doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.18.019

玉米密植免耕播种机秸秆清抛分掷装置设计与试验

王泽河[1]　邢家乐[1]　王家忠[1]　刘江涛[1]　吴运涛[2]
(1.河北农业大学机电工程学院,保定 071001;2.河北农哈哈机械集团有限公司,石家庄 052560)

摘要:黄淮海地区夏玉米单产提升一般采用 80 cm + 40 cm 宽窄行密植免耕精量播种模式,通过减少株距增加种植密度,有效改善田间通风条件与提高光合作用效率,但窄行播种时小麦秸秆易堵塞播种机,影响播种质量。为解决窄行秸秆堵塞问题,在播种机前端加装清抛分掷装置,将麦茬破碎后清抛到宽行区域。构建刀轴速度模型与清抛运动学模型,分别用于刀轴转速分析及探究影响麦茬抛掷距离的主要因素。将机具作业速度、清茬刀轴转速和导流板夹角作为试验因素,以清茬率与清抛分掷装置作业功耗为评价指标,基于离散元与二次回归正交试验相结合方法,研究不同参数组合对清抛分掷装置作业性能的影响规律。结果表明:较优参数组合为机具作业速度 9.2 km/h、清茬刀轴转速 1 740 r/min、导流板夹角 125°,此时清茬率为 91.73%,功耗为 8.836 kW。经田间试验验证,该参数组合下清茬率为 91.19%,功耗为 9.211 kW,仿真与试验结果误差小于 5%,表明仿真模型具有较高可靠性与预测精度。对比试验结果表明,挂接清抛分掷装置的气吸式播种机播种效果较好,满足宽窄行玉米密植免耕精量播种的农艺需求,研究结果为黄淮海地区夏玉米宽窄行种植高质量播种提供了新思路。

关键词:免耕播种机;宽窄行;清茬;清抛分掷;EDEM
中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)18-0221-13　　**OSID**:

Design and Experiment of Straw Clearing and Throwing Device for Corn Close Planting No-till Planter

Wang Zehe[1]　Xing Jiale[1]　Wang Jiazhong[1]　Liu Jiangtao[1]　Wu Yuntao[2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Hebei Agricultural University*, *Baoding* 071001, *China*
2. *Hebei Nonghaha Machinery Group Co.*, *Ltd.*, *Shijiazhuang* 052560, *China*)

Abstract: The general approach to increase the yield of summer maize in the Huang - Huai - Hai region involved the adoption of a 80 cm + 40 cm wide-narrow row close planting no-tillage precision seeding model. By reducing the plant spacing and increasing the planting density, this method effectively improved the ventilation conditions in the field and enhances the efficiency of photosynthesis. However, when sowing in narrow rows, the wheat straw tended to clog the seeder, affecting the seeding quality. To address the issue of straw clogging in narrow rows, a clearing and throwing device was installed in the front of the seeder to break the wheat stubble and threw it into the wide row area. A model of the knife shaft speed and a kinematic model of the throwing process were constructed, respectively, for the analysis of the knife shaft speed and the exploration of the main factors affecting the throwing distance of the stubble. The working speed of the machine, the rotational speed of the stubble clearing knife shaft, and the angle of the deflector plate were taken as the experimental factors, with the stubble clearing rate and the power consumption of the clearing and throwing device as the evaluation indicators. Based on the combination of discrete element and quadratic regression orthogonal experiments, the influence of different parameter combinations on the working performance of the clearing and throwing device was studied. The results showed that the optimal parameter combination was a machine working speed of 9.2 km/h, a stubble clearing knife shaft speed of 1 740 r/min, and a deflector plate angle of 125°. At this time, the stubble clearing rate was 91.73% and the power consumption was 8.836 kW. Field experiments verified that the stubble clearing rate under this parameter combination was 91.19% and the

收稿日期:2026 - 02 - 09　修回日期:2026 - 04 - 23
基金项目:河北省重大科技支撑计划项目(242N7201Z)
作者简介:王泽河(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事机械装备设计制造与优化研究,E-mail:wzh@hebau.edu.cn
通信作者:王家忠(1970—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail:wjz9001@163.com

power consumption was 9.211 kW. The error between the simulation and experimental results was less than 5%, indicating that the simulation model had high reliability and prediction accuracy. Comparative test results showed that the air-suction seeder equipped with the clearing and throwing device had a better seeding effect and met the agronomic requirements of wide-narrow row close planting no-tillage precision seeding of maize. The research results can provide an idea for high-quality seeding of wide-narrow row corn in the Huang - Huai - Hai region.

Key words: no-till planter; wide and narrow rows; stubble removal; clearing and throwing; EDEM

0 引言

玉米宽窄行密植播种通过调整行距,改善田间通风透光条件、提高光合作用效率、减小株距以增加种植密度和减少病虫害发生。同时,方便在窄行铺设滴灌带,采用水肥一体化技术保障水肥及时供给;宽行便于作业,产生边界效应,实现密植增产。该模式通过“空间重构”平衡个体与群体、密植与通风、高产与绿色的矛盾,将农机与农艺融合,在稳产增产、降本增效、生态友好等方面形成综合优势,成为当前玉米主产区正在推广的播种模式。但在窄行玉米播种时,受到麦茬影响导致播种作业质量差、效率低。一般麦茬留茬高度为 20 ~ 25 cm,直接播种和麦茬还田后播种效果不同。在麦茬未被还田前进行播种时,会出现土壤水肥不足、易板结,玉米苗长势弱、抗逆性差问题;而对麦茬进行还田处理后进行播种,可改良土壤、保墒肥田,助力玉米增产,但消耗大量能源,且易造成播种机作业时产生拥堵。因此,为满足在宽窄行玉米播种模式下对麦茬清理的要求,提高清茬率,亟需研发一种适用于宽窄行播种的清抛分掷装置,通过清茬刀组与导流板相互配合,将窄行及其边缘区域的麦茬清理抛掷至宽行中,为后续铺设滴灌带提供条件。

良好的清秸防堵性能是保证免耕播种机在高速作业下实现高质量播种的前提,也是该领域持续关注的重点[1]。现有研究主要聚焦于等行距播种模式下播种带的秸秆清理,核心目标在于通过切断并移走种沟附近的秸秆残茬,为种子着床整理出无秸种床区域。于畅畅等[2]针对东北地区免耕播种时存在秸秆堵塞等问题,结合螺旋输送特点,设计了一种螺旋切分式种带清理装置,在最优工作参数下种带清秸率为 92.55%;黄玉祥等[3]提出驱动切茬与被动导草相结合的技术思路,设计了一种切茬导草组合式草土分离装置,实现秸秆及杂草的切割、拨抛和引导分流,苗带秸秆清除率为 90.16%;张银平等[4]针对两熟区麦茬地玉米免耕播种机被动清秸存在拥堵、能耗高等问题,将被动清秸与主动清秸结合,设计动力补偿清秸装置,平均种床清秸率为 88.93%,最高达 91.33%;陈海涛等[5]针对东北地区玉米原茬地免耕播种机高速作业时易产生堵塞等问题,改进设计了一种适用于高速免少耕播种作业的侧向清茬刀,当作业速度为 14.4 km/h 时根茬清除率为 91.6%,当量功耗 12.62 kW;姚文燕等[6-7]设计了一种适用于两熟区小麦秸秆覆盖条件下免耕条带浅旋对行主动式防堵装置,当前进速度为 8 km/h时,秸秆清秸率为 91.85%;后续针对增大秸秆残茬侧向抛出播种带的距离,提出一种以拨离残茬和浅旋根茬形式实现苗床清整的斜置式防堵装置,秸秆清除率为 92.5%,功耗为 1.51 kW;林静等[8]针对播种机在有秸秆覆盖地表作业时,基于阿基米德螺线思路,设计一种被动式防缠绕破茬清垄装置,同时实现破茬和清垄功能,破茬率为 92.21%,清秸率为 93.49%;曹鑫鹏等[9-10]针对东北地区玉米免耕播种机在秸秆全量还田条件下作业清茬率低等问题,根据不同农艺要求设计了 2 种侧置切刀与拨茬齿盘组合式、主动旋转集行式驱动秸秆清理装置,在清茬宽度 20 cm 下,组合式装置种带清茬率为 91.4%,集行式清秸装置种带清秸率为 98.3%,平均作业功率为 605 W;王奇等[11]设计了一种能在东北地区玉米秸秆全量粉碎还田进行高效清秸防堵作业的被动式星齿凹面盘式防堵装置,苗带清秸率为 92.2%;刘俊孝等[12]针对东北地区秸秆覆盖条件下少免耕播种玉米时种带清洁度低导致晾籽率高等问题,设计了一种玉米少免耕播种机种带灭茬清理装置,种带清洁度在 80% 以上。宽窄行播种模式下对窄行清茬的清茬装置研究较少。袁盼盼等[13]设计了播种带秸秆残茬分区清理装置,通过纵向错位布置拨草机构对播种带秸秆进行清理,播种带秸秆残茬清理率均值为 87.61%;毕津硕等[14]针对玉米秸秆还田后覆盖量大,免耕播种机高速作业过程堵塞缠绕严重、秸秆清理能力不足的问题,设计了一种应用于玉米高速免耕作业的组合式种带清秸装置,玉米种带清秸率为 92.2%,作业功率为 9.024 kW。

