

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.007

大垄玉米原茬地免耕播种机防堵装置设计与优化试验

陈海涛 侯磊 侯守印 李煜 闵诗尧 柴誉铎

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为解决北方寒区玉米机收秸秆粉碎覆盖大垄原茬地免耕播种时易发生堵塞及地温回升较慢的问题,设计了一种大垄玉米原茬地免耕播种机的防堵装置。通过理论分析,设计了防堵装置关键部件,初步得到了该装置的结构和作业参数。应用三因素三水平正交试验方法和模糊综合评价分析法,以机组作业速度、清秸刀齿总成转速、清秸刀齿总成回转轴垂直面与机具前进方向的夹角为试验因素,以根茬清除率、秸秆清除率、防堵装置当量功耗为评价指标,对影响防堵装置性能的结构与作业参数进行了试验与优化研究。结果表明:在试验条件和试验因素水平范围内,影响多目标函数的参数优化组合为机组作业速度 5.4 km/h、清秸刀齿总成转速 440 r/min、清秸刀齿总成回转轴垂直面与机具前进方向的夹角 20°,此时,根茬清除率为 93.94%,秸秆清除率为 95.39%,防堵装置当量功耗为 4.36 kW,土壤扰动量为 31.9%。

关键词: 玉米; 免耕播种机; 防堵装置; 刀齿总成

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0059-09

Design and Optimization Experiment of Anti-blocking Mechanism of No-tillage Planter for Grand Ridge with Raw Corn Stubble

CHEN Haitao HOU Lei HOU Shouyin LI Yu MIN Shiyao CHAI Yuduo

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: For the blocking circumstance in the no-tillage planting operation for grand ridge with crushed raw corn stubble produced by corn harvester in north cold area and slower recovery of ground temperature after planting operation. In order to solve these problems above, an anti-blocking mechanism of no-tillage planter for grand ridge with raw corn stubble was designed. Corn stubble was positioned on the seeding belt, which was continuously struck by the force of cleaning rotating blade on the anti-blocking mechanism. So that the corn stubble reached furrow between adjacent grand ridges, the clean seeding belt on grand ridge was produced for guaranteeing the operation quality of ditch-opening, seeding, soil-covering and compacting. Through theoretical analysis, the key parts of anti-blocking mechanism were designed, and then structure and operation parameters of the mechanism were determined. Orthogonal experiment design of three factors and three levels and fuzzy comprehensive evaluation method were employed for finding the optimal parameter combination of anti-blocking mechanism. Meanwhile, the working speed of equipment, the rotation speed of cleaning blade assembly, the angle between direction of operation speed and vertical plane rotation axis of cleaning blade assembly were selected as factors. Stubble-cleaning rate, straw-cleaning rate and equivalent power dissipation of anti-blocking mechanism were selected as indexes. The result showed that the working speed of equipment had very significant effect on stubble-cleaning rate. The rotation speed of cleaning blade assembly and the angle between direction of operation speed and vertical plane rotation axis of cleaning blade assembly had significant effect on the stubble-cleaning rate; the rotation speed of cleaning blade assembly had very significant effect on the straw-cleaning rate. The working speed of equipment, the angle between direction of operation speed and vertical plane rotation axis of cleaning blade assembly had significant effect on the straw-cleaning rate. The working speed of equipment and the rotation speed of cleaning blade assembly had very significant effect on the equivalent power dissipation of anti-blocking mechanism. Within the

收稿日期: 2018-02-13 修回日期: 2018-03-06

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303011)和现代农业产业技术体系建设专项资金项目(GARS-04)

作者简介: 陈海涛(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备技术研究,E-mail: htchen@neau.edu.cn

range of experimental conditions and experiment factors, the optimal combination result of parameters that influencing multi-objective function showed that when the working speed of equipment was 5.4 km/h and the rotation speed of cleaning blade assembly was 440 r/min, the angle between direction of operation speed and vertical plane rotation axis of cleaning blade assembly was 20°, the obtained indexes were as follows: the stubble-cleaning rate was 93.94%, the straw-cleaning rate was 95.39%, the equivalent power dissipation of anti-blocking mechanism was 4.36 kW, the soil disturbance was 31.9%. The result can provide references for design of no-tillage planter for grand ridge with crushed raw corn stubble produced by corn harvester in north cold area.

Key words: corn; no-till planter; anti-blocking mechanism; blade assembly

0 引言

保护性耕作技术可减少土壤风蚀、水蚀,提高土壤肥力,避免秸秆焚烧,缓解生态环境压力,是实现农业可持续发展的一项重要举措^[1]。该技术要求将秋季收获后的秸秆还田,春季在原茬地上直接进行开沟、施肥、播种、覆土镇压等作业^[2-5]。由于高产品种结合新技术的推广,玉米大垄双行种植模式应运而生,该种植模式能增加田间通风、透光性,可大大提升单位面积的玉米产量^[6]。将保护性耕作技术和大垄双行种植模式相结合,可避免因垄台宽度过小而导致的机具垄上播种稳定性差的问题,进一步提高播种质量^[7-8]。

