

协拨组合式玉米条带秸秆清理装置设计与试验

高 振^{1,2} 卢彩云^{1,2} 位旭阳³ 李洪文^{1,2} 何 进^{1,2} 王庆杰^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部河北北部耕地保育科学观测实验站, 北京 100083;
3. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 洛阳 471023)

摘要: 针对现有条带秸秆清理装置集行效果差、秸秆清理率低等问题,提出了一种协拨组合式条带秸秆清理方案,从力学角度对比分析不同齿形清秸轮拨送秸秆的过程,设计了一种径向锐化协拨清秸轮,清秸轮半径为162.5 mm、齿数为12、齿长为65 mm。开展了协拨组合式条带秸秆清理装置的仿真试验,以径向锐化清秸轮的工作参数为影响因素,秸秆清理率为指标,开展离散元仿真试验,分析了清秸轮工作过程中秸秆运动、土壤扰动及秸秆清理率的变化。结果表明,试验因素对秸秆清理率的影响由大到小为侧倾角、前进速度、前倾角,当机具前进速度为7.8 km/h、清秸轮前倾角为31.7°、侧倾角为13.4°时,秸秆清理率最高为91.62%。开展了协拨组合式条带秸秆清理装置和整机的作业性能田间试验,结果表明协拨组合式条带秸秆清理装置工作稳定,秸秆清理率为87%~90%,实现了条带秸秆清理装置的设计目标。

关键词: 条带秸秆清理装置; 条带耕作; 径向锐化清秸轮; EDEM 仿真

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)10-0068-12 **OSID:** 

Design and Experiment of Co-stirring Combined Corn Strip Straw Cleaning Device

GAO Zhen^{1,2} LU Caiyun^{1,2} WEI Xuyang³ LI Hongwen^{1,2} HE Jin^{1,2} WANG Qingjie^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Scientific Observing and Experiment Station of Arable Land Conservation (North Hebei),
Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Beijing 100083, China

3. Luoyang Electro Optic Equipment Research Institute, China Aviation Industry Corporation, Luoyang 471023, China)

Abstract: To solve the problems of poor collection effect and unstable profiling of existing machines and tools for strip straw cleaning, a combined strip straw cleaning scheme was proposed. The process of pulling straws with different tooth shape cleaning wheels was compared and analyzed from the mechanical point of view, and a radial sharpening-assisted pulling cleaning wheel was designed. The radius of the cleaning wheel was 162.5 mm, the number of teeth was 12, and the tooth length was 65 mm. The simulation experiment of the combined strip straw cleaning device was carried out. Taking the working parameters of the radial sharpening straw cleaning wheel as the experimental factors and the straw cleaning rate as the experimental index, the quadratic orthogonal rotation regression discrete element simulation experiment was carried out to analyze the changes in straw movement, soil disturbance, and straw cleaning rate during the working process of the straw cleaning wheel. The results showed the significant order of the experimental factors on the straw cleaning rate from large to small was as follows: roll angle, forward speed and rake angle. When the forward speed of the machine was 7.8 km/h, the rake angle of the straw cleaning wheel was 31.7°, and the roll angle was 13.4°, the highest straw cleaning rate was 91.62%. A field experiment on the operational performance of the combined strip straw cleaning device and the whole machine was carried out. The results showed that the combined strip straw cleaning device worked stably, the straw cleaning rate was 87%~90%, and the design goal of the strip straw cleaning device was achieved.

Key words: strip straw cleaning device; strip tillage; radial sharpening wheel; EDEM simulation

收稿日期: 2023-07-10 修回日期: 2023-08-26
基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA28010402)和中国农业大学2115人才工程项目
作者简介: 高振(1994—),男,博士生,主要从事保护性耕作研究,E-mail: 1248010060@qq.com
通信作者: 卢彩云(1986—),女,副教授,博士生导师,主要从事保护性耕作与智能农业装备研究,E-mail: lucaiyun@cau.edu.cn

0 引言

中国东北黑土区总面积约 $1.03 \times 10^6 \text{ km}^2$, 是世界排名第三的黑土区^[1-3]。保护性耕作技术是实施黑土地保护的有效举措, 其技术要点主要是对农田实行免耕、少耕和作物秸秆覆盖地表^[4-6]。东北地区玉米秸秆量大, 秸秆全量还田条件下, 地温回升慢, 出苗不齐, 且机械化播种容易造成机具堵塞、播种晾籽等问题。针对以上问题, 研究人员提出条带耕作的方法, 即通过秸秆集行, 形成清秸带和秸秆带相间的地表环境, 研究发现, 条带耕作技术具有土壤扰动小, 作业成本低, 地温提升快等优点^[7-9]。

条带秸秆清理装置是玉米条带清秸耕整机的重要组成部分, 直接影响清秸带秸秆残留量和后续播种难易程度, 是条带耕整机研究的重点。于畅畅等^[10]提出螺旋切分式种带清秸装置结构, 由拖拉机动力输出轴驱动切口圆盘切割秸秆, 在清茬刀的旋转推送下, 将秸秆输送到清秸带两侧。陈海涛等^[11]提出螺旋刀齿秸秆清理装置, 将清秸刀螺旋周布, 由拖拉机后输出轴主动驱动, 实现种床秸秆清茬、抛撒。袁盼盼等^[12]提出滴灌带秸秆清理装置, 可根据滴灌带作业要求完成不同次序的种带清理。林静等^[13]提出的星型清垄装置, 圆盘犁刀能够完成无支撑和有支撑两种切割方式, 在玉米垄作地完成清垄工作方便后续播种。

条带耕整机的作业性能与条耕质量密切相关, 国内对条带耕整机研究尚处于起步阶段, 无法满足东北黑土地条带耕作需求。条带集行是条带耕作的核心, 东北地区秸秆量大, 现有条带秸秆清理装置集行效果差、秸秆清理率低, 难以直接应用于东北地区。为此, 本文设计一种协拨组合式条带秸秆清理装置, 以期实现秸秆集行并降低土壤扰动量。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

协拨组合式条带秸秆清理装置结构如图 1 所示, 主要由地表自适应机构和协拨组合清秸轮组成。地表自适应机构包括仿形支撑座、仿形调节装置和平行四连杆架, 仿形支撑座焊接在机架上, 平行四连杆架采用专用自锁螺母铰接。协拨组合清秸轮包括清秸轮、清秸轮安装架和限深轮, 清秸轮和限深轮通过轴承座固定在清秸轮安装架上, 清秸轮安装架采用专用自锁螺母与平行四连杆架铰接。

1.2 工作原理

作业时, 地表自适应机构根据地表起伏对协拨

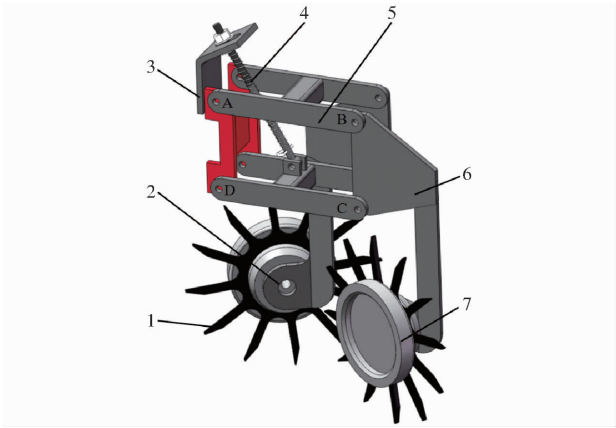


图 1 协拨组合式条带秸秆清理装置
Fig. 1 Co-stirring combined strip straw cleaning device
1. 清秸轮 2. 清秸轮安装架 3. 仿形支撑座 4. 仿形调节装置
5. 平行四连杆架 6. 清秸轮安装架 7. 限深轮