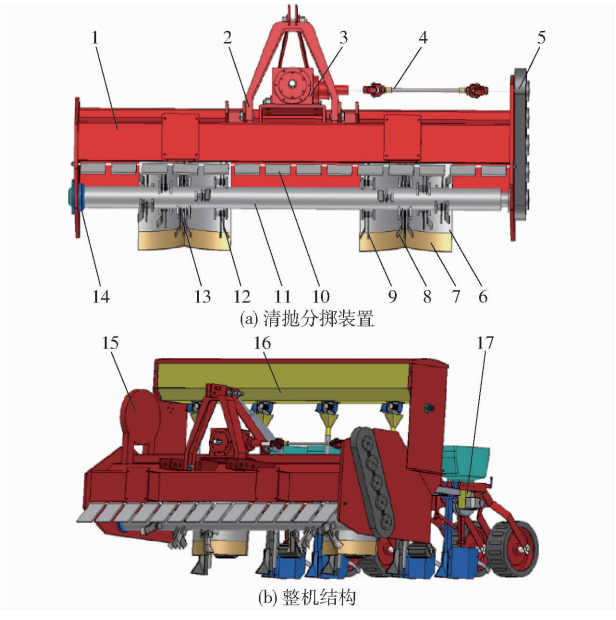
综上所述,现有主动式清秸装置多聚焦于等行距种植模式的防堵性能,清理秸秆位置在种沟附近。但在高秸秆量覆盖场景下,针对宽窄行种植模式下控制秸秆定向抛掷至宽行的研究较少,缺乏针对窄

行区秸秆定点清理的研究，但前人研究为玉米宽窄行密植免耕播种机清抛分掷装置设计提供了有益参考。针对高秸秆覆盖量场景，本文设计一种适用于宽窄行玉米密植免耕播种机作业的主动式清抛分掷装置。以主动动力驱动清茬机构，并设计加装导流板，实现秸秆粉碎与侧向抛掷，有效减少窄行区的麦茬残留。基于离散元法建立“装置-麦茬-土壤”模型，对清茬过程进行仿真模拟；通过正交试验确定装置较优工作参数，并将较优工作参数组合应用于田间试验，以验证其作业性能。

1　秸秆清抛分掷装置结构和工作原理

1.1　总体结构

秸秆清抛分掷装置安装在玉米密植免耕播种机前端，结构如图 1 所示，主要包括机架、传动箱、传动轴、侧边齿轮箱、导流板、自缓冲翼板、挡板、清茬刀辊、清茬双刀组、清茬三刀组等。其中 V 形曲面导流板安装在清茬刀后方的机架上，清茬三刀组安装在窄行中心线上，清茬双刀组沿窄行中心线对称安装，通过清茬刀组与导流板配合实现对麦茬的粉碎、抛掷等过程。玉米密植免耕播种机清抛分掷装置主要参数如表 1 所示。



(a) 清抛分掷装置

(b) 整机结构

图 1　清抛分掷装置结构

Fig. 1　Structure of clearing and throwing device

1. 机架　2. 三点悬挂　3. 传动箱　4. 传动轴　5. 侧边齿轮箱　6. 导流板　7. 自缓冲翼板　8. L 型刀　9. 直刀　10. 挡板　11. 清茬刀辊　12. 清茬双刀组　13. 清茬三刀组　14. 轴承　15. 风机　16. 肥箱　17. 电控播种单体

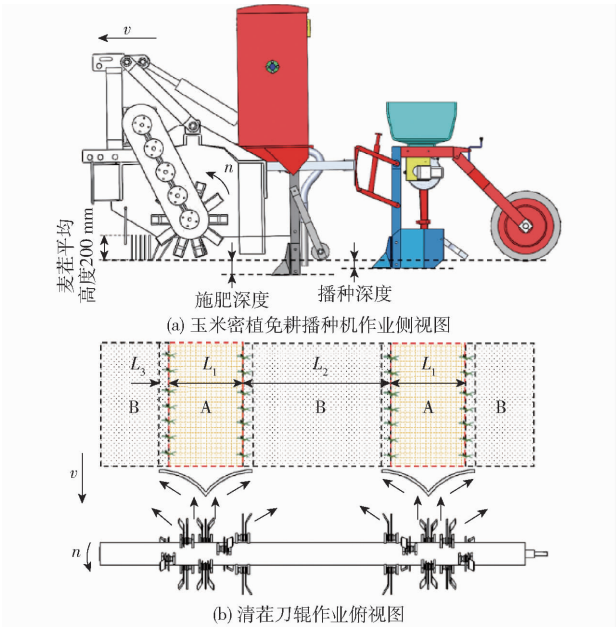
1.2　工作原理

玉米密植免耕播种机工作原理如图 2a 所示。在清抛分掷装置作业完成后，施肥、播种装置在地表

表 1　玉米密植免耕播种机秸秆清抛分掷装置主要参数

Tab. 1　Main parameters of straw clearing and throwing device for corn close planting no-till planter

参数	数值
变速箱变速比	41/16
清茬刀数量/把	20(直刀)+24(L 型刀)
清茬刀回转半径/mm	220
作业幅宽/mm	1 000
清茬宽度/mm	50
适用行距/mm	800(宽行 B)+400(窄行 A)



(a) 玉米密植免耕播种机作业侧视图

(b) 清茬刀辊作业俯视图

图 2　工作原理图

Fig. 2　Working principle diagrams

以下不同深度完成施肥、播种作业。清抛分掷装置工作原理如图 2b 所示，图中窄行行距 L_1 = 400 mm，宽行行距 L_2 = 800 mm，窄行边缘区域清茬宽度 L_3 = 50 mm。

传动箱作为动力中枢与拖拉机动力输出轴相连。动力经传动箱变速、变向传递至传动轴，再由传动轴输送至侧边齿轮箱，通过齿轮啮合驱动清茬刀辊高速运转。清茬刀辊带动清茬刀组对窄行与窄行两侧边缘区域中麦茬进行粉碎并沿 L 型刀弯折方向抛掷，在导流板与自缓冲翼板配合下，秸秆沿图 2b 中箭头方向抛送至宽行 B 中，减少窄行 A 播种区域的麦茬残留，为播种和滴灌带铺设创造条件。

2　关键部件设计

清茬刀辊作为秸秆处理的关键执行部件，对麦茬粉碎效果、工作效率和功耗等均产生显著影响[15]。

2.1　清茬刀设计

2.1.1　清茬刀选型与设计

清茬刀形状对清茬效果、刀具在刀轴上的排

列及刀辊设计布局有重要影响,合理的刀具形状可以提高清茬率和降低功耗[16]。清茬作业刀具可分为直刀式、L 型刀和锤爪式等。本装置设计目标是对土壤上层麦茬进行粉碎抛掷。考虑麦茬含水率低、硬度较小、韧性较大的特性和机具作业时复杂环境,为保障良好播种环境,需用清茬刀将麦茬更好地粉碎与抛掷。因此,选用直刀与 L 型刀组合,形成“剪切 + 抛掷”复合清茬模式,清茬刀作业效果如图 3 所示。综上,清茬双刀组采用 1 把直刀与单 L 型刀组合,清茬三刀组采用 1 把直刀与双 L 型刀组合,清茬刀组兼有直刀粉碎性能和 L 型刀粉碎性能[17]。

