架铰接,并通过固定圆环与挡板偏角调节装置相连接,仿生分草栅条焊接于仿生分草挡板外侧面。

### 1.4 运动学分析与结构参数

仿生拨草轮设置有运动偏角,随机器前进作业时,轮爪作复合运动<sup>[14]</sup>。以仿生拨草轮与地面接触点为坐标原点, $x$  轴和  $y$  轴分别平行、垂直于拨草轮盘平面, $xoy$  面水平, $z$  轴垂直于  $xoy$  面,建立坐标轴

如图 10 所示。

任一仿生拨草轮爪顶点的运动轨迹方程为：

$$\begin{cases} x = vt\cos\delta + R\sin\omega t \\ y = vt\sin\delta \\ z = R(1 - \cos\omega t) \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $v$  为机具前进速度 ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $\delta$  为拨草轮盘运动偏角 ( $^\circ$ );  $\omega$  为拨草轮盘角速度 ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $R$  为拨草轮盘的半径 ( $\text{mm}$ )。

绘制任一仿生拨草轮爪顶点的运动轨迹, 并将  $zoy$  面展开, 如图 11 所示。由图 11 可知, 顶点运动轨迹为空间螺旋线, 此时可将其运动分解为从  $a$  点到  $b$  点的纯滚动和从  $b$  点到  $c$  点的平移运动, 从  $xoy$  面内

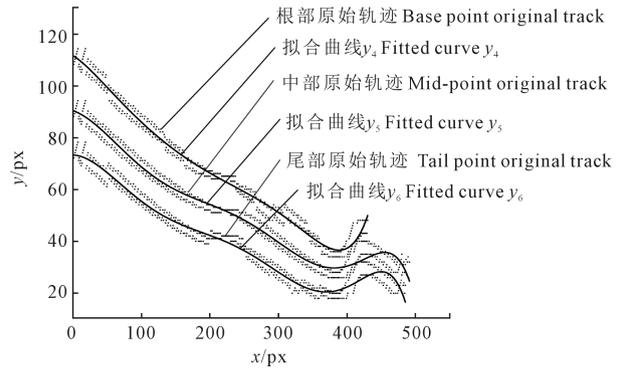
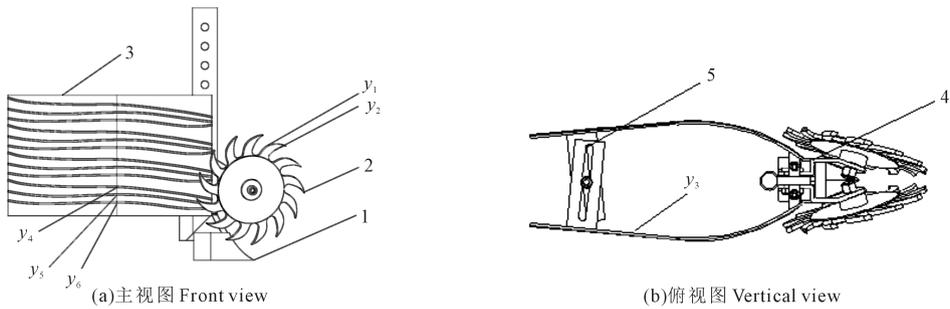


图 7 原运动轨迹与运动轨迹拟合曲线对比  
Fig.7 Comparison between original motion track and motion track fitting curve



1. 铲式开沟器; 2. 仿生拨草轮; 3. 仿生分草挡板; 4. 固定支臂; 5. 挡板偏角调节装置  
1. Hoe opener; 2. Bionic grass wheel; 3. Bionic dividing baffle; 4. Fixed arm; 5. Baffle angle adjustment device

图 9 仿生分拨草防堵装置结构图

Fig.9 Structure diagram of bionic shifting and diffidence straw anti-blocking device

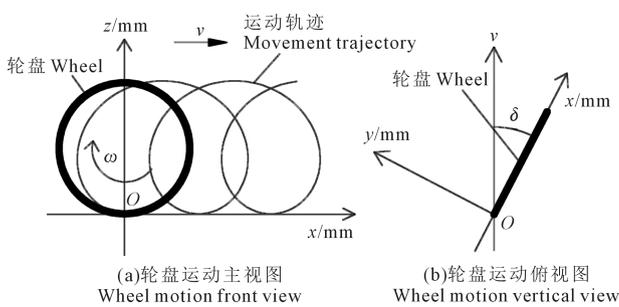


图 10 仿生拨草轮盘运动分析简图  
Fig.10 Schematic diagram of motion analysis of bionic grass wheel