组合清秸轮单体的垂直位置进行调整, 保证清秸轮轮齿始终与地面秸秆接触, 避免拨秸失效。协拨组合清秸轮在地面摩擦力和牵引力形成的旋转力矩作用下转动, 通过左右清秸轮的配合作业, 将秸秆导流拨送至清秸轮两侧形成清秸带。

秸秆在协拨组合式条带秸秆清理装置作用下的流动情况如图 2 所示, 图中红色框线区域为清秸带, 清秸带两侧是秸秆带。清秸轮以速度 v_0 进行作业时, 清秸轮齿首先触碰秸秆, 秸秆沿着清秸轮轮面向后流动, 在轮齿的连续推送下, 秸秆持续沿轮面流动, 最终轮齿与秸秆分离, 秸秆维持末速度斜抛, 落到地面形成秸秆带。

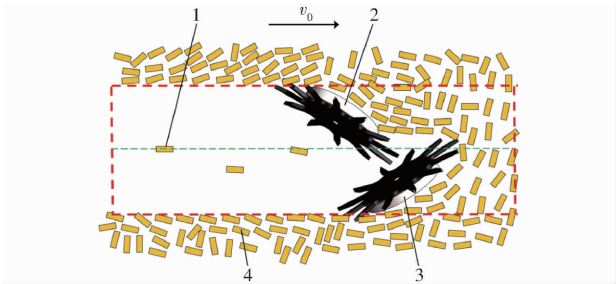


图 2 秸秆清理示意图
Fig. 2 Schematic of straw cleaning
1. 清秸带残留秸秆 2. 左清秸轮 3. 右清秸轮 4. 秸秆带秸秆

2 协拨清秸轮设计

清秸轮是协拨组合式条带秸秆清理装置的核心部件, 为了满足秸秆集行要求, 分析秸秆集行时清秸轮施加给秸秆的作用力, 合理设计清秸轮的结构参数和布置方案。

2.1 清秸轮齿形设计

2.1.1 清秸轮齿形选择

按照轮齿切线与过圆心直线的关系, 清秸轮齿形可分为径向、前倾和后倾^[14]。以清秸轮开始

碰触秸秆时刻和清秸轮将秸秆拨离地面时刻为例,对两个时间节点中不同齿形清秸轮作用下的秸秆进行受力分析。通过对比清理秸秆过程中秸秆的受力变化,分析不同齿形清秸轮清理秸秆的效果。

清秸轮开始触碰秸秆时,秸秆受力情况如图 3

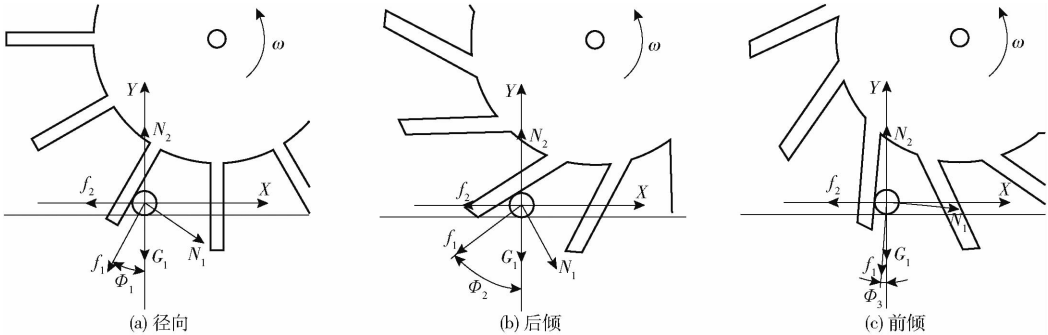


图 3 清秸轮刚接触秸秆时秸秆受力分析

Fig. 3 Force analysis of straw when straw cleaning wheel just touched straw

由于清秸轮刚触碰秸秆时,竖直方向相对地面无运动,即秸秆竖直方向受力平衡,秸秆沿着地面向前滚动,此时秸秆沿着地面方向的速度由水平方向的合力决定。3 种清秸轮水平方向合力为

$$\begin{cases} F_{ax} = N_1 \cos \Phi_1 - f_1 \sin \Phi_1 - f_2 & (\text{径向}) \\ F_{bx} = N_1 \cos \Phi_2 - f_1 \sin \Phi_2 - f_2 & (\text{后倾}) \\ F_{cx} = N_1 \cos \Phi_3 - f_1 \sin \Phi_3 - f_2 & (\text{前倾}) \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)设函数

$$Y = N_1 \cos \Phi - f_1 \sin \Phi - f_2 \quad (2)$$

对式(2)求得

$$Y' = -N_1 \sin \Phi - f_1 \cos \Phi \quad (3)$$

式中 F_{ax} ——径向清秸轮水平方向合力,N
 F_{bx} ——后倾清秸轮水平方向合力,N
 F_{cx} ——前倾清秸轮水平方向合力,N
 Φ —— f_1 与 G_1 的夹角

由图 3 可知,清秸轮对秸秆的摩擦力与秸秆重

力的夹角 Φ 小于 $\pi/2$,则式(3)小于零,即随着夹角 Φ 的增大 Y 减小,其中 $\Phi_2 > \Phi_1 > \Phi_3$,即 $F_{cx} > F_{ax} > F_{bx}$ 。所以,按照清秸轮刚触碰秸秆时秸秆沿水平方向向前移动的趋势,将 3 种清秸轮由大到小排序为:前倾清秸轮、径向清秸轮、后倾清秸轮。随着清秸轮继续拨动秸秆,清秸轮对秸秆的摩擦力与秸秆重力的夹角 Φ 先减少后增大,但夹角 Φ 始终小于 $\pi/2$ 。所以,随着清秸轮继续拨动秸秆,按照秸秆沿水平方向向前移动的趋势,将 3 种清秸轮排序仍为:前倾清秸轮、径向清秸轮、后倾清秸轮。

清秸轮将秸秆拨离地面时刻,秸秆的受力情况如图 4 所示。以秸秆中心为坐标原点,以垂直齿面方向为 X 轴,以平行齿面方向为 Y 轴建立坐标系。秸秆在清秸轮作用下沿 X 轴抛离,对轮面方向秸秆的受力情况进行分析,此时秸秆受自身重力 G_1 ,清秸轮对秸秆的摩擦力 f_1 ,清秸轮对秸秆的支持力 N_1 。

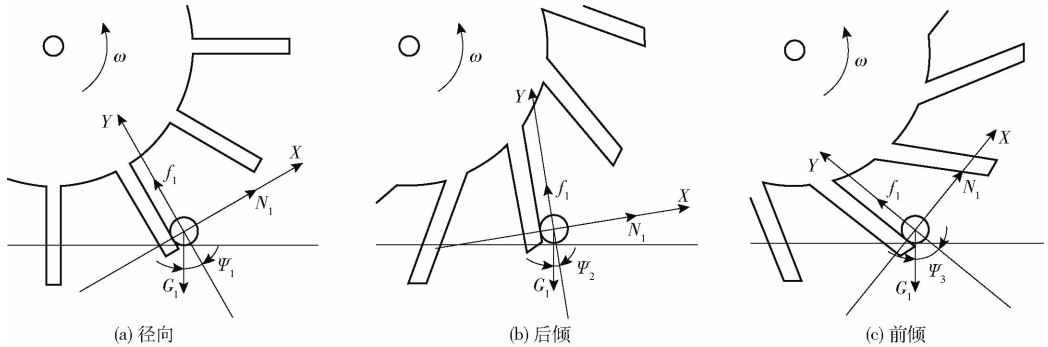


图 4 清秸轮抛出秸秆时秸秆受力分析

Fig. 4 Force analysis of straw when straw was thrown out by straw cleaning wheel

由于清秸轮将秸秆拨离地面的瞬间,地面对秸秆无作用力,因此接触面方向秸秆受力平衡。此时

秸秆垂直接触面方向的速度由 X 轴方向的合力决定,3 种清秸轮垂直接触面方向的合力为

$$\begin{cases} F_{ax1} = N_1 - G_1 \sin \varphi_1 \\ F_{bx1} = N_1 - G_1 \sin \varphi_2 \\ F_{cx1} = N_1 - G_1 \sin \varphi_3 \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4)设函数