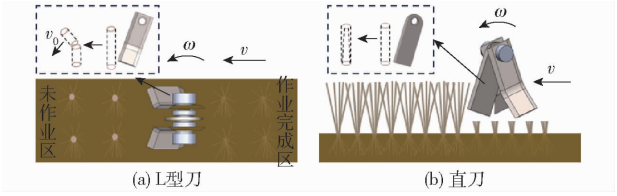


图 3 清茬刀作业效果

Fig. 3 Clearing knife operation effect

麦茬具有纤维韧性强、易缠绕的特点,L 型刀具弯折角度对破碎效果影响较大。90°直角虽结构强度高,但在作业时,易使麦茬出现弯折情况,粉碎不充分。根据国标 L 型刀具设计原则,将弯折角度设计为 150°[16],可形成平滑的引导包裹效应,将麦茬揽入粉碎区,延长刃口与麦茬的作用时间,充分切断撕裂纤维,从根源上防缠绕。该设计也能兼顾刀具抗冲击韧性与粉碎作业性能,提升粉碎均匀性和通过性。刀具厚度需平衡作业功耗与结构强度,过厚易增加功耗、引起振动;过薄则刚性不足、易变形,因此将厚度设计为 5 mm,刀具采用下宽 55 mm、刃口倾角 30°构型,如图 4 所示。保证切削宽度的同时形成锋利楔入角,强化对细韧麦茬的剪切性能[18],实现低功耗、高强度、优粉碎的设计目标。

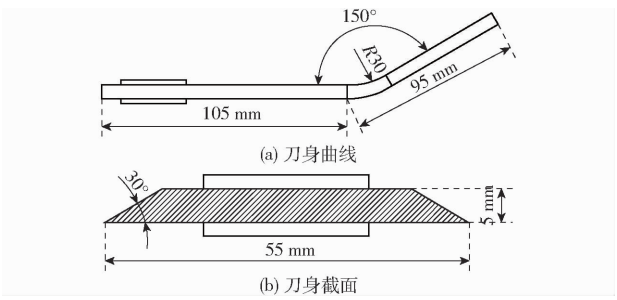


图 4 L 型刀结构

Fig. 4 Structure of L-shaped cutter

2.1.2 刀具数量与排布

对刀具进行合理排布,可以改善机具平衡性、减少振动与无效功率损耗[19]。在工况恒定情况下,甩刀数量不足会制约秸秆的切割效率,无法满足理想粉碎要求;数量冗余则会增大空载能耗,同时诱发堵塞故障,降低整机作业稳定性。刀具安装数量由刀具排布密度决定[20],关系为

$$N = \rho L \tag{1}$$

式中 N——刀组安装数量,组

ρ——刀具排布密度,组/mm

L——作业幅宽,mm

以麦茬粉碎质量和装置功率为双重考量依据,设计组合刀具排布密度 ρ 为 0.02 组/mm[20],装置作业幅宽为 1 000 mm,由式(1)求得甩刀组为 20 组,其中直刀 20 把。针对 L 型刀清茬效果与秸秆导流运动方向,设计 L 型刀数量为 24 把。共计 16 组清茬双刀组,4 组清茬三刀组,清茬宽度 50 mm。

清茬刀组在刀轴上的安装排列对清茬效果有显著影响。不合理的排布会降低清抛分掷装置处理秸秆的粉碎与抛分效果,还会引发机具剧烈振动,严重时将直接导致机具损毁[21-24]。选用双螺旋线排列形式组合甩刀,可使清茬刀辊受力分布均匀,进而减小整机运行过程振动强度。

由于清抛分掷装置在玉米密植免耕播种机前方安装,平均分配 2 个窄行,每个窄行 10 组清茬刀组。清茬刀组沿单螺旋线设 5 组,初始相位角为 0°和 180°;单螺旋线与麦茬接触的甩刀相位差为 36°,单螺旋线相邻清茬刀组轴向间距 100 mm。参照旋耕机刀具排布,推导单螺旋线相邻甩刀组相位差 φ 计算式为[25]

$$\varphi = \begin{cases} 2\theta_c & (c \leqslant 20 \text{ 组}) \\ 4\theta_c & (20 \text{ 组} < c \leqslant 40 \text{ 组}) \\ 8\theta_c & (c > 40 \text{ 组}) \end{cases} \tag{2}$$

式中 θ_c——单螺旋线上相继与麦茬接触的 2 组清茬刀相位差,(°)

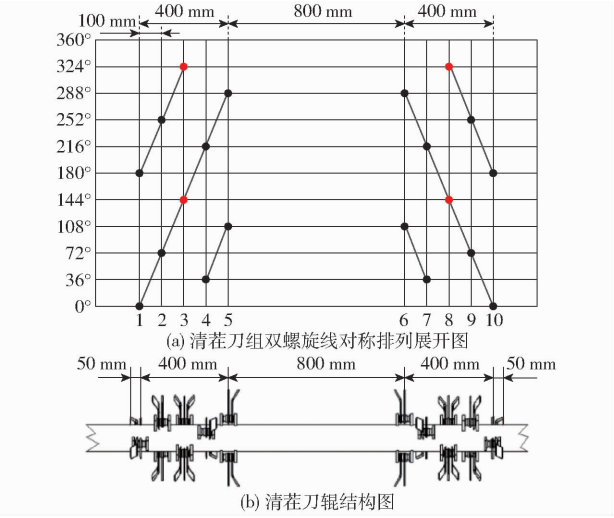
c——单螺旋线上清茬刀组数量,组

单螺旋线清茬刀组数量 c 为 5 组,代入式(2)确定单螺旋线相邻甩刀组相位差为 72°。两窄行中清茬刀组对称排列,得到清茬刀组在清茬刀轴上排列如图 5a(图中黑色点为清茬双刀组;红色点为清茬三刀组)所示,清茬刀辊结构如图 5b 所示。

2.2 清茬刀轴转速分析

为保证麦茬粉碎质量,选择合理的刀轴转速至关重要,其绝对转速取决于机器作业速度和刀轴转速[26]。

针对清茬刀作业阶段的运动状态开展分析,将机具前进方向定义为正方向,作业过程如图 6a 所示。以清茬刀轴轴心为原点,以刀尖位置为观察点建立直角坐标系,得出清茬刀运动轨迹呈周期性螺旋曲线,如图 6b 所示。

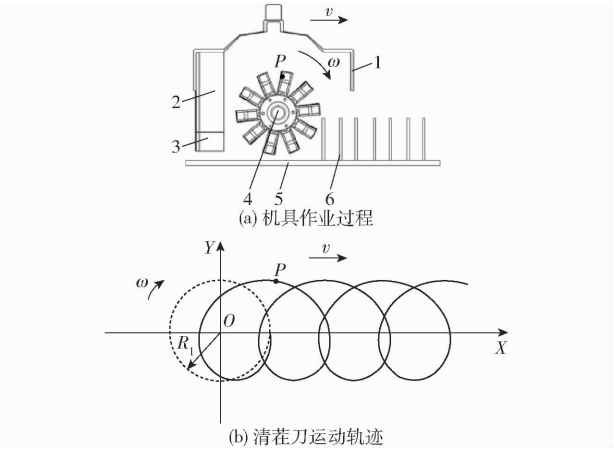


(a) 清茬刀组双螺旋线对称排列展开图

(b) 清茬刀辊结构图

图 5　清茬刀辊模型

Fig. 5　Clearing cutter drum model



(a) 机具作业过程

(b) 清茬刀运动轨迹

图 6　清茬刀运动与作业示意图

Fig. 6　Sowing knife movement and operation diagrams

1. 机架　2. 导流板　3. 自缓冲翼板　4. 清茬刀轴　5. 土壤　6. 麦茬

设清茬刀轨迹上任一点 $P(x,y)$，清茬刀运动轨迹参数方程为

$$\begin{cases} x = vt + R_1\cos(\omega t) \\ y = R_1\sin(\omega t) \end{cases} \tag{3}$$

式中　t——清茬刀运动时间，s

v——机具作业速度，m/s

ω——清茬刀轴转动角速度，rad/s

R_1——清茬刀回转半径，mm

由式(3)微分得

$$\begin{cases} v_x = v - R_1\omega\sin(\omega t) \\ v_y = R_1\omega\cos(\omega t) \end{cases} \tag{4}$$

式中　v_x、v_y——清茬刀刀尖在 X、Y 方向分速度，m/s

由式(4)可得清茬刀刀尖绝对速度为

$$v_1 = \sqrt{v^2 - 2vR_1\omega\sin(\omega t) + R_1^2\omega^2} \tag{5}$$

当 $\omega t = \dfrac{4k+1}{2}\pi\ (k \in N)$，$k$ 为非负整数变量，刀尖绝对速度方向与机器作业速度方向相反，刀尖绝对速度 v_1 有最小值，即

$$v_1 = R_1\omega - v \tag{6}$$

将 $\omega = 2\pi n$（n 为转速）代入式(6)可得转速最小值为

$$n_{\min} = \frac{30(v_1 + v)}{\pi R_1} \tag{7}$$

研究表明，清茬刀刀尖绝对速度（以动刀转轴为轴心）为 30 ~ 43 m/s 时，能达到良好的切碎效果[27]。选用气吸式播种机，为探究清抛分掷装置能否适配气吸式玉米播种机在高速条件下正常作业，将机具作业速度 v 设置为 2.2 ~ 3.3 m/s，清茬刀回转半径 R_1 为 220 mm，代入式(7)，得清茬刀轴转速最小值为 1 398 r/min，取 n 为 1 400 r/min。

