

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.21.019

高速免耕播种机防残茬回带清秸防堵装置设计与试验

陈海涛^{1,2} 王旭¹ 侯守印¹ 王星¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江东方学院机电工程学院, 哈尔滨 150066)

摘要: 针对 2BMFJ 型免耕播种机在高速作业条件下清秸工作部件易造成残茬回带问题,设计一种防残茬回带清秸防堵装置。通过单因素试验确定影响清秸刀盘作业效果的关键参数范围,基于 EDEM-ADAMS 联合仿真试验,应用五因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验方法,以清秸刀盘调节器长度、刀柄长度、行星轮与清秸刀齿铰接点中心距、作业速度和刀轴转速为试验因素,以清秸率、土壤扰动率、当量功耗和秸秆回带率为评价指标,对影响清秸装置性能的结构与作业参数进行仿真试验与优化研究,试验结果表明:当调节器长度为 35 mm、刀柄长度为 54 mm、行星铰接中心距为 58 mm、作业速度为 14.4 km/h 以及刀轴转速为 540 r/min 时,装置的清秸率能够达到 91.11%,土壤扰动率为 21.03%,当量功耗为 9.35 kW,秸秆回带率为 4.85%。田间性能验证试验表明:在清秸刀齿入土深度 50 mm、作业速度 14.4 km/h、刀轴转速 540 r/min 的作业条件下,优化后的清秸防堵装置清秸率为 $(91.23 \pm 0.56)\%$ 、土壤扰动率为 $(22.63 \pm 2.34)\%$ 、当量功耗为 (10.63 ± 0.33) kW、秸秆回带率为 $(5.90 \pm 1.98)\%$ 。防残茬回带清秸防堵装置比原清秸防堵装置秸秆回带率降低了 28.13%,可有效减少残茬回带,提高种带清秸质量。

关键词: 高速免耕播种机; 清秸防堵装置; 防残茬回带; EDEM-ADAMS 联合仿真

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)21-0203-14 OSID: 

Design and Test of Stubble Returning Preventing and Straw-clearing Anti-blocking Device for High-speed No-tillage Planter

Chen Haitao^{1,2} Wang Xu¹ Hou Shouyin¹ Wang Xing¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, East University of Heilongjiang, Harbin 150066, China)

Abstract: Aiming at the problem of stubble returning caused by the working parts of 2BMFJ series no-tillage planter under high-speed operation conditions, an anti-blocking device for preventing stubble returning was improved and designed. The range of key parameters affecting the operation effect of straw clearing cutter was determined by single factor test. Based on the EDEM-ADAMS joint simulation test, the five-factor and five-level quadratic regression orthogonal rotation center combination test method was applied. The length of the regulator of straw clearing cutter, length of handle, center distance between planetary wheel and hinge point of straw clearing cutter, operation speed and rotation speed of cutter shaft were taken as test factors, and straw clearing rate, soil disturbance rate, equivalent power consumption and straw returning rate were taken as evaluation indexes. The simulation test and optimization of structure and operation parameters affecting the performance of straw clearing device were carried out. The test results showed that when the length of the regulator was 35 mm, length of tool holder was 54 mm, center distance of planetary hinge was 58 mm, operating speed was 14.4 km/h, and rotation speed of tool shaft was 540 r/min, the straw removal rate of the device can reach 91.11%, soil disturbance rate was 21.03%, equivalent power consumption was 9.35 kW, and straw returning rate was 4.85%. The field performance verification test showed that under the operating conditions of 50 mm soil depth, 14.4 km/h operating speed and 540 r/min cutter shaft speed, the optimized straw removal and anti-blocking device had a straw removal rate of $(91.23 \pm 0.56)\%$, soil disturbance rate of $(22.63 \pm 2.34)\%$, equivalent power consumption of (10.63 ± 0.33) kW, and straw return rate of $(5.90 \pm 1.98)\%$. The straw

收稿日期: 2025-07-13 修回日期: 2025-10-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000401)

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

returning rate of the anti-blocking device for preventing stubble returning was 28.13% lower than that of the original straw cleaning and anti-blocking device, which could effectively reduce the stubble returning and improve the quality of straw cleaning.

Key words: high-speed no-tillage planter; straw-cleaning anti-blocking device; stubble returning preventing; EDEM – ADAMS co-simulation

0 引言

免耕播种技术是一种保护性耕作方法,清洁的种床是实施精量播种的前提。秸秆还田具有调控土壤温度、抑制水分蒸腾、提升土壤有机质含量及防止风蚀水蚀等生态功能^[1-3]。东北黑土区机收粉碎后的玉米茬地中,大量滞留秸秆形成高密度覆盖层,易导致清秸防堵装置作业效果不佳,并引发播种器械堵塞问题^[4-5]。实施免耕播种作业时,必须开发与高速播种机匹配的清秸防堵装置,有效解决秸秆缠绕和种床堵塞问题,保障播种质量与作业效率^[6]。

清秸防堵装置从动力来源方面可分为主动式与被动式,国外免耕播种机械大部分采用被动式清秸防堵装置完成清秸防堵工作,Torbert等^[7]设计了一种结合被动清秸和重力切茬的残茬处理装置,减轻了工作负荷与秸秆堵塞问题。Gould等^[8]对比了4种玉米免耕播种机的开沟器与清茬装置性能,发现双圆盘开沟器清茬能力显著优于其他类型。对于秸秆重度覆盖区域,被动式清秸防堵装置很难解决作业时残茬堵塞装置的问题,播种作业需要配备主动式清秸防堵装置。王伟等^[9]研发出一款基于交叉立式耙刀的秸秆移位防堵装置,在作业过程中,耙刀主动旋转,秸秆受此作用,顺着回转刀尖的切线方向,被推移至种床的一侧;黄玉祥等^[10]研发出一款驱动切茬与被动导草协同作业的清秸防堵装置,在作业过程中,凹面缺口圆盘刀主动对秸秆残茬进行切割、破碎以及拨抛操作,而导草板则将秸秆残茬分流至苗带两侧;赵宏波等^[11]研发出一款行间侧抛清秸防堵装置,当装置开始作业时,刀轴主动转动,带动侧倾刀对地表秸秆进行切割,并将其抛至种床两侧。

陈海涛团队^[12-15]首创的2BMFJ型免耕覆秸精量播种机应用侧向清秸防堵装置,可有效清理种床上玉米残茬,一次进地完成清秸覆秸、施肥、播种、覆土镇压等全部播种作业环节,可降低能源消耗,减少对土壤的压实破坏,但在高速作业条件下,清秸刀齿抛撒秸秆时部分秸秆被刀齿挑起并旋转回种床,残茬积累后易造成播种单体堵塞,影响正常播种。

针对上述问题,设计一种防残茬回带清秸防堵装置,运用理论分析、仿真试验、田间试验相结合的方法确定关键部件的主要参数,通过田间试验验证

仿真试验的准确性,减小残茬回带率,提高种床清秸率,为秸秆重度覆盖区域高速免、少耕精播机研发提供参考。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

防残茬回带清秸防堵装置由机架、压秸板、动力输入系统、传动链、清秸刀轴、挡秸板、地轮等构成,如图1所示,其中清秸刀轴如图2所示,由固定式中心轴、轴座、链轮、清秸刀盘组成。

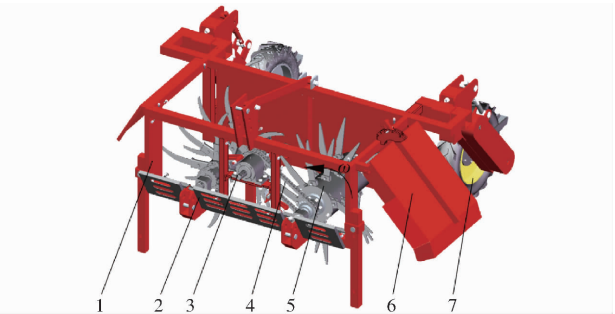


图1 防残茬回带清秸防堵装置结构图
Fig.1 Structure diagram of anti-blocking device to prevent stubble returning to clear straw

1. 机架 2. 压秸板 3. 动力输入系统 4. 传动链 5. 清秸刀轴
6. 残茬侧抛控制装置 7. 地轮

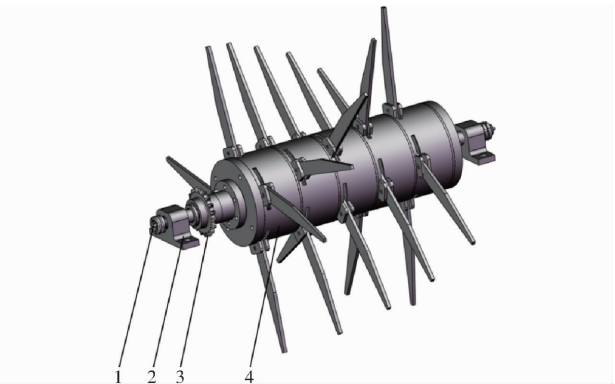


图2 清秸刀轴结构图
Fig.2 Structure diagram of straw cleaning cutter shaft
1. 固定式中心轴 2. 轴座 3. 链轮 4. 清秸刀盘