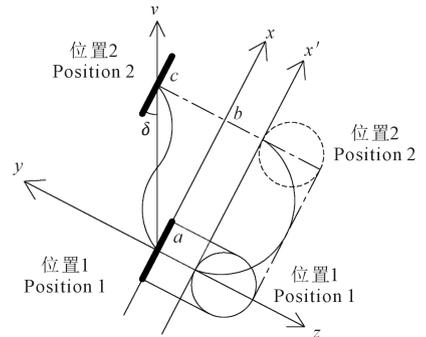


图 11 仿生拨草轮爪上任一顶点的运动轨迹  
Fig.11 The motion track of any vertex of the bionic lever

的运动轨迹投影可以看出, 拨草轮爪的顶点有比较明显的横向移动, 即对秸秆有侧方向的推动作用。当运动偏角  $\delta$  增大时, 相同作业行程内  $x$  方向运动距离减小,  $y$  方向运动距离增大, 即对秸秆的侧向推动作用增强, 向后拨动作用减弱; 当运动偏角  $\delta$  减小时, 对秸秆的侧向推动作用减弱, 向后拨动作用增强。

仿生分拨草装置中两拨草轮盘的交汇点高度  $h$  (图 12) 是影响拨草清秸效果的重要指标之一, 当  $h$  值过小时, 秸秆会从交汇点上方进入两拨草轮盘中间并造成堵塞; 当  $h$  值过大时, 两拨草轮在前下方秸

秆层位置空间过大, 会导致中间秸秆遗漏。为增强拨离作用, 通常使  $h$  略小于或等于秸秆层的覆盖高度。小麦秸秆留茬粉碎覆盖还田后, 碎秸秆覆盖高度约为  $50 \sim 100 \text{ mm}$ , 并且秸秆层流动性较差, 为满足作业要求, 本设计选取交汇点高度  $h = 80 \text{ mm}$ 。

图 12 中,  $H$  为秸秆层的覆盖高度 ( $\text{mm}$ );  $e$  为 2 个仿生拨草轮盘拨草交汇点,  $h$  为仿生拨草轮盘的交汇点高度 ( $\text{mm}$ );  $f$  为幅宽定义点,  $d$  为工作幅宽 ( $\text{mm}$ );  $\delta$  为运动偏角 ( $^\circ$ )。

由图 12 得出仿生拨草装置工作幅宽  $d$  的计算

公式为:

$$d = 2L\sin\delta = 4\sin\delta\sqrt{R^2 - (R-h)^2} = 4\sin\delta\sqrt{(2Rh-h^2)} \quad (8)$$

式中,  $L$  为  $e$  点到  $f$  点的长度(mm)。

为满足农艺要求,选取工作幅宽  $d=200$  mm,且为满足机具实际的工作要求,应保证  $H-R < R-h$ <sup>[14]</sup>,即  $100-R < R-80$ ,将以上参数带入公式(8)中得出  $\delta < 33.98^\circ$ , $\delta$ 取整为  $30^\circ$ ,数值大小适中且便于加工生产,将  $\delta=30^\circ$ 代回式(8)计算得  $R=102$  mm,即得拨草轮盘的直径  $D=204$  mm。

拨草轮爪的数量  $N$ 也是影响作业效果的重要参数, $N$ 过大会增加轮爪插入秸秆层的难度, $N$ 过小则连续拨草作业需要的转速过大。参照多齿拨草星轮的设计,轮爪数量一般为9~15个。按照1:1比例绘制仿生拨草轮盘工作示意图,如图13所示,为使拨草轮盘能在秸秆层中能稳定地连续不断进行拨草作业,当秸秆覆盖高度较小时,应保证优先工作区覆盖高度  $S$ 内至少有2个以上的拨草轮爪同时工作,选取仿生拨草轮爪数量为13且均匀分布。