$$Y_1 = N_1 - G_1 \sin \varphi \quad (5)$$

对式(5)求导得

$$Y'_1 = -G_1 \cos \varphi \quad (6)$$

式中 F_{ax1} ——径向清秸轮垂直接触面方向的合力, N

F_{bx1} ——后倾清秸轮垂直接触面方向的合力, N

F_{cx1} ——前倾清秸轮垂直接触面方向的合力, N

Ψ —— G_1 与平行接触面方向的夹角

由图 4 可知, 秸秆重力与垂直接触面方向夹角 Ψ 小于 $\pi/2$, 则式(6)小于零, 即随着夹角 Ψ 的增大 Y_1 减小。其中 $\Psi_3 > \Psi_1 > \Psi_2$, 即 $F_{bx1} > F_{ax1} > F_{cx1}$, 清秸轮将秸秆拨离地面时, 按照秸秆沿垂直接触面方向继续移动的趋势, 将 3 种清秸轮由大到小排序为: 后倾清秸轮、径向清秸轮、前倾清秸轮。

综上所述, 径向清秸轮连续向前拨动秸秆的性能优于后倾清秸轮, 将秸秆抛离地面的性能优于前倾清秸轮, 在刚触碰秸秆时刻和将秸秆抛离地面时都表现出较好的性能。在刚接触秸秆时, 它能够平稳地与秸秆接触并逐渐拨动, 从而减小对秸秆和设备的冲击; 在将秸秆拨离地面时, 能够将秸秆有效地抛离地面; 而在持续拨动阶段, 径向清秸轮能够持续有效地清理秸秆, 保持清理效果的稳定性, 所以选择径向清秸轮。

2.1.2 清秸轮齿形优化

径向清秸轮拨送秸秆时部分轮齿与土壤接触, 为减小清秸轮在土壤中的阻力, 对径向清秸轮齿的轮齿锐化处理。径向清秸轮轮齿锐化前后秸秆被抛离地面时刻的受力情况如图 5 所示, 以秸秆中心为坐标原点, 以垂直齿面方向为 X 轴, 以平行齿面方向为 Y 轴建立坐标系。

从图 5 可知, 径向清秸轮锐化前轮齿末端在进入土壤时接触面积 C_1 大于锐化后轮齿末端在进入土壤时接触面积 C_2 , 锐化后阻力较小, 提升了清秸轮入土能力, 降低了清秸轮与土壤接触过程中的能量损耗。径向清秸轮锐化前后将秸秆拨离地面时秸秆的受力情况发生改变, 重力与沿着接触面方向的夹角减小。其中 $\Psi_4 > \Psi_5$, 根据式(5)、(6)分析知, 径向清秸轮锐化后将秸秆拨离地面时垂直接触面的趋势增加, 能够有效提升秸秆的抛离效果。

将清秸轮轮齿锐化可以减小入土阻力, 增大秸

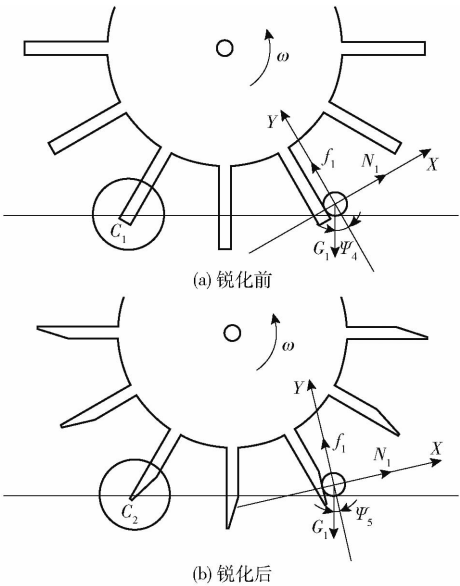


图 5 锐化前后秸秆受力分析

Fig. 5 Force analysis of straw before and after sharpen

秆重力方向与垂直接触面方向的夹角 Ψ , 改变清秸轮拨离秸秆时秸秆的运动方向, 提升 X 轴的速度分量, 降低 Y 轴竖直分速度, 提升清秸效果。清秸轮的入土深度是影响清秸阻力的因素, 如图 6 所示径向清秸轮沿着轮面方向旋转时, 当轮齿旋转到与地面垂直时轮齿入土深度最大, 入土阻力最大。

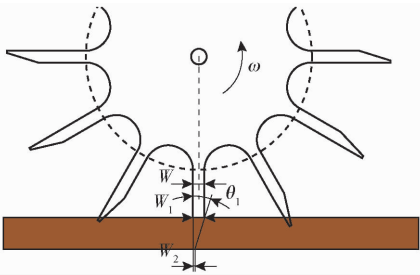


图 6 轮齿锐化结构图

Fig. 6 Tooth sharpening structure diagram

在清秸轮入土阻力最大时, 同样的锐化清秸轮在相同的入土深度时, 减小轮齿在土壤中水平宽度 W_1 和 W_2 可以减小轮齿在土壤中的工作阻力。轮齿尖端宽度 W_2 过小, 清秸轮工作过程中可能出现扎秸现象, 而且清秸轮工作时尖端更易磨损, 因此本文设尖端宽度 W_2 为 3 mm。由图 6 几何关系可知 θ_1 为

$$\theta_1 = \arctan \frac{W_1 - W_2}{h_1} \quad (7)$$

式中 θ_1 ——清秸轮轮齿锐化角度, ($^\circ$)

h_1 ——清秸轮入土深度, mm

清秸轮与土壤水平接触宽度影响轮齿的强度, W_1 越大轮齿寿命越高, 因此本文 W_1 与齿宽 W 相同为 14 mm。

清秸轮入土深度 h_1 为 25 mm, 代入式(7)得 θ_1 为 23.7° 。

2.2 清秸轮参数设计

2.2.1 清秸轮理论幅宽

清秸轮工作时左右轮对置分布,图 7 为右清秸轮工作示意图, X 轴为机具前进方向, Y 轴为垂直于机具前进方向, Z 轴为垂直地面方向。沿机具前进方向正视清秸轮得到 ZOY 面的投影,清秸轮轮面与 XOZ 面的夹角为侧倾角 β ,清秸轮入土深度为 h_1 ,清秸轮轮齿的运动轨迹与土壤表面水平线交点为啮合点 m 和啮合点 n ,在 ZOY 面清秸轮有效工作幅宽为 b 。从垂直地面方向俯视清秸轮得到 XOY 面的投影,清秸轮与机具前进方向的夹角为前倾角 α ,啮合点 m 和啮合点 n 对应清秸轮沿轮面方向的有效宽度为 L_{mn} 。