免耕播种是保护性耕作技术的核心,防堵是免耕播种的关键^[9]。目前,常用的防堵装置可分为主动式和被动式两类。被动式防堵装置如 KARAYEL^[10]设计的翼铲、双圆盘组合式防堵装置, CHEN 等^[11]设计的偏置式分草双圆盘, SHARIPOV 等^[12]通过传感器识别地表信息控制滑靴式分草开沟器动态防堵, 林静等^[13]设计的阿基米德螺旋型缺口圆盘刀。这类防堵装置结构简单,在一定条件下有良好的防堵效果,当大量秸秆覆盖地表时,易发生堵塞现象。主动式防堵装置如 MATIN 等^[14]设计的带状粉碎旋耕装置, 张军昌等^[9]设计的立轴旋转式秸秆粉碎装置, 蒋金琳等^[15]设计的双刀盘动力破茬装置, 李复辉等^[16]设计的灭茬刀、旋耕刀组合式秸秆粉碎还田装置。这类防堵装置防堵效果好,但存在土壤扰动量大、功率消耗大等问题,且由于土壤与秸秆混合,影响种子与土壤接触,降低出苗率。针对大垄玉米原茬地免耕播种作业, 王庆杰等^[7]采用宽窄行交替休闲种植方式,通过旋转式缺口圆盘刀切茬装置,在大垄上进行原茬错茬免耕播种作业; 贾洪雷等^[17]设计的组合刀片式被动切茬装置,作业时只切断秸秆不处理根茬,适用于行间互作和宽窄行交替休闲 2 种免耕播种作业模式。此种免耕播种作业方式土壤扰动量小,可有效减少堵塞,但错行作业难度大,开沟器行走在玉米根茬上时,易造成堵塞

现象^[18]。陈海涛等^[19]设计的 2BMFJ 系列免耕精量播种机,采用残茬侧向抛出的防堵方式,适用于各种作物残茬和各种状态原茬地,防堵效果好,解决了上述主动式防堵装置存在的土壤扰动量大、功率消耗大等问题,不过该机具在北方寒地播种作业后,覆盖在播种带上的残茬阻碍阳光射入,影响地温回升速度^[20-21]。

本研究旨在设计一种适合北方寒地大垄玉米原茬地的免耕播种机防堵装置,以有效解决在免耕播种作业时残茬堵塞及可能造成地温回升较慢的问题,通过理论分析和正交试验优化设计方法,探究该防堵装置的结构和作业参数优化组合。

1 结构与工作原理

1.1 防堵装置结构

由机架、传动链、挡秸板、上传动系统、下传动系统、主变速箱、清秸刀齿总成(以下简称刀齿总成)、联轴器、地轮等构成主动式防堵装置,如图 1 所示,将其中由挡秸板、滚筒焊合、刀鞘、清秸刀齿、带座轴承组成的针对一条大垄作业部件称为该防堵装置的清秸单元组,如图 2 所示。该防堵装置可与大垄精量播种单元组、施肥机构、播种施肥传动系统共同组成一种适用于北方大垄玉米原茬地的免耕播种机。

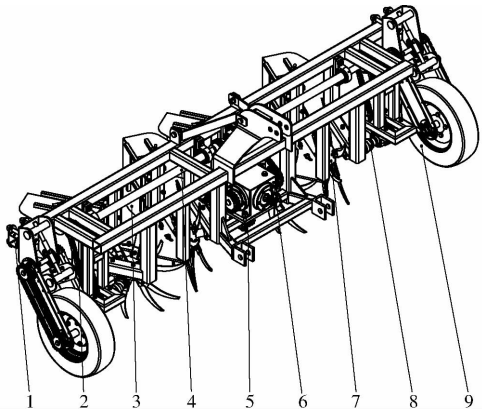


图 1 防堵装置结构简图

Fig. 1 Structure diagram of anti-blocking mechanism

- 1. 机架 2. 传动链 3. 挡秸板 4. 上传动系统 5. 下传动系统
- 6. 主变速箱 7. 刀齿总成 8. 联轴器 9. 地轮

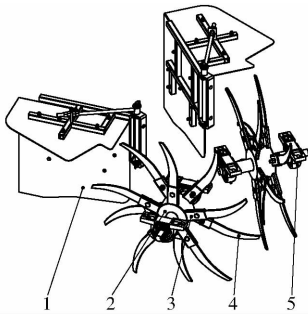


图 2 清秸单元组结构简图

Fig. 2 Structure diagram of cleaning unit-combination

1. 挡秸板 2. 滚筒焊合 3. 刀鞘 4. 清秸刀齿 5. 带座轴承

1.2 工作原理

该装置采用三点悬挂与拖拉机挂接,机组作业时由拖拉机提供牵引力和旋转动力。主变速箱输出的动力通过传动链、上传动系统、下传动系统、联轴器传递给 4 个刀齿总成,驱动刀齿总成旋转,其上固装的清秸刀齿对播种带内的玉米残茬进行循环打击,使玉米残茬沿清秸刀齿出土点绝对运动轨迹的切线方向运动,在接触到该刀齿总成对应的挡秸板后落在两相邻大垄之间的垄沟内,进而在大垄上形成与大垄精量播种单元组对应的双行播种带,以保证播种机作业时开沟器、覆土镇压器的顺利通过。在机架两侧装配地轮,通过调节其高度来控制清秸刀齿的入土作业深度,并由其实现整个防堵装置随地表进行自动仿形作业。播种作业时地轮行走在大垄垄沟内,大垄精量播种单元组行走在大垄清洁播种带上,机具垄上播种稳定性高。播种作业后残茬覆盖在垄沟内,实现蓄水保墒、培肥地力等功效,避免了因残茬阻碍阳光射入导致的播种带上地温回升较慢现象。