1.2 工作原理

2BMFJ型免耕播种机清秸防堵装置在作业时采用三点悬挂与拖拉机挂接,机组沿前进方向行驶作业时,压秸板将作业幅内任意形态秸秆和根茬压倒送入清秸刀轴,动力输出轴经传动系统驱动刀轴旋转,刀轴旋转时清秸刀齿角度周期性变化,击打秸

秆向机具侧面抛送,从而在保证清秸率的同时降低秸秆回带率,在施肥、播种作业前完成种床整备。

2 关键部件设计与分析

2.1 清秸刀盘结构设计

根据清秸防堵装置作业原理与防残茬回带功能的需要设计清秸刀盘,结构如图 3 所示。

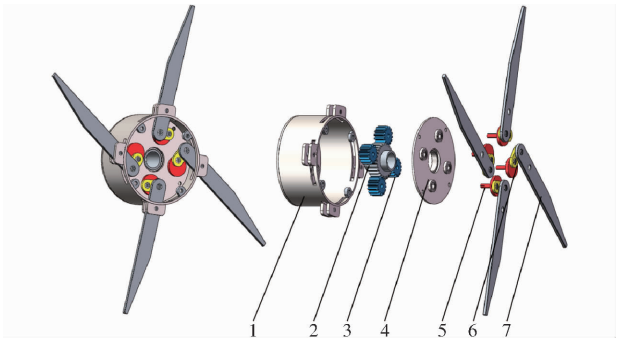


图 3 清秸刀盘结构图

Fig. 3 Structure diagram of straw clearing cutter

1. 清秸刀盘外壳 2. 太阳轮 3. 行星轮 4. 密封盖 5. 盘式曲柄 6. 调节器 7. 清秸刀齿

针对田间作业高粉尘工况环境对行星齿轮传动的润滑防护需求,为避免扬尘污染润滑油导致齿轮组磨损,清秸刀盘采用密封式设计,将齿轮组与外界环境隔离,使齿轮箱内部润滑系统保持清洁。清秸刀盘工作时,带动行星轮绕太阳轮转动,行星轮与盘式曲柄固连,所以盘式曲柄在跟随清秸刀盘转动的同时进行自转,与调节器和刀柄构成曲柄摇杆机构。根据曲柄摇杆机构的运动特点可知,清秸刀齿在旋转击打抛撒残茬的同时,角度也在规律变化,实现防残茬回带的功能^[16]。

2.2 清秸刀盘工作过程分析

以清秸刀齿为研究对象,机组在作业时清秸刀轴以角速度 ω 做匀速圆周运动,同时行星轮绕太阳轮匀速旋转,盘式曲柄与行星轮固连,在绕轴转动的同时进行自转,盘式曲柄、调节器、刀柄共同组成曲柄摇杆机构,同时机组沿 X 轴(机具前进方向)以速度 V_0 做直线运动,如图 4 所示。

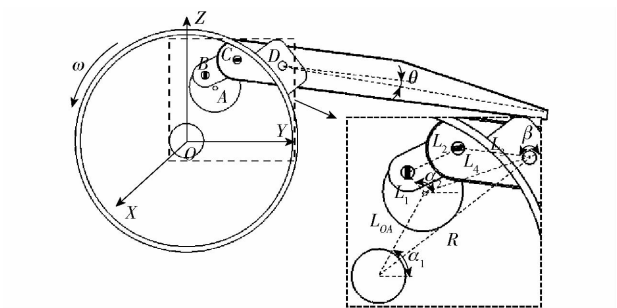


图 4 齿端运动分析图

Fig. 4 Tooth end motion analysis

机构中的盘式曲柄 AB 、调节杆 BC 、刀柄 CD 组成一个曲柄摇杆机构,则刀柄 CD 的输出角 β 为^[17]

$$\beta = \begin{cases} \pi - \theta_1 - \theta_2 & (\alpha_2 \in (0, \pi]) \\ \pi - \theta_1 + \theta_2 & (\alpha_2 \in (\pi, 2\pi]) \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\theta_1 = \arccos \frac{L_{BD}^2 + L_3^2 - L_2^2}{2L_{BD}L_3} \quad (2)$$

$$\theta_2 = \arccos \frac{L_{BD}^2 + L_4^2 - L_1^2}{2L_{BD}L_4} \quad (3)$$

$$L_{BD} = \sqrt{L_1^2 + L_4^2 - 2L_1L_4\cos\alpha_2} \quad (4)$$

式中

L_1 ——盘式曲柄等效长度, mm

L_2 ——调节器长度, mm

L_3 ——刀柄长度, mm

L_4 ——清秸刀齿与清秸刀盘外壳铰接点和行星轮的中心距(以下简称行星铰接中心距), mm

L_{BD} ——清秸刀齿与清秸刀盘外壳铰接点和盘式刀柄与调节器铰接点的中心距, mm

θ_1 ——调节器固定点相对刀齿固定点角度, ($^\circ$)

θ_2 ——盘式曲柄固定点相对刀齿固定点角度, ($^\circ$)

α_2 ——行星轮自转角度, ($^\circ$)

清秸刀齿与清秸刀盘外壳法线夹角 γ 的表达式为

$$\gamma = \pi - \beta + \theta_3 \quad (5)$$

其中

$$\theta_3 = \arccos \frac{R^2 + L_4^2 - L_{OA}^2}{2RL_4} \quad (6)$$

式中

R ——清秸刀齿与外壳铰接点回转半径, mm

L_{OA} ——行星轮回转半径, mm

θ_3 ——刀盘中心与曲柄中心相对刀齿固定点角度, ($^\circ$)

根据清秸刀盘结构尺寸参数和行星齿轮机构各部件内部空间配合关系,确定太阳轮与行星轮的齿数比为 2:1,得到 α_2 与 α_1 的关系为

$$\alpha_2 = 2\alpha_1 \quad (7)$$

式中 α_1 ——清秸刀盘转动角度, ($^\circ$)

清秸刀齿正切刃角度 θ 的计算式为

$$\theta = \alpha_1 - \gamma - \lambda \quad (8)$$

式中

λ ——刀刃倾角, ($^\circ$)

清秸刀齿端点 P 在 X 、 Y 、 Z 3 个方向的轨迹参数方程为

$$\begin{cases} X = V_0 t \\ Y = R\cos(\omega t) + L_5\cos(\omega t + \lambda - \gamma) \\ Z = R\sin(\omega t) - L_5\sin(\omega t + \lambda - \gamma) \end{cases} \quad (9)$$

式中

L_5 ——清秸刀齿端点 P 到刀齿固定点距离,

mm

其中 $\alpha_1 = \omega t$, 对 t 求一阶导数, 可以得到点 P 在各坐标轴的速度分量 V_x 、 V_y 、 V_z 为

$$\begin{cases} V_x = V_0 \\ V_y = -R\omega\sin(\omega t) - L_5\omega(1 - \gamma'(t))\sin(\omega t + \lambda - \gamma) \\ V_z = R\omega\cos(\omega t) - L_5\omega(1 - \gamma'(t))\cos(\omega t + \lambda - \gamma) \end{cases} \quad (10)$$

对 t 进行二次求导, 可以得到点 P 在各坐标轴的加速度分量 A_x 、 A_y 、 A_z 为

$$\begin{cases} A_x = 0 \\ A_y = -R\omega^2\cos(\omega t) + L_5\omega\gamma''(t)\sin(\omega t + \lambda - \gamma) - L_5\omega(1 - \gamma'(t))(\omega - \gamma'(t))\cos(\omega t + \lambda - \gamma) \\ A_z = -R\omega^2\sin(\omega t) + L_5\omega\gamma''(t)\cos(\omega t + \lambda - \gamma) + L_5\omega(1 - \gamma'(t))(\omega - \gamma'(t))\sin(\omega t + \lambda - \gamma) \end{cases} \quad (11)$$

