

## 全秸硬茬地小麦播种机碎秸导流装置参数设计与优化

罗伟文, 胡志超\*, 吴 峰, 顾峰玮, 徐弘博, 陈有庆

(农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

**摘 要:** 针对中国稻麦轮作区小麦播种时, 存在田间秸秆量大和茬口紧等影响小麦播种的问题, 提出可直接在全秸硬茬地作业的小麦“洁区”宽幅播种农艺模式, 并基于种带无播种障碍、碎秸行间条覆的技术思路设计相应的碎秸导流装置。通过理论分析作业时碎秸下抛及与碎秸导流装置滑切耦合的运动规律, 以清秸率和种带宽度变异系数为目标函数, 确定影响目标函数的主要结构参数。结合 Box-Behnken 中心组合试验方法和 EDEM 离散元仿真技术对影响碎秸导流装置作业性能的参数进行虚拟试验, 利用 Design-Expert 软件分析因素对碎秸导流装置作业性能的影响, 确定最佳参数组合, 并通过田间对比试验验证该装置的作业性能。试验结果表明: 各因素对碎秸导流装置清秸覆秸性能有显著影响, 其对清秸率影响的主次顺序依次为装置导流宽度、装置导流长度、径向距离, 对种带宽度变异系数影响的主次顺序依次为装置导流长度、径向距离、装置导流宽度; 最佳参数组合设计为装置导流长度 300 mm、径向距离 19 mm 和装置导流宽度 298 mm, 其对应指标清秸率为 91.83%, 种带宽度变异系数为 10.36%, 其田间试验对应指标清秸率为 90.75%, 种带宽度变异系数为 10.94%, 仿真与田间试验结果基本吻合。研究结果可为全秸硬茬地的小麦机播作业提供技术与装备支持, 亦可为碎秸行间集覆还田的碎秸导流装置参数优化提供参考。

**关键词:** 农业机械; 离散元; 优化; 种带清秸; 碎秸导流装置

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.001

中图分类号: S223.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-18-0001-10

罗伟文, 胡志超, 吴 峰, 顾峰玮, 徐弘博, 陈有庆. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.001 http://www.tcsae.org

Luo Weiwen, Hu Zhichao, Wu Feng, Gu Fengwei, Xu Hongbo, Chen Youqing. Design and optimization for smashed straw guide device of wheat clean area planter under full straw field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(18): 1—10. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.001 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

江苏省常年稻麦轮作总面积约  $1.6 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 约占全省稻麦种植总面积的 60%, 轮作区的小麦产量可达  $6\ 600 \text{ kg/hm}^2$ ; 此外, 四川、安徽、湖北等地的常年稻麦轮作面积也都接近  $1.3 \times 10^6 \text{ hm}^2$ <sup>[1]</sup>。稻麦轮作两熟制是中国稻麦生产的重要模式, 可有效提高谷物生产总量, 在保证国家粮食安全方面占有重要地位<sup>[2]</sup>。但稻收后小麦播种工序复杂, 通常为稻秸粉碎、翻耕埋茬、旋耕整地、施肥播种、播后镇压, 同时稻收后播种小麦的茬口非常紧, 导致轮作区的小麦生产不仅成本较高, 而且通常无法在适播期内完成播种<sup>[3]</sup>。因此, 产区亟需能直接在秸茬地进行下茬小麦播种的作业设备。

播前秸茬的及时有效处理, 是直接在秸茬地播种的关键环节, 国内外专家对此做出大量研究, 成效显著<sup>[4-5]</sup>。针对不同作业背景, 秸茬处理主要有以下方式: 在秸秆被移出并资源化利用后, 田间仍有部分秸茬的背景下, 主要有“秸秆流动”、“重力切茬”、“条耕”、“粉

碎”、和“拨抛”等几种技术模式, 其相关设备适用性强, 但在秸秆量大、秸茬不做任何处理的地块作业时机具入土部分易挂草雍秸<sup>[6-12]</sup>; 在农作物收获后不做任何秸秆移出和耕整地处理的全秸硬茬地背景下, 主要有全量秸秆粉碎后播前入土混埋、播后地表均覆、按比例混埋均覆、侧边集秸、开沟深埋等几种技术模式, 其相关设备均能直接在全秸硬茬地作业, 但均需配置相应的后续碎秸处理装置, 整机结构相对复杂, 功耗相对较大<sup>[13-20]</sup>。同时, 由于水稻秸秆量大、韧性强、流动性差等特点, 易导致大量秸茬混入土壤造成架种晾种, 大量秸秆覆盖地表影响出苗等问题<sup>[21-24]</sup>。

因此, 针对上述 2 种背景下的秸茬处理问题, 本文结合小麦宽幅播种农艺要求与课题组研制的全秸硬茬地小麦洁区播种机工作机理, 提出播种带无障碍、碎秸行间集覆的轮作区小麦机播技术思路, 设计了一种能够高效集秸、行间覆秸的碎秸导流装置, 具有组配方便、高度集成、高效低耗等优点, 既能满足在全秸硬茬地高质顺畅播种需求, 又能实现提升地温、封闭行间杂草、改善土壤结构的功能, 可为一年两熟、多熟耕作区保护性耕作提供技术与装备支持<sup>[25]</sup>。

## 1 播种方式及结构设计

### 1.1 行间覆秸小麦洁区播种方式

小麦宽幅播种具有优化群体结构、均衡营养面积等

收稿日期: 2019-05-17 修订日期: 2019-07-03

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金子项目 (CX (17) 1002-03)。

作者简介: 罗伟文, 助理工程师, 主要从事农机装备研发。

Email: luoweiwensc@163.com

\*通信作者: 胡志超, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事农机装备研究。

Email: nfzhongzi@163.com

优势<sup>[26]</sup>。结合以往试验,在全秸硬茬地作业工况下,提出了一种幅距为 300 mm,播幅为 240 mm(播幅内等距排列 3 组开沟器,每组开沟器播种幅宽为 80 mm),并将全量秸茬粉碎后覆盖于行间的小麦“洁区”(种带无播种秸障)宽幅播种农艺模式,如图 1 所示,目前该农艺模式已在江苏、河南等地区进行应用示范。

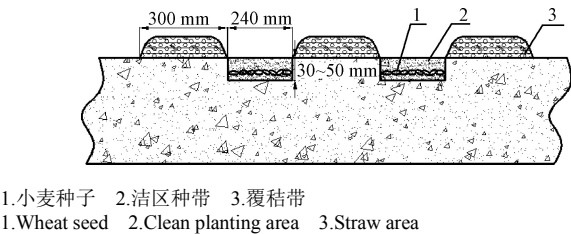


图 1 小麦“洁区”宽幅播种农艺模式  
Fig.1 Wheat wide-boundary sowing agronomic with clean area

1.2 整机结构

全秸硬茬地小麦播种机(碎秸行间集覆式)整机结构如图 2 所示,主要包括秸秆粉碎装置(压秸辊、碎秸刀罩壳、碎秸刀、调节横梁)、碎秸导流装置、种带旋耕装置(可调支撑辊、阻隔板、旋耕刀组、旋耕刀罩壳)、多功能施肥播种装置(种箱、肥箱、撒肥器、开沟器、镇压轮)、机架、悬挂系统、传统系统等,主要技术参数如表 1 所示。