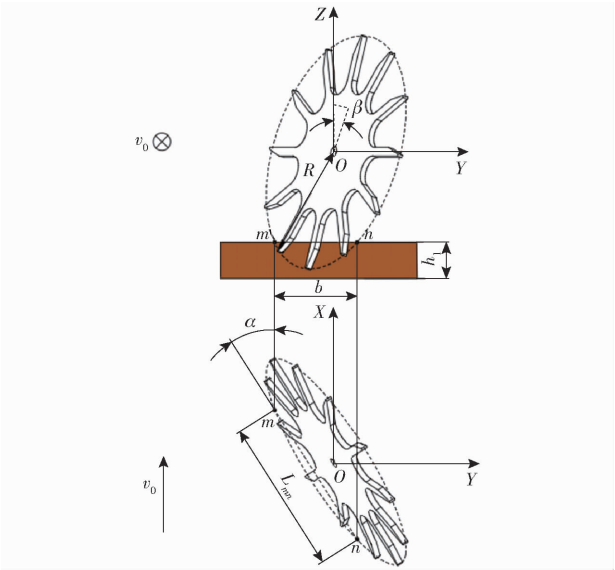


图 7 清秸轮工作示意图

Fig. 7 Schematic of work of straw cleaning wheel

清秸轮的入土深度影响啮合点位置、清秸轮旋转力矩和土壤扰动量。入土深度过浅啮合点 m 和点 n 在 ZOY 面的有效幅宽窄,不符合作业要求,且地面摩擦力小使清秸轮旋转力矩过小旋转不流畅;入土深度过大,啮合点 m 和点 n 区间接触土壤量大,清秸阻力大,增大土壤扰动量,综合考虑取清秸轮入土深度 h_1 为 25 mm。清秸轮入土深度沿轮面方向的长度 h_2 ,可以近似为

$$h_2 = \frac{h_1}{\cos\beta}$$
 (8)

结合图 7 可知清秸轮沿轮面方向的有效宽度^[15] L_{mn} 为

$$L_{mn} = 2 \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{h_1}{\cos\beta}\right)^2}$$
 (9)

式中 R ——清秸轮半径,mm

清秸轮理论幅宽 b 为

$$b = L_{mn} \sin\alpha = 2 \sin\alpha \sqrt{\frac{h_1}{\cos\beta} \left(2R - \frac{h_1}{\cos\beta}\right)}$$
 (10)

2.2.2 清秸轮齿长和半径

清秸轮依靠轮齿拨动地表秸秆达到秸秆集行的目的,清秸轮齿长 E 应大于秸秆厚度与入土深度之和,即

$$E > E_1 + h_1$$
 (11)

式中 E_1 ——秸秆厚度,mm

东北地区条耕前秸秆层平均厚度 $E_1 = 40$ mm,结合清秸轮入土深度 $h_1 = 25$ mm,由式(11)得轮齿长度 E 为 65 mm。

参照《农业机械设计手册》^[16],清秸轮半径 R 为

$$R = K d_k$$
 (12)

式中 K ——径深比,取 1.5 ~ 2.5

d_k ——清秸轮工作深度,mm

通过限深轮限制清秸轮工作深度,清秸轮最大工作深度等于轮齿长度 E ,得清秸轮半径为 98.5 ~ 162.5 mm。清秸轮半径越大清秸幅宽越易满足条耕作业农艺要求,参考传统中小型免耕播种机清茬防堵机构参数,选取清秸轮半径为 162.5 mm。

2.2.3 清秸轮齿数

清秸轮齿数 n 决定相邻齿之间的弧线长度 L_1 ,弧线长度过短,两清秸轮间容易夹带秸秆,弧线长度过长,清秸轮拨秸不连续容易造成漏拨。根据图 8 可知相邻齿之间的弧线长度 L_1 为

$$L_1 = \frac{\theta_2}{180} \pi (R - E) - W$$
 (13)

式中 θ_2 ——相邻齿轮间隔角,(°)

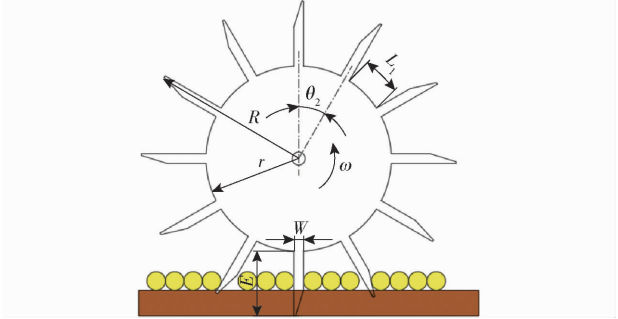


图 8 清秸轮参数

Fig. 8 Parameter of straw cleaning wheel

根据《农业机械设计手册》^[16],参考免耕播种机防堵机构取清秸轮相邻齿间隔角 θ_2 为 30°,由式(13) 计算此时相邻轮齿弧线长度 L_1 为 37.1 mm,弧线长度 L_1 大于玉米秸秆直径,满足清秸轮齿间不夹带秸秆的要求。此时清秸轮齿数 n 为

$$n = \frac{360}{\theta_2}$$
 (14)

将 θ_2 代入计算得清秸轮齿数为 12。

3 离散元仿真试验

秸秆清理率是评价条带秸秆清理装置的重要指标,反映条带秸秆清理装置的工作性能^[17-19]。根据前文分析可知,清秸轮前倾角和侧倾角是影响清秸轮的结构参数,影响秸秆集行效果;条带秸秆清理装置的前进速度与清秸轮对秸秆的冲量有关,影响秸秆集行效果。为分析条带秸秆清理装置的工作性能,以前进速度、前倾角、侧倾角为试验因素,以秸秆清理率为试验指标,开展离散元仿真试验。

3.1 离散元仿真模型构建

根据东北地区条耕时土壤条件,运用 EDEM 离散元仿真软件建立虚拟土槽模型。设置土槽基本尺寸(长×宽×高)为 2 000 mm×1 000 mm×100 mm,在土槽上方建立颗粒工厂,生成厚 100 mm 的土壤颗粒。设定土壤颗粒间接触模型为 Hertz - Mindlin with no slip^[20-21]。

条带秸秆清理装置的工作对象主要为玉米秸秆,建立符合实际的玉米秸秆模型对保证模拟数据的准确性有重要意义。根据实际测量和文献[22-23],采用 20 个直径 18 mm、球心间距为 5 mm 的球体组成长 112 mm 的长圆线型模型作为玉米秸秆颗粒模型,秸秆颗粒间接触模型为 Hertz - Mindlin with no slip 模型^[24-25]。玉米秸秆颗粒生成位置和下落姿态为随机受自身重力作用下落,在土槽模型内生成厚度为 40 mm 左右秸秆层。

在 SolidWorks 2018 中建立清秸模型,为提高仿真效率,对三维模型进行简化,仅保留两清秸轮作为主要工作部件,将文件另存为 .stp 格式导入 EDEM 软件中,如图 9 所示,清秸轮采用 65Mn 钢,清秸轮与土壤、秸秆颗粒间的接触模型选定为 Hertz - Mindlin with no slip 模型。设置正确的旋转方向、角速度、前倾角和侧倾角,沿旋转轴匀速旋转,并设置清秸轮正确的行驶方向和前进速度,模拟清秸过程。

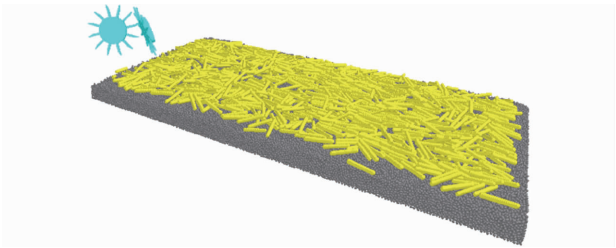


图 9 仿真模型与清秸轮模型

Fig. 9 Simulation model and straw cleaning wheel model

在清秸轮仿真过程中,清秸轮-土壤颗粒、清秸轮-秸秆颗粒、土壤-土壤颗粒、秸秆-秸秆颗粒和土

壤-秸秆之间均发生接触,并产生相对运动。通过查阅文献,在 EDEM 软件中设置各离散元仿真模型接触参数如表 1 所示。

表 1 材料参数和接触参数
Tab. 1 Material parameters and contact parameters

项目	参数	数值
清秸轮	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	7.0×10^{10}
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 800
土壤颗粒	泊松比	0.38
	剪切模量/Pa	1.0×10^6
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 850
秸秆颗粒	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	1.0×10^6
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	180
土壤颗粒-土壤颗粒	碰撞恢复系数	0.20
	静摩擦因数	0.40
	动摩擦因数	0.25
土壤颗粒-清秸轮	碰撞恢复系数	0.04
	静摩擦因数	0.50
	动摩擦因数	0.04
秸秆颗粒-秸秆颗粒	碰撞恢复系数	0.30
	静摩擦因数	0.30
	动摩擦因数	0.01
秸秆颗粒-清秸轮	碰撞恢复系数	0.30
	静摩擦因数	0.30
	动摩擦因数	0.01
土壤颗粒-秸秆颗粒	碰撞恢复系数	0.50
	静摩擦因数	0.30
	动摩擦因数	0.05