由式(9)~(11)可知清秸刀盘尺寸参数、机具作业速度以及刀轴转速对清秸刀盘工作情况有直接影响。

2.3 清秸刀盘切茬节距分析

切茬节距是指相邻两个清秸刀齿之间做切茬运动轨迹曲线的法向距离, 切茬节距的大小是影响清秸刀齿切茬效果重要指标, 切茬节距 S_q 与机具前进速度、刀轴转速及清秸刀齿个数等因素有关, 切茬节距计算公式为^[18]

$$S_q = \frac{10^6 v}{60 z_d z_p n} \quad (12)$$

式中 v ——作业速度, km/h
 z_d ——每排清秸刀齿数量, 个
 z_p ——清秸刀齿排数, 排
 n ——刀轴转速, r/min

由基础试验可知东北玉米主根茬直径大多在 30~50 mm, 故切茬节距应不大于 30 mm 才可以保证将根茬清理出种床。将作业速度 14.4 km/h、每盘清秸刀齿数 4、清秸刀齿排数 5、切茬节距 30 mm 代入式(12), 得到最低转速为 400 r/min。

2.4 残茬抛撒运动分析

清秸刀齿打击残茬的同时将残茬输送并侧抛出播种带左侧, 为分析残茬抛撒运动规律, 对残茬抛撒的瞬间进行运动学分析, 如图 5 所示。

由式(10)可得残茬在点 O 被抛撒的瞬时速度在 X 轴与 Y 轴方向的分速度 V_x 、 V_y 为

$$\begin{cases} V_x = -R\omega\sin(\omega t) - L_5\omega(1 - \gamma'(t))\sin(\omega t + \lambda - \gamma) \\ V_y = R\omega\cos(\omega t) - L_5\omega(1 - \gamma'(t))\cos(\omega t + \lambda - \gamma) \end{cases} \quad (13)$$

由式(10)可知残茬在空中的飞行时间为

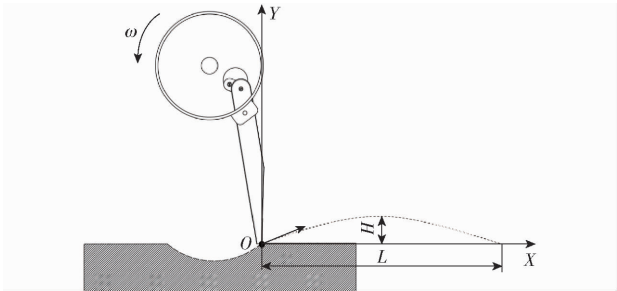


图 5 残茬抛撒运动分析图

Fig. 5 Analysis of stubble throwing motion

$$t_0 = \frac{2R\omega\cos(\omega t)}{g} - \frac{2L_5\omega(1 - \gamma'(t))\cos(\omega t + \lambda - \gamma)}{g} \quad (14)$$

式中 t_0 ——残茬在空中的抛撒时间, s
 g ——重力加速度, m/s²

则残茬做抛物线运动最大抛撒距离 L 为

$$L = \frac{-R\omega\sin(\omega t) - L_5\omega(1 - \gamma'(t))\sin(\omega t + \lambda - \gamma)}{g} \cdot \frac{2R\omega\cos(\omega t) - 2L_5\omega(1 - \gamma'(t))\cos(\omega t + \lambda - \gamma)}{g} \quad (15)$$

同理可得最大抛撒高度 H 为

$$H = \frac{R\omega\cos(\omega t) - L_5\omega(1 - \gamma'(t))\cos(\omega t + \lambda - \gamma)}{g} \cdot \frac{R\omega\cos(\omega t) - L_5\omega(1 - \gamma'(t))\cos(\alpha_1 + \lambda - \gamma)}{g} - \frac{[R\omega\cos(\omega t) - L_5\omega(1 - \gamma'(t))\cos(\omega t + \lambda - \gamma)]^2}{2} \quad (16)$$

由式(15)、(16)可知残茬抛撒的距离和高度与清秸刀盘尺寸参数和转速等因素相关。因残茬在实际情况下还会受到自身重力、土壤颗粒、碎茬碎秸的作用力和空气阻力等因素影响, 实际抛撒距离会远小于理论值。

2.5 土壤扰动量分析

土壤扰动量是指土壤在机具作业过程中受到扰动的程度和频率, 它是用来衡量土壤受到的机械作业影响程度的重要指标。如图 6 所示, 每个清秸刀齿在一个清秸作业周期内从点 A 切入土壤运动到点 B 时结束清秸工作。

由式(9)可知清秸刀齿端点在此坐标系内的运动轨迹为

$$\begin{cases} X_1 = R\cos(\omega t) + L_5\cos(\omega t + \lambda - \gamma) \\ Y_1 = R\sin(\omega t) - L_5\sin(\omega t + \lambda - \gamma) \end{cases} \quad (17)$$

土壤表面位置方程为

$$Y_1 = H_1 - H_2 \quad (18)$$

式中 H_1 ——清秸刀齿入土深度, mm

速度的影响,如表 5 所示。

表 5 不同刀柄长度的试验结果

Tab. 5 Test results of different tool holder lengths			
刀柄长度/mm	截面面积/mm ²	角度/(°)	加速度/(m·s ⁻²)
40.00	12 707.76	4.19	238.65
48.00	12 673.87	3.10	234.95
56.00	12 769.42	2.32	229.16
64.00	12 959.84	-1.90	198.17
72.00	12 978.32	-2.14	183.55

由表 6 可知,刀柄长度对 3 个指标影响均显著。当刀柄长度逐渐增大时,截面面积呈现先减小后增大趋势;残茬抛撒角度随刀柄长度增大而减小;清秸刀齿对残茬提供的加速度随刀柄长度增大而减小。其中残茬抛撒角度为负值时,残茬会侧移至机具侧面,无法抛撒覆秸。所以刀柄长度范围取 40~56 mm。

表 6 不同刀柄长度对指标的方差检验

Tab. 6 Variance test of different tool holder length on index			
指标	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
截面面积	79 789.47	28.69	0.003 0 **
角度	51.07	72.82	0.000 4 **
加速度	3 674.53	60.50	0.000 6 **

2.6.4 行星铰接中心距对截面面积、角度和加速度的影响

在探究行星铰接中心距对清秸防堵装置清秸刀齿角度变化、运动轨迹与清秸刀齿顶点加速度的影响时,行星铰接中心距分别取 46、50、54、58、62 mm,其余参数采用初始参数,得到行星铰接中心距不同长度下对截面面积、角度和加速度的影响如表 7 所示。

表 7 行星铰接中心距对指标的影响

Tab. 7 Effect of planetary joint center distance length on various indicators			
行星铰接中心距/mm	截面面积/mm ²	角度/(°)	加速度/(m·s ⁻²)
46.00	12 984.39	0.13	182.23
50.00	12 813.71	1.51	182.56
54.00	12 769.42	2.32	229.16
58.00	12 311.92	7.17	394.48
62.00	12 529.34	11.29	412.51

由表 8 可知,行星铰接中心距对 3 个指标影响均显著。当行星铰接中心距逐渐增大时,截面面积呈现先减小后增大趋势;残茬抛撒角度随行星铰接中心距增大而增大;清秸刀齿对残茬提供的加速度随行星铰接中心距增大而增大。清秸刀齿划过土壤的截面面积越小,土壤扰动率越小,所以行星铰接中心距范围取 54~62 mm。

表 8 行星铰接中心距对指标的方差检验

Tab. 8 Variance test of planetary hinge center distance to index			
指标	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
截面面积	2.995 × 10 ⁵	16.88	0.009 3 **
角度	140.56	71.13	0.000 4 **
加速度	71 321.09	45.04	0.001 1 **

3 EDEM – ADAMS 联合仿真试验

3.1 联合仿真试验

构建 EDEM 离散元仿真模型和 ADAMS 运动学仿真模型^[19-21],联合仿真流程如图 7 所示^[22-23]。

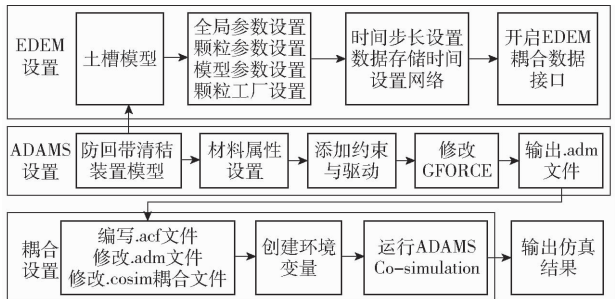


图 7 联合仿真流程图

Fig. 7 Joint simulation flowchart

联合仿真试验过程如图 8 所示,清秸刀齿入土深度 50 mm^[24-25],在直线位移驱动牵引和角速度驱动共同作用下开始清秸工作。



图 8 联合仿真试验过程

Fig. 8 Joint simulation test process

在完成仿真模型构建后,本研究通过田间试验对模型有效性进行了验证,试验数据与仿真结果具有良好一致性。

3.2 试验方案

为得到清秸装置的最佳工作参数组合,采用五因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验方法,以调节器等效长度(以下简称调节器长度)、刀柄长度、行星铰接中心距、作业速度、刀轴转速为试验因素,以清秸率、土壤扰动率、当量功耗及秸秆回带率为性能评价指标,结合团队前期研究及单因素试验结果,试验因素编码如表 9 所示。