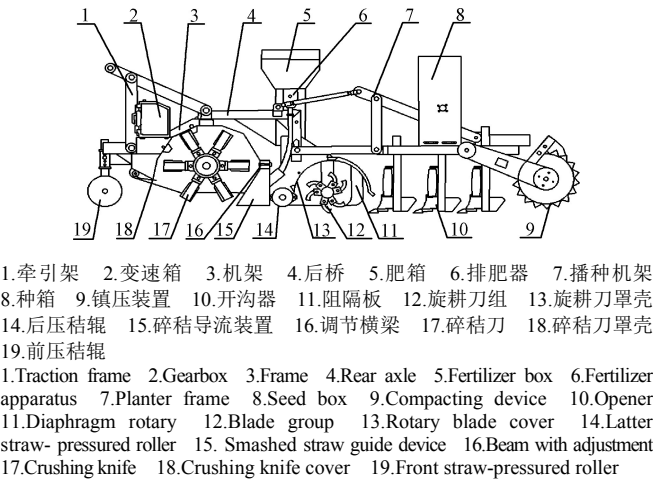


图 2 全秸硬茬地小麦“洁区”播种机结构简图  
Fig.2 Structural diagram of wheat clean area planter under full straw field

表 1 主要技术参数

Table 1 Technical parameters of equipment		
项目 Item	数值 Values	
整机质量 Weight/kg	1 800	
配套动力 Power/kW	≥105	
作业速度 Velocity/(m·s <sup>-1</sup> )	0.6~1.2	
作业幅宽 Homework width/mm	2 400	
种带行数 Rows	4	
覆秸条数 Covering rows	5	

1.3 碎秸导流装置

碎秸导流装置如图 3 所示,主要包括斜面导流板、

定型板和安装板。该装置安装在捡拾粉碎装置与种带旋耕装置之间。4 组碎秸导流装置固定于捡拾粉碎装置后下方的调节横梁上,相邻碎秸导流装置沿作业幅宽方向等距分布,装置与地面的间隙为 20 mm。作业时,捡拾粉碎装置的碎秸刀将作业幅宽内秸秆捡拾并粉碎,粉碎后的秸秆沿碎秸刀罩壳内侧壁向下喷射,位于覆秸带(行间)幅宽内的碎秸直接落在覆秸带上,位于清秸带(种带)幅宽内的碎秸在碎秸喷射与碎秸导流装置的滑切耦合作用下,自行向碎秸导流装置两侧分开,并下落于种带两侧的覆秸带上,形成无秸秆障碍的“洁区”播种带和相邻碎秸导流装置间的覆秸带。后续种带旋耕和播种作业均在所形成的无秸秆障碍的种带上进行。

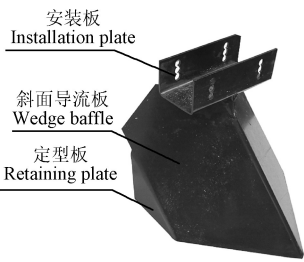
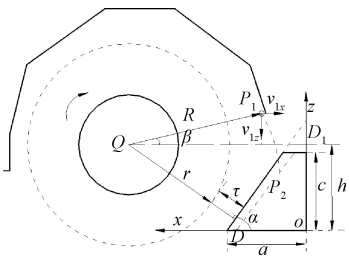


图 3 碎秸导流装置结构图  
Fig.3 Structural diagram of smashed straw guide device

2 碎秸颗粒运动学特性

在条覆过程中,碎秸先以一定初速度从粉碎室喷出,在空气中做下抛运动,随后与碎秸导流装置滑切耦合后集覆于行间。为便于研究碎秸的运动规律,以机具前进方向为  $x$  轴正方向,以竖直向上为  $z$  轴正方向,以右手定则确定  $y$  轴正方向,建立如图 4 所示坐标系  $oxyz$ 。



注:  $oxz$  为坐标系;  $P_1$ 、 $P_2$  分别为碎秸颗粒下抛起止点;  $D$ 、 $D_1$  分别为过  $P_2$  的装置导流刀线的平行线与坐标轴交点;  $Q$  为刀轴回转中心;  $R$  为回转中心与碎秸下抛点  $P_1$  的距离, mm;  $a$  为装置导流长度, mm;  $c$  为装置高度, mm;  $h$  为碎秸导流装置底面与回转中心所在水平面的距离, mm;  $r$  为碎秸刀回转半径, mm;  $\tau$  为导流刀线碎秸刀回转面的径向距离(以下简称径向距离), mm;  $\alpha$  为导流刀线水平面夹角, ( $^\circ$ );  $\beta$  为粉碎装置回转中心和碎秸质心两点连线与水平面夹角, ( $^\circ$ )。  
Note:  $oxz$  is coordinate system;  $P_1$  and  $P_2$  are the starting and ending points of the lower throwing motion respectively;  $D$  and  $D_1$  are the intersections of the coordinate axis with the line passing through  $P_2$  and parallel to the guide line;  $Q$  is the knife axis rotation center;  $R$  is the distance between the center of rotation and the throwing point  $P_1$ , mm;  $a$  is the length of the diversion, mm;  $c$  is the height of the diversion, mm;  $h$  is the distance between the bottom surface of the guiding device and the horizontal plane where the rotary center is located, mm;  $r$  is the rotating radius of knives, mm;  $\tau$  is the radial distance between the guiding line and the rotating surface of knives;  $\alpha$  is the angle between guiding line and the horizontal plane, ( $^\circ$ );  $\beta$  is the angle between the horizontal plane and the line connecting between the center of rotation and the throwing point, ( $^\circ$ ).

图 4 碎秸下抛  $OXZ$  平面轨迹分析  
Fig.4 Trajectory analysis of  $OXZ$  plane for smashed straw

## 2.1 碎秸下抛运动规律

碎秸从粉碎室喷出后，在重力和空气阻力作用下，做下抛运动。任取碎秸导流装置竖直方向一截面为研究域，离散化碎秸为单个颗粒，碎秸颗粒从  $P_1$  点运动到  $P_2$  点做下抛运动<sup>[27]</sup>，下抛过程中碎秸在坐标系的运动微分方程为

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} + k\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = 0 \\ \frac{d^2z}{dt^2} - k\left(\frac{dz}{dt}\right)^2 + g = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $k$  为空气阻力因子，描述碎秸下抛过程中所受空气阻力； $g$  为重力加速度， $\text{m/s}^2$ 。

初始条件为

$$\begin{cases} x|_{t=0} = \frac{r+\tau}{\sin\alpha} - R\cos\beta + a - h\cot\alpha \\ z|_{t=0} = h + R\sin\beta \end{cases} \quad (2)$$