2 防堵装置关键部件设计

为了保证清秸质量,清秸刀齿入土深度要大于玉米根茬主根深度^[22-23],针对北方玉米根茬特性,设定清秸刀齿入土深度 h 为 55 mm。查阅资料,可知刀齿总成上清秸刀齿数在 9~16 范围内^[19,24],考虑到该防堵装置的结构限制,设定刀齿总成上刀齿排数 e 为 2,单排刀齿包含清秸刀齿数 z 为 5,刀齿总成上清秸刀齿的排列方式如图 3 所示,10 个清秸刀齿间轴向间角均为 36° 。

2.1 切土间距的确定

两相邻土壤切痕之间的法向距离即为切土间距 d ,切土间距 d 是影响免耕播种机防堵效果的重要指标。为减小刀齿总成在作业过程中的冲击载荷,需要各理论切土间距相等。

刀齿总成上每相邻两清秸刀齿切茬时间间隔

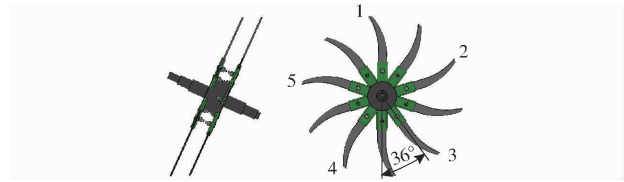


图 3 刀齿总成结构简图

Fig. 3 Structure diagram of blade assembly

内,机具进距为

$$J_1 = \frac{v_0 \times 10^5}{6nez} \quad (1)$$

式中 v_0 ——机组作业速度,km/h

n ——刀齿总成转速,r/min

单排刀齿上相邻两清秸刀齿切茬时间间隔内,机具进距为

$$J_2 = \frac{v_0 \times 10^5}{6nz} \quad (2)$$

欲使各理论切土间距相等,需满足条件

$$L - J_1 = rJ_2 \pm J_1 \quad (r=1,2,3,\dots) \quad (3)$$

式中 L ——相邻两排刀齿间的距离,mm

r ——排距系数

对清秸单体回转作业速度特性分析可知,当清秸刀齿回转作业运动至最低点时,清秸刀齿尖点绝对速度 v_a 方向和土壤切痕方向吻合。如图 4 所示,

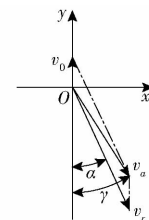


图 4 清秸刀齿尖点速度分析简图

Fig. 4 Diagram of velocity analysis of cleaning blade

对此时清秸刀齿尖点运动速度进行分析,得到其沿 x 轴方向及 y 轴方向的速度分量为

$$\begin{cases} v_x = v_a \sin \gamma = v_r \sin \alpha = 12n\pi R \sin \alpha \times 10^{-5} \\ v_y = v_a \cos \gamma = v_r \cos \alpha - v_0 = 12n\pi R \cos \alpha \times 10^{-5} - v_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 v_x ——清秸刀齿尖点绝对速度沿 x 轴方向分量,km/h

v_y ——清秸刀齿尖点绝对速度沿 y 轴方向分量,km/h

v_r ——清秸刀齿尖点相对速度,km/h

γ ——清秸刀齿尖点绝对速度方向与机具前进方向反向夹角, ($^\circ$)

α ——清秸刀齿尖点相对速度方向与机具前进方向反向夹角, ($^\circ$)

R ——刀齿总成回转半径,mm

γ 和土壤切痕与机具前进方向夹角 β 大小相

等。因此, β 为

$$\beta = \gamma = \arctan \frac{v_x}{v_y} = \arctan \frac{12n\pi R \sin \alpha \times 10^{-5}}{12n\pi R \cos \alpha \times 10^{-5} - v_0} \quad (5)$$

切土间距 d 过大会导致玉米根茬从两相邻切痕之间漏过。为了保证清秸质量,要求切土间距 d 要小于玉米根部茎秆直径^[25]。田间实测玉米根部茎秆直径并做统计分析,得出其服从正态分布 $N(34.1, 6.350\ 4)$, 根据“ 3σ ”法则,最小直径为 26.54 mm。如图 5a 所示,切土间距 d 满足

$$d = J_1 \sin \beta < 26.54\text{ mm} \quad (6)$$

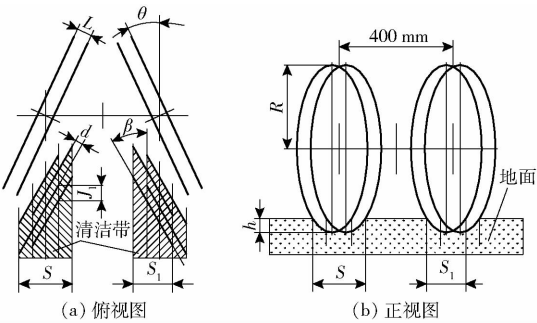


图 5 工作原理图

Fig.5 Functional diagrams

2.2 播种单元组通过性分析与相关参数设计

针对大垄精量播种单元组,可通过更换双行大豆排种器和单行玉米排种器来实现在大垄玉米原茬地上进行大豆垄上四行、玉米垄上双行免耕播种作业。双行大豆排种器比单行玉米排种器所需要的播种带宽度大,因此对装配双行大豆排种器的大垄精量播种单元组进行通过性分析。如图 5 所示,为保证开沟器、覆土盘、镇压器的顺利通过^[26],要求沿机具前进方向的清洁带宽 S 大于等于 170 mm。