在仿真过程中通过记录清秸作业时条带区域内秸秆质量的变化,反映条带秸秆清理装置的工作效果。在 EDEM 软件 Setup Selections 模块添加 Grid Bin Group 传感器,设置检测颗粒类型为秸秆。设置秸秆传感器长×宽×高为 2 100 mm×200 mm×150 mm,传感器大小与理论清秸幅宽对应,秸秆传感器的中心与土槽中心重合。

如图 10 所示,仿真过程中传感器记录区域内秸秆质量变化情况。图中绿色方框为设置的检测区域,灰色颗粒为土壤颗粒,黄色和橙色颗粒为秸秆颗粒,在统计区域内的秸秆颗粒显示为橙色。

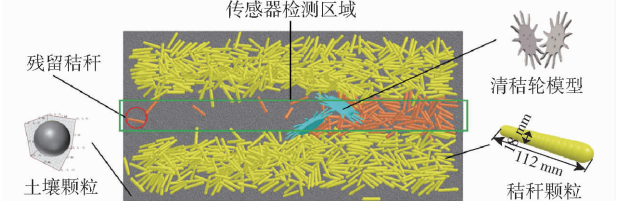


图 10 秸秆清理率检测

Fig. 10 Detection of straw cleaning rate

每组仿真结束后,在后处理中导出数据,秸秆清理率计算式为

$$\zeta_1 = \left(1 - \frac{m_1}{m_0}\right) \times 100\% \tag{15}$$

式中 ζ_1 ——秸秆清理率,%
 m_1 ——仿真后秸秆质量,kg
 m_0 ——仿真前秸秆质量,kg

3.2 单因素试验

以前进速度、前倾角、侧倾角为试验因素,以秸秆清理率为试验指标,设计单因素仿真试验,分析上述因素对仿真清秸过程中秸秆运动特性和秸秆清理率的影响。

3.2.1 前进速度

以清秸轮前进速度为试验因素,进行单因素试验,分析前进速度对秸秆清理率的影响。设置清秸轮前倾角 32.5°、侧倾角 0°、入土深度 25 mm,前进速度在 4~9 km/h 之间变化,增量为 1 km/h。不同前进速度时,离散元仿真 0.9 s 时秸秆和土壤的运动云图如图 11 所示。

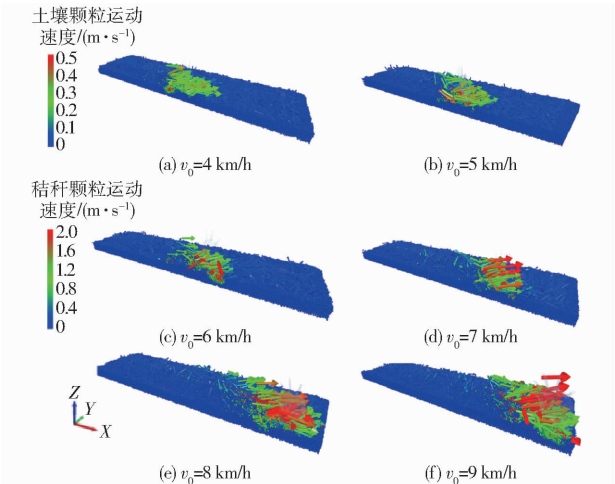


图 11 不同速度下仿真云图
Fig. 11 Simulation cloud images at different speeds

由图 11 可知,清秸轮前进速度对秸秆运动速度有影响,清秸轮前进速度越大,秸秆运动越剧烈。以运动速度达到 2.0 m/s 的秸秆(以下简称高速秸秆)为例,清秸轮前进速度为 7~9 km/h 时,高速秸秆的数量明显高于清秸轮前进速度为 4~6 km/h。因此,提高前进速度能够促进秸秆运动。

秸秆清理率结果如图 12 所示。当前进速度在 4~7 km/h 范围内变化时,随着前进速度的增加,秸秆清理率迅速提高。当清秸轮前进速度较小时,秸秆的运动速度较小,导致一些秸秆虽然有运动,但仍在清秸带内。当前进速度在 7~9 km/h 范围内变化时,清秸轮前进速度增加,秸秆运动速度增加。虽然秸秆运动速度增加,但短时间内需要处理的秸秆量

也随之增加,导致秸秆清理率在该范围内没有明显变化。为保证条带秸秆清理装置的清秸质量,秸秆清理率应该大于 80%,综合以上分析,在正交试验中设定清秸轮前进速度范围为 6~8 km/h。

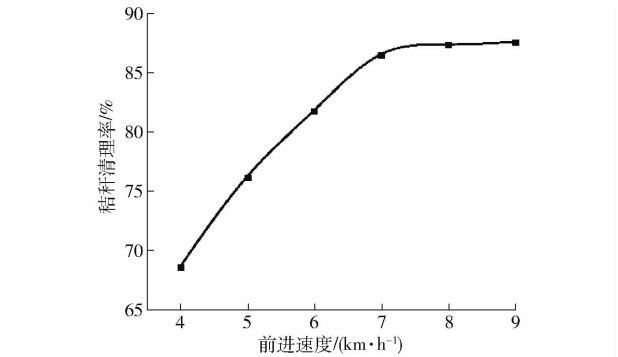


图 12 不同前进速度时秸秆清理率变化曲线
Fig. 12 Change curve of straw cleaning rate at different forward speeds

3.2.2 前倾角

以清秸轮前倾角为试验因素,进行单因素试验,分析清秸轮的前倾角对秸秆清理率的影响。设置清秸轮前进速度 7 km/h、侧倾角 0°、入土深度 25 mm,参考免耕播种机清秸轮前倾角工作参数,设置清秸轮前倾角在 30°~35°范围内变化,增量为 2.5°。离散元仿真至 0.9 s 时,前倾角为 30°、32.5°、35°时的秸秆运动云图如图 13 所示。

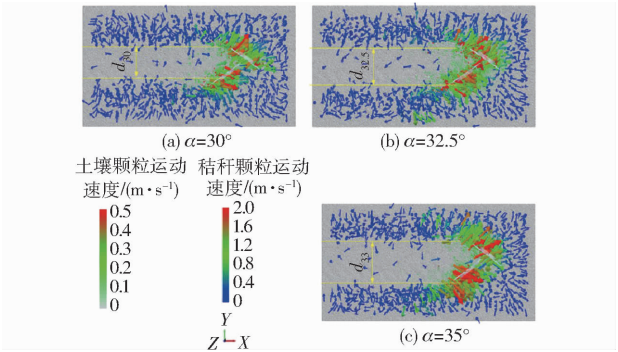


图 13 不同前倾角下仿真云图
Fig. 13 Simulation cloud images under different forward tilt angles