评价指标的测定方法为:

(1) 清秸率测定:通过 EDEM 软件中 Grid Bin

表 9 试验因素编码
Tab.9 Factors and coding

编码	因素				
	调节器	刀柄长度	行星铰接	作业速度	刀轴转速
	长度		中心距	$X_4/$	$X_5/$
	X_1/mm	X_2/mm	X_3/mm	$(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
-2	30.0	40	54	7.2	300
-1	32.5	44	56	9.0	400
0	35.0	48	58	10.8	500
1	37.5	52	60	12.6	600
2	40.0	56	62	14.4	700

Group 功能,选取 1 600 mm×200 mm×230 mm 的网格,输出作业前与作业后网格内秸秆颗粒的数量,计算秸秆的清除比例。清秸率 Y_1 计算式为

$$Y_1 = \frac{m_q - m_h}{m_q} \times 100\%$$
 (20)

式中 m_h ——采样点作业后全部秸秆质量,kg
 m_q ——采样点作业前全部秸秆质量,kg

(2)土壤扰动率测定:通过 EDEM 软件后处理模块中 clipping 功能,分别选取距中心点前后 500 mm、深度 100 mm 的位置作为横截面,近似计算出清秸防堵装置工作前后横截面积的比值作为土壤扰动率,土壤扰动率 Y_2 计算式为

$$Y_2 = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$
 (21)

式中 S_0 ——作业前土壤横截面积,mm²
 S_1 ——作业后土壤横截面积,mm²

(3)当量功耗测定:提取仿真过程中每个步长中施加到清秸防堵装置的扭矩及牵引力,根据扭矩、转速、牵引力、前进速度和功耗的关系,清秸防堵装置作业功耗 Y_3 计算式为

$$Y_3 = \frac{Tn}{9\,550} + FV_0$$
 (22)

式中 T ——仿真总转矩,N·m
 F ——机具牵引力,N

(4)秸秆回带率测定:通过 EDEM 软件中 Grid Bin Group 功能,分别选取清秸防堵装置作业后清秸条带与清秸条带左侧区域,输出作业后清秸条带内浮动秸秆颗粒数量与清秸条带左侧区域增加的秸秆颗粒数量,计算得到秸秆回带率 Y_4 ,计算式为

$$Y_4 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \times 100\%$$
 (23)

式中 m_1 ——清秸防堵装置作业后清秸条带内浮动秸秆的质量,kg
 m_2 ——清秸防堵装置作业后左侧秸秆增加的质量,kg

3.3 试验结果与方差分析

五因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验共计实施 36 组,运用 Design-Expert 软件对清秸防堵装置仿真结果进行回归分析与显著性检验。试验结果如表 10 所示, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 为因素编码值。

表 10 试验设计与结果
Tab.10 Test design and results

序号	试验因素					评价指标			
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	清秸率	土壤	当量	秸秆
						$Y_1/\%$	扰动率	功耗	回带率
						$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	Y_3/kW	$Y_4/\%$
1	-1	-1	-1	-1	1	95.60	27.20	7.30	7.04
2	1	-1	-1	-1	-1	93.61	28.16	6.12	3.23
3	-1	1	-1	-1	-1	93.28	29.38	6.14	5.32
4	1	1	-1	-1	1	93.85	32.90	7.21	5.76
5	-1	-1	1	-1	-1	96.55	26.08	6.18	5.96
6	1	-1	1	-1	1	96.72	28.85	8.17	7.73
7	-1	1	1	-1	1	96.73	33.87	7.11	12.13
8	1	1	1	-1	-1	93.70	23.01	7.26	6.67
9	-1	-1	-1	1	-1	93.16	23.42	8.20	7.09
10	1	-1	-1	1	1	93.36	25.70	8.22	6.97
11	-1	1	-1	1	1	93.15	27.14	9.26	9.16
12	1	1	-1	1	-1	89.91	22.26	7.64	6.41
13	-1	-1	1	1	1	96.41	24.43	8.79	12.47
14	1	-1	1	1	-1	92.24	22.11	8.04	7.92
15	-1	1	1	1	-1	90.70	29.07	7.86	11.96
16	1	1	1	1	1	93.48	22.56	8.79	10.79
17	-2	0	0	0	0	95.64	27.59	8.10	9.49
18	2	0	0	0	0	93.60	24.27	8.35	5.74
19	0	-2	0	0	0	94.39	21.72	7.36	7.46
20	0	2	0	0	0	91.20	26.56	7.38	10.07
21	0	0	-2	0	0	93.15	27.42	7.58	5.70
22	0	0	2	0	0	94.35	28.54	7.94	11.06
23	0	0	0	-2	0	95.83	30.43	5.90	6.10
24	0	0	0	2	0	92.22	23.07	8.80	10.54
25	0	0	0	0	-2	92.75	23.46	6.00	4.21
26	0	0	0	0	2	95.31	28.43	7.80	10.27
27	0	0	0	0	0	93.86	25.72	7.11	7.67
28	0	0	0	0	0	92.96	25.54	7.18	8.30
29	0	0	0	0	0	92.95	26.92	7.17	8.03
30	0	0	0	0	0	93.79	26.25	7.20	8.34
31	0	0	0	0	0	94.26	26.85	7.27	7.78
32	0	0	0	0	0	93.88	25.82	7.11	7.91
33	0	0	0	0	0	93.69	27.00	7.26	8.35
34	0	0	0	0	0	93.33	26.71	7.23	7.93
35	0	0	0	0	0	93.86	26.85	7.21	8.36
36	0	0	0	0	0	93.32	27.04	7.18	7.82

注:在试验进行前需验证参数组合是否可实施,曲柄摇杆形成的条件为:最小杆和最大杆长度之和小于等于另两杆长度之和,经验证,36 组试验均可实施。

3.3.1 清秸率

清秸率方差分析结果如表 11 所示,模型均方为 4.17, F 值为 18.81, P 值小于 0.000 1,失拟项 P 值大于 0.05, R^2 值为 0.961 7,说明该模型的拟合效果较好,可以用来进行试验预测。剔除不显著影响因素,各试验因素与清秸率之间回归模型为

$$Y_1 = 93.59 - 0.53x_1 - 0.8x_2 + 0.54x_3 - 1.04x_4 + 0.89x_5 + 0.18x_1x_2 + 0.013x_1x_3 - 0.009\,375x_1x_4 - 0.016x_1x_5 - 0.11x_2x_3 - 0.19x_2x_4 + 0.19x_2x_5 - 0.26x_3x_4 + 0.26x_3x_5 + 0.29x_4x_5 + 0.26x_1^2 - 0.2x_2^2 + 0.039x_3^2 + 0.11x_4^2 + 0.11x_5^2$$

(24)

表 11 清秸率方差分析

Tab.11 Analysis of variance of straw clearing rate

差异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	83.40	20	4.17	18.81	<0.000 1 **
残差	3.33	15	0.22		
失拟	1.65	6	0.27	1.48	0.287 4
误差	1.68	9	0.19		
总和	86.72	35			

3.3.2 土壤扰动率

土壤扰动率方差分析结果如表 12 所示,模型均方为 13.42, F 值为 26.17, P 值小于 0.000 1,失拟项 P 值大于 0.05, R^2 值为 0.972 1,说明该模型的拟合效果较好,可以用来进行试验预测。剔除不显著影响因素,各试验因素与土壤扰动率之间回归模型为

$$Y_2 = 26.41 - 0.9x_1 + x_2 - 0.16x_3 - 1.98x_4 + 1.21x_5 - 1.4x_1x_2 - 1.18x_1x_3 - 0.49x_1x_4 + 0.16x_1x_5 - 0.01x_2x_3 - 0.22x_2x_4 + 0.4x_2x_5 + 0.34x_3x_4 - 0.017x_3x_5 - 0.83x_4x_5 - 0.041x_1^2 - 0.49x_2^2 + 0.47x_3^2 + 0.16x_4^2 - 0.037x_5^2$$

(25)

表 12 土壤扰动率方差分析

Tab.12 Analysis of variance of soil disturbance rate

差异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	268.39	20	13.42	26.17	<0.000 1 **
残差	7.69	15	0.51		
失拟	4.64	6	0.77	2.28	0.128 5
误差	3.05	9	0.34		
总和	276.08	35			