单排清秸刀齿沿机具前进方向的清洁带宽为

$$S_1 = 2\sin\theta \sqrt{R^2 - (R - h)^2} \quad (7)$$

沿机具前进方向刀齿总成的清洁带宽为

$$S = L\cos\theta + S_1 \geq 170\text{ mm} \quad (8)$$

清秸刀齿尖点相对速度方向与机具前进方向反向夹角 α 和刀齿总成回转轴垂直面与机具前进方向的夹角(以下简称夹角) θ 大小相等。因机具的作业原理和结构限制,确定夹角 θ 的变化范围为 $20^\circ \sim 30^\circ$,确定机组作业速度(以下简称作业速度) v_0 的变化范围为 3.6 ~ 7.2 km/h。

联立式(1) ~ (8),得到防堵装置的部分结构和作业参数

$$\begin{cases} L = 50\text{ mm 或 } L = 100\text{ mm} \\ R \geq 321.51\text{ mm} \\ n \geq 275.56\text{ r/min} \end{cases} \quad (9)$$

因此,初步设定相邻两排刀齿间距 L 为 50 mm,刀齿总成回转半径 R 为 330 mm。

由上分析可知,作业速度 v_0 、刀齿总成转速 n 、夹角 θ 等因素都对防堵装置的作业效果有重要影响。因此,满足农艺和机具设计要求前提下,应找到防堵装置的最佳结构和作业参数组合。

3 参数优化试验

3.1 试验条件

试验于 2017 年 10 月 22 日在哈尔滨向阳农场进行,试验地块为机收后玉米原茬地,如图 6 所示。土壤硬度 26.3 kg/cm²,土壤湿度 30.1%,玉米秸秆覆盖量 1.253 kg/m²,清秸刀齿入土深度 55 mm。



图 6 田间试验

Fig.6 Field test

3.2 试验仪器及设备

约翰迪尔 354 型拖拉机、JM5937A 动态信号测试系统、JNNT-0 型应变式扭矩传感器、SFZ001 型应变式拉力传感器、SZ-3 型土壤硬度计、SU-LB 型土壤水分测定仪、艾德堡数字电子数显推拉力计、乐祺 C100001 型电子秤、数码摄像机、卷尺等。JNNT-0 型应变式扭矩传感器由法兰盘与主变速箱动力输入轴串联连接,测试 4 个刀齿总成的扭矩和;SFZ001 型应变式拉力传感器嵌入其保护架中,通过螺栓分别与该防堵装置的 3 个悬挂点连接,工作方向与机组作业方向相同^[19]。试验过程中,各传感器将采集到的数据传输到 JM5937A 型数据采集仪,并汇总至计算机中进行数据分析和

3.3 试验方法

应用 Design-Expert 6.0.10,采用三因素三水平正交试验方法。以作业速度、刀齿总成转速、夹角为试验因素,以根茬清除率、秸秆清除率、防堵装置当量功耗(以下简称当量功耗)为评价指标,共实施 9 组试验。

因素水平的确定方法参照文献[16]并结合式(5)、(9),试验因素水平如表 1 所示,试验方案如表 2 所示(A 、 B 、 C 分别为作业速度、刀齿总成转速、夹角的水平值)。

各试验指标测试方法如下:

表 1 试验因素水平
Tab.1 Factors levels in experiments

水平	因素		
	作业速度	刀齿总成转速	夹角
	$x_1/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$x_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$x_3/(^{\circ})$
1	3.6	280	20
2	5.4	360	25
3	7.2	440	30

表 2 试验方案与结果
Tab.2 Experiment layout and results

序号	A	B	C	根茬清除率/%	秸秆清除率/%	当量功耗/kW
1	1	1	1	92.81	93.31	1.91
2	1	2	2	94.03	94.73	3.13
3	1	3	3	93.23	94.48	3.98
4	2	1	2	92.09	92.48	2.07
5	2	2	3	92.48	93.22	3.75
6	2	3	1	93.94	95.39	4.36
7	3	1	3	89.13	90.31	3.47
8	3	2	1	91.79	93.54	5.24
9	3	3	2	92.42	93.33	5.82