由图 13 可知,秸秆颗粒在清秸轮作用下向侧前方运动,形成清秸带,当清秸轮前倾角在 30°~35°范围内时,高速秸秆数量无明显变化,前倾角对秸秆运动速度影响较小。当清秸轮前倾角在 30°~35°范围内时,清秸幅宽随清秸轮前倾角增大而增大。分析秸秆运动云图可知,提升清秸轮前倾角对秸秆运动速度影响不明显。

秸秆清理率结果如图 14 所示,清秸轮前倾角在 30°~35°范围内变化时,随清秸轮前倾角增大,秸秆清理率增大,但增量较小。条带内秸秆清理率均大

于 84% , 清秸效果较好, 满足清秸要求。

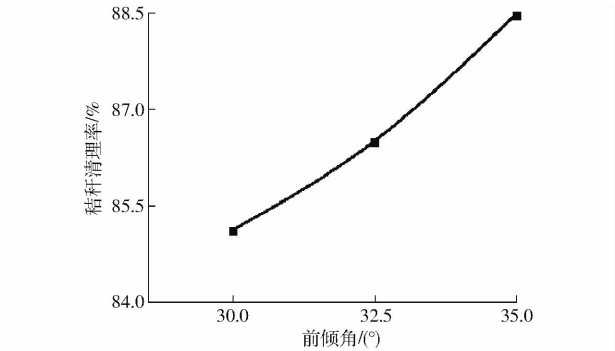


图 14 不同前倾角时秸秆清理率变化曲线

Fig. 14 Change curve of straw cleaning rate at different forward tilt angles

3.2.3 侧倾角

以清秸轮侧倾角为试验因素, 进行单因素试验, 分析清秸轮侧倾角对秸秆清理率的影响。设置清秸轮前进速度 7 km/h、前倾角 32.5°、入土深度 25 mm, 设置清秸轮侧倾角在 -15° ~ 15° 范围内变化, 增量为 7.5°。离散元仿真至 0.9 s 时, 侧倾角为 -15°、-7.5°、0°、7.5°、15° 时秸秆运动云图如图 15 所示。

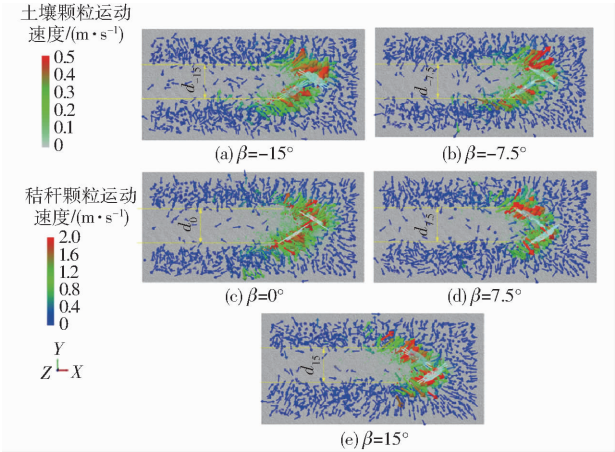


图 15 不同侧倾角下仿真云图

Fig. 15 Simulation cloud images at different roll angles

由图 15 可知, 秸秆颗粒在清秸轮作用下向清秸轮侧前方运动, 形成清秸带, 当清秸轮侧倾角在 -15° ~ 15° 范围内变化时, 高速秸秆数量无明显变化, 侧倾角对秸秆运动速度影响较小。由图 15 可知, 不同侧倾角的清秸带内秸秆残留数量差异较大, 其中侧倾角 -15° 时, 残留的秸秆最多。

秸秆清理率如图 16 所示。由图 16 可知, 随清秸轮侧倾角增加, 秸秆清理率提升, 在 -15° ~ 0° 时秸秆清理率提升较快, 在 0° ~ 15° 秸秆清理率提升缓慢。清秸轮侧倾角对秸秆清理率的影响较显著, 因此在正交试验中设定清秸轮侧倾角范围为 -15° ~ 15°。

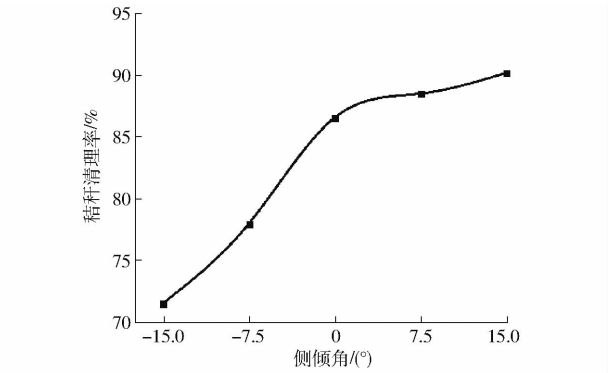


图 16 不同侧倾角时秸秆清理率的变化曲线

Fig. 16 Change curve of straw cleaning rate at different roll angles

3.3 正交试验

3.3.1 试验方案与试验结果

通过单因素离散元仿真试验, 分析清秸轮前进速度、前倾角和侧倾角对秸秆清理率的影响, 为进一步分析这 3 个参数对秸秆清理率影响的交互作用, 获取秸秆清理率的最佳参数组合, 选取 Box - Behnken 试验方案, 以清秸轮的前倾角、侧倾角和前进速度为试验因素, 秸秆清理率为试验指标, 开展离散元仿真试验。试验因素编码如表 2 所示, 试验方案设计与试验结果如表 3 所示, 其中 x_1 、 x_2 、 x_3 为编码值。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Coding of test factors

编码	因素		
	前进速度 v_0 /	前倾角 α /	侧倾角 β /
	($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	($^{\circ}$)	($^{\circ}$)
-1	6	30.0	-15
0	7	32.5	0
1	8	35.0	15

表 3 Box - Behnken 试验方案及结果

Tab. 3 Box - Behnken test scheme and results

试验 序号	因素			秸秆清理率 ξ_1 / %
	前进速度 x_1	前倾角 x_2	侧倾角 x_3	
1	-1	-1	0	79.03
2	1	-1	0	87.52
3	-1	1	0	87.42
4	1	1	0	90.16
5	-1	0	-1	72.77
6	1	0	-1	76.50
7	-1	0	1	90.10
8	1	0	1	90.79
9	0	-1	-1	71.54
10	0	1	-1	79.55
11	0	-1	1	89.21
12	0	1	1	90.00
13	0	0	0	86.43
14	0	0	0	86.51
15	0	0	0	87.02
16	0	0	0	86.15
17	0	0	0	85.12

3.3.2 试验结果方差分析

利用分析软件 Design-Expert 10.0.7 对仿真结果进行方差分析,结果如表 4 所示。通过方差分析可知,前进速度、前倾角、侧倾角对秸秆清理率影响极显著,交互项中侧倾角的平方项对秸秆清理率影响极显著;前进速度与前倾角的交互项、前倾角与侧倾角的交互项对秸秆清理率影响显著。主因素对秸秆清理率显著性影响由大到小为侧倾角、前倾角、前进速度,模型失拟差 $P>0.05$,失拟项不显著,证明拟合效果较好。对不显著项剔除后再次分析,得到方差分析表,结果如表 5 所示。其回归方程为

$$\zeta_1=86.15+1.96x_1+2.48x_2+7.47x_3-1.44x_1x_2-1.80x_2x_3-3.59x_3^2$$

(16)

表 4 秸秆清理率方差分析

Tab.4 Variance analysis of straw cleaning rate

项目	平方和	自由度	均方	F	P
模型	604.28	9	67.14	47.33	<0.000 1***
x_1	30.62	1	30.62	21.58	0.002 4***
x_2	49.15	1	49.15	34.65	0.000 6***
x_3	446.11	1	446.11	314.49	<0.000 1***
x_1x_2	8.27	1	8.27	5.83	0.046 5**
x_1x_3	2.31	1	2.31	1.63	0.242 6
x_2x_3	13.03	1	13.03	9.19	0.019 1**
x_1^2	0.065	1	0.065	0.046	0.836 6
x_2^2	0.034	1	0.034	0.024	0.882 1
x_3^2	54.02	1	54.02	38.08	0.000 5***
失拟差	7.95	3	2.65	5.35	0.069 4
残差 误差	1.98	4	0.49		
综合	614.21	16			