## 2 分拨草防堵装置离散元仿真

### 2.1 DEM模型

在EDEM软件中生成三维尺寸为2 000 mm×400 mm×400 mm的虚拟土床以及厚度为70 mm的

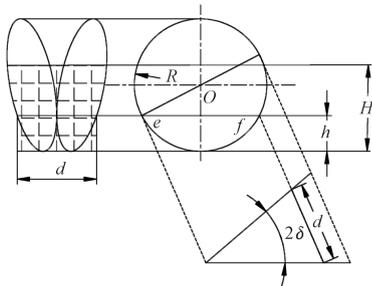


图12 仿生拨草轮盘结构示意图

Fig.12 Schematic diagram of bionic grass wheel

表1 试验因素编码水平表

Table 1 Experimental factors and levels

编码 Code	试验因素 Experimental factor		
	入土深度 $A$ Grass wheel depth/mm	机具前进速度 $B$ Forward speed /(km·h <sup>-1</sup> )	分草挡板偏角 $C$ Baffle deflection angle/(°)
-1	5	3	15
0	10	4	30
1	15	5	45

秸秆层模型,采用三维建模软件 Solidworks 对仿生分拨草免耕防堵装置按照1:1的尺寸比例进行仿真三维建模,以“.x\_t”格式导入离散元仿真软件中,颗粒间接触模型为 Hertz Mindlin with JKR 接触模型<sup>[24-26]</sup>,进行清秸防堵仿真(图14,见325页)。

### 2.2 仿真优化试验

为获取仿生分拨草装置工作的最优参数组合,以仿生拨草轮入土深度  $T(A)$ 、机具的前进速度  $v(B)$ 以及分草挡板的偏角  $\alpha(C)$ 为试验因素,种带的清秸率  $Y$ 作为试验指标,采用 Box-Behnken 试验优化设计方法,进行二次回归正交组合离散元仿真优化试验。试验因素编码如表1所示,试验方案与结果如表2所示。

### 2.3 试验结果与分析

通过 Design-Expert 软件对试验结果进行回归分析,如表3所示。影响试验指标清秸率  $Y$ 的主要因素依次是分草挡板偏角  $C$ 、机具前进速度  $B$ 、入土深度  $A$ 。清秸率  $Y$ 的试验模型极显著( $P < 0.01$ )。机具前进速度  $B$ 、分草挡板偏角  $C$ 、入土深度的二次项  $A^2$ 、机具前进速度的二次项  $B^2$ 、分草挡板偏角的二次项  $C^2$ 对清秸率  $Y$ 存在极显著影响( $P < 0.01$ ),入土深度与分草挡板偏角的交互项  $AC$ 、机具前进速度与分草挡板偏角的交互项  $BC$ 对清秸率  $Y$ 存在显著影响( $0.01 < P < 0.05$ ),入土深度与机具前进速度的交互项  $AB$ 对清秸率  $Y$ 的影响不显著。将不显著的

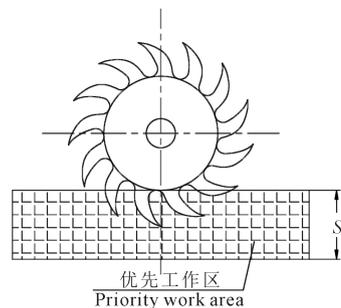


图13 仿生拨草轮盘图

Fig.13 Bionic grass wheel detail drawing

交互项并入残差项,得到各试验因素对清秸率  $Y$ 影响的回归模型为:

$$Y = 92.99 + 0.28A + 0.39B + 1.11C + 0.344C - 0.47BC - 1.48A^2 - 1.51B^2 - 1.55C^2 \quad (9)$$

通过上述回归模型的失拟性检验,可知  $P = 0.0651 > 0.05$ ,失拟项不显著,不存在其他影响指标的主要因素存在,试验指标与试验因素存在显著的二次型关系,并且决定系数与校正后的决定系数均接近于1,变异系数小于5%,信噪比大于4,说明回

归方程的可信度、精确性、合理性高,回归模型的预测值对试验值有较高的拟合水平。

利用 Design-Expert 软件,固定 3 个因素中的一个因素为零水平,通过响应曲面法分析其他两个因素对试验指标的影响和交互作用,绘制自变量与响应值(清秸率)的三维响应面图(图 15)。

(1)固定  $C$  因素取 0 水平( $30^\circ$ )时, $A$  因素和  $B$  因素对清秸率  $Y$  的影响可表示为:

$$Y_1 = 92.99 + 0.28A + 0.39B - 1.48A^2 - 1.51B^2 \quad (10)$$

如图 15a 所示,机具前进速度一定时,清秸率随拨草轮入土深度的增加先增大后减小;拨草轮入土深度一定时,清秸率随机具前进速度的增加同样先增大后减小。同时机具前进速度增加时,清秸率随拨草轮入土深度变化的速率缓慢降低。拨草轮入土深度为 9~11 mm,机具前进速度为  $4.0\sim 4.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,清秸率较高。