(1)根茬清除率

试验前,选取 10 个测试框测量根茬数量,取算术平均值为根茬残留量 O_1 。试验后,在有效清扫区域内选取 10 个测试框测量根茬数量,取算术平均值为根茬剩余量 O_2 ,根茬清除率 $Y_1^{[27]}$ 为

$$Y_1 = \frac{O_1 - O_2}{O_1} \times 100\% \tag{10}$$

(2)秸秆清除率

试验前,选取 10 个测试框测量秸秆量,取算术平均值为秸秆残留量 D_1 。试验后,在有效清扫区域内选取 10 个测试框测量秸秆量,取算术平均值为秸秆剩余量 D_2 ,秸秆清除率 $Y_2^{[27]}$ 为

$$Y_2 = \frac{D_1 - D_2}{D_1} \times 100\% \tag{11}$$

表 4 极差分析
Tab.4 Range analysis

指标来源	根茬清除率			秸秆清除率			当量功耗		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
k_1	93.357	91.343	92.847	94.173	92.033	94.080	3.007	2.483	3.837
k_2	92.837	92.767	92.847	93.697	93.830	93.513	3.393	4.040	3.673
k_3	91.113	93.197	91.613	92.393	94.400	92.670	4.843	4.720	3.733
R	2.244	1.854	1.234	1.780	2.367	1.410	1.836	2.237	0.164
优化水平	A_1	B_3	$C_1、C_2$	A_1	B_3	C_1	A_1	B_1	C_2
优化组合	$A_1B_3C_1$		$A_1B_3C_2$	$A_1B_3C_1$			$A_1B_1C_2$		

总成转速和夹角两因素影响显著 ($0.01 < P < 0.05$), 主次顺序为: 作业速度、刀齿总成转速、夹角, 较优组合为 $A_1B_3C_1$ 或 $A_1B_3C_2$; 对秸秆清除率的各项因素水平进行分析, 得出刀齿总成转速影响极显

(3)当量功耗

田间测试中,通过应变式扭矩传感器、应变式拉力传感器分别测量该装置所需的牵引力、扭矩,当量功耗 Y_3 为

$$Y_3 = \frac{Mn + F_0v_0}{4} \tag{12}$$

式中 M ——应变式扭矩传感器所测扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$
 F_0 ——3 个应变式拉力传感器所测牵引力之和, N

3.4 试验结果与分析

试验结果如表 2 所示,方差、极差分析如表 3、4 所示。

表 3 方差分析
Tab.3 Variance analysis

指标	来源	平方和	自由度	均方	F	P
根茬清除率	A	8.27	2	4.14	101.69	0.009 7
	B	5.65	2	2.82	69.39	0.014 2
	C	3.04	2	1.52	37.39	0.026 0
	误差	0.081	2	0.041		
	总和	17.04	8			
秸秆清除率	A	5.09	2	2.55	62.01	0.015 9
	B	9.15	2	4.58	111.42	0.008 9
	C	3.02	2	1.51	36.76	0.026 5
	误差	0.082	2	0.041		
	总和	17.35	8			
当量功耗	A	5.63	2	2.81	121.88	0.008 1
	B	7.89	2	3.94	170.91	0.005 8
	C	0.041	2	0.020	0.89	0.529 8
	误差	0.046	2	0.023		
	总和	13.60	8			

注: $P < 0.01$ (极显著), $0.01 < P < 0.05$ (显著), $P > 0.05$ (不显著), 下同。

如表 3、4 所示,对根茬清除率的各项因素水平进行分析,得出作业速度影响极显著 ($P < 0.01$),刀齿

著 ($P < 0.01$), 作业速度和夹角两因素影响显著 ($0.01 < P < 0.05$), 主次顺序为: 刀齿总成转速、作业速度、夹角, 较优组合为 $A_1B_3C_1$; 对当量功耗的各项因素水平进行分析, 得出作业速度和刀齿总成转速

两因素影响极显著 ($P < 0.01$), 夹角影响不显著 ($P > 0.05$), 主次顺序为: 刀齿总成转速、作业速度、夹角, 较优组合为 $A_1B_1C_2$ 。

3.5 模糊综合评价分析

由于作业速度、刀齿总成转速、夹角对根茬清除率、秸秆清除率、当量功耗产生影响的主次顺序不同, 分别针对 3 项评价指标进行分析得出较优水平组合也各不相同, 采用模糊综合评价方法对试验结果进行分析处理^[28-30], 得出试验范围内的最优水平组合。

该防堵装置是大垄玉米原茬地免耕播种机的关键部件, 为提高工作效率, 在模糊综合评价分析时, 设置作业速度 A 为评价指标。因此, 以根茬清除率 Y_1 、秸秆清除率 Y_2 、作业速度 A 、当量功耗 Y_3 为评价指标集, 正交试验的 9 组试验数据为评价对象集, 其中 Y_1 、 Y_2 、 A 为偏大型指标, Y_3 为偏小型指标, 评价指标集中 4 项指标的隶属度 r_{1n} 、 r_{2n} 、 r_{3n} 、 r_{4n} 分别为

$$r_{1n} = \frac{Y_{1n} - \min(Y_{1n})}{\max(Y_{1n}) - \min(Y_{1n})} \quad (n = 1, 2, \dots, 9)$$

(13)

$$r_{2n} = \frac{Y_{2n} - \min(Y_{2n})}{\max(Y_{2n}) - \min(Y_{2n})} \quad (n = 1, 2, \dots, 9)$$

(14)

$$r_{3n} = \frac{A_n - \min(A_n)}{\max(A_n) - \min(A_n)} \quad (n = 1, 2, \dots, 9)$$

(15)

$$r_{4n} = \frac{\max(Y_{3n}) - Y_{3n}}{\max(Y_{3n}) - \min(Y_{3n})} \quad (n = 1, 2, \dots, 9)$$

(16)

隶属函数 R 为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{19} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{29} \\ r_{31} & r_{32} & \cdots & r_{39} \\ r_{41} & r_{42} & \cdots & r_{49} \end{bmatrix}$$