3.3.3 当量功耗

当量功耗方差分析结果如表 13 所示,模型均方为 1.15, F 值为 347.29, P 值小于 0.000 1,失拟项 P 值大于 0.05, R^2 值为 0.997 8,说明模型的拟合效果好,可以用来进行试验预测。剔除不显著影响因素,各试验因素与当量功耗之间回归模型为

$$Y_3 = 10.59 + 2.55x_1 + 1.36x_2 + 0.82x_3 + 0.41x_4 + 0.19x_5 + 0.11x_1x_2 + 1.01x_1x_3 - 0.43x_1x_4 - 0.094x_1x_5 - 0.14x_2x_3 + 0.044x_2x_4 - 0.059x_2x_5 - 0.22x_3x_4 - 0.046x_3x_5 - 0.048x_4x_5 + 1.06x_1^2 + 0.20x_2^2 + 0.59x_3^2 + 0.046x_4^2 - 0.066x_5^2$$

(26)

表 13 当量功耗方差分析

Tab.13 Analysis of variance of power consumption

差异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	22.98	20	1.15	347.29	<0.000 1 **
残差	0.050	15	3.31×10^{-3}		
失拟	0.023	6	3.81×10^{-3}	1.28	0.354 1
误差	0.027	9	2.97×10^{-3}		
总和	23.03	35			

3.3.4 秸秆回带率

秸秆回带率方差分析结果如表 14 所示,模型均方为 8.15, F 值为 62.58, P 值小于 0.000 1,失拟项 P 值大于 0.05, R^2 值为 0.988 1,说明该模型的拟合效果较好,可以用来进行试验预测。剔除不显著影响因素,各试验因素与秸秆回带率之间回归模型为

$$Y_4 = 8.07 - 0.96x_1 + 0.63x_2 + 1.47x_3 + 1.16x_4 + 1.23x_5 - 0.14x_1x_2 - 0.2x_1x_3 - 0.096x_1x_4 - 0.22x_1x_5 + 0.32x_2x_3 - 0.13x_2x_4 - 0.16x_2x_5 + 0.15x_3x_4 + 0.23x_3x_5 - 0.34x_4x_5 - 0.13x_1^2 + 0.15x_2^2 + 0.057x_3^2 + 0.042x_4^2 - 0.23x_5^2$$

(27)

表 14 秸秆回带率方差分析

Tab.14 Analysis of variance of stover return rate

差异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	162.99	20	8.15	62.58	<0.000 1
残差	1.95	15	0.13		
失拟	1.32	6	0.22	3.10	0.062 4
误差	0.64	9	0.071		
总和	164.95	35			

3.4 各因素对试验指标的影响

3.4.1 清秸率

行星铰接中心距与作业速度对清秸率的交互影响如图 9a 所示,在固定中心距时,提高作业速度会使秸秆喂入量增加、击打次数减少,导致清秸率明显下降。在低速情况下,增大中心距可改善抛秸效果,从而提高清秸率;而在高速条件下,清秸率主要受速度限制,中心距的调节作用不显著。

行星铰接中心距与刀轴转速对清秸率的交互影响如图 9b 所示,固定行星铰接中心距,清秸率随刀

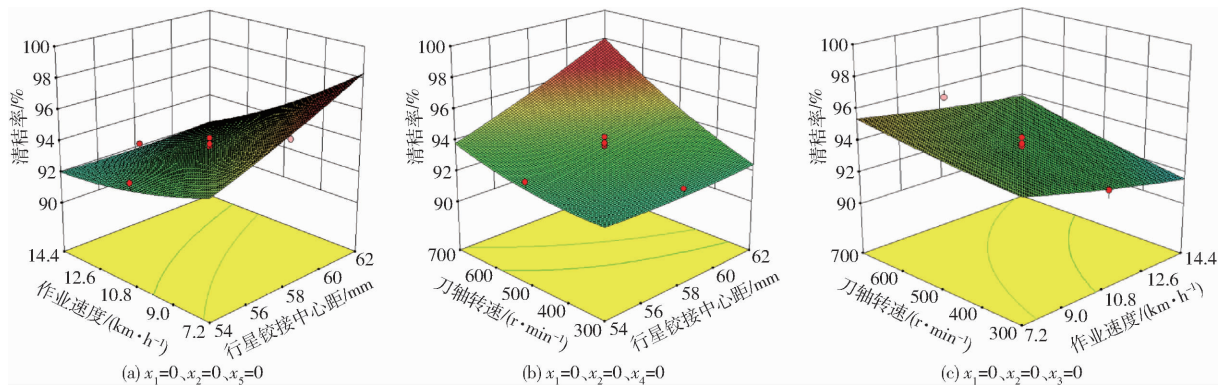


图 9 各因素对清秸率影响的响应曲面

Fig. 9 Response surfaces of various factors on straw clearing rate

轴转速的增大呈现显著上升趋势,因为转速增大,单位质量秸秆受击打频率增大,所以秸秆被及时清除。刀轴转速不变时,增大行星铰接中心距时,清秸刀齿击打抛射角度偏移,更利于秸秆抛离,所以清秸率提高。

作业速度与刀轴转速对清秸率的交互影响如图 9c 所示。作业速度不变时,清秸率随刀轴转速的增大显著提升。原因是单位时间秸秆喂入量不变,清秸刀齿击打频率随转速线性增加。转速提升使单位质量的秸秆平均受击打次数增加,显著提高清秸率。刀轴转速不变时,清秸率随作业速度增大而减小,在固定转速下,作业速度的提高使清秸刀齿有效击打间距扩大,而秸秆喂入量随速度提升也在增加。所以造成清秸率下降。

3.4.2 土壤扰动率

调节器长度与刀柄长度对土壤扰动率的交互影响如图 10a 所示。当调节器长度在 30 ~ 35 mm 区间时,刀柄长度增加可能使清秸刀齿切入土壤的范围更大,截面面积更大,所以土壤扰动率增大。当调节器长度超过临界值时,刀柄长度增加可能使清秸刀齿切入土壤的范围变小,截面面积减小,所以此时土壤扰动率下降。

调节器长度与行星铰接中心距对土壤扰动率的

交互影响如图 10b 所示。当调节器长度处于 30 ~ 35 mm 区间时,行星铰接中心距延长改变了清秸刀齿的运动轨迹,使清秸刀齿切入土壤范围增大,所以土壤扰动率增大。当调节器长度超过 35 mm 后,行星铰接中心距增长使清秸刀齿切入土壤范围减小所以使土壤扰动率降低。

作业速度与刀轴转速对土壤扰动率的交互影响如图 10c 所示,当作业速度固定时,刀轴转速增加,单位面积内土壤受击打次数增多,土壤扰动率随之升高。当刀轴转速固定时,作业速度提高,单位面积内土壤受击打次数减小,所以土壤扰动率随之减小。

3.4.3 当量功耗

调节器长度与行星铰接中心距对当量功耗的交互影响如图 11a 所示。当调节器长度在 30 ~ 35 mm 区间时,行星铰接中心距的增大改变了清秸刀齿运动轨迹,减少因轨迹突变导致的清秸刀齿与土壤和秸秆之间的无效摩擦功耗;当调节器长度在 35 ~ 40 mm 区间时,行星铰接中心距增大反而使清秸刀齿与土壤和秸秆之间的无效摩擦功耗增大。同理,当行星铰接中心距不变时,调节器长度的变化也导致清秸刀齿运动轨迹的变化,所以也是先减小后增大。

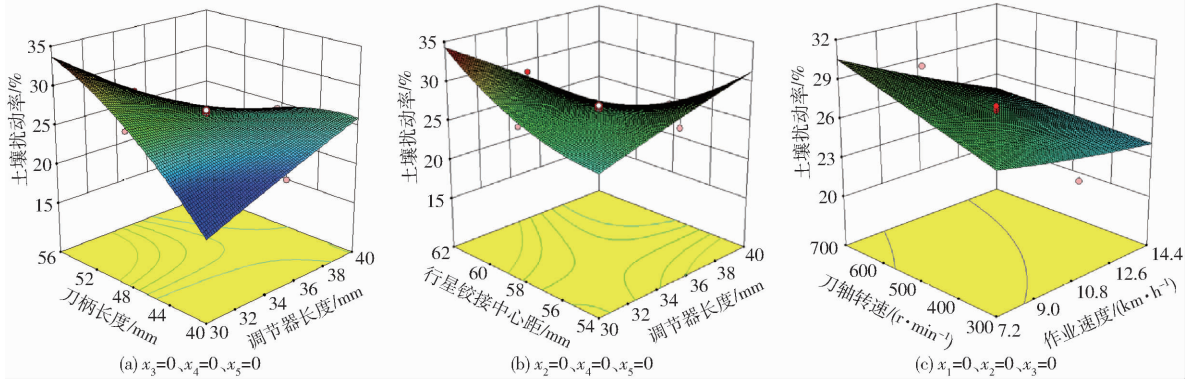


图 10 各因素对土壤扰动率影响的响应曲面

Fig. 10 Response surfaces for effects of various factors on soil disturbance rate