(2)固定  $B$  因素取 0 水平( $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )时, $A$  因素和  $C$  因素对清秸率  $Y$  的影响可表示为:

$$Y_2 = 92.99 + 0.28A + 1.11C + 0.34AC - 1.48A^2 - 1.55C^2 \quad (11)$$

如图 15b 所示,分草挡板偏角一定时,清秸率随拨草轮入土深度的增加先增大后减小;拨草轮入土深度一定时,清秸率随分草挡板偏角的增加同样先增大后减小。同时分草挡板偏角增加时,清秸率随拨草轮入土深度变化的速率降低。拨草轮入土深度为 9~11 mm,分草挡板偏角介于  $33^\circ\sim 39^\circ$  时,清秸率较高。

(3)固定  $A$  因素取 0 水平(10 mm)时, $B$  因素和  $C$  因素对清秸率  $Y$  的影响可表示为:

$$Y_3 = 92.99 + 0.39B + 1.11C - 0.47BC - 1.51B^2 - 1.55C^2 \quad (12)$$

如图 15c 所示,分草挡板偏角一定时,清秸率随机具前进速度的增加先增大后减小;机具前进速度一定时,清秸率随分草挡板偏角的增加同样先增大后减小。同时分草挡板偏角增加时,清秸率随机具前进速度变化的速率快速降低。机具前进速度为  $3.8\sim 4.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,分草挡板偏角介于  $30^\circ\sim 36^\circ$  时,清秸率较高。

以清秸率最大为寻优指标,通过 Design-Expert 软件中的 Optimization 模块对回归模型进一步优化求解,其中约束条件为:

$$\begin{aligned} & \text{Max} Y(T, v, \alpha) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} 5 \text{ mm} \leq T \leq 15 \text{ mm} \\ 3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \leq v \leq 5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \\ 15^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

从优化结果中选取一组优化方案作为最优参数组合,即当拨草轮的入土深度  $T$  为 11 mm、前进速度  $v$  为  $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、分草挡板的偏角  $\alpha$  为  $35^\circ$  时,清秸防堵装置作业性能最理想,此时的清秸率为 93.2253%。

表 3 方差分析表

Table 3 Analysis of variance table

方差来源 Variance item	平方和 Quadratic sum	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	$F$	$P$	显著性 Significance
模型 Model	45.7215	9	5.0802	66.9828	<0.0001	**
$A$	0.6050	1	0.6050	7.9770	0.0256	*
$B$	1.2013	1	1.2013	15.8387	0.0053	**
$C$	9.8125	1	9.8125	129.3787	<0.0001	**
$AB$	0.3249	1	0.3249	4.2839	0.0772	
$AC$	0.4624	1	0.4624	6.0968	0.0429	*
$BC$	0.9025	1	0.9025	11.8996	0.0107	*
$A^2$	9.2227	1	9.2227	121.6032	<0.0001	**
$B^2$	9.6641	1	9.6641	127.4227	<0.0001	**
$C^2$	10.1158	1	10.1158	133.3783	<0.0001	**
残差 Residual	0.5309	7	0.0758			
失拟误差 Lack of fit	0.4285	3	0.1428	5.5794	0.0651	
纯误差 Pure error	0.1024	4	0.0256			
总离差 Total	46.2524	16				
决定系数 $R^2$	0.9885					
校正决定系数 Adj $R^2$	0.9738					
变异系数 $CV/\%$	0.3031					
信噪比 Adeq precision	23.8738					

注: \* 表示显著 ( $0.01 \leq P < 0.05$ ), \*\* 表示极显著 ( $P < 0.01$ )。

Note: \* indicates a significant effect ( $0.01 \leq P < 0.05$ ), \*\* indicates a highly significant effect ( $P < 0.01$ ).