设碎秸下抛运动时间为  $t_1$ ，忽略碎秸下抛点  $P_1$  到碎秸刀罩壳的距离，则  $0 \leq t < t_1$  时，碎秸的运动轨迹为

$$\begin{cases} x(t) = x|_{t=0} + \frac{\ln[1 + k(v_{1x} + v_0)t]}{k} \\ z(t) = z|_{t=0} + \frac{1}{k} \ln \left[ \frac{2e^{\sqrt{gk}t}}{1 - \sqrt{\frac{k}{g}}v_{1z} + \left(1 + \sqrt{\frac{k}{g}}v_{1z}\right)e^{2\sqrt{gk}t}} \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中  $v_{1x}$ 、 $v_{1z}$  分别表示碎秸下抛点  $P_1$  的初速度沿  $x$ 、 $z$  轴的分速度， $\text{m/s}$ 。

且碎秸的下抛终点位置满足关系式

$$z|_{t=t_1} = (x|_{t=t_1} - a + \delta\cot\theta)\tan\alpha \quad (4)$$

由式 (3)、式 (4) 可知，在下抛过程中，秸秆粉碎装置参数和前进速度确定后，影响碎秸下抛终点位置、速度的因素有径向距离、装置导流长度、导流刃线与水平面夹角和碎秸导流装置单侧分秸角。

## 2.2 碎秸与导流装置滑切运动规律

碎秸下抛至碎秸导流装置时，与斜面导流板进行滑切耦合，从而改变碎秸运动轨迹。以碎秸为研究对象，碎秸从  $P_2$  点运动到  $P_3$  点为滑切耦合的过程，忽略碎秸在该过程中受到的空气阻力，分析碎秸颗粒受力情况，如图 5 所示。结合文献<sup>[4]</sup>，在滑切过程中碎秸所受支持力  $N$  为

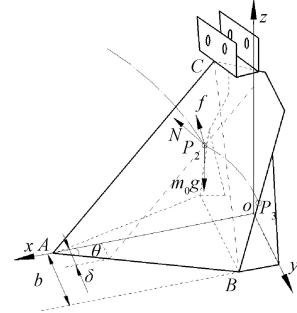
$$N = \frac{\sqrt{b^2c^2 + a^2c^2 + a^2b^2}}{\sqrt{b^2c^2 + a^2c^2}} \frac{m_0g}{2\tan\phi} \quad (5)$$

式中  $c$  为导流装置高度，由安装横梁与地面高度决定， $c=250\text{ mm}$ ； $\phi$  为碎秸自然休止角， $(^\circ)$ 。

将支持力  $N$  和摩擦力  $f$  沿坐标轴方向分解，结合式 (5)，建立滑切耦合过程中碎秸沿坐标轴方向的运动微分方程

$$\begin{cases} \frac{g}{2\tan\phi} \left( \frac{bc}{\sqrt{b^2c^2 + a^2c^2}} - \frac{a\tan\phi}{\sqrt{b^2c^2 + a^2c^2}} \right) = \frac{d^2x}{dt^2} \\ \frac{g}{2\tan\phi} \left( \frac{ac}{\sqrt{b^2c^2 + a^2c^2}} - \frac{b\tan\phi}{\sqrt{b^2c^2 + a^2c^2}} \right) = \frac{d^2y}{dt^2} \\ \frac{g}{2\tan\phi} \frac{ab(1+\tan\phi)}{\sqrt{b^2c^2 + a^2c^2}} - g = \frac{d^2z}{dt^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $\phi$  为碎秸与斜面导流板之间的摩擦角，斜面导流板材质确定， $\phi$  为一定值， $(^\circ)$ 。



注： $oxyz$  为坐标系； $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别表示导流板的 3 个角点，其中  $A$  点表示导流板最前端的点， $C$  点表示导流板最高点； $P_3$  为碎秸滑出点； $N$  为垂直于导流斜面的支持力， $N$ ； $f$  为平行于导流斜面的摩擦力， $N$ ； $b$  为装置单侧宽度， $\text{mm}$ ； $m_0$  为碎秸质量， $\text{kg}$ ； $\delta$  为  $P_2$  与装置对称面的距离， $\text{mm}$ ； $\theta$  为碎秸导流装置单侧分秸角， $(^\circ)$ 。

Note:  $oxyz$  is coordinate system;  $A$ ,  $B$ , and  $C$  are the three corner points of the deflector, where  $A$  is the front end of the deflector, and  $C$  is the highest point of the deflector;  $P_3$  is the slipping point of smashed straw;  $N$  is the support force perpendicular to the deflector,  $N$ ;  $f$  is the friction parallel to the deflector,  $N$ ;  $b$  is the half width of the device,  $\text{mm}$ ;  $m_0$  is the quality of smashed straw,  $\text{kg}$ ;  $\delta$  is the distance between  $P_2$  and the symmetry plane of the device,  $\text{mm}$ ;  $\theta$  is the unilateral guiding angle of straw flow guiding device,  $(^\circ)$ .

图 5 稻秸受力分析图

Fig.5 Force analysis diagram of rice straw

设碎秸滑切耦合时间为  $t_2$ ，则  $t_1 \leq t < t_2$  时，碎秸在动坐标系运动轨迹为

$$\begin{cases} x(t) = (v_{2x} - v_0)t + \left( \frac{bc}{\sqrt{b^2c^2 + a^2c^2}} - \frac{a\tan\phi}{\sqrt{b^2c^2 + a^2c^2}} \right) \frac{gt_1^2}{4\tan\phi} + x_1|_{t=t_1} \\ y(t) = v_{2y}t + \left( \frac{ac}{\sqrt{b^2c^2 + a^2c^2}} - \frac{b\tan\phi}{\sqrt{b^2c^2 + a^2c^2}} \right) \frac{gt_1^2}{4\tan\phi} + \delta \\ z(t) = v_{2z}t + \frac{ab(1+\tan\phi)gt_1^2}{4\tan\phi\sqrt{b^2c^2 + a^2c^2}} - \frac{gt_1^2}{2} + z_1|_{t=t_1} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $v_{2x}$ 、 $v_{2y}$ 、 $v_{2z}$  分别为滑切耦合过程中的初速度在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的分速度， $\text{m/s}$ 。

从式 (7) 可知，影响滑切运动轨迹的因素包括滑切运动的初始位置和速度、装置导流长度、装置单侧宽度。而滑切运动的初始位置、速度与下抛运动终点位置、速度有关；同时，由碎秸导流装置结构可知，导流刃线与水平面夹角、碎秸导流装置单侧分秸角、装置单侧宽度均与碎秸导流装置结构参数有关，分别有如下几何关系

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{c}{a} \\ b = \frac{d}{2} \\ \theta = \arctan \frac{b}{a} \end{cases} \quad (9)$$