黄淮海地区地表麦茬覆盖量大，为保证麦茬粉碎质量，并考虑实际工作中地块平整度差异、麦茬含水率波动、机具作业速度变化等因素，实际转速取 $(1.1 \sim 1.5)n$[28-29]，因此清茬刀轴转速取值范围为 1 540 ~ 2 100 r/min。

2.3　导流板结构设计

导流板是导流装置核心部件，作用是将窄行打碎后的麦茬导流到宽行内。导流板需满足以下要求[30]：简洁实用，满足安装要求与工作强度指标。与清抛分掷装置有效配合，具有较好导流效果。适应田间复杂工况，在地势起伏、坑洼地块中具有良好的作业通过性。基于以上设计准则并结合实际情况，开展导流板设计。

2.3.1　结构选型与材料确定

鉴于导流板在作业过程不与土壤直接接触，所受冲击载荷较小，设计时主要考虑结构轻量化。因此，选取厚 4 mm 的 Q235 钢板作为基材。在几何构型上采用微曲面 V 字形折弯结构，不仅能增加板体截面惯性矩，提升抗变形能力，还形成两侧向中间收拢的导流槽，有利于将散乱秸秆聚拢并定向引导。导流板高度由机架与地面高度决定，在留出安装自缓冲翼板的距离后，将高度设置为 420 mm，如图 7a 所示。采用铆接工艺将导流板固定在机架后横梁上，能有效释放装配应力，提高在复杂田间环境下抗疲劳振动的能力。

2.3.2　夹角参数理论分析

V 形导流板夹角 β 是决定导流效果的核心参数。基于颗粒运动学理论及离散元法，秸秆碎片在接触到导流板表面时，相对运动轨迹受导流板法向作用力影响。参照文献[31]，对导流板夹角进行理论分析，将导流板简化为等腰三角形，如图 7b 所示。

导流板夹角 β 为

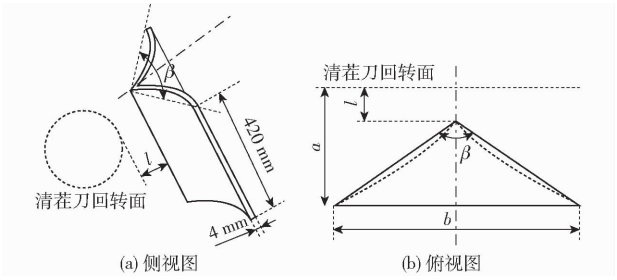


图 7 导流板结构

Fig. 7 Flow deflector structure

$$\beta = 2\arctan\frac{1/2b}{a-l} \tag{8}$$

式中 b——导流板宽度,mm

a——导流板尾部与清茬刀回转面径向距离,mm

l——导流板刃线与清茬刀回转面径向距离,mm

已知 $b=500$ mm、$a=225$ mm,则影响导流板夹角 β 的因素为导流板刃线与清茬刀回转面径向距离 l。为防止清茬刀回转面与导流板刃线距离太近导致麦茬堵塞,取 $l_{\min}$ 为 65 mm,将以上数据代入式(8)求得 $\beta=114.7°$,取 $\beta_{\min}=115°$。

当夹角较小时导流板迎茬面趋于陡峭,导致碎茬与板面碰撞后法向速度分量增加,飞溅至相邻窄行,造成二次混杂,降低清茬率;当夹角较大时导流板趋近于扁平,对碎茬约束能力下降,且碎茬在板面上滑移阻力增大,易导致碎茬在板面上滞留堆积,甚至掉落回窄行区域,增加壅堵风险。在确定导流板最小夹角为 115°的基础上,以 10°为梯度递增,设置 115°、125°、135° 3 种水平进行仿真试验,研究夹角变化对导流效果的影响,从而确定最优参数范围。

2.4 清茬刀组清抛运动学分析

清茬刀组作业时,麦茬在接触导流板之前运动轨迹受到自身重力、清茬刀轴转速和清茬刀弯折角度的影响。为使碎麦茬被抛掷到宽行 B 中,外侧清茬刀起到抛掷的重要作用,清茬刀与碎茬运动轨迹如图 8 所示。内侧清茬刀作业时,被切割的碎茬会发生相互碰撞,碎茬离开清茬刀时速度降低,该部分碎茬会接触导流板后向宽行抛掷,由于摩擦作用速度也会降低,因此这部分碎茬被抛掷的距离不会超过最外侧碎茬向宽行抛掷的距离。因此,选择最外侧清茬刀接触麦茬瞬间进行运动学分析。

忽略空气阻力,令播种机前进方向为 Y 轴,设麦茬为质点 O,该点为麦茬与清茬刀准备脱离的临界点。在清茬刀继续旋转时,麦茬已被切碎并沿着抛物线被清茬刀抛掷至侧后方的宽行 B 中,则麦茬在点 O 处被抛掷的初始速度 v_o 为

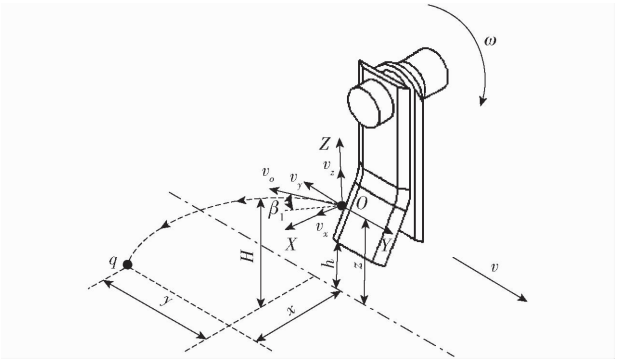


图 8 抛掷碎茬运动学分析

Fig. 8 Kinematic analysis of throwing debris

$$v_o = \omega(R_1 + h - z) \tag{9}$$

式中 h——麦茬质点距离地面垂直高度,mm

z——清茬刀底部距离地面垂直距离,mm

麦茬在点 O 被抛掷的瞬时速度 v_o 在 X 轴方向分速度为 v_{ox},在 Y 轴方向分速度为 v_{oy},在 Z 轴方向分速度为 v_{oz},由式(9)可得

$$\begin{cases} v_{ox} = v_o\cos\beta_1\sin\alpha = \omega(R_1 + h - z)\cos\beta_1\sin\alpha \\ v_{oy} = -v_o\cos\beta_1\cos\alpha = \omega(z - R_1 - h)\cos\beta_1\cos\alpha \\ v_{oz} = v_o\sin\beta_1 = \omega(R_1 + h - z)\sin\beta_1 \end{cases} \tag{10}$$

式中 α——清茬刀弯折角度,(°)

β_1——麦茬被抛掷瞬时方向与水平方向夹角,(°)

麦茬脱离清茬刀被抛出后做抛物线运动,运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x_o = t_1\omega(R_1 + h - z)\cos\beta_1\sin\alpha \\ y_o = t_1\omega(z - R_1 - h)\cos\beta_1\cos\alpha \\ z_o = z + t_1\omega(R_1 + h - z)\sin\beta_1 - 1/2gt_1^2 \end{cases} \tag{11}$$

式中 x_o——麦茬在 X 轴方向抛出距离,mm

y_o——麦茬在 Y 轴方向抛出距离,mm

z_o——麦茬在 Z 轴方向抛出距离,mm

g——重力加速度,m/s^2

t_1——飞行时间,s

当麦茬落地时,$z_o=0$,代入式(11)计算飞行时间 t_1 为

$$t_1 = \frac{\omega(R_1 + h - z)\sin\beta_1}{g} + \frac{\sqrt{[\omega(R_1 + h - z)\sin\beta_1]^2 + 2gz}}{g} \tag{12}$$

根据式(11)得出麦茬水平向后最大抛掷距离 y 为

$$y = \frac{-\omega^2(R_1 + h - z)^2\sin(2\beta_1)\cos\alpha}{2g} + \frac{\sqrt{[\omega(R_1 + h - z)\sin\beta_1]^2 + 2gz}}{g}\cdot \omega(z - R_1 - h)\cos\beta_1\cos\alpha \tag{13}$$

麦茬在水平面内垂直于机具前进方向的侧向最大抛掷距离 x 为

$$x=\frac{\omega^2(R_1+h-z)^2\sin(2\beta_1)\sin\alpha}{2g}+\frac{\sqrt{[\omega(R_1+h-z)\sin\beta_1]^2+2gz}}{g}\cdot\omega(R_1+h-z)\cos\beta_1\sin\alpha \tag{14}$$