表 2 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 2 Design and results of Box-Behnken experiment

标准序号 Standard number	试验序号 Experiment number	$A$	$B$	$C$	清秸率 $Y$ Straw cleaning rate/%
3	1	-1	1	0	89.99
2	2	1	-1	0	89.43
8	3	1	0	1	91.98
17	4	0	0	0	93.09
14	5	0	0	0	92.89
16	6	0	0	0	92.81
1	7	-1	-1	0	89.65
13	8	0	0	0	93.21
10	9	0	1	-1	89.81
6	10	1	0	-1	88.69
9	11	0	-1	-1	88.22
5	12	-1	0	-1	88.62
15	13	0	0	0	92.95
4	14	1	1	0	90.91
12	15	0	1	1	90.68
7	16	-1	0	1	90.55
11	17	0	-1	1	90.99

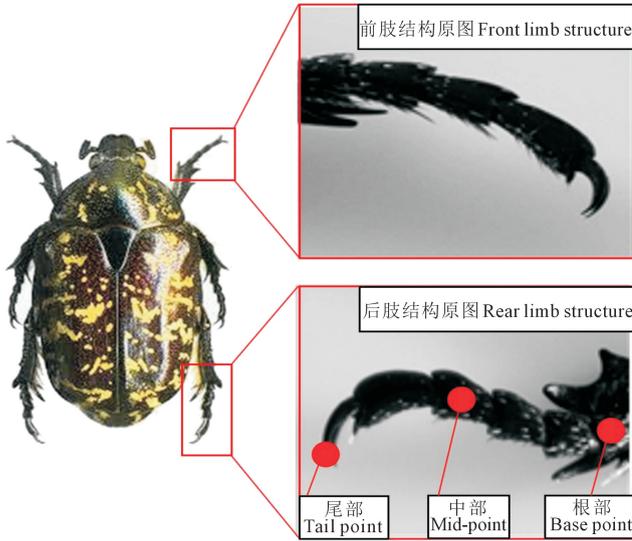


图 2 白星花金龟前、后肢结构原图

Fig.2 Original structure of front and rear limbs of *Potosia brevitarsis*

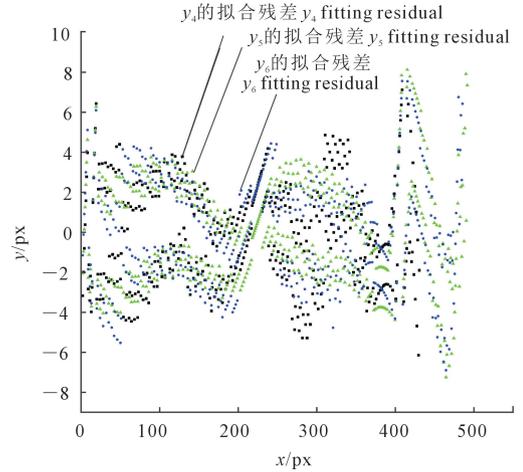


图 8 拟合运动轨迹曲线的残差

Fig.8 Residual distribution diagram of fitting motion trajectory curve

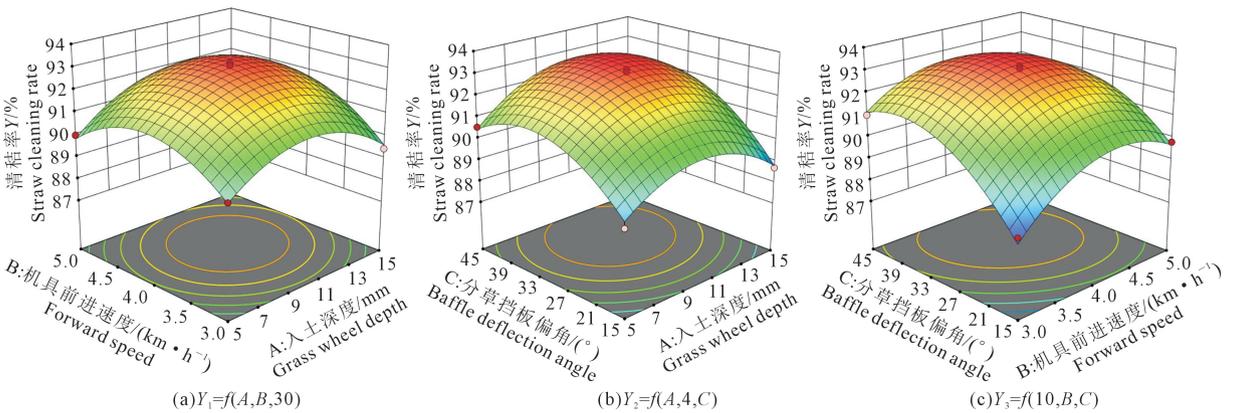


图 15 各因素对清秸率影响的响应曲面

Fig.15 Response surface of effects of factors on straw cleaning rate

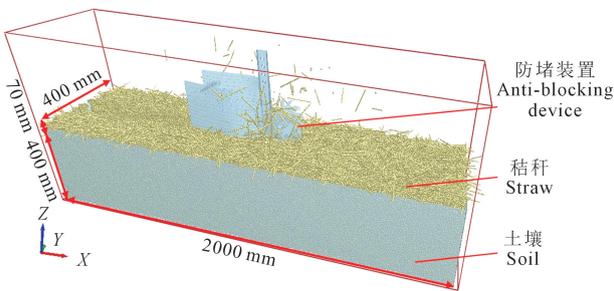


图 14 仿真作业过程

Fig.14 Simulation process



图 16 田间试验现场

Fig.16 Platform experiment

### 3 田间试验

#### 3.1 试验条件与仪器设备

试验于 2020 年 9 月 7 日在云南省昆明理工大学呈贡校区保护性耕作试验田 (24°51'N, 102°51'E, 海拔 1 892 m) 进行, 如图 16 所示, 试验期间日平均

气温为 16.5~23.6℃, 试验区域为 60 m×5 m 坡地, 土壤类型为红壤土, 土壤容重、含水率及坚实度过高或过低都会减弱拨草轮的被动转动, 试验地土壤的物理性质如表 4 所示。前茬作物小麦种植行距为 200 mm, 收获后全量覆盖还田, 小麦秸秆平均长度