式中  $d$  为装置导流宽度, mm。

因此, 在秸秆粉碎装置参数与前进速度确定后, 影响碎秸运动轨迹的因素为装置导流长度、径向距离和装置导流宽度。

3 离散元仿真试验

为分析装置导流长度、径向距离和装置导流宽度对碎秸导流装置作业性能的影响, 并寻找最佳参数组合, 设计了种带清秸性能的仿真试验。碎秸在碎秸导流装置的作用下条覆于行间, 该过程涉及大量碎秸离散体运动, 运用离散元仿真软件 EDEM 对碎秸导流装置行间覆秸过程进行分析, 可提高工作效率, 降低试验成本<sup>[28]</sup>。通过建立装置—碎秸—土壤间作用模型, 模拟碎秸导流装置的田间作业环境, 并建立以清秸率和种带宽度变异系数为主的评价指标, 为后续对影响作业性能的主要因素进行分析和寻找最佳参数组合准备。

3.1 三维仿真平台搭建

3.1.1 工作模型建立

为平衡计算机处理效率与仿真效果, 在进行模型构建时适当简化模型。运用 SolidWorks 软件简化建模秸秆粉碎装置(碎秸刀罩壳、碎秸刀辊)和碎秸导流装置, 并以 .igs 格式导入 EDEM 软件 Geometry 项。同时, 为了便于分析仿真后碎秸的分布情况, 在碎秸导流装置下方 20 mm 处建立土槽简化模型, 土槽尺寸(长×宽×高)为 4 000 mm×2 500 mm×20 mm, 槽内土壤颗粒直径为 8 mm<sup>[29]</sup>。根据稻秸粉碎长度及参考文献<sup>[29]</sup>, 采用直径为 7 mm、球心间距为 3.5 mm 的球体组合成总长为 90 mm 的长线型模型作为稻秸颗粒模型。装置—碎秸—土壤间作用模型搭建如图 6 所示。

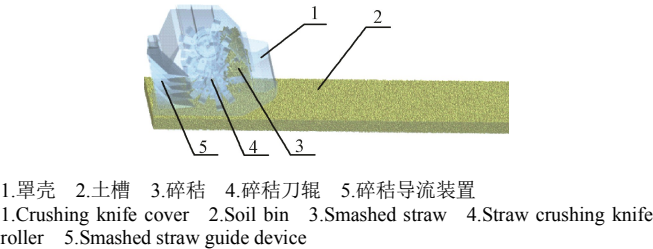


图 6 导流装置—碎秸—土壤模型  
Fig.6 Model of guide device- smashed straw-soil

3.1.2 材料间的接触模型

在行间覆秸作业过程中, 碎秸与碎秸、导流装置、土壤之间的接触模型采用 Hert—Mindlin 无滑动接触模型。导流装置模型材料属性设置为 45 号钢, 根据相关文献确定碎秸颗粒、导流装置模型、土壤的相关材料与接触力学参数, 如表 2 所示<sup>[29-30]</sup>。

表 2 材料间接触模型的参数设置			
Table 2 Parameter setting of contact model between materials			
项目 Item	45 号钢 Steel	稻秸 Rice straw	土壤 Soil
密度 Density/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 800	241	1 850
剪切模量 Shear modulus/Pa	7.0E+10	1.0E+6	1.0E+8
泊松比 Poisson ratio	0.30	0.40	0.38
动摩擦系数(与稻秸) Rolling friction coefficient (Interaction with rice straw)	0.01	1.04	1.04
静摩擦系数(与稻秸) Static friction coefficient (Interaction with rice straw)	0.30	1.05	1.05
碰撞恢复系数(与稻秸) Restitution coefficient (Interaction with rice straw)	0.30	0.02	0.02

3.2 仿真试验设计

根据参考文献<sup>[14]</sup>, 设定仿真作业速度为 1.2 m/s, 粉碎装置转速为 2 000 r/min。以江苏省稻麦轮作区稻秸产量为参考, 草谷比均值为 1.6, 草谷总质量均值为 2.2 kg/m<sup>2</sup>, 设置颗粒工厂生产稻秸颗粒的速度为 3.9 kg/s (≥田间秸秆覆盖量)<sup>[26]</sup>。

依据 Box—Benhken 试验理论, 设计 3 因素 3 水平分析试验, 通过 EDEM 虚拟仿真试验, 对装置导流长度、径向距离、装置导流宽度 3 因素进行响应面试验研究<sup>[31-32]</sup>。在以往单因素试验基础上, 选取装置导流长度的取值区间为 200~300 mm, 径向距离的取值区间 10~40 mm, 装置导流宽度的取值区间 280~350 mm, 试验因素水平编码如表 3 所示。EDEM 仿真性能试验如图 7 所示。

表 3 试验因素和水平			
Table 3 Factors and levels of test			
水平 Levels	装置导流长度 Length of diversion X <sub>1</sub> /mm	径向距离 Radial distance X <sub>2</sub> /mm	装置导流宽度 Width of diversion X <sub>3</sub> /mm
-1	200	10	280
0	250	25	315
1	300	40	350

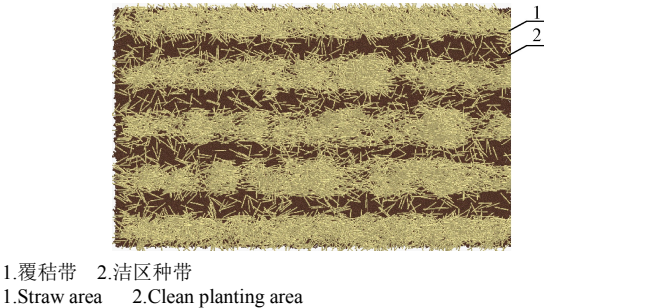
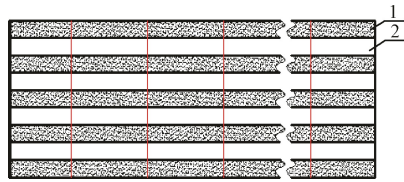


图 7 清秸作业 EDEM 仿真  
Fig.7 EDEM simulation processes of strap row clearing

3.3 碎秸导流装置清秸性能评价指标

通过查阅相关资料并结合实际作业情况, 选取清秸率、种带宽度变异系数为试验评价指标<sup>[33]</sup>。在模拟种床的中间区域选取长度为 3 000 mm 的作业带, 应用 EDEM 后处理 Selection 模块设置 Grid Bin Group, 将各洁区种带和各覆秸带均分为 10 个网格单元, 如图 8 所示。





1.覆秸带 2.洁区种带  
1.Straw area 2.Clean planting area

图 8 抽样区域数据采集示意图  
Fig.8 Data collection in sampling area

清秸率指作业后种带上被清除的碎秸数量与作业前种带碎秸总数量的比值，其值越大表明碎秸导流装置的清秸性能越好，清秸率的计算方法为

$$P = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left( \frac{c - c_{ij}}{c} \right)}{mn} \times 100\% \quad (10)$$

式中  $P$  为清秸率，%； $c_{ij}$  为仿真作业后第  $i$  行第  $j$  列网格小区的种带碎秸数量； $c$  为仿真作业前种带网格小区内碎秸总数量； $m$  为测量种带行数， $m=4$ ； $n$  为每行种带测量网格数， $n=10$ 。

种带宽度变异系数值越小，碎秸导流装置清理出的种带宽度越接近农艺要求的播幅。种带宽度变异系数计算方法为

$$F = \frac{1}{\bar{w}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (w_{ij} - \bar{w})^2}{mn - 1}} \times 100\% \quad (11)$$