(17)

该防堵装置的主要任务是将播种带上的残茬清理干净, 要在保证根茬清除率、秸秆清除率的基础上, 提高作业速度, 降低功耗。因此, 本试验确定根茬清除率、秸秆清除率、作业速度、当量功耗的权重分别为 0.4、0.3、0.2、0.1, 即权重分配集 $P = (0.4, 0.3, 0.2, 0.1)$ 。模糊综合评价 T 为^[31-33]

$$T = PR = [t_1 \quad t_2 \quad \cdots \quad t_9]$$

(18)

指标隶属度和模糊综合评价如表 5 所示。

对模糊综合评价分别进行方差、极差分析, 分析结果如表 6、7 所示。由分析结果可知, 作业速度、刀齿总成转速、夹角影响极显著 ($P < 0.01$), 主次顺

表 5 模糊综合评价结果

Tab.5 Results of fuzzy comprehensive evaluation

试验号	指标隶属度				模糊综合评价
	r_{1n}	r_{2n}	r_{3n}	r_{4n}	t_n
1	0.751	0.591	0.001	1.000	0.562
2	1.000	0.870	0.001	0.688	0.717
3	0.837	0.821	0.001	0.471	0.626
4	0.604	0.427	0.500	0.959	0.548
5	0.684	0.573	0.500	0.529	0.587
6	0.982	1.000	0.500	0.373	0.832
7	0.001	0.001	1.000	0.601	0.260
8	0.543	0.636	1.000	0.148	0.632
9	0.671	0.594	1.000	0.001	0.639

表 6 模糊综合评价法方差分析

Tab.6 Variance analysis of fuzzy comprehensive evaluation

来源	平方和	自由度	均方	F	P
A	0.037	2	0.019	431.29	0.002 3
B	0.097	2	0.049	1 130.24	0.000 9
C	0.056	2	0.028	654.33	0.001 5
误差	8.6×10^{-5}	2	4.3×10^{-5}		
总和	0.190	8			

表 7 模糊综合评价法极差分析

Tab.7 Range analysis of fuzzy comprehensive evaluation

指标	A	B	C
k_1	0.635	0.457	0.675
k_2	0.656	0.645	0.635
k_3	0.510	0.699	0.491
R	0.146	0.242	0.184
因素主次	$B > C > A$		
最优组合	$A_2B_3C_1$		

序为: 刀齿总成转速、夹角、作业速度, 该大垄玉米原茬地免耕播种机防堵装置最优参数组合为 $A_2B_3C_1$, 即作业速度 5.4 km/h、刀齿总成转速 440 r/min、夹角 20°。

3.6 优化结果验证

按照模糊综合评价分析得出的最优参数组合进行田间验证试验, 试验重复 5 次取均值, 结果为根茬清除率为 93.94%, 秸秆清除率为 95.39%, 当量功耗为 4.36 kW, 3 项评价指标与优化结果相吻合, 优化结果可信。

4 田间性能试验

4.1 试验条件

将该防堵装置与大垄精量播种单元组配合在哈尔滨向阳农场进行性能试验, 试验地块为机收后玉米原茬地, 土壤硬度 25.1 kg/cm², 土壤湿度 33.6%, 玉米秸秆覆盖量 1.571 kg/m², 清秸刀齿入

土深度 55 mm,作业速度 5.4 km/h、刀齿总成转速 440 r/min、夹角 20°。

4.2 试验方法

(1) 机组通过性

机组通过性按照 NY/T 1768—2009《免耕播种机 质量评价技术规范》进行测定。

(2) 土壤扰动量

免耕播种作业时减少动土量,能够蓄水保墒,减少拖拉机动力消耗,因此保护性耕作要求减少土壤扰动。土壤扰动量计算式^[34]为

$$\eta = \frac{2S_2}{W_1 + W_2} \times 100\%$$
 (19)

式中 η ——土壤扰动量,%

S_2 ——实际清洁带宽,mm

W_1 ——大垄垄上相邻两行行距,mm

W_2 ——垄沟两侧相邻两行行距,mm

根据北方大垄双行作业模式的特点,取 W_1 为 400 mm, W_2 为 700 mm。

(3) 秸秆覆盖率

秸秆覆盖率按照 GB/T 20865—2007《免耕施肥播种机》进行测定。

4.3 试验结果与分析

机组通过性、土壤扰动量及秸秆覆盖率测定结果如表 8 所示。

由表 8 可知,机组通过性良好,没有发生堵塞现象。土壤扰动量为 31.9%,满足保护性耕作相关技术要求^[35]。作业后,播种带内的秸秆覆盖率为 13.4%,较作业前降低了 83.54%,有利于提高免耕播种作业质量,且避免了因阻碍阳光射入导致的播

种带上地温回升较慢现象;非播种带内秸秆覆盖率高达 96.6%,较作业前升高了 9.52%,可实现蓄水保墒、培肥地力等功效。

表 8 田间性能试验结果

Tab. 8 Results of field performance test %						
序号	机组通过性	土壤扰动量	秸秆覆盖率			
			播种带内		非播种带内	
			作业前	作业后	作业前	作业后
1	无堵塞	32.3	83	15	87	96
2	无堵塞	30.7	79	16	90	98
3	无堵塞	31.8	84	12	85	96
4	无堵塞	33.2	81	13	91	97
5	无堵塞	31.5	80	11	88	96
均值		31.9	81.4	13.4	88.2	96.6