为 118 mm, 秸秆含水率为 14.6%, 地表留茬高度为 5 ~ 10 mm, 平均残茬(地表以上小麦秸秆及根茬的总称)覆盖率为 88.3%, 平均残茬覆盖量为 0.636 kg · m<sup>-2</sup>, 试验条件满足《中免(少)耕施肥播种机试验准备》(GB/T20865—2017)的规定。试验主要设备: 黄海金马 304 型拖拉机、SC-900 土壤紧实度仪、环刀、烘箱、手持便携式气象站、JE502 型电子天平。

### 3.2 试验指标与方法

根据《免耕播种机质量评价技术规范》及农业部农机鉴定总站免耕播种机性能检测要求<sup>[27-30]</sup>, 将仿生分拨草防堵装置单体安装于播种机上, 以上述最优作业参数进行田间试验, 测试内容为播种机通过性、实际清秸率、土壤扰动量。

在一个试验行程中间隔 5 m 选取 10 个测试点观察防堵装置的堵塞程度, 按照无、轻微、中度、重度堵塞 4 个标准进行记录, 无堵塞或发生一次轻微堵塞为合格。使用台式电子秤测量分拨草免耕防堵装置工作前后测试点中秸秆质量, 计算实际清秸率  $\gamma$ , 计算公式为式(14),  $\gamma$  值越大越好。测量出实际开沟宽度, 取播种行距  $Z$  为 600 mm, 算出土壤扰动量  $\eta$ , 计算公式为式(15),  $\eta$  值越小越好。

$$\gamma = \left(1 - \frac{m}{M}\right) \times 100\% \quad (14)$$

式中,  $\gamma$  为实际清秸率(%);  $M$  为作业前测试点秸秆质量(kg);  $m$  为作业后测试点秸秆质量(kg)。

$$\eta = \frac{W}{Z} \times 100\% \quad (15)$$

式中,  $\eta$  为土壤扰动量(%);  $W$  为实际开沟宽度(mm);  $Z$  为播种行距(mm)。

### 3.3 试验结果与分析

种带的实际清秸率、土壤扰动量测定结果如表 5、表 6 所示, 实际作业中只在一个测试点发生轻微堵塞, 整机的通过性良好; 各测试点土壤扰动量测定值较为均匀, 平均土壤扰动量为 20.00%, 满足检测要求; 已知目前同类型被动式破茬防堵机构秸秆清除率介于 50% ~ 80%, 主动式破茬防堵机构秸秆清除率为 90% 左右, 本设计的平均实际秸秆清除率

为 90.58%, 略低于仿真试验结果, 清秸防堵效果较好。并且实际秸秆清除率和土壤扰动量变异系数均较小, 分别为 1.20% 和 5.30%, 证明机器的工作稳定性较好。

## 4 结 论

1) 以白星花金龟为仿生原型, 使用连续变倍体视显微镜和高速摄像机获得了其前、后肢轮廓图像及后肢运动视频, 用 Matlab 和高速视频目标跟踪测量软件 V 1.0 进行图像处理, 采用 Origin 软件获得了白星花金龟前、后肢轮廓拟合曲线及后肢运动轨迹拟合曲线, 并设计了一种新型的仿生分拨草清秸防堵装置。