式中  $F$  为种带宽度变异系数，%； $w_{ij}$  为第  $i$  行第  $j$  列网格小区的种带宽度； $\bar{w}$  为播幅， $\bar{w}=240$  mm。

## 4 结果分析

试验包括 12 个分析因子和 5 个零点估计误差，共 17 个试验点。运用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行回归分析，并利用响应面分析法对各因素相关性和交互效应的影响规律进行分析研究。试验方案与响应值如表 4 所示。

表 4 试验设计方案及响应值

Table 4 Experiment design and response values

序号 No.	因素 Factors			响应值 Response values	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	清秸率 Straw cleaned rate $Y_1/\%$	种带宽度变异系数 Variable coefficient of strip width $Y_2/\%$
1	-1	-1	0	87.50	11.65
2	1	-1	0	90.04	9.33
3	-1	1	0	86.47	13.07
4	1	1	0	87.33	10.13
5	-1	0	-1	89.00	13.89
6	1	0	-1	92.77	11.29
7	-1	0	1	87.07	14.15
8	1	0	1	86.78	13.51
9	0	-1	-1	89.36	10.84
10	0	1	-1	86.74	12.88
11	0	-1	1	84.62	12.47
12	0	1	1	85.26	12.91
13	0	0	0	90.80	11.05
14	0	0	0	92.02	10.36
15	0	0	0	91.34	10.55
16	0	0	0	91.51	10.67
17	0	0	0	92.35	10.88

## 4.1 回归分析

用 Design-Expert 8.0.6 软件对表 4 的数据进行分析和多元回归拟合，清秸率  $Y_1$ 、种带宽度变异系数  $Y_2$  的方差分析结果如表 5 所示。分别建立清秸率、种带宽度变异系数对装置导流长度  $X_1$ 、径向距离  $X_2$  和装置导流宽度  $X_3$  3 个自变量的多项式回归方程，并检验其显著性。

### 4.1.1 清秸率的显著性分析

清秸率方差分析如表 5 所示。由表 5 可知，响应面模型中的清秸率模型  $P<0.0001$ ，表明回归模型极显著，回归项  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_1X_3$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$  对清秸率模型影响极显著，回归项  $X_2X_3$ 、 $X_1^2$  对清秸率模型影响显著。从各因素  $F$  值分析可知，各因素对清秸率模型影响的显著性顺序为： $X_3 > X_1 > X_2$ 。将其他不显著的方差来源项合并入残差项，再次进行方差分析，结果如表 5 所示。删除不显著项后，得到各因素对清秸率的二次回归方程如式 (12) 所示。对式 (12) 方程进行失拟性检验，失拟项  $P>0.1$ ，不显著，表明回归方程拟合度高。

$$Y_1 = -117.98 + 0.36X_1 + 0.15X_2 + 1.09X_3 - 5.80 \times 10^{-4} X_1X_3 + 1.55 \times 10^{-3} X_2X_3 - 2.71 \times 10^{-4} X_1^2 - 0.01X_2^2 - 1.65 \times 10^{-3} X_3^2 \quad (12)$$

### 4.1.2 种带宽度变异系数的显著性分析

种带宽度变异系数方差分析如表 5 所示。由表 5 可知，响应面模型中的种带宽度变异系数模型  $P<0.0001$ ，表明回归模型极显著，回归项  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_1^2$ 、 $X_3^2$  对种带宽度变异系数模型影响极显著，回归项  $X_1X_3$  对模型影响显著，回归项  $X_2X_3$  对模型影响较显著。从各因素  $F$  值分析可知，各因素对种带宽度变异系数模型影响的显著性顺序为： $X_1 > X_2 > X_3$ 。将其他不显著的方差来源项合并入残差项，再次进行方差分析，结果如表 5 所示。删除不显著项后，得到各因素对种带宽度变异系数的二次回归方程如式 (13) 所示。对式 (13) 方程进行失拟性检验，失拟项  $P>0.1$ ，不显著，表明回归方程拟合度高。

$$Y_2 = 192.02 - 0.23X_1 + 0.28X_2 - 0.99X_3 + 2.80 \times 10^{-4} X_1X_3 - 7.62 \times 10^{-4} X_2X_3 + 2.49 \times 10^{-4} X_1^2 + 1.53 \times 10^{-3} X_3^2 \quad (13)$$

## 4.2 响应曲面分析

### 4.2.1 因素对清秸率的影响分析

当径向距离位于中心位置 (25 mm) 时，装置导流长度和装置导流宽度对清秸率  $Y_1$  的交互作用影响如图 9a 所示，随着装置导流长度增加，清秸率增大，随着装置导流宽度增加，清秸率先增大后减小。当装置导流长度位于中心位置 (250 mm) 时，径向距离和装置导流宽度对清秸率的交互作用影响如图 9b 所示，随着径向距离增加，清秸率先增大后减小，随着装置导流宽度增加，清秸率先增大后减小。各因素对清秸率  $Y_1$  的总体影响趋势为：随着装置导流长度增加，清秸率增大；随着径向距离、装置导流宽度增加，清秸率先增大后减小。

分析原因可知：随着装置导流长度增加，碎秸导流装置本身壅堵情况减弱，对碎秸产生的雍滞影响减小，

清秸率增大。当径向距离过小时, 碎秸惯性力大, 碎秸易被反弹至洁区种带; 但当径向距离过大时, 碎秸与导流装置耦合位置过低, 耦合滑切能力减弱, 同时惯性力减弱, 碎秸经耦合滑切后落至覆秸带概率减小。在整个清秸过程中, 始终有少量碎秸通过导流装置与地面间隙漏入种带, 随着装置导流宽度增加, 漏秸区域变化不大, 但作业前的碎秸量增幅较大, 清洁率增大; 装置导流宽度增加到一定程度后, 碎秸滑出洁区的横向位移过大, 滑切后落至种带的碎秸量增加, 清洁率减小。

#### 4.2.2 因素对种带宽度变异系数的影响分析

当径向距离位于中心位置 (25 mm) 时, 装置导流长度和装置导流宽度对种带宽度变异系数的交互作用影响如图 9c 所示, 随着装置导流长度增加, 种带宽度变异系数减小, 随着装置导流宽度增加, 种带宽度变异系数先减小后增大。当装置导流长度位于中心位置 (250 mm) 时, 径向距离和装置导流宽度对种带宽度变异系数  $Y_2$  的

交互作用影响如图 9d 所示, 随着径向距离增加, 种带宽度变异系数增大, 随着装置导流宽度增加, 种带宽度变异系数先减小后增大。各因素对种带宽度变异系数的总体影响趋势为: 随着装置导流长度增加, 种带宽度变异系数减小; 随着径向距离增加, 种带宽度变异系数增大; 随着装置导流宽度增加, 种带宽度变异系数先减小后增大。