麦茬在竖直方向最大抛掷高度 H 为

$$H=z+\frac{[\omega(R_1+h-z)\sin\beta_1]^2}{2g} \tag{15}$$

由式(13)~(15)可知，麦茬在各个方向抛掷距离随清茬刀轴角速度变化而变化。当 β_1 为 45°时，抛掷距离最大。影响抛掷距离的因素主要有：清茬刀轴转速、清茬刀回转半径、清茬刀弯折角度与清茬刀离地高度。实际作业中，清茬刀回转半径与弯折角度已设置为固定值，在不同地块工作时，工作地面情况不同，故清茬刀离地高度在作业时会不断变化。因此，麦茬被侧向抛掷距离主要与清茬刀轴转速有关。为避免因转速过高导致碎茬横向位移超出宽行行距、落入相邻窄行而影响播种质量，基于碎茬抛掷运动学理论分析，确定刀轴转速为核心影响参数，选取 1 500、1 800、2 100 r/min 3 种水平开展多因素仿真试验，研究刀轴转速变化对碎茬抛掷距离的影响规律。

3　清抛分掷过程仿真

采用 EDEM 构建清抛分掷装置与麦茬、土壤的相互作用模型，明确清茬刀和导流板在作业过程对麦茬的清理作用。通过分析机具作业速度、清茬刀轴转速及导流板夹角之间的交互作用，验证装置运动参数设计合理性；模拟清抛分掷装置在田间作业工况，建立以清茬率与功耗为核心的评价体系，对影响作业性能的关键因素进行分析，从而确定最佳工作参数组合。

3.1　模型参数设置与仿真系统环境

通过 Solidworks 2025 建立等比例清抛分掷装置简化模型，另存为 .igs 格式导入 EDEM 2024，模型材料为 45 钢[32]。对土壤-麦茬模型简化：土壤颗粒以直径 10 mm 小球表示，麦茬选择直径 1 mm 小球，圆周排列为直径 5 mm、长度 200 mm 的空心柱状体，如图 9 所示。装置与颗粒物理特性如表 2 所示[32]。仿真接触模型选用 Hertz - Mindlin(no slip)，装置、麦茬与土壤模型接触参数见表 3[33-34]。

通过 EDEM 软件建立虚拟仿真土槽，参数设定为长 2 500 mm、宽 2 000 mm、高 50 mm；麦茬颗粒生成区域尺寸为 2 000 mm × 2 000 mm，平均高度控制

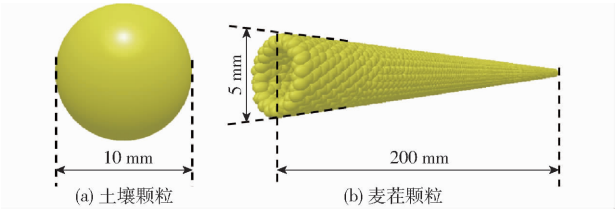


图 9　土壤与麦茬颗粒模型

Fig. 9　Soil and stubble particle model

表 2　装置与颗粒物理特性

Tab. 2　Device and particle physical properties

项目	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m^{-3})
装置	0.31	7.8×10^{10}	7 800
土壤	0.38	1.0×10^{6}	1 850
麦茬	0.40	1.0×10^{6}	241

表 3　材料接触参数

Tab. 3　Material contact parameters

项目	恢复系数	滚动摩擦因数	静摩擦因数
麦茬-麦茬	0.5	0.30	0.3
土壤-土壤	0.6	0.40	0.6
土壤-麦茬	0.5	0.05	0.3
装置-土壤	0.6	0.05	0.6
装置-麦茬	0.6	0.01	0.3

在 200 mm，选取 Cubic 作为位置生成选项，保证麦茬空间分布与实际一致。土壤颗粒成型后，在重力作用下完成沉降堆积，促使颗粒间紧密接触，实现仿真土壤与真实土壤的等效匹配，确保仿真分析的准确性。仿真系统环境如图 10 所示。

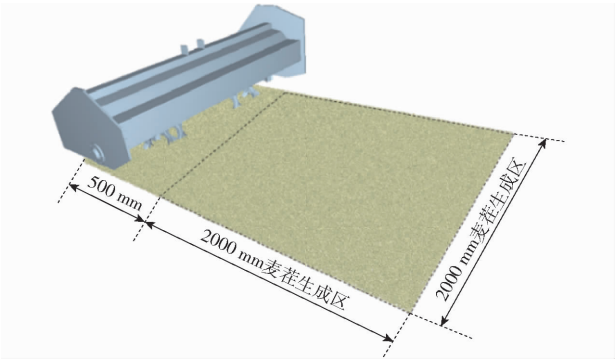


图 10　仿真系统环境

Fig. 10　Simulation system environment

3.2　仿真试验设计

基于上述理论分析，选定机具作业速度、清茬刀轴转速与导流板夹角作为试验因素，将清茬率和功耗设为评价指标，采用三因素三水平 Box - Behnken 试验。试验因素编码如表 4 所示。

3.3　仿真过程

仿真过程如图 11 所示，设置清抛分掷装置在土槽初始位置开始作业。在仿真环境中 0~1 s 生成土壤颗粒，1~2 s 土壤颗粒自然沉降，2~4 s 分 10

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Experimental factors and codes

编码	因素		
	机具作业速度 v/(km·h^{-1})	清茬刀轴转速 n/(r·min^{-1})	导流板夹角 β/(°)
-1	8	1 500	115
0	10	1 800	125
1	12	2 100	135

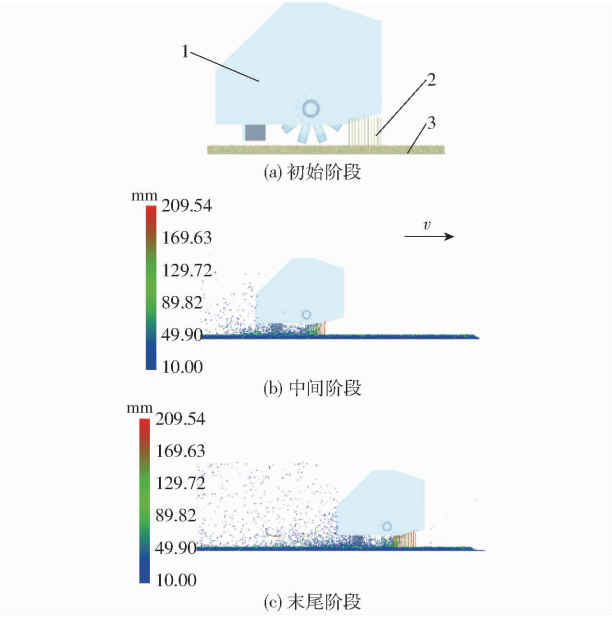


图 11 清茬作业仿真过程

Fig. 11 Simulation process of clearing crop residue

1. 清抛分掷装置 2. 麦茬 3. 土壤

段生成麦茬颗粒,并进行清茬作业,仿真时间为 4 s。设置仿真过程时间步长为自动时间步长,设置 Rayleigh percentage 为 1%,单元格尺寸为 3 倍最小颗粒半径。

3.4 评价指标

(1)清茬率

在 EDEM 后处理界面 Analyst Tree 中选择 Histogram 对比装置作业完成前后窄行麦茬数量,清茬作业区域如图 12 所示。清茬率 λ 计算式为

$$\lambda = \left(1 - \frac{n_1}{n_0}\right) \times 100\% \tag{16}$$

式中 n_0——作业前窄行麦茬根数,根

n_1——作业后窄行麦茬根数,根

(2)功耗

借助 EDEM 仿真软件 Analyst Tree 功能,对仿真周期内全部麦茬颗粒与土壤颗粒所承受的总转矩进行统计分析,功耗与转矩转换公式为

$$P_1 = \frac{Tn}{9\,550} \tag{17}$$

式中 P_1——仿真过程功耗,kW

T——仿真过程总转矩,N·m

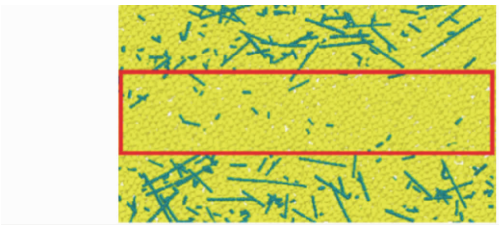


图 12 清茬作业区域

Fig. 12 Area for clearing crop residue

3.5 试验结果与分析

3.5.1 回归模型建立与方差分析

利用 Design-Expert 软件对试验数据进行二次回归正交试验,试验方案与结果见表 5,A、B、C 为因素编码值。

表 5 试验方案与结果

Tab. 5 Experimental plan and results

试验序号	因素			清茬率 Y_1/%	功耗 Y_2/kW
	机具作业速度 A	清茬刀轴转速 B	导流板夹角 C		
1	-1	-1	0	86.64	8.773
2	1	-1	0	81.34	10.167
3	-1	1	0	87.06	10.785
4	1	1	0	85.97	13.512
5	-1	0	-1	87.69	9.330
6	1	0	-1	85.74	10.263
7	-1	0	1	89.02	9.680
8	1	0	1	85.86	10.734
9	0	-1	-1	86.57	9.150
10	0	1	-1	85.15	11.400
11	0	-1	1	82.23	8.340
12	0	1	1	87.48	12.615
13	0	0	0	92.09	9.193
14	0	0	0	91.67	9.434
15	0	0	0	92.30	9.401
16	0	0	0	91.34	9.328
17	0	0	0	91.88	9.298