2) 对仿生拨草轮进行了运动学分析, 得出运动偏角  $\delta$  与机具对秸秆的侧向推动作用呈正相关关系, 与机具对秸秆的拨动作用呈负相关关系。通过计算分析获得了影响作业性能的结构参数运动偏角  $\delta$  为 30°, 拨草轮盘的直径  $D$  为 204 mm, 拨草轮爪数量为 13 个。

3) 采用 Box-Behnken 试验优化设计方法, 进行二次回归正交组合离散元仿真优化试验, 通过 Design-

表 5 种带秸秆清除效果测定表

Table 5 Performance evaluation index of the anti-blocking device for allocating grass

试验号 Experiment number	$M$ /kg	$m$ /kg	$\gamma$ /%
1	0.354	0.033	90.68
2	0.289	0.035	87.89
3	0.396	0.038	90.40
4	0.317	0.028	91.17
5	0.384	0.031	91.93
6	0.296	0.025	91.55
7	0.368	0.033	91.03
8	0.314	0.029	90.76
9	0.346	0.035	89.88
10	0.328	0.031	90.55

表 6 土壤扰动量测定表

Table 6 Determination of soil disturbance

试验号 Experiment number	$W$ /mm	$\eta$ /%
1	115	19.20
2	123	20.53
3	121	20.20
4	118	19.70
5	127	21.20
6	131	21.87
7	122	20.37
8	119	19.87
9	109	18.20
10	114	19.03

表 4 试验区域土壤物理性质

Table 4 Physical properties of soil in test area

物理特性 Physical property	土层深度 Soil depth/cm			
	0~5	5~10	10~15	15~20
容重 Unit weight/(g · cm <sup>-3</sup> )	1.12	1.24	1.27	1.31
含水率 Moisture content/%	11.4	13.6	17.4	19.1
土壤坚实度/MPa Soil compaction	0.65	0.82	1.10	1.20

Expert 软件对试验结果进行分析,获得了最优作业参数组合:拨草轮入土深度  $T$  为 11 mm,机具前进速度  $v$  为  $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,分草挡板偏角  $\alpha$  为  $35^\circ$ 。

4) 田间试验结果表明,安装仿生分拨草防堵装置后,整机的通过性良好,平均秸秆清除率为 90.58%,平均土壤扰动量为 20.00%,秸秆清除率和土壤扰动量变异系数分别为 1.20% 和 5.30%,作业质量稳定,符合免耕播种机作业的农艺和技术要求。

#### 参考文献:

- [1] 戴伊莎,贾会娟,熊瑛,等. 保护性耕作措施对西南旱地玉米田土壤有机碳、氮组分及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 82-90.
- DAI Y S, JIA H J, XIONG Y, et al. Impact of conservation tillage measures on maize yield, soil organic carbon and nitrogen components of maize field in rain-fed region in southwest China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 82-90.
- [2] 邱野,王瑄. 耕作模式对坡耕地土壤水分和大豆产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 128-137.
- QIU Y, WANG X. Effects of tillage patterns on soil moisture and soybean yield in sloping fields[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(22): 128-137.
- [3] CARMONA I, GRIFFITH D M, SORIANO M A, et al. What do farmers mean when they say they practice conservation agriculture? A comprehensive case study from southern Spain [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 213: 164-177.
- [4] ABADI B, YADOLLAHI A, BYBORDI A, et al. The contribution of diverse motivations for adhering to soil conservation initiatives and the role of conservation agriculture features in decision-making[J]. Agricultural Systems, 2020, 182: 102849.
- [5] 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 H B, HE J, ZHENG Z Q, 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.
- [6] 陈海涛,魏志鹏,苏文海,等. 前置式大垄原茬地种床整备装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 51-60, 73.
- CHEN H T, WEI Z P, SU W H, et al. Design and experiment of cleaning and anti-blocking of front-mounted seed bed preparation device for grand ridge with raw stubble[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 51-60, 73.
- [7] 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 Q J, CAO X P, WANG C, 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.
- [8] 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 J, LI H W, CHEN H T, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1-19.
- [9] 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 Y Y, LUO W W, HU Z C, 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.
- [10] 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 Q, TANG H, ZHOU W Q, 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.
- [11] 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 Q, JIA H L, ZHU L T, et al. Design and experiment of star-toothed concave disk row cleaners for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 68-77.
- [12] 赵淑红,谭贺文,王加一,等. 多功能集成式播种开沟器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 58-67.
- ZHAO S H, TAN H W, WANG J Y, et al. Design and experiment of multifunctional integrated seeding opener[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(11): 58-67.
- [13] 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 X H, JIA H L, ZHANG W H, et al. Parametric analysis of finger-type anti-blocking residue-cleaner for no-till planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 56-60.
- [14] 刘正平,田梦,杨淞旭,等. 从动型旋转齿盘分草装置的设计[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(1): 120-124.
- LIU Z P, TIAN M, YANG S X, et al. Design of a grass separation equipment with driven rotating tooth disk[J]. Journal of South China Agricultural University, 2018, 39(1): 120-124.
- [15] 贾洪雷,郭明卓,郭春江,等. 免耕播种机动态仿生破茬装置设计与参数试验优化[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 103-114.
- JIA H L, GUO M Z, GUO C J, et al. Design of dynamic bionic stubble cutting device and optimization test of parameters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 103-114.
- [16] 贾洪雷,郑健,赵佳乐,等. 2BDB-6(110)型大豆仿生智能耕播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 93-107.
- JIA H L, ZHENG J, ZHAO J L, et al. Design and experiment of 2BDB-6(110) soybean bionic intelligent till-sowing machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 93-107.
- [17] 张广杰,王倩,刘玉升. 白花金龟人为条件生物学与应用潜力[J]. 环境昆虫学报, 2020, 42(2): 257-266.
- ZHANG G J, WANG Q, LIU Y S. Biology under artificial condition