分析原因可知: 随着装置导流长度增加, 导流装置本身壅秸情况减弱, 碎秸分流流向性越好, 雍秸滞秸、覆秸成团的情况减弱, 种带宽度变异系数减小; 随着径向距离增加, 耦合位置降低以及碎秸惯性力减小, 碎秸流向种带趋势增大, 种带宽度变异系数增大; 随着装置导流宽度增加, 碎秸滑切后横向位移增大, 横向分桔能力增强, 种带宽度变异系数减小, 但超过一定宽度后, 相邻导流装置间隔变小, 易出现漏桔区滞秸堆桔和碎桔成团集覆等问题, 导致种带变异系数增大。

表 5 回归方程方差分析  
Table 5 Variance analysis of regression equation

项目 Items	方差来源 Source	平方和 Sum of squares		自由度 Degree of freedom		均方 Mean square		F		P	
		原数据	剔除不显著 数据	原数据	剔除不显著 数据	原数据	剔除不显著 数据	原数据	剔除不显著 数据	原数据	剔除不显著 数据
$Y_1$	模型 Model	106.60	105.89	9	8	11.84	13.24	37.90	36.60	<0.000 1	<0.000 1
	$X_1$	5.92	5.92	1	1	5.92	5.92	18.93	16.36	0.003 3	0.003 7
	$X_2$	4.09	4.09	1	1	4.09	4.09	13.09	11.31	0.008 5	0.009 9
	$X_3$	24.99	24.99	1	1	24.99	24.99	79.98	69.11	<0.000 1	<0.000 1
	$X_1X_2$	0.71	-	1	-	0.71	-	2.26	-	0.176 6	-
	$X_1X_3$	4.12	4.12	1	1	4.12	4.12	13.19	11.40	0.008 4	0.009 7
	$X_2X_3$	2.66	2.66	1	1	2.66	2.66	8.50	7.35	0.022 5	0.026 6
	$X_1^2$	1.93	1.93	1	1	1.93	1.93	6.18	5.34	0.041 8	0.049 6
	$X_2^2$	40.14	40.14	1	1	40.14	40.14	128.14	110.99	<0.000 1	<0.000 1
	$X_3^2$	17.14	17.14	1	1	17.14	17.14	54.84	47.39	0.000 1	0.000 1
	残差 Residual	2.19	2.89	7	8	0.31	0.36	-	-	-	-
	失拟项 Lack of fit	0.75	1.45	3	4	0.25	0.36	0.69	1.01	0.601 8	0.495 7
	误差 Pure error	1.44	1.44	4	4	0.36	0.36	-	-	-	-
	总和 Total	108.79	108.79	16	16	-	-	-	-	-	-
$Y_2$	模型 Model	32.74	32.74	9	7	3.64	4.61	28.41	30.48	0.000 1	<0.000 1
	$X_1$	9.03	9.03	1	1	9.03	9.03	70.52	59.70	<0.000 1	<0.000 1
	$X_2$	2.76	2.76	1	1	2.76	2.76	21.58	18.25	0.002 4	0.002 1
	$X_3$	2.14	2.14	1	1	2.14	2.14	16.73	14.16	0.004 6	0.004 5
	$X_1X_2$	0.10	-	1	-	0.10	-	0.75	-	0.415 0	0.069 8
	$X_1X_3$	0.96	0.96	1	1	0.96	0.96	7.50	6.35	0.029 0	-
	$X_2X_3$	0.64	0.64	1	1	0.64	0.64	5.00	4.23	0.060 5	0.032 8
	$X_1^2$	1.72	1.64	1	1	1.72	1.64	13.43	10.85	0.008 0	0.009 3
	$X_2^2$	0.37	-	1	-	0.37	-	2.88	-	0.133 5	-
	$X_3^2$	14.71	14.50	1	1	14.71	14.50	114.84	95.88	<0.000 1	<0.000 1
	残差 Residual	0.90	1.36	7	9	0.13	0.15	-	-	-	-
	失拟项 Lack of fit	0.60	1.07	3	5	0.20	0.21	2.73	2.91	0.177 9	0.160 0
	误差 Pure error	0.29	0.29	4	4	0.07	0.07	-	-	-	-
	总和 Total	33.64	33.64	16	16	-	-	-	-	-	-

注:  $P<0.01$  (极显著);  $0.01\leq P<0.05$  (显著);  $0.05\leq P<0.1$  (较显著)。

Note:  $P<0.01$  (highly significant);  $0.01\leq P<0.05$  (very significant);  $0.05\leq P<0.1$  (significant).

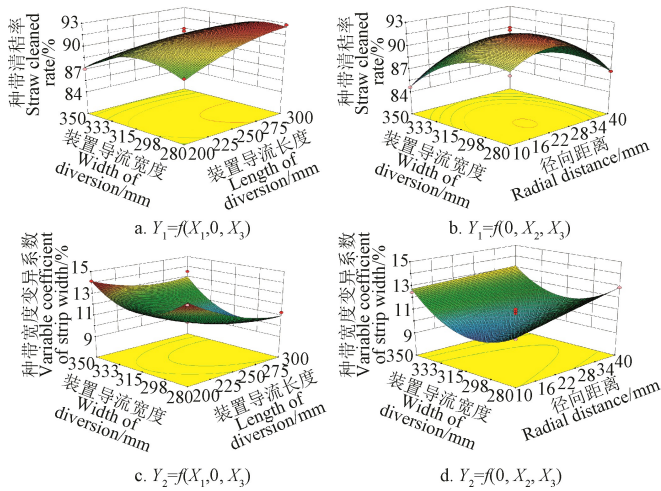


图 9 交互因素对清秸率和种带宽度变异系数的影响

Fig.9 Effects of interactive factors on cleaning rate and sowing strip width variation coefficient

## 5 参数优化与验证

### 5.1 参数优化

为达到种带清秸与行间覆秸的最优性能，采用多目标变量优化方法，以清秸率最大、种带宽度变异系数最小为优化目标，对装置导流长度、径向距离和装置导流宽度进行优化设计，结合试验约束条件，建立目标及约束函数

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 250 \text{ mm} \leq X_1 \leq 300 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \leq X_2 \leq 40 \text{ mm} \\ 280 \text{ mm} \leq X_3 \leq 350 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

运用 Design-Expert8.0.6 软件对 2 指标的数学模型进行分析求解，优化后选取最佳参数组合为：装置导流长度 300 mm、径向距离 19 mm 和装置导流宽度 298 mm，对应理论清秸率、种带宽度变异系数分别为 92.60%、9.77%。选取优化后的参数组合进行仿真验证，其清秸率、种带宽度变异系数分别为 91.83%、10.36%，与优化后的理论结果基本一致。

### 5.2 验证试验

为验证碎秸导流装置的田间作业性能，于 2018 年 10 月在江苏省农业科学院泗洪水稻种植基地进行田间试验。试验地为全量稻秸硬茬地，平均留茬高度为  $\geq 400$  mm，水稻品种为南粳 9108 号，土质为重黏性土壤。碎秸导流装置结构参数为优化后的结果：装置导流长度 300 mm，径向距离 19 mm，装置导流宽度 298 mm，进行 5 次重复试验，取其平均值，机具田间试验及作业前后种带清秸与行间覆秸效果如图 10 所示。试验结果为清秸率 90.75%，种带宽度变异系数 10.94%，与优化后仿真结果相比偏差均小于 5 个百分点，误差在可接受范围内，验证了参数组合的可行性和准确性。