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

表 5 剔除不显著因素秸秆清理率方差分析

Tab.5 Analysis of straw cleaning rate variance of removal of insignificant factors

项目	平方和	自由度	均方	F	P
模型	601.87	6	100.31	81.27	<0.000 1***
x_1	30.62	1	30.62	24.80	0.000 6***
x_2	49.15	1	49.15	39.82	<0.000 1***
x_3	446.11	1	446.11	361.40	<0.000 1***
x_1x_2	8.27	1	8.27	6.70	0.027 1**
x_2x_3	13.03	1	13.03	10.56	0.008 7***
x_3^2	54.69	1	54.69	44.31	<0.000 1***
失拟差	12.34	10	1.23	3.49	0.123 3
残差 误差	10.36	6	1.73		
综合	1.98	4	0.49		

3.3.3 响应曲面分析

为了分析试验因素与秸秆清理率的关系,运用分析软件 Design-Expert 10.0.7 得到前进速度和前

倾角交互项及前倾角和侧倾角交互项的显著性响应曲面。

图 17 为侧倾角 0°时,前倾角和前进速度交互项的显著性响应曲面。从图 17 可知,秸秆清理率与前进速度、前倾角呈正相关,并随着前倾角增大秸秆清理率随速度提升的增量逐渐变少。在清秸轮前倾角不变时,前进速度增加清秸轮的角速度增加,加剧秸秆与轮齿的碰撞,使秸秆更容易被集行处理,秸秆清理率增大;在前进速度不变时,由式(4)可知,清秸轮的角速度与前倾角为正弦函数关系,在试验区间内呈正相关,前倾角增大等同于提升了清秸轮的角速度,秸秆清理率提升。结合表 4 显著性结果分析,清秸轮前倾角的影响效果大于前进速度。

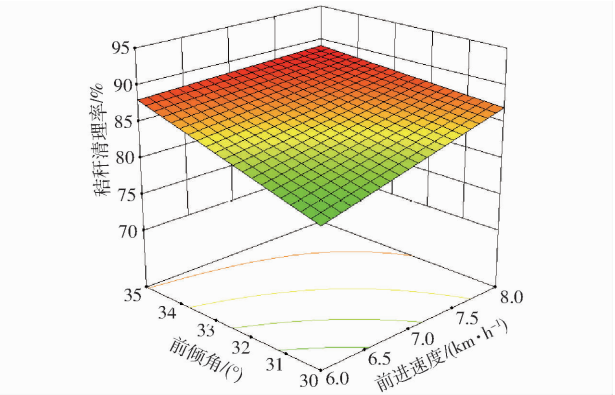


图 17 前进速度和前倾角交互项响应曲面

Fig.17 Response surface of interaction term between forward speed and forward tilt angle

图 18 为前进速度 7 km/h 时,清秸轮前倾角和侧倾角交互项的显著性响应曲面。从图 18 可以看出,秸秆清理率与清秸轮前倾角、侧倾角呈正相关,并随着清秸轮前倾角、侧倾角数值增大秸秆清理率提升量将逐渐变小。当侧倾角一定时,前倾角增大秸秆清理率提升显著,并随着清秸轮侧倾角的增大提升效果逐渐不明显;当清秸轮前倾角一定时,侧倾角变大清秸效果提升明显,相关性最为显著。当侧

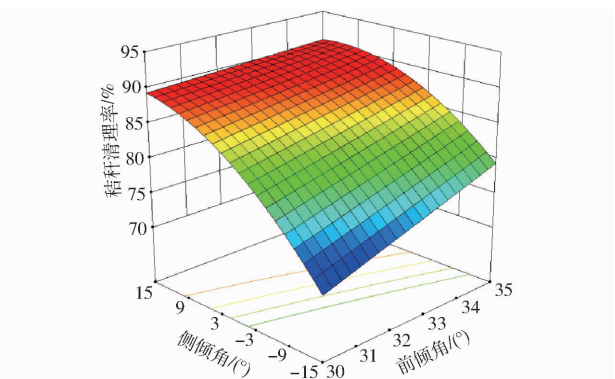


图 18 前倾角和侧倾角交互项响应曲面

Fig.18 Response surface for interaction term between tilt angle and roll angle

倾角变大时,秸秆运动轨迹向两侧的趋势明显,集行效果显著,秸秆清理率提升。

3.3.4 参数优化

利用 Design-Expert 10.0.7 软件中的优化模块,对上述回归模型进行约束目标优化求解,得到清秸轮的最佳运动参数与结构参数。根据实际作业及相关理论得到优化约束条件、目标及约束函数为

$$\begin{cases} \max Y(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq x_1 \leq 1 \\ -1 \leq x_2 \leq 1 \\ -1 \leq x_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

根据目标函数优化求解得,当机具前进速度为 7.8 km/h、前倾角 31.7°、侧倾角 13.4°时,秸秆清理率为 91.62%。

4 田间试验

4.1 试验条件与试验方案

为验证离散元仿真结果,在辽宁省本溪市本溪满族自治县小市镇开展了机具田间工作性能试验。辽宁省本溪满族自治县地处辽宁省东部,属于东北黑土区,土壤肥沃,位于东经 123°34′~124°45′,北纬 38°43′~43°26′之间,气候属于北温带湿润气候,年降雨量 800~1 000 mm。试验地区位于辽宁省本溪满族自治县小市镇附近农户自种田,属于一年一熟垄作地,前茬作物为玉米,收获时秸秆粉碎还田,根茬无处理,试验地情况如图 19a 所示。试验前对试验地地表情况和土壤理化特性进行测试,包括玉米行距、株距,根茬留茬高度、根茬直径、秸秆平均覆盖量、土壤紧实度、温度、土壤含水率,结果如表 6 所示。

开展条带秸秆清理装置田间试验时,将条带耕整机的土壤耕整装置、镇压装置卸掉,如图 19b 所示。设置协拨清秸轮前倾角 31.7°、侧倾角 13.4°,对比单点仿形和平行四连杆仿形,机具前进速度为 6、7、8 km/h 的作业效果,并测量秸秆清理率和清秸幅宽,如图 19c、19d 所示,清秸作业后效果如图 19e 所示。

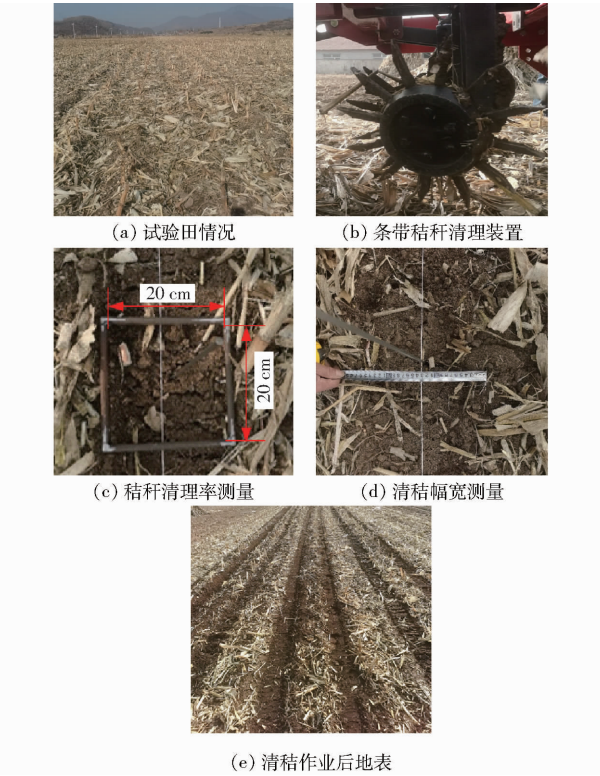
4.2 试验结果分析

4.2.1 秸秆清理率

图 20 为不同仿形方案下平均秸秆清理率随前进速度的变化趋势,机具前进速度 6~8 km/h 时,两种仿形方案平均秸秆清理率为 87%~90%,秸秆清理率随前进速度逐渐增加。