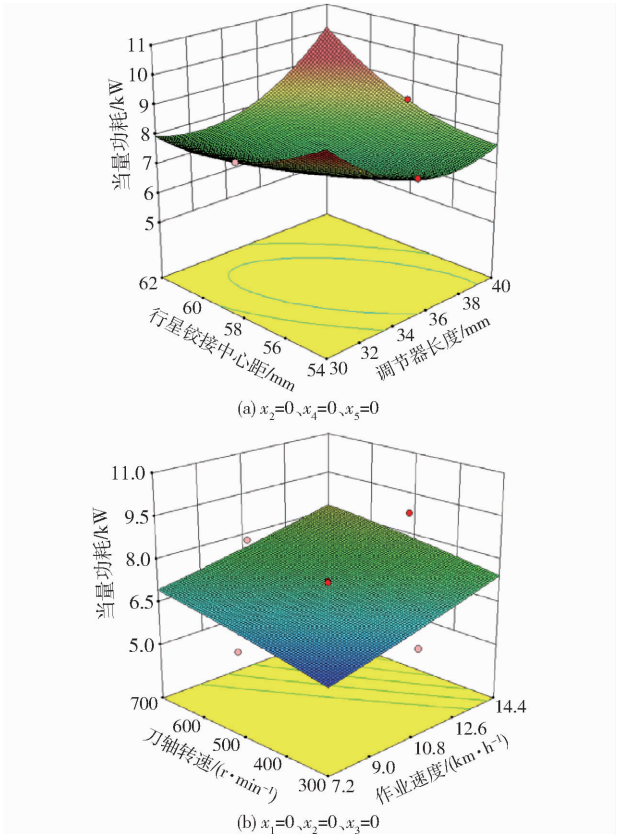


图 11 各因素对当量功耗影响的响应曲面
Fig. 11 Response surfaces for effects of various factors on equivalent power consumption

作业速度与刀轴转速对当量功耗的交互影响如图 11b 所示,当作业速度固定时,刀轴转速增加,清秸刀齿切削土壤次数增加,刀轴旋转阻力增大,旋转功耗增大。当刀轴转速固定时,作业速度增大,牵引功耗会随之增加,所以当量功耗增大。

3.4.4 秸秆回带率

刀柄长度与行星铰接中心距对秸秆回带率的交互影响如图 12a 所示。当行星铰接中心距固定时,刀柄长度增大,使清秸刀齿支点向后移动,当清秸刀齿击打秸秆时,滑切效应减弱,秸秆回带率增大;当刀柄长度固定时,行星铰接中心距增大,使清秸刀齿击打秸秆时更易挑起秸秆,造成回带,所以秸秆回带率增大。

作业速度与刀轴转速对秸秆回带率的交互影响如图 12b 所示。当刀轴转速固定时,随着作业速度的增大,秸秆喂入量迅速增大,阻碍部分秸秆抛出的通道,这部分被旋转的清秸刀齿带回,秸秆回带率增大;当作业速度固定时,刀轴转速增大,部分秸秆会被负压回吸并被高速旋转的清秸刀齿带回,秸秆回带率增大。

3.5 参数组合优化

根据实际作业条件和工作要求,目标函数及约束条件为

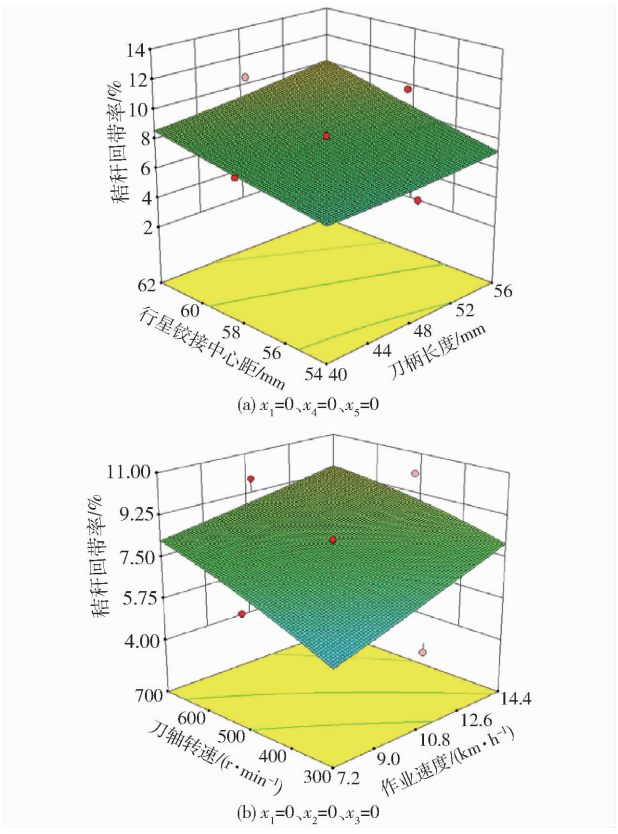


图 12 各因素对秸秆回带率影响的响应曲面
Fig. 12 Response surfaces for effects of various factors on residue pushback rate

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \\ \min Y_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \\ \min Y_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \\ \min Y_4(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \end{cases}$$
$$\text{s. t. } \begin{cases} -2 \leq x_1 \leq 2 \\ -2 \leq x_2 \leq 2 \\ -2 \leq x_3 \leq 2 \\ -2 \leq x_4 \leq 2 \\ -2 \leq x_5 \leq 2 \end{cases}$$
$$\text{s. t. } \begin{cases} 80\% \leq Y_1 \leq 100\% \\ 5\% \leq Y_2 \leq 25\% \\ 5 \text{ kW} \leq Y_3 \leq 20 \text{ kW} \\ 1\% \leq Y_4 \leq 10\% \end{cases}$$

(28)

应用 Design-Expert 软件进行多目标优化求解,优先选取高清秸率与低秸秆回带率的参数组合,得到最优工作参数组合为:调节器长度为 35 mm、刀柄长度为 54 mm、行星铰接中心距为 58 mm、作业速度为 14.4 km/h 以及刀轴转速为 540 r/min 时,装置的清秸率达到 91.11%,土壤扰动率为 21.03%,当量功耗为 9.35 kW,秸秆回带率为 4.85%。为验证参数组合优化结果的正确性,将所得最优工作参数进行仿真验证,重复 3 次试验取平均值,试验结果表

明,清秸率为 $(91.68 \pm 1.15)\%$ 、土壤扰动率为 $(22.37 \pm 1.97)\%$ 、当量功耗为 (9.60 ± 0.67) kW, 秸秆回带率为 $(4.78 \pm 0.61)\%$,结果与参数优化结果一致。

4 田间试验

4.1 试验条件与仪器设备

试验于 2025 年 6 月 15 日在东北农业大学向阳农场进行。试验环境:机收未经粉碎处理玉米原茬地,作物种植模式为垄距 650 mm 标准垄,玉米残茬覆盖量 1.54 kg/m^2 ,平均留茬高度 28 mm,秸秆平均含水率 20.54%,0 ~ 10 cm 深度平均土壤硬度为 18.34 kg/cm^2 ,平均土壤含水率为 22.42%。

4.2 评价指标及其确定方法

(1)清秸率

清秸率是指作业幅宽内清秸防堵装置单元组工作区域作业前后全部秸秆质量的比值,在完成清秸工作区域内采用五点法确定采样点,根据标准垄植模式垄台平均宽度确定每个采样点的范围为 $1\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 。

(2)土壤扰动率

以清秸刀齿回转平面内切削土壤横截面积与完整垄横断面面积的比值作为土壤扰动率,计算式为

$$Y_2 = \frac{S_1}{S_2} \times 100\% \tag{29}$$

式中 S_2 ——完整垄横断面面积, mm^2

(3)当量功耗

当量功耗是每个清秸防堵装置单元组刀轴旋转作业消耗的功率和克服前进阻力消耗的功率之和,计算式为

$$Y_3 = \frac{F_0 V_0 + P}{2} \tag{30}$$

式中 F_0 ——拉力传感器所测牵引力,N

P ——扭矩传感器所测拖拉机后输出轴输出功率,kW

(4)秸秆回带率

清秸装置作业前,在播种带左侧,放置苫布,将苫布表面清理干净,清秸装置作业后,残茬被抛撒到机具前进方向左侧的苫布上,测量清秸装置作业后苫布区域秸秆质量与清秸作业区域表面的浮动秸秆质量,计算得到秸秆回带率,计算式为

$$Y_4 = \frac{m_3}{m_3 + m_4} \times 100\% \tag{31}$$

式中 m_3 ——清秸作业区域表面浮动秸秆质量,kg
 m_4 ——清秸装置作业后苫布区域秸秆质量,kg

(5)覆秸均匀度

秸秆覆盖区域利用五点法选取 5 个测点($1\text{ m} \times 1\text{ m}$),所选各测点秸秆覆盖质量均值和极差的差值与各测点秸秆覆盖质量均值的比值即为覆秸均匀度,计算式为

$$Y_5 = \frac{m_\alpha - (m_{\max} - m_{\min})}{m_\alpha} \times 100\% \tag{32}$$