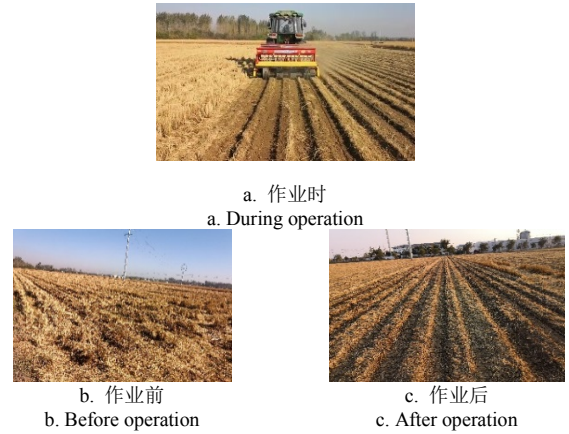


图 10 导流装置最优参数验证试验

Fig.10 Verification experiments of optimal parameters for guiding device

根据本文研究，该类型小麦播种方式及碎秸导流装置已在江苏、河南等地进行示范应用，并对该播种方式的小麦长势进行跟踪，如图 11 所示，随着小麦生长分蘖，覆秸带逐渐被小麦植株覆盖，与其他稻秸还田方式的小麦长势相比未出现明显弱苗现象，证明了该种小麦生产方式应用于稻麦轮作的可行性。

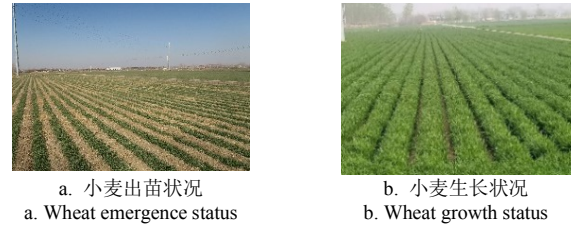


图 11 播种与长势跟踪

Fig.11 Seeding and growth monitoring

## 6 结论与讨论

1) 针对一年两熟稻麦轮作区，提出了直接在全秸硬茬地工况下进行种带清秸、行间覆秸的小麦“洁区”宽幅播种生产模式，对碎秸导流装置进行了参数设计，通过对碎秸的运动过程进行分析，得出影响碎秸导流装置性能的结构参数为装置导流长度、径向距离和装置导流宽度。

2) 搭建了离散元法模拟碎秸导流装置工作过程的试验平台，采用 Box-Behnken 试验方法，对装置导流长度、径向距离和装置导流宽度对清秸率和种带宽度变异系数的影响趋势进行了仿真分析并建立了优化模型。研究表明，碎秸导流装置各因素对清秸率影响的主次顺序依次为装置导流宽度、装置导流长度、径向距离，对种带宽度变异系数影响的主次顺序依次为装置导流长度、径向距离、装置导流宽度。

3) 碎秸导流装置最佳参数组合为装置导流长度 300 mm、径向距离 19 mm、装置导流宽度 298 mm，优化后仿真结果为清秸率 91.83%，种带宽度变异系数 10.36%，田间作业性能试验结果为清秸率 90.75%，种带宽度变异系数 10.94%，与理论计算及仿真结果均基本吻合，验证

了回归模型的建立是准确可行的。

由于试验时间与自然条件限制,本研究没有考虑粉碎装置转速、机具前进速度与稻秸本身差异性对作业质量的影响。在后续试验中将对影响碎秸导流装置作业性能的参数做进一步分析与试验。

#### [参 考 文 献]

- [1] 刘正平,何瑞银. 江苏稻麦轮作区机械化生产模式分析[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(7): 112—116.  
Liu Zhengping, He Ruiyin. Analysis on mechanized production mode of rice and wheat rotation area in Jiangsu Province[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(7): 112—116. (in Chinese with English abstract)
- [2] 房焕,李奕,周虎,等. 稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 297—302.  
Fang Huan, Li Yi, Zhou Hu, et al. Effects of straw incorporation on paddy soil structure in rice-wheat rotation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 297—302. (in Chinese with English abstract)
- [3] 吴峰,徐弘博,顾峰玮,等. 秸秆粉碎后抛式多功能免耕播种机秸秆输送装置改进[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 18—26.  
Wu Feng, Xu Hongbo, Gu Fengwei, et al. Improvement of straw transport device for straw-smashing back-throwing type multi-function no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(24): 18—26. (in Chinese with English abstract)
- [4] 施印炎,罗伟文,胡志超,等. 全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 58—67.  
Shi Yinyan, Luo Weiwen, Hu Zhichao, et al. Design and test of equipment for straw crushing with strip-laying and seed-belt classification with cleaning under full straw mulching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 50(4): 58—67. (in Chinese with English abstract)
- [5] 廖庆喜,高焕文,舒彩霞. 免耕播种机防堵技术研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 108—112.  
Liao Qingxi, Gao Huanwen, Shu Caixia. Present situations and prospects of anti-blocking technology of no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(1): 108—112. (in Chinese with English abstract)
- [6] Ahmad F, Ding W, Ding Q, et al. Forces and straw cutting performance of double disc furrow opener in no-till paddy soil[J]. Plos One, 2015, 10(3): 1—14.
- [7] 朱瑞祥,李成鑫,程阳,等. 被动式圆盘刀作业性能优化试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 47—54.  
Zhu Ruixiang, Li Chengxin, Cheng Yang, et al. Working performance of passive disc coulter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(18): 47—54. (in Chinese with English abstract)
- [8] 何进,李洪文,李慧,等. 往复切刀式小麦固定垄免耕播种机[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 133—138.  
He Jin, Li Hongwen, Li Hui, et al. No-till planter with reciprocating powered-cutter for wheat permanent raised beds cultivation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 133—138. (in Chinese with English abstract)
- [9] 高娜娜,张东兴,杨丽,等. 玉米免耕播种机滚筒式防堵机构的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 31—37.  
Gao Nana, Zhang Dongxing, Yang Li, et al. Design and experiment of drum-type anti-blocking mechanism of no-till planter for maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(12): 31—37. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈海涛,查韶辉,顿国强,等. 2BMFJ 系列免耕精量播种机清秸装置优化与试验[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 with English abstract)
- [11] 贾洪雷,赵佳乐,姜鑫铭,等. 行间免耕播种机防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 16—25.  
Jia Honglei, Zhao Jiale, Jiang Xinming, et al. Design and experiment of anti-blocking mechanism for inter-row no-tillage seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(18): 16—25. (in Chinese with English abstract)
- [12] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 1—19.  
He Jin, Li Hongwen, Chen Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1—19. (in Chinese with English abstract)
- [13] 朱惠斌,李洪文,何进,等. 稻茬地双轴驱动防堵式小麦免耕播种机[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 39—44.  
Zhu Huibin, Li Hongwen, He Jin, et al. No-till wheat seeder with two-axle drive anti-blocking in rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 39—44. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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 and experiment of peanut no-till planter under full wheat straw mulching based on “clean area planting”[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(20): 15—23. (in Chinese with English abstract)
- [15] 徐弘博,胡志超,吴峰,等. 全量稻秸还田小麦播种机秸