(1)清茬率

对清茬率进行方差分析,结果见表 6。A、B、AB、BC、A^2、B^2、C^2对清茬率影响极显著,回归模型 P 小于 0.000 1,失拟项 P 为 0.088 7,回归模型极显著。各因素对清茬率影响主次顺序为 $A > B > C$,决定系数 R^2 为 0.986 3 时清茬率二次多项式回归模型为

$$Y_1 = 91.86 - 1.44A + 1.11B - 0.07C + 1.05AB - 0.302\,5AC + 1.67BC - 2.44A^2 - 4.16B^2 - 2.34C^2 \tag{18}$$

(2)功耗

对功耗进行方差分析,结果见表 7。A、B、BC、A^2、B^2对功耗影响极显著,AB 对功耗影响显著,回归

表 6　清茬率方差分析

Tab. 6　Analysis of variance for stubble removal rate

方差来源	平方和	自由度	均方差	*F*	*P*
模型	176. 12	9	19. 57	56. 13	<0. 000 1 **
A	16. 53	1	16. 53	47. 41	0. 000 2 **
B	9. 86	1	9. 86	28. 27	0. 001 1 **
C	0. 039 2	1	0. 039 2	0. 112 4	0. 747 2
AB	4. 43	1	4. 43	12. 71	0. 009 2 **
AC	0. 366	1	0. 366	1. 05	0. 339 6
BC	11. 12	1	11. 12	31. 90	0. 000 8 **
A^2	25. 1	1	25. 1	72. 00	<0. 000 1 **
B^2	72. 93	1	72. 93	209. 16	<0. 000 1 **
C^2	22. 99	1	22. 99	65. 94	<0. 000 1 **
残差	2. 44	7	0. 348 7		
失拟项	1. 89	3	0. 629 1	4. 55	0. 088 7
误差	0. 553 3	4	0. 138 3		
总和	178. 56	16			

注：** 表示差异极显著（$P<0.01$）。下同。

表 7　功耗方差分析

Tab. 7　Analysis of variance for power consumption

方差来源	平方和	自由度	均方差	*F*	*P*
模型	30. 97	9	3. 44	58. 82	<0. 000 1 **
A	6. 32	1	6. 32	107. 94	<0. 000 1 **
B	17. 65	1	17. 65	301. 63	<0. 000 1 **
C	0. 006 4	1	0. 006 4	0. 109 1	0. 750 8
AB	0. 444 2	1	0. 444 2	7. 59	0. 028 3 *
AC	0. 193 2	1	0. 193 2	3. 30	0. 112 1
BC	1. 03	1	1. 03	17. 52	0. 004 1 **
A^2	1. 93	1	1. 93	32. 98	0. 000 7 **
B^2	2. 70	1	2. 70	46. 23	0. 000 3 **
C^2	0. 250 6	1	0. 250 6	4. 28	0. 077 3
残差	0. 409 6	7	0. 058 5		
失拟项	0. 373 9	3	0. 124 6	13. 98	0. 013 8
误差	0. 035 7	4	0. 008 9		
总和	31. 38	16			

注：* 表示差异显著（$0.01 \leqslant P<0.05$）。

模型 P 小于 0. 000 1，失拟项 P 为 0. 013 8，回归模型极显著。各因素对功耗影响主次顺序为 $B>A>C$，R^2 为 0. 986 9 时功耗二次多项式回归模型为

$$Y_2 = 9.33 + 0.888\,5A + 1.49B + 0.028\,2C + 0.333\,2AB - 0.219\,7AC + 0.506\,2BC + 0.677A^2 + 0.8015B^2 + 0.244C^2 \quad (19)$$

3. 5. 2　响应面分析

利用 Design-Expert 软件对仿真结果进行分析，得到机具作业速度、清茬刀轴转速、导流板夹角之间交互作用对清茬率、功耗影响的响应曲面。

（1）清茬率

机具作业速度与清茬刀轴转速对清茬率的影响如图 13a 所示。当导流板夹角为 125°、机具作业速度为 10 km/h、清茬刀轴转速为 1 800 r/min 时，清茬率最高为 92. 3%；当清茬刀轴转速小于 1 800 r/min 时，随着转速增加，清茬效果越好；当转速大于 1 800 r/min 时，清茬率逐渐下降。此现象产生的原因为：当转速过高时，部分被击打脱离的麦茬会被再次卷入刀体，无法顺利通过导流板排出作业幅宽，出现残茬回流，清茬效果减弱，导致清茬率降低。当清茬刀轴转速一定时，机具作业速度小于 10 km/h 时，随着速度提升，作业幅宽内被清理的麦茬可以快速从清茬刀上流落到导流板上，清茬率不断提高；但当作业速度逐渐增大时，清茬刀尖碎茬节距不断增大，引起部分麦茬未受到清茬刀击打，导致作业幅宽内残茬数量增加，使得清茬率不断降低。

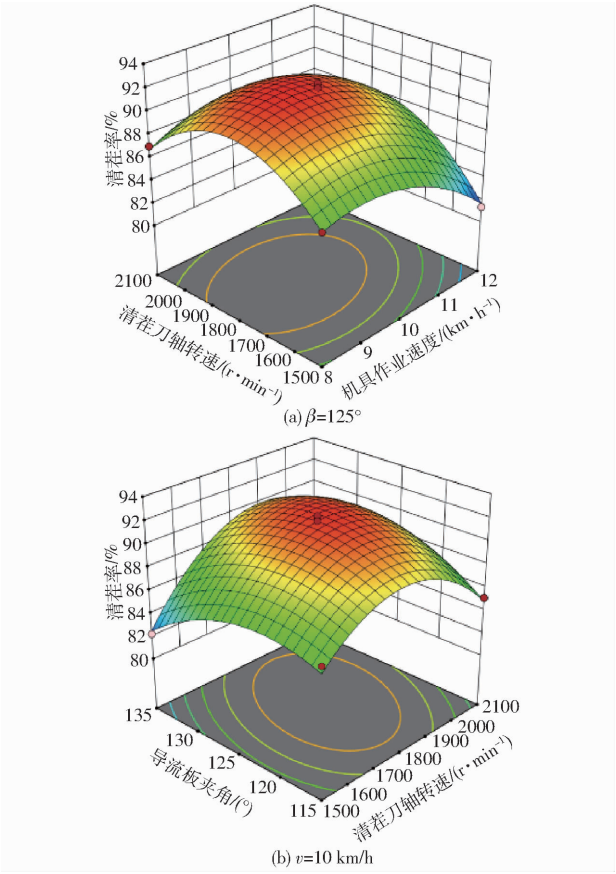


图 13　试验因素对清茬率影响的响应曲面

Fig. 13　Response surfaces for influence of experimental factors on stubble removal rate

导流板夹角与清茬刀轴转速对清茬率的影响如图 13b 所示。机具作业速度为 10 km/h，当清茬刀轴转速保持稳定为 1 800 r/min，在导流板夹角小于最优区间角度时，随着夹角增大，导流板对碎茬的导向排送空间更合理，麦茬能快速脱离作业区域，清茬率持续上升；但当导流板夹角超过最优区间后，夹角增大会使导流板逐渐趋近于平面状态，原曲面 V 形导茬结构功能被弱化，无法快速对碎茬进行清抛分掷，此时碎茬易在导流板表面堆积，随着作业时间推移，部分堆积的碎茬会从导流板上脱落，重新掉回作

业幅宽内,最终导致清茬率降低。

(2)功耗

机具作业速度与清茬刀轴转速对功耗的影响规律如图 14a 所示。当导流板夹角为 125°,机具作业速度一定时,随着清茬刀轴转速提升,刀辊与麦茬的撞击频率、负载强度同步增加,驱动刀辊运转所需功耗随之升高;当清茬刀轴转速一定时,随着机具作业速度加快,单位时间内作业幅宽内的麦茬处理量增多,清茬刀负载增强,导致机组牵引功耗增大,进而提高了整体作业功耗。