5 结论

(1) 在土壤硬度 26.3 kg/cm²、土壤湿度 30.1%、秸秆覆盖量 1.253 kg/m²的机收后大垄玉米原茬地上,清秸刀齿入土深度 55 mm,大垄玉米原茬地免耕播种机防堵装置的最佳结构与作业参数组合为:作业速度 5.4 km/h、刀齿总成转速 440 r/min、夹角 20°。在此条件下,根茬清除率为 93.94%,秸秆清除率为 95.39%,当量功耗为 4.36 kW,土壤扰动量为 31.9%。

(2) 所设计的 110 cm 大垄玉米原茬地免耕播种机主动式防堵装置可有效清洁种床残茬至垄沟,从而解决北方寒区玉米机收大垄原茬地在免耕播种作业时残茬堵塞和播种带上地温回升较慢的问题。

参 考 文 献

1 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):1-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001.

HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1-19. (in Chinese)

2 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/OL]. 农业机械学报,2013,44(4):64-70. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130412&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.012.

WANG Hanyang, CHEN Haitao, JI Wenyi. Anti-locking mechanism of type 2BMFJ-3 no-ill precision planter for wheat stubble fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 64-70. (in Chinese)

3 ZHANG Shixiu, CHEN Xuewen, JIA Shuxia, et al. The potential mechanism of long-term conservation tillage effects on maize yield in the black soil of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 154: 84-90.

4 MULLERA E, WILDHAGEN H, QUINTERN M, et al. Spatial patterns of soil biological and physical properties in a ridge tilled and a ploughed Luvisol[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105(1): 88-95.

5 王庆杰,李洪文,何进,等. 凹形圆盘式玉米垄作免耕播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2011,27(7):117-122.

WANG Qingjie, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment on concave disc type maize ridge-till and no-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 117-122. (in Chinese)

6 张明哲. 玉米大垄双行栽培技术及其推广应用[J]. 安徽农业科学,2006,34(12):2663-2664,2696.

- ZHANG Mingzhe. Application of the technique of two row with big ridge in corn cultivation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(12): 2663–2664, 2696. (in Chinese)
- 7 王庆杰,李洪文,何进,等.大垄宽窄行免耕种植对土壤水分和玉米产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(8):39–43.
WANG Qingjie, LI Hongwen, HE Jin, et al. Effects of wide-ridge and narrow-row no-till cultivation on soil water and maize yield[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 39–43. (in Chinese)
- 8 林静,李博,李宝筏,等.阿基米德螺旋线型缺口圆盘破茬刀参数优化与试验[J/OL].农业机械学报,2014,45(6):118–124.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140619&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.019.
LIN Jing, LI Bo, LI Baofa, et al. Parameter optimization and experiment on archimedes spiral type of gap cutting disc[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 118–124. (in Chinese)
- 9 张军昌,闫小丽,薛少平,等.秸秆粉碎覆盖玉米免耕施肥播种机设计[J/OL].农业机械学报,2012,43(12):51–55. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121210&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.010.
ZHANG Junchang, YAN Xiaoli, XUE Shaoping, et al. Design of no-tillage maize planter with straw smashing and fertilizing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 51–55. (in Chinese)
- 10 KARAYEL D. Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 121–125.
- 11 CHEN Y, TESSIER S, IRVINE B. Drill and crop performances as affected by different drill configurations for no-till seeding[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 77(2): 147–155.
- 12 SHARIPOV G M, PARAFOROS D S, PULATOV A S, et al. Dynamic performance of a no-till seeding assembly[J]. Biosystems Engineering, 2017, 158: 75–94.
- 13 林静,李宝筏,李宏哲.阿基米德螺旋线型破茬开沟和切拔防堵装置的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(17):10–19.
LIN Jing, LI Baofa, LI Hongzhe. Design and experiment of archimedes spiral type stubble breaking ditching device and stubble breaking anti blocking device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 10–19. (in Chinese)
- 14 MATIN M A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A. Torque and energy characteristics for strip-tillage cultivation when cutting furrows using three designs of rotary blade[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 329–340.
- 15 蒋金琳,龚丽农,王东伟,等.免耕播种机双刀盘有支撑切茬破茬装置的研制与试验[J].农业工程学报,2012,28(21):17–22.
JIANG Jinlin, GONG Linong, WANG Dongwei, et al. Design and experiment for driving double coulters anti-blockage device of no-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 17–22. (in Chinese)
- 16 李复辉,杜瑞成,刁培松,等.舵轮式玉米免耕精量施肥播种机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2013,44(增刊1):33–38. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s107&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.007.
LI Fuhui, DU Ruicheng, DIAO Peisong, et al. Design and experiment of helm-shaped no-tillage precision fertilization planter for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Suppl.1): 33–38. (in Chinese)
- 17 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 CSAE, 2013, 29(18): 16–25. (in Chinese)
- 18 马洪亮,高焕文,魏淑艳.驱动缺口圆盘玉米秸秆根茬切断装置的研究[J].农业工程学报,2006,22(5):86–89.
MA Hongliang, GAO Huanwen, WEI Shuyan. Driven gap disc cutting mechanism for treating corn stalk and rootstalk[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 86–89. (in Chinese)
- 19 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/OL].农业机械学报,2016,47(7):96–102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160714&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.014.
CHEN Haitao, ZHA Shaohui, DUN Guoqiang, et al. Optimization and experiment of cleaning device of 2BMFJ type no-till precision planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 96–102. (in Chinese)
- 20 范旭辉,贾洪雷,张伟汉,等.免耕播种机仿形爪式防堵清茬机构参数分析[J].农业机械学报,2011,42(10):56–60.
FAN Xuhui, JIA Honglei, ZHANG Weihai, et al. Parametric analysis of finger-type anti-blocking residue-cleaner for no-till Planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 56–60. (in Chinese)
- 21 张敬涛,刘婧琦,赵桂范,等.免耕栽培不同秸秆覆盖量下土壤温度变化研究[J].中国农学通报,2015,31(27):224–228.
ZHANG Jingtao, LIU Jingqi, ZHAO Guifan, et al. Study on soil temperature variation of no-till cultivation with different amounts of stalk mulch[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(27): 224–228. (in Chinese)
- 22 潘茹京.玉米根茬和土壤相互作用的力学特性研究[D].长春:吉林大学,2012.
PAN Rujing. Study on mechanical properties of interaction of the corn stubble and soil[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- 23 顿国强.大垄密植原茬地免耕精量播种机关键技术研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2013.
DUN Guoqiang. Key technology research of no-tillage precision planter on grand ridge planting with original stubble[D]. Harbin:

- Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 24 顿国强,陈海涛,李昂,等.刀齿排布旋向对免耕覆秸精播机清秸单体性能的影响[J].农业工程学报,2015,31(12):48-56.
DUN Guoqiang, CHEN Haitao, LI Ang, et al. Effect of rotation direction of knife teeth configuration on clearing straw unit performance for no-tillage and straw mulching precision seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 48-56. (in Chinese)
- 25 孙茸茸,李问盈,李洪文.垄作玉米免耕播种机破茬装置设计与试验[J].农业机械学报,2008,39(8):48-53.
SUN Rongrong, LI Wenying, LI Hongwen. Design and experiment on power driven rootstalk cutting mechanism of ridge-till and no-till corn planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 48-53. (in Chinese)
- 26 贾洪雷,郑嘉鑫,袁洪方,等.仿形滑刀式开沟器设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(4):16-24.
JIA Honglei, ZHENG Jiaxin, YUAN Hongfang, et al. Design and experiment of profiling sliding-knife opener[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 16-24. (in Chinese)
- 27 GB/T 20865—2007 免耕施肥播种机[S].2007.
- 28 吴崇友,丁为民,张敏,等.油菜分段收获脱粒清选试验[J].农业机械学报,2010,41(8):72-76.
WU Chongyou, DING Weimin, ZHANG Min, et al. Experiment on threshing and cleaning in two-stage harvesting for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 72-76. (in Chinese)
- 29 吕金庆,杨颖,李紫辉,等.舀勺式马铃薯播种机排种器的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(16):17-25.
LÜ Jinqing, YANG Ying, LI Zihui, et al. Design and experiment of cup-belt type potato seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 17-25. (in Chinese)
- 30 麻芳兰,何玉林,李尚平,等.甘蔗收获机切割性能的模糊综合评价与优化[J].农业机械学报,2006,37(12):79-82.
MA Fanglan, HE Yulin, LI Shangping, et al. Analysis on fuzzy comprehensive evaluation and optimization of cutting performance of sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12): 79-82. (in Chinese)
- 31 刘环宇,陈海涛,侯磊,等.D200型秸秆纤维制取机原料供给系统优化设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(3):92-98. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170311&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.011.
LIU Huanyu, CHEN Haitao, HOU Lei, et al. Optimal design and experiment for raw material supply system of D200 straw fiber extruder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 92-98. (in Chinese)
- 32 钟挺,胡志超,顾峰玮,等.4LZ-1.0Q型稻麦联合收获机脱粒清选部件试验与优化[J/OL].农业机械学报,2012,43(10):76-81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121014&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.014.
ZHONG Ting, HU Zhichao, GU Fengwei, et al. Optimization and experiment for threshing and cleaning parts of 4LZ-1.0Q cereal combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 76-81. (in Chinese)
- 33 李耀明,周伟,徐立章,等.单切双横流脱粒分离装置参数试验与优化[J/OL].农业机械学报,2015,46(5):62-67,92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150510&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.010.
LI Yaoming, ZHOU Wei, XU Lizhang, et al. Parameter test and optimization of tangential-horizontal-horizontal threshing and separating device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 62-67, 92. (in Chinese)
- 34 王庆杰,李洪文,何进,等.螺旋刀型垄台清理装置的设计与试验[J].农业工程学报,2010,26(6):109-113.
WANG Qingjie, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment on twist type ridge-clear device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 109-113. (in Chinese)
- 35 卢彩云,李洪文,何进,等.小麦免耕播种机浮动支撑式防堵装置[J/OL].农业机械学报,2013,44(12):52-55,153. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.009.
LU Caiyun, LI Hongwen, HE Jin, et al. Floated support anti-blocking device of wheat no-till seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 52-55, 153. (in Chinese)