- and utilization potential of *Potosia brevitarsis* (Coleoptera: Cetoniidae)[J]. Journal of Environmental Entomology, 2020, 42(2): 257-266.
- [18] 朱惠斌, 钱诚, 白丽珍, 等. 正反转动力式玉米切茬防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 1-11.  
ZHU H B, QIAN C, BAI L Z, et al. Design and experiments of active anti-blocking device with forward-reverse rotation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(1): 1-11.
- [19] 石林榕, 赵武云, 孙伟, 等. 马铃薯仿生挖掘铲减阻性能研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 286-291.  
SHI L R, ZHAO W Y, SUN W, et al. Research on the drag reduction performance of potato bionic digging shovel[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(3): 286-291.
- [20] IGATHINATHANE C, WOMAC A R, SOKHANSANJ S. Corn stalk orientation effect on mechanical cutting[J]. Biosystems Engineering, 2010, 107(2): 97-106.
- [21] 林静, 张桐嘉, 田阳, 等. 秸秆深埋还田仿生开沟装置优化与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊 1): 50-59, 67.  
LIN J, ZHANG T J, TIAN Y, et al. Optimization and experiment on bionic deep-buried device for returning straw in field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 50-59, 67.
- [22] JIA H L, LI C Y, ZHANG Z H, et al. Design of bionic saw blade for corn stalk cutting[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(4): 497-505.
- [23] LIU C B, SHENG C, YANG H L, et al. Design and optimization of bionic Janus blade in hydraulic torque converter for drag reduction [J]. Journal of Bionic Engineering, 2018, 15(1): 160-172.
- [24] 田辛亮, 丛旭, 齐江涛, 等. 黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 100-108, 242.  
TIAN X L, CONG X, QI J T, et al. Parameter calibration of discrete element model for corn straw-soil mixture in black soil areas [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 100-108, 242.
- [25] 武涛, 黄伟凤, 陈学深, 等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(3): 93-98.  
WU T, HUANG W F, CHEN X S, et al. Calibration of discrete element model parameters for cohesive soil considering the cohesion between particles[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(3): 93-98.
- [26] 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 W W, CAI D Y, XIE J J, et al. Parameters calibration of discrete element model for corn stalk powder compression simulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 127-134.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 农业机械试验条件测定方法的一般规定: GB/T 5262-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Agricultural machinery testing conditions-general rules for measuring methods: GB/T 5262-2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 免(少)耕施肥播种机: GB/T 20865-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. No or little-tillage fertilizes-seeder: GB/T 20865-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [29] 中华人民共和国农业部. 免耕播种机质量评价技术规范: NY/T 1768-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Technical specifications of quality evaluation for no-tillage drilling machinery NY/T 1768-2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 单粒(精密)播种机试验方法: GB/T 6973-2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Testing methods of single seed drills (precision drills): GB/T 6973-2005 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.