- 秆分流还田装置设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 19—28.
- Xu Hongbo, Hu Zhichao, Wu Feng, et al. Design of straw distributed retention device of wheat planter under full rice straw retention[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(9): 29—28. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李小聪, 吴明亮, 邱进, 等. 稻秸秆对行抛撒装置的结构设计与试验[J]. 湖南农业大学学报, 2016, 42(4): 454—459.
- Li Xiacong, Wu Mingliang, Qiu Jin, et al. Design and experiment of row-controlled throwing mechanism for rice straw[J]. Journal of Hunan Agricultural University, 2016, 42(4): 454—459. (in Chinese with English abstract)
- [17] 郑智旗. 玉米秸秆捡拾粉碎沟埋还田机研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- Zheng Zhiqi. Study on Corn Straw Pickup-Chopping and Ditch-Burying Returning Field Machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [18] 胡红, 李洪文, 李传友, 等. 稻茬田小麦宽幅精量少耕播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 24—32.
- Hu Hong, Li Hongwen, Li Chuanyou, et al. Design and experiment of broad width and precision minimal tillage wheat planter in rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(4): 24—32. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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 with English abstract)
- [20] 田阳, 林静, 李宝筏, 等. 气力式 1JH-2 型秸秆深埋还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 10—18.
- Tian Yang, Lin Jing, Li Baofa, et al. Design and test of pneumatic 1JH-2 style straw deep burying and returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(14): 10—18. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王红妮, 王学春, 黄晶, 等. 秸秆还田对土壤还原性和水稻根系生长及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 116—126.
- Wang Hongni, Wang Xuechun, Huang Jing, et al. Effect of straw incorporated into soil on reducibility in soil and root system and yield of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(20): 116—126. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李华, 刘世平, 陈畅, 等. 连续免耕与秸秆还田对土壤养分含量的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(15): 237—241.
- [23] Olaf E, Umar F, Malik R K, et al. On-farm impacts of zero tillage wheat in South Asia's rice-wheat systems[J]. Field Crops Research, 2008, 105(3): 240—252.
- [24] Botta G, Tolón-becerra A, Lastra-bravo X, et al. Alternatives for handling rice (*Oryza sativa* L.) straw to favor its decomposition in direct sowing systems and their incidence on soil compaction[J]. Geoderma, 2015, 239/240: 213—222.
- [25] 胡志超. 全秸秆覆盖地机械化免耕播种技术研发取得重大突破[J]. 基层农技推广, 2015(4): 40.
- [26] 石玉华, 初金鹏, 尹立俊, 等. 宽幅播种提高不同播期小麦产量与氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 127—133.
- Shi Yuhua, Chu Jinpeng, Yin Lijun, et al. Wide-range sowing improving yield and nitrogen use efficiency of wheat sown at different dates[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(17): 127—133. (in Chinese with English abstract)
- [27] 章志强. 玉米秸秆粉碎抛撒还田机的设计与秸秆运动特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- Zhang Zhiqiang. Research on Corn Straw Chopping and Spreading Machine Design and Dynamic Characteristic of Straw[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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 with English abstract)
- [29] 方会敏, 姬长英, 郭俊, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22—28.
- Fang Huimin, Ji Changying, Guo Jun, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22—28. (in Chinese with English abstract)
- [30] Lenaerts B, Aertsen T, Tijssen E, et al. simulation of grain-straw separation by discrete element modeling with bendable straw particles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 101(7441): 24—33.
- [31] 任露泉. 试验设计及其优化[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [32] 吕金庆, 王英博, 李紫辉, 等. 加装导流板的舀勺式马铃薯播种机排种器性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 19—28.
- Lü Jinqing, Wang Yingbo, Li Zhihui, et al. Performance analysis and experiment of cup-belt type potato seed-metering device with flow deflector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(9): 19—28. (in Chinese with English abstract)
- [33] 中华人民共和国农业部. NY/T 500-2002 秸秆还田机作业质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

## Design and optimization for smashed straw guide device of wheat clean area planter under full straw field

Luo Weiwen, Hu Zhichao<sup>\*</sup>, Wu Feng, Gu Fengwei, Xu Hongbo, Chen Youqing

(Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** The rice-wheat alternate planting system is the main grain production model in most areas of China which has a great significance to ensure food security in China. The wheat sowing season after the rice harvest is relatively short, combined with the complexity of the traditional wheat planting process, which not only result in the higher sowing costs, but also fails to complete all works during the wheat sowing season. Seeding directly in the field without straw treatment is an effective way to avoid the aforementioned problems. However, the following issues often occur during the application: for example, the soil-buried parts of the machine are blocked by grass which can't guarantee the steady operation; a large amount of straw is mixed into the soil which will take the seeds outside the soil and lead to the seeds exposed. To handle the above problems, this paper provided a new sowing method and an efficient guiding device, which adopted the planting technology in the full amount of straw and root stubble field. After the straw was pulverized, all the smashed straw could be placed on inter-rows by using the guiding device to form a sown strip containing few stalks, and the subsequent sowing operations could be completed on the strip. Through the theoretical analysis of the motion of the smashed straw, length of the diversion, radial distance and width of the diversion as key parameters affect the performance of the equipment were verified. The discrete element platform for simulating the operation of the device was established, and the platform mainly was composed of a pellet factory, a crushing device cover, a smashed straw guiding device and a soil trough. Based on the Box-Benhnken central composite test method and EDEM technique, the three-factor and three-level orthogonal rotating quadratic combination experiment was carried out with straw cleaned rate and variable coefficient of the strip width as the evaluation indexes. The influence of the three key parameters was analyzed. Furthermore, the regression equations were established to describe the relationships between the various factors and each assessment index by using the regression analysis and response surface analysis by software Design-Expert 8.0.6. The optimum combination of the selected parameters was obtained, and it was verified by numerical simulations and field trials. The experiment results indicated that various factors had a significant impact on straw cleaned rate and variable coefficient of the strip width. Depending on the order of significance of the impacts, the factors affecting straw cleaned rate were arranged as follows: width of the diversion, length of the diversion, radial distance. Likewise, the factors affecting variable coefficient of the strip width were arranged as follows: length of the diversion, radial distance and width of the diversion. The combination result of parameter optimum design was presented as follows: length of the diversion is 300 mm, radial distance is 19 mm and width of the diversion is 298 mm. The straw cleaned rate and the variable coefficient of the strip width were (91.83%, 10.36%) and (90.75%, 10.94%), which were determined through simulation experiment and field experiment respectively. Hence, the results of the two verification tests were basically consistent. The study should provide technical and equipment reference for no-tillage seeding of wheat after the rice harvest in the rice-wheat alternate season in China.

**Keywords:** agricultural machinery; discrete element method; optimization; seeding strip straw removal; smashed straw guide device