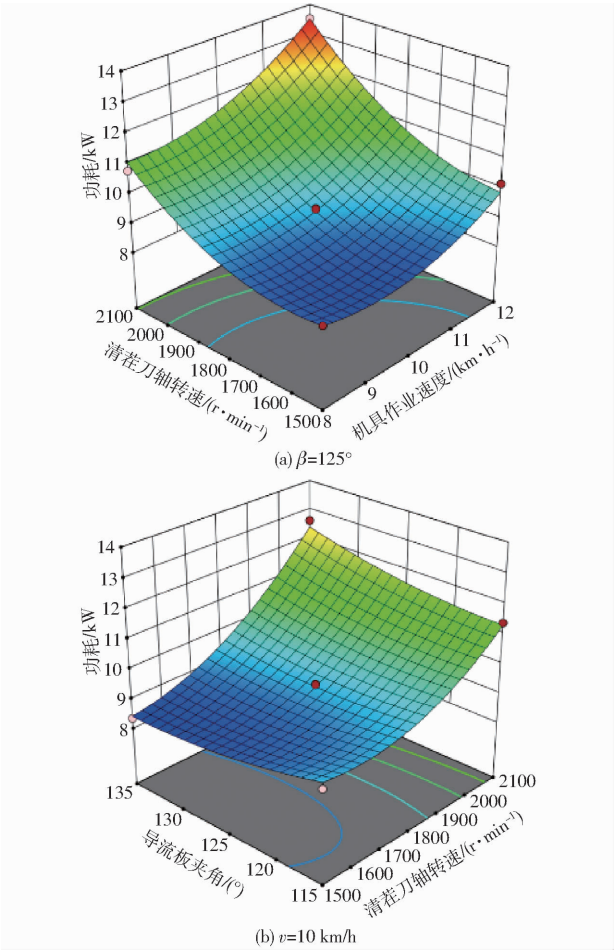


图 14 试验因素对功耗影响的响应曲面

Fig. 14 Response surfaces for influence of experimental factors on power consumption

导流板夹角与清茬刀轴转速对功耗的影响如图 14b 所示。机具作业速度为 10 km/h,当导流板夹角一定时,随着清茬刀轴转速提升,清茬刀与麦茬的撞击频率、负载强度增大,驱动刀辊功耗增加;当清茬刀轴转速一定时,随着导流板夹角增大,导流板对碎茬的导向阻力增强,同时刀辊与导流板的配合负载提升,设备需克服更大阻力完成作业,导致功耗上升,但总体变化不明显。

3.5.3 试验因素参数优化

功耗为一个复杂的评价指标,受拖拉机配备、播种机配置和田间地况等多因素影响,很难仅通过仿真得出最优工作参数。表 7 中功率方差分析中失拟项 $P<0.05$,需结合图 14 响应面趋势寻找较优工作参数。对评价指标实施优化求解,目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max\ Y_1(A,B,C) \\ \min\ Y_2(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1\leqslant A\leqslant 1 \\ -1\leqslant B\leqslant 1 \\ -1\leqslant C\leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{20}$$

通过 Design-Expert 软件进行多目标优化求解,得较优工作参数组合为:机具作业速度 9.2 km/h、清茬刀轴转速 1 740 r/min、导流板夹角 125°,此时清茬率为 91.73%,功耗为 8.836 kW。

4 田间试验

4.1 试验条件

田间试验于 2025 年 6 月 17 日在河北省保定市望都县高优农业技术服务合作社进行,试验现场如图 15 所示。根据仿真试验得出的功率数据和田间试验条件,将玉米密植免耕播种机安装在东方红 LX1604(g4)型轮式拖拉机上进行作业,试验地块留茬高度平均为 22 cm,麦茬平均含水率为 6.25%、麦茬平均单位面积覆盖量为 0.55 kg/m^2。测得土壤含水率为 5.84%,土壤温度为 32℃。试验仪器设备主要有:TZS-ⅡW 型土壤水分温度测量仪、电子秤、机械动力学参数遥测仪、转矩传感器、转速表、卷尺、直尺等。



图 15 清抛分掷装置田间试验

Fig. 15 Field trials of clearing and throwing device

4.2 试验设计

将玉米密植免耕播种机安装在拖拉机后方三点

悬挂上，调整好清茬作业位置，拖拉机牵引装置进行清茬作业。为验证离散元仿真的正确性，在机具作业速度为 9.2 km/h、清茬刀轴转速为 1 740 r/min、导流板夹角为 125°条件下进行田间试验，试验重复 3 次取均值，测量清抛分掷装置的清茬率及功率损耗。

4.3　评价指标

（1）清茬率

基于五点取样法在试验田内随机布设麦茬取样点，利用电子秤完成取样点麦茬质量称量，确定单位面积麦茬平均质量 M_0；作业后，收集取样点窄行内未清理麦茬，称量其总质量 M_1，计算清抛分掷装置清茬率 λ_t，计算式为

$$\lambda_t = \left(1 - \frac{M_1}{M_0}\right) \times 100\% \tag{21}$$

（2）功耗

通过传感器所测得数据计算功耗，计算式为

$$P_t = \frac{Mn + Fv}{2} \tag{22}$$

式中　M——转矩传感器测量转矩，N·m

F——装置所受牵引力之和，N

P_t——装置作业功耗，kW

4.4　试验结果分析

田间试验重复 3 次取平均值，统计结果如表 8 所示。由表 8 可知，清茬率为 91.19%，低于仿真结果；功耗为 9.211 kW，高于仿真结果。误差（小于 5%）产生原因在于仿真环境相对理想化，而田间实际作业工况复杂多变，存在诸多不可控变量，且麦茬长度参差不齐，麦茬覆盖量、土壤含水率不同等，从而降低了窄行清茬率，增加了功耗。

表 8　田间试验验证结果

Tab.8　Results of field trial verification

序号	清茬率/%	功耗/kW
1	91.25	9.236
2	91.51	8.973
3	90.82	9.461
平均值	91.19	9.211

4.5　播种效果

选取不同麦茬处理方式的试验田进行试验，图 16a 为将麦茬还田后播种机作业时出现拥堵状态；图 16b 为麦茬被清抛分掷装置清理后播种完成时地表状态。

玉米种子出苗情况如图 17 所示。其中，图 17a 显示破茬直接播种的地块中出现缺苗断垄现象。原因为：由于麦茬提前被还田机破碎，平铺在地块上，播种机在作业时会携带碎茬前进。随着播种机作业距离增加，被携带的碎茬不断积累，播种机下方会被



(a) 破茬播种　　(b) 清茬播种

图 16　播种效果

Fig.16　Sowing effect



(a) 破茬播种　　(b) 清茬播种

图 17　出苗效果

Fig.17　Planting effects

碎茬填满，尤其是播种开沟器后方堆积大量碎茬，使得刚被播种的玉米种子上方土壤被堆积的碎茬刮开，导致种子外露（晾籽现象），种子无法正常生长。采用本文清抛分掷装置后，玉米种子出苗效果如图 17b 所示。将碎茬进行分掷处理，将绝大部分碎茬抛掷至宽行，有效减少窄行碎茬，种子发育良好，苗全、苗齐、苗壮。

5　结论

（1）设计了适用于玉米宽窄行密植免耕播种机的清抛分掷装置，通过对清茬刀辊进行宽窄行适配设计，加装导流板，将窄行麦茬清理抛掷至宽行。对关键部件进行设计和分析，得出影响装置作业性能的主要工作参数为机具作业速度、清茬刀轴转速和导流板夹角。

（2）通过 EDEM 仿真试验，并利用 Design-Expert 软件进行旋转正交试验，得到提高清茬率与降低作业功耗的较优工作参数。结果表明：当机具作业速度为 9.2 km/h、清茬刀轴转速为 1 740 r/min、导流板夹角为 125°时，清茬率为 91.73%，功耗为 8.836 kW。

（3）对仿真试验得到的较优工作参数组合进行田间试验验证，试验重复 3 次取平均值。结果表明，清茬率为 91.19%，功耗为 9.211 kW，试验与仿真结果基本一致，证明仿真模型可靠。通过对比破茬与清茬分掷的播种效果，气吸式播种机在麦茬还田地直接播种易因碎茬堆积堵塞、刮开种床导致种子外露（晾种）。挂接清抛分掷装置后可将碎茬分掷至宽行，保障窄行正常播种。装置在高速作业时清茬效果良好，符合玉米免耕播种秸秆清理需求。