4.2.2 清秸幅宽

图 21 为不同仿形方案下平均清秸幅宽随前进



(e) 清秸作业后地表

图 19 试验现场

Fig. 19 Test site

表 6 试验田地况数据采集

Tab. 6 Test field data collection results

参数	数值
株距/cm	22.47
行距/cm	59.17
留茬高度/cm	151.72
根茬直径/cm	25.58
平均秸秆覆盖量/(kg·m ⁻²)	2.436
土壤含水率/%	15.44

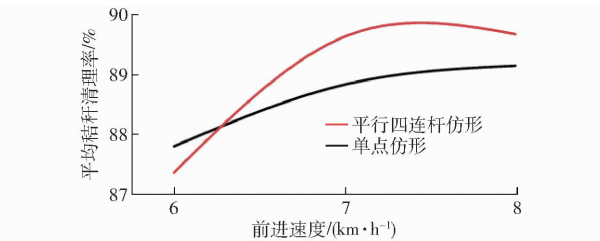


图 20 不同仿形方案下平均秸秆清理率变化曲线

Fig. 20 Change curves in average straw cleaning rate under different profiling schemes

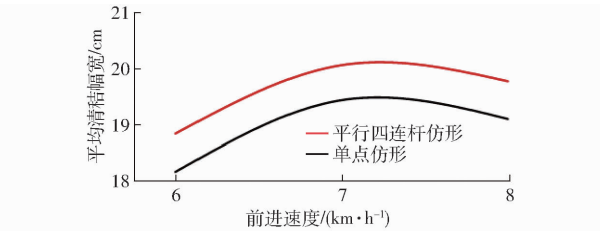


图 21 不同仿形方案下平均清秸幅宽变化曲线

Fig. 21 Change curves in average width of straw cleaning under different profiling schemes

速度的变化趋势,在前进速度 6 ~ 8 km/h 时,两种方案平均清秸幅宽为 18 ~ 20.5 cm,清秸幅宽随前进速度先增加再减少,在前进速度 7 km/h 和 8 km/h 时清秸幅宽差异不大。

5 结 论

(1)对比了不同齿形清秸轮作业时秸秆的受力情况,设计了一种径向锐化协拨清秸轮,清秸轮结构参数为半径 162.5 mm、齿数 12、齿长 65 mm,保证协拨清秸轮有效工作区域重叠,对置安装时两轮前后

距离为 210 mm。
(2)以秸秆清理率为试验指标,以清秸轮的前进速度、前倾角和侧倾角为试验因素,开展离散元仿真试验,确定协拨清秸轮工作参数机具前进速度 7.8 km/h、清秸轮前倾角 31.7°、侧倾角 13.4°时,秸秆清理率为 91.62%。
(3)田间试验结果表明,前进速度为 6 ~ 8 km/h 时,协拨组合式条带秸秆清理装置秸秆清理率为 87% ~ 90%,清秸幅宽为 18 ~ 20.5 cm。

参 考 文 献

[1] 李然嫣.我国东北黑土区耕地利用与保护对策研究[D].北京:中国农业科学院,2017.
LI Ranyan. Research on policy options in utilizing and protecting farm land in black soil region of Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. (in Chinese)

[2] 国家黑土地保护工程实施方案(2021—2025 年)[J].农村工作通讯,2021(17):4-9.

[3] 农业部、国家发展改革委、财政部、国土资源部、环境保护部、水利部.关于印发《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030 年)》的通知[Z].2017.

[4] 魏丹,杨谦,迟凤琴.东北黑土区土壤资源现状与存在问题[J].黑龙江农业科学,2006(6):69-72.
WEI Dan, YANG Qian, CHI Fengqin. The soil resource conditions and the problems in northeast black soil regions[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences,2006(6):69-72. (in Chinese)

[5] 谭佳琪.东北典型黑土区耕地资源变化及其对粮食生产的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.
TAN Jiaqi. Changes of cultivated land resources and its impact on grain production in typical back soil areas of Northeast China [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[6] 农业部农业机械化管理司.中国保护性耕作[M].北京:中国农业出版社,2008.

[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 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)

[8] LICHT M A, KOOPMAN Z A, BERN S K R. No-tillage, strip-tillage, and chisel plow tillage trial[R]. Iowa State Research and Demonstration Farms Progress Reports, 2012.

[9] 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. Tillage soil protection of black soil zone in Northeast of China based on analysis of conservation tillage in the united states[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(10): 28-34. (in Chinese)

[10] 于畅畅,王庆杰,李洪文,等.螺旋切分式种带清理装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(增刊2):212-219.
YU Changchang, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and experiment of spiral-split sowing strip cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp.2):212-219. (in Chinese)

[11] 陈海涛,查韶辉,顿国强,等.2BMFJ 系列免耕精量播种机条带秸秆清理装置优化与试验[J].农业机械学报,2016, 47(7):96-102.
CHEN Haitao, ZHA Shaohui, DUN Guoqiang, et al. Optimization and experiment of cleaning device of 2BMFJ type no-till precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):96-102. (in Chinese)

[12] 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 straw cleaning device for wide narrow maize no-tillage sowing strip in drip irrigation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(6): 43-52. (in Chinese)

[13] 林静,钱巍,牛金亮.玉米垄作免耕播种机新型切拨防堵装置的设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2015,46(6): 691-698.
LIN Jing, QIAN Wei, NIU Jinliang. Design and experiment of stubble-cutting and anti-blocking mechanism for ridge-till and no-till planter[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2015,46(6):691-698. (in Chinese)

[14] 余海波.免耕播种机凹面爪式清茬机构仿真与试验[D].长春:吉林大学,2017.
YU Haibo. Simulation and experiment on the concave claw-type stubble clearance mechanism of no-tillage planter[D].

Changchun; Jilin University, 2017. (in Chinese)

[15] 包文育. 东北垄作免耕播种机关键部件研究与整机设计[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2009.
BAO Wenyu. Study on key parts and holistic device of the no-till planter of the ridge cropping system in northeast area of China [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009. (in Chinese)

[16] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.

[17] 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)

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

[19] 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)

[20] MAK J, CHEN Y, SADEK M A. Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. Soil & Tillage Research,2012,118:117-122.

[21] 方会敏. 基于离散元法的秸秆-土壤-旋耕刀相互作用机理研究[D]. 南京:南京农业大学,2016.
FANG Huimin. Research on the straw-soil-rotary blade interaction using discrete element method[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[22] 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 CSAE, 2021, 37(6): 26-34. (in Chinese)

[23] 曹鑫鹏,王庆杰,李洪文,等. 玉米免耕播种机侧置切刀与拨茬齿盘组合清茬装置研究[J]. 农业机械学报,2021, 52(3):36-44.
CAO Xinpeng, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Combined row cleaners research with side cutter and stubble clean disk of corn no-till seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(3):36-44. (in Chinese)

[24] 方会敏,姬长英,AHMED Ali Tagar,等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报,2016,47(1): 60-67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(1):60-67. (in Chinese)

[25] ZENG Zhiwei, CHEN Ying. Simulation of straw movement by discrete element modelling of straw-sweep-soil interaction [J]. Biosystems Engineering,2019,180:25-35.