式中 m_α ——各测点秸秆平均质量,kg

$m_{\max}$ ——各测点秸秆质量最大值,kg

$m_{\min}$ ——各测点秸秆质量最小值,kg

4.3 验证试验

在作业速度 14.4 km/h,刀轴转速 540 r/min 的条件下实施田间试验,每组试验重复 3 次取平均值,试验过程如图 13 所示,结果如表 15 所示。

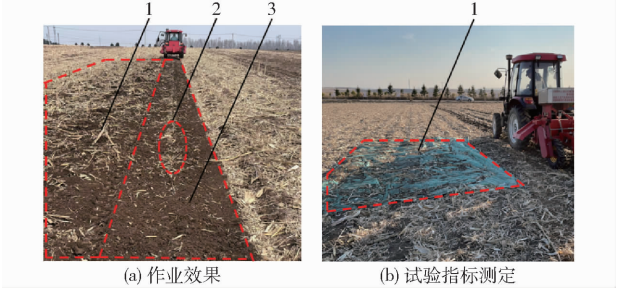


图 13 试验场景

Fig. 13 Test scene

1. 秸秆抛撒区域 2. 浮动秸秆 3. 已作业区域

表 15 验证试验结果

Tab. 15 Verification test results

序号	清秸率/ %	土壤扰动 率/%	当量功耗/ kW	秸秆回带 率/%
1	91.20	22.15	10.65	4.70
2	90.43	21.45	11.20	7.45
3	92.07	24.30	10.05	5.55
平均值	91.23	22.63	10.63	5.90

将仿真试验结果与田间验证试验结果进行对比,田间试验时的清秸率为 $(91.23 \pm 0.56)\%$ 、土壤扰动率为 $(22.63 \pm 2.34)\%$ 、当量功耗为 (10.63 ± 0.33) kW、秸秆回带率为 $(5.90 \pm 1.98)\%$ 。由于真实作业环境较仿真试验所构建的环境相对复杂,实际测得数值与仿真试验结果有差异,但在误差允许范围内,田间验证试验结果表明联合仿真试验优化结果可信。

4.4 对比试验

对比优化前后清秸装置作业性能差异,优化前后清秸防堵装置分别以清秸刀齿入土深度 50 mm,刀轴转速 540 r/min,在作业速度为 10.8、12.6、14.4 km/h 的条件下进行测试,试验均重复 3 次取平均值。对优化前后清秸防堵装置进行配对比较,

结果如表 16 所示。

表 16 田间对比试验配对比较

Tab. 16 Multiple comparisons incomparative field trials

评价指标	平均 差异	标准 误差	显著性	95% 置信区间	
				下限	上限
清秸率	-4.01%	0.13%	<0.001	-4.35%	-3.67%
土壤扰动率	1.08%	0.24%	0.016	0.48%	1.67%
当量功耗	0.73 kW	0.17 kW	0.017	0.31 kW	1.15 kW
秸秆回带率	2.02%	0.25%	0.005	1.40%	2.65%
覆秸均匀度	0.90%	0.49%	0.78	-0.32%	2.12%

优化后清秸防堵装置与原清秸防堵装置在清秸率、土壤扰动率、当量功耗和秸秆回带率方面存在显著性差异,在覆秸均匀度上无显著差异。原清秸防堵装置在 3 种作业速度下的秸秆清除率分别为 $(89.29 \pm 2.09)\%$ 、 $(88.20 \pm 3.00)\%$ 、 $(87.06 \pm 2.63)\%$,防残茬回带装置在 3 种作业速度下的秸秆清除率分别为 $(93.22 \pm 2.30)\%$ 、 $(92.13 \pm 2.92)\%$ 、 $(91.23 \pm 0.56)\%$ 。相比原清秸防堵装置,防残茬回带装置秸秆清除率分别提升了 4.40%、4.46%、4.79%。原清秸防堵装置在 3 种作业速度下的平均土壤扰动率分别为 $(24.13 \pm 1.47)\%$ 、 $(23.93 \pm 1.58)\%$ 、 $(23.10 \pm 1.51)\%$,防残茬回带装置在 3 种作业速度下的平均土壤扰动率分别为 $(22.94 \pm 1.44)\%$ 、 $(22.69 \pm 1.52)\%$ 、 $(22.30 \pm 2.34)\%$,相比原清秸防堵装置,防残茬回带装置土壤扰动率分别降低了 4.93%、5.18%、3.46%。原清秸防堵装置在 3 种作业速度下的平均当量功耗分别为 (13.03 ± 0.85) kW、 (12.54 ± 0.60) kW、 (11.23 ± 0.93) kW,防残茬回带装置在 3 种作业速度下的平均当量功耗分别为 (12.11 ± 0.75) kW、 (11.86 ± 0.61) kW、 (10.63 ± 0.33) kW,防残茬回带装置当量功耗分别降低了 7.06%、5.42%、5.34%。原清秸防堵装置在 3 种作业速度下的平均秸秆回带率分别为 $(6.24 \pm 0.67)\%$ 、 $(6.98 \pm 0.74)\%$ 、 $(8.21 \pm 0.45)\%$,防残茬回带装

置在 3 种作业速度下的平均秸秆回带率分别为 $(4.35 \pm 0.67)\%$ 、 $(5.12 \pm 0.54)\%$ 、 $(5.90 \pm 1.98)\%$,防残茬回带装置秸秆回带率分别降低了 30.29%、26.65%、28.13%。原清秸防堵装置在 3 种作业速度下的覆秸均匀度分别为 $(90.14 \pm 1.40)\%$ 、 $(89.14 \pm 0.97)\%$ 、 $(90.54 \pm 1.21)\%$,防残茬回带装置在 3 种作业速度下的覆秸均匀度分别为 $(90.07 \pm 0.67)\%$ 、 $(90.11 \pm 2.13)\%$ 、 $(90.24 \pm 1.75)\%$,原清秸防堵装置与防残茬回带装置在覆秸均匀度上无显著差异。

5 结论

- (1)设计一种适用于东北地区机收玉米原茬地免、少耕高速(14 km/h)精播种作业的防残茬回带清秸防堵装置。根据参数优化程序进行单因素试验,确定影响清秸刀盘作业效果的核心参数范围:调节器长度为 30~40 mm、刀柄长度为 40~56 mm 和行星铰接中心距为 54~62 mm。
- (2)通过基于 EDEM-ADAMS 联合仿真的五因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验,得到满足清秸防堵装置试验性能的多目标优化参数组合:调节器长度 35 mm、刀柄长度 54 mm、行星铰接中心距 58 mm、作业速度 14.4 km/h 以及刀轴转速 540 r/min,此时清秸率为 91.11%,土壤扰动率为 21.03%,当量功耗为 9.35 kW,秸秆回带率为 4.85%。
- (3)田间试验表明,在清秸刀齿入土深度 50 mm、作业速度 14.4 km/h、刀轴转速 540 r/min 的作业条件下,优化后的清秸防堵装置清秸率为 $(91.23 \pm 0.56)\%$ 、土壤扰动率为 $(22.63 \pm 2.34)\%$ 、当量功耗为 (10.63 ± 0.33) kW、秸秆回带率为 $(5.90 \pm 1.98)\%$ 。对比试验结果显示,优化后的清秸防堵装置对比原清秸防堵装置秸秆回带率降低了 28.13%,满足设计技术要求,为玉米原茬地免、少耕播种高速精播机研发提供参考。

参 考 文 献

[1] 刘芳,张长生,陈爱武,等. 秸秆还田技术研究及应用进展[J]. 作物杂志,2012(2):18-23.
Liu Fang, Zhang Changsheng, Chen Aiwu, et al. Research and application progress of straw returning technology[J]. Crops, 2012(2): 18-23. (in Chinese)