参 考 文 献

[1] 卢彩云,罗锡文,李洪文,等. 我国保护性耕作的发展与政策建议[J]. 中国工程科学,2024,26(2):103 – 112.
Lu Caiyun, Luo Xiwen, Li Hongwen, et al. Progress and suggestions of conservation tillage in China[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(2): 103 – 112. (in Chinese)

[2] 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(S2): 212 – 219. (in Chinese)

[3] 黄玉祥,高鹏洋,张庆凯,等. 免耕播种机切茬导草组合式草土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(5):67 – 78.
Huang Yuxiang, Gao Pengyang, Zhang Qingkai, et al. Design and experiment of grass-soil separation device with combination of stubble cutting and grass guiding used for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 67 – 78. (in Chinese)

[4] 张银平,郝泽华,徐婷,等. 玉米免耕播种机动力补偿自适应清秸装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(1):174 – 185.
Zhang Yinping, Hao Zehua, Xu Ting, et al. Design and experiment of dynamic compensation adaptive straw removal device for corn no-till seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 174 – 185. (in Chinese)

[5] 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 test of lateral stubble clearing blade 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)

[6] 姚文燕,赵殿报,徐广飞,等. 条带对行主动式玉米免耕播种防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 2):55 – 62,71.
Yao Wenyan, Zhao Dianbao, Xu Guangfei, et al. Design and experiment of anti-blocking device for strip to row active corn no-tillage seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 55 – 62, 71. (in Chinese)

[7] 姚文燕,赵殿报,苗河泉,等. 免耕播种机浅旋清茬斜置式防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):42 – 52.
Yao Wenyan, Zhao Dianbao, Miao Hequan, et al. Design and experiment of oblique anti-blocking device for no-tillage planter with shallow plowing stubble clearing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 42 – 52. (in Chinese)

[8] 林静,吕洲翼,李宏哲,等. 垄作免耕播种机被动式防缠绕破茬清垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(6):19 – 27,37.
Lin Jing, Lü Zhouyi, Li Hongzhe, et al. Design and experiment of passive anti-winding stubble breaking and ridge cleaning device for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 19 – 27, 37. (in Chinese)

[9] 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)

[10] 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 an active rotating row-type straw removal device [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(6): 26 – 34. (in Chinese)

[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 Qi, Jia Honglei, Zhu Longtu, 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. (in Chinese)

[12] 刘俊孝,王浩,王庆杰,等. 玉米少免耕播种机种带灭茬清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊 1):132 – 140.
Liu Junxiao, Wang Hao, Wang Qingjie, et al. Design and experiment of strip cleaning device of no and minimum-tillage corn planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 132 – 140. (in Chinese)

[13] 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)

[14] 毕津硕,卢彩云,李洪文,等. 玉米高速免耕播种机组合式垄台种带清秸装置研制[J]. 农业工程学报,2025,41(17):44 – 54.
Bi Jinshuo, Lu Caiyun, Li Hongwen, et al. Development of the stalk cleaning device of maize high-speed no-tillage seeder on seeding belts[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(17): 44 – 54. (in Chinese)

[15] 郭超凡,李粤,姚德宇,等. 仿生香蕉秸秆粉碎装置关键部件作业参数优化与试验[J]. 中国农机化学报,2022,43(1):93 – 100.
Guo Chaofan, Li Yue, Yao Deyu, et al. Optimization and experiment of operating parameters of key components of bionic banana straw crushing devices[J]. Journal of Chinese Agricultural Machinery, 2022, 43(1): 93 – 100. (in Chinese)

[16] 位士全,李粤,吴紫晗,等.卧式香蕉秸秆粉碎还田机关键部件优化设计[J].农机化研究,2024,46(12):58－66.
Wei Shiquan, Li Yue, Wu Zihan, et al. Optimization design of key components for horizontal banana straw crushing and returning machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(12): 58－66. (in Chinese)

[17] 付雪高.甘蔗叶粉碎还田机关键部件研究[D].海口:海南大学,2010.
Fu Xuegao. Sugarcane leaves smash-field machine's components research[D]. Haikou: Hainan University, 2010. (in Chinese)

[18] 汪志祥.双轴式旋耕灭茬播种机的灭茬刀辊优化设计与试验研究[D].合肥:安徽农业大学,2018.
Wang Zhixiang. Optimum design and experimental study of stubble cutter roller for two-axis rotary tillage and stubble seeder[D]. Hefei:Anhui Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[19] 王海庆,王迪,田海清,等.黄贮玉米秸秆饲料收获机改进设计[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2021,42(5):83－88.
Wang Haiqing, Wang Di, Tian Haiqing, et al. Improved design of yellow corn straw fodder harvester[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 42(5): 83－88. (in Chinese)

[20] 章志强,何进,李洪文,等.可调节式秸秆粉碎抛撒还田机设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(9):76－87.
Zhang Zhiqiang, He Jin, Li Hongwen, et al. Design and experiment on straw chopper cum spreader with adjustable spreading device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(9):76－87. (in Chinese)

[21] 姬江涛,李庆军,蔡苇.刀具布置对茎秆切碎还田机振动的影响分析[J].农机化研究,2003,25(4):63－64.
Ji Jiangtao, Li Qingjun, Cai Wei. Analysis of the influence of tool arrangement on the vibration of the stem chopping and tillage machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2003,25(4): 63－64. (in Chinese)

[22] 涂建平,徐雪红,夏忠义.秸秆还田机刀片及刀片优化排列的研究[J].农机化研究,2003,25(2):102－104.
Tu Jianping, Xu Xuehong, Xia Zhongyi. The study of the cutting-blade and the optimum of the knife-array of field straw chopper[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2003,25(2): 102－104. (in Chinese)

[23] 薄鸿明,林静.玉米秸秆还田机的设计与参数研究[J].农机化研究,2016,38(11):99－103.
Bo Hongming, Lin Jing. The design and simulation analysis of maize field straw chopper[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11): 99－103. (in Chinese)

[24] Sidhu H,Singh M,Singh Y, et al. Development and evaluation of the Turbo Happy Seeder for sowing wheat into heavy rice residues in NW India[J]. Field Crops Research,2015,184:201－212.

[25] 王多辉,陈翠英.旋转耕作机刀片排列应用程序的设计[J].农业机械学报,1998,29(增刊1):26－29.
Wang Duohui, Chen Cuiying. The program for rotary tiller's blades arranging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998,29(S1): 26－29. (in Chinese)

[26] 高阳,李粤,位士全,等.具有腐熟剂喷施装置的香蕉秸秆粉碎还田机的设计与试验[J].中国农业科技导报,2024,26(9):93－104.
Gao Yang, Li Yue, Wei Shiquan, et al. Design and experiment of a banana straw crushing and returning machine with rotting agent spraying device[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(9): 93－104. (in Chinese)

[27] 薛惠岚,薛少平,杨青,等.秸秆粉碎覆盖与施肥播种联合作业的实现及机具设计[J].农业工程学报,2003,19(3):104－107.
Xue Huilan, Xue Shaoping, Yang Qing, et al. Implementation of combined work of straw crushed for mulching and seeding with fertilizer and design of the machine[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(3): 104－107. (in Chinese)

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

[29] 张佳喜,王学农,陈发,等.秸秆粉碎还田回收机刀辊工作参数的研究[J].农业机械学报,2007,38(6):82－85,37.
Zhang Jiaxi, Wang Xuenong, Chen Fa, et al. Study on working parameters of knife roller of field straw chopper for mulching or reclaiming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(6): 82－85, 37. (in Chinese)

[30] 张先民.玉米秸秆粉碎还田机导流装置设计与试验[D].哈尔滨:东北农业大学,2017.
Zhang Xianmin. Design and experimental study on diversion device of maize straw crushing and returning machine[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[31] 罗伟文,胡志超,吴峰,等.全秸硬茬地小麦播种机碎秸导流装置参数设计与优化[J].农业工程学报,2019,35(18):1－10.
Luo Weiwen, Hu Zhichao, Wu Feng, et al. Design and optimization for smashed straw guide device of wheat clean area planter under full straw field[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 1－10. (in Chinese)

[32] Li X,Zhang Y,He H, et al. Design and experiment of row cleaner with staggered disc teeth for no-till planter[J]. Agriculture, 2023, 13(7):1373.

[33] Tagar A,Changying J,Adamowski J, et al. Finite element simulation of soil failure patterns under soil bin and field testing conditions[J]. Soil & Tillage Research,2015,145:157－170.

[34] Zeng Z,Chen Y. Simulation of straw movement by discrete element modelling of straw-sweep-soil interaction[J]. Biosystems Engineering,2019,180:25－35.