[2] 殷文,陈桂平,柴强,等. 河西灌区不同耕作与秸秆还田方式对春小麦出苗及产量的影响[J]. 中国生态农业学报,2017, 25(2):180-187.
Yin Wen, Chen Guiping, Chai Qiang, et al. Effects of different tillage and straw returning methods on spring wheat emergence and yield in Hexi Irrigation District[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 180-187. (in Chinese)

[3] 殷文,陈桂平,郭瑶,等. 春小麦秸秆还田对后茬玉米干物质积累及产量形成的调控效应[J]. 中国生态农业学报(中英文),2020,28(8):1210-1218.
Yin Wen, Chen Guiping, Guo Yao, et al. Regulatory effects of spring wheat straw returning on dry matter accumulation and yield formation of subsequent maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture (Chinese & English Edition), 2020, 28(8): 1210-

1218. (in Chinese)
- [4] 朱敏,石云翔,孙志友,等. 秸秆还田与旋耕对川中土壤物理性状及玉米机播质量的影响[J]. 中国生态农业学报,2017,25(7):1025-1033.
- Zhu Min, Shi Yunxiang, Sun Zhiyou, et al. Effects of straw returning and rotary tillage on soil physical properties and maize mechanical seeding quality in Central Sichuan[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(7): 1025-1033. (in Chinese)
- [5] 顾峰玮,胡志超,陈有庆,等. “洁区播种”思路下麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机研制[J]. 农业工程学报,2016,32(20):15-23.
- Gu Fengwei, Hu Zhichao, Chen Youqing, et al. Development of no-tillage peanut seeder with full straw mulching in wheat stubble fields under the concept of “clean area sowing”[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 15-23. (in Chinese)
- [6] 申梦伟,王素珍,钱生越. 自动控制技术在秸秆还田-免耕播种联合作业中的发展现状[J]. 农业工程,2019,9(10):13-17.
- Shen Mengwei, Wang Suzhen, Qian Shengyue. Development status of automatic control technology in the combined operation of straw returning and no-tillage seeding[J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(10): 13-17. (in Chinese)
- [7] Torbert H A, Ingram J T, Prior S A. Planter aid for heavy residue conservation tillage systems[J]. Agronomy Journal, 2007, 99(2): 478-480.
- [8] Gould N S, Peake D, Dalgliesh N P, et al. No-tillage planters for heavy-textured Alfisols in the semi-arid tropics of Australia[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1996, 36(8): 957-970.
- [9] 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 displacement anti-blocking device for maize no-tillage seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 10-17. (in Chinese)
- [10] 黄玉祥,高鹏洋,张庆凯,等. 免耕播种机切茬除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 the combined straw-soil separation device for no-tillage seeder with stubble cutting function[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 67-78. (in Chinese)
- [11] 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. Research on the strip-shaped side-throwing straw-cleaning and anti-blocking device of the less-tillage and no-tillage seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 24-34. (in Chinese)
- [12] 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. Establishment and experiment of the dynamic model for lateral throwing of corn straw residue[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 76-83. (in Chinese)
- [13] 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 test of the anti-blocking device of the no-tillage seeder for corn on large ridges in the original stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 59-67. (in Chinese)
- [14] Wang Hanyang, Chen Haitao, Ji Wenyi. Design and experiment of straw cleaning and covering device of no-tillage seeder in wheat stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(S2): 7-12.
- [15] 王汉羊,陈海涛,纪文义. 2BMFJ-3 型麦茬地免耕精播机防堵装置[J]. 农业机械学报,2013,44(4):64-70.
- Wang Hanyang, Chen Haitao, Ji Wenyi. Anti-blocking device of 2BMFJ-3 no-tillage precision seeder in wheat stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 64-70. (in Chinese)
- [16] 胡飞,郭栋,陈彩蓉,等. 复合曲柄摇杆式蔬菜膜上双行栽植装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(9):62-69.
- Hu Fei, Guo Dong, Chen Cairong, et al. Design and experiment of a double-row vegetable planting device on the film with a compound crank-rocker mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 62-69. (in Chinese)
- [17] 冯立艳,耿浩,王文华,等. 再现运动规律的曲柄摇杆机构运动与传力性能优化[J]. 机械设计,2020,37(5):63-67.
- Feng Liyan, Geng Hao, Wang Wenhua, et al. Optimization of the motion and force transmission performance of a crank-rocker mechanism with reproduced motion law[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(5): 63-67. (in Chinese)
- [18] 陈海涛,逯远东,王星,等. 玉米原茬地高速作业侧向清茬刀设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(4):163-173, 201.
- Chen Haitao, Lu Yuandong, Wang Xing, et al. Design and experiment of lateral stubble-clearing knife for high-speed operation in corn stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 163-173, 201. (in Chinese)

[19] 赵淑红,刘汉朋,杨超,等. 玉米秸秆还田交互式分层深松铲设计与离散元仿真[J]. 农业机械学报,2021,52(3):75 – 87.
Zhao Shuhong, Liu Hanpeng, Yang Chao, et al. Design and discrete element simulation of an interactive stratified subsoiling shovel for corn straw returning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 75 – 87. (in Chinese)

[20] 赵淑红,赵国鹏,冷明新,等. 与深松铲互作锯齿式灭茬刀设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(4):151 – 162.
Zhao Shuhong, Zhao Guopeng, Leng Mingxin, et al. Design and experiment of sawtooth stubble-breaking knife interacting with subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 151 – 162. (in Chinese)

[21] Momozu M, Oida A, Yamazaki M, et al. Simulation of a soil loosening process by means of the modified distinct element method[J]. Journal of Terramechanics, 2002, 39(4): 207 – 220.

[22] 宋井玲,张永政,王卓,等. 大蒜直立种植机非对称式栽植器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(9):116 – 128, 261.
Song Jingling, Zhang Yongzheng, Wang Zhuo, et al. Design and experiment of asymmetric planter for garlic upright planting [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 116 – 128,261. (in Chinese)

[23] 万丽荣,秦伟,刘文婷,等. 基于 EDEM – ADAMS 耦合的挖掘机动臂疲劳寿命分析[J]. 煤炭工程,2024,56(12):176 – 184.
Wan Lirong, Qin Wei, Liu Wenting, et al. Fatigue life analysis of the boom of an excavator based on the coupling of EDEM and ADAMS[J]. Coal Engineering, 2024, 56(12): 176 – 184. (in Chinese)

[24] 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 test of matched fold-type seedbed preparation device for large-scale no-tillage precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 174 – 185,240. (in Chinese)

[25] 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 Haitao, Wei Zhipeng, Su Wenhai, et al. Design and test of front-mounted seedbed preparation device for large ridge in original stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 51 – 60,73. (in Chinese)

(上接第 168 页)

[28] 陈丽鹃,周冀衡,陈闰,等. 秸秆还田对作物土传病害的影响及作用机制研究进展[J]. 作物研究,2018,32(6): 535 – 540.
Chen Lijuan, Zhou Jiheng, Chen Gui, et al. Research progress of influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil-borne diseases in crops[J]. Crop Research, 2018, 32(6): 535 – 540. (in Chinese)

[29] 张亚萍,吴檬宇,周昌敏,等. 长期秸秆还田对南方稻田土壤细菌性病害群落多样性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2026,47(2): 284 – 297.
Zhang Yaping, Wu Mengyu, Zhou Changmin, et al. Effect of long-term straw return on the community diversity of bacterial diseases in paddy soil of southern China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2026, 47(2): 284 – 297. (in Chinese)

[30] Zandi-sohani N, Keena A M, Gallagher R M, et al. Heat treatments to kill eggs of two invasive forest insects: *Lycorma delicatula* (Hemiptera: Fulgoridae) and *Lymantria dispar* (Lepidoptera: Erebidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2025, 118(2): 614 – 624.

[31] Ben-ialli A, Méot J M, Bohuon P, et al. Survival kinetics of *Ephestia kuehniella* eggs during 46 ~ 75°C heat treatment[J]. Journal of Stored Products Research, 2009, 45(3): 206 – 211.

[32] 王何晨阳,高仲亮,曹宇飞,等. 森林火灾产物影响植物种子萌发响应机制研究[J]. 世界林业研究,2023,36(4): 47 – 53.
Wang Hechenyang, Gao Zhongliang, Cao Yufei, et al. Response mechanism of forest fire combustion products affecting plant seed germination[J]. World Forestry Research, 2023, 36(4): 47 – 53. (in Chinese)

[33] Siddiqui A O, Jabran K. Weed tolerance and suppressive ability of potato cultivars to natural weed infestations[J]. Journal of Crop Health, 2025, 77(1): 47.

[34] Baumann D, Bastiaans L, Kropff M J. Competition and crop performance in a leek-celery intercropping system[J]. Crop Science, 2001, 41(3): 764 – 774.