

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.003

幅宽自动控制清秸防堵装置设计与试验

王奇 唐汉 周文琪 王金武
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对免耕播种机在进行玉米秸秆全量粉碎还田作业时,清秸防堵装置存在清秸幅宽、秸秆抛掷距离不合理和幅宽稳定性差等问题,设计了一种幅宽自动控制的清秸防堵装置。建立清秸幅宽数学模型,确定影响作业幅宽和漏清区域的主要工作参数和各参数的取值范围;运用S型压力传感器和电动直线推杆协同作用设计幅宽自动控制系统;通过正交试验设计和EDEM离散元仿真试验确定清秸盘的最优工作参数组合,并进行田间试验,验证自动控制系统和装置的作业性能。结果表明,影响星齿凹盘式清秸防堵装置作业幅宽和漏清区域的主要工作参数为清秸盘间距、工作偏角和工作倾角,通过仿真试验得到最优参数组合为90 mm、30°和15°;自动控制系统通过监测清秸盘对地压力实时调节其入土深度,从而调控其作业幅宽,可有效提高幅宽稳定性。田间试验表明,该装置苗带清秸率、秸秆横向移动最大距离和幅宽稳定性系数分别为92.3%、40.2 mm和92.1%,满足免耕播种作业农艺和技术要求。

关键词: 保护性耕作; 清秸防堵装置; 作业幅宽; 自动控制

中图分类号: S223.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)03-0025-11 OSID: 

Design and Experiment of Automatic Width Control Row Cleaners

WANG Qi TANG Han ZHOU Wenqi WANG Jinwu
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Aiming at the problems of the unreasonable working width and straw throwing distance of the row cleaners and poor stability of the working width of no-tillage planter when working in the field, an automatic width control row cleaner was designed. A mathematical model of the row cleaning width was established, the main operating parameters that affected the row cleaning and the missing cleaning area were determined, and the value range of each parameter was obtained. An automatic width control system was designed by using S-type pressure sensor and electric linear actuator. The method of combining orthogonal experiment design and EDEM discrete element simulation technology was adopted, and the optimal working parameter combination of the row cleaners was determined, and the operation performance of the automatic control system and the row cleaners were verified by field experiments. The research results showed that the main working parameters that affected the working width and the missing cleaning area of the row cleaners were the distance of the two cleaners, the working deflection and the working inclination angle. The optimal combination of parameters obtained by the simulation test was that the distance of the two cleaners was 90 mm, the working deflection angle was 30° and the working inclination angle was 15°. The automatic control system monitored the pressure of the row cleaners on the soil and adjusted its depth into the soil in real time, thereby regulating the operation width of the row cleaners, which can effectively improve the stability of the width by 8.7 percentage points. Field test results showed that the straw cleaning rate, straw lateral movement distance and width stability of the device were 92.3%, 40.2 mm and 92.1%, respectively, which can meet the agronomic and technical requirements of no-tillage planting operations. The research results can provide reference for the design of similar soil contact parts.

Key words: conservation tillage; row cleaners; working width; automatic control

收稿日期: 2020-10-27 修回日期: 2021-01-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(52005094、31901414)、黑龙江省博士后科学基金项目(LBH-Z19041)和东北农业大学“青年才俊”项目(20QC10)
作者简介: 王奇(1990—),男,讲师,博士,主要从事保护性耕作技术及其智能农业装备研究,E-mail: wangqi_4034@163.com
通信作者: 王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械及机械可靠性研究,E-mail: jinwu@163.com

0 引言

清秸防堵装置是保护性耕作系统中免耕模式和条带耕作模式必不可少的工作部件,具有清理播种行内残留秸秆、为开沟和播种作业环节准备清秸苗带的功能^[1-3]。清洁一致的苗带宽度和合理的秸秆抛掷距离能够提高后续播种作业质量和工作效率^[4-6],促进作物生长和产量提高^[7-9]。因此,清秸防堵装置已成为精密播种技术研究重点。

对置双盘式清秸防堵装置具有土壤扰动小、保墒效果好、作业阻力低等优点,已被广泛用在免耕播种机和条带耕整机上^[1]。目前,国内外学者主要通过改进清秸盘结构和优化工作参数来提高苗带清秸率^[10-15],对秸秆横向抛掷的合理距离和幅宽稳定性控制的研究较少。相关研究表明,轮盘间距和工作偏角等工作参数影响清秸装置的作业质量,参数应始终保持在合理范围内,从而确保作业性能的可靠性^[11,16-17];通过增加配重块、弹簧、气压系统和液压系统等方法对清秸装置进行入土深度控制,在一定程度上能够提高装置仿形能力和作业性能稳定性,但并不能根据免耕复杂地况变化主动调节装置的作业幅宽,无法保证作业幅宽稳定性^[18-19]。

本文以设计的星齿凹盘式清秸防堵装置为研究载体,对其工作参数进行理论分析和仿真优化,运用S型拉压力传感器和电动直线推杆协同作用设计幅宽自动控制系统,在保证清秸率的前提下实时调控清秸幅宽和秸秆横向移动最大距离,并通过田间试验验证优化结果和控制系统设计的合理性,以期同类工作部件的设计提供参考。

1 农艺要求

对置双盘式清秸防堵装置作业时,清秸盘将预清理条带内的秸秆向两侧推移和抛掷,如图1所示。图中 R_s 为播种时玉米种植理论行距; R_w 为条带清理理论宽度; D_l 为秸秆横向移动距离的合理区间; D 为实际秸秆横向移动最大距离。因此,在作业过程中应始终避免清秸装置将本行内清理的秸秆抛掷到相邻行的预清理条带区域,以防止相邻行的作业负担

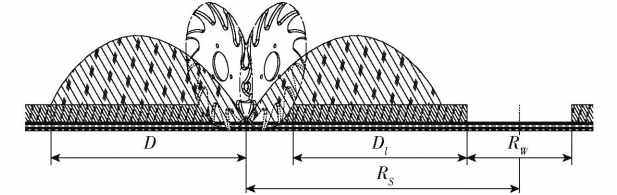


图1 秸秆横向移动距离分析简图
Fig.1 Analysis diagram of straw lateral movement distance

增加、苗带清秸率降低的现象发生。

东北地区采用免耕覆盖种植模式下进行玉米免耕播种作业的技术要求,免耕播种机作业时对土壤扰动需小于田面的30%,且应为播种作业准备出15~25 cm的播种区^[20-21]。东北地区玉米常规垄距为65 cm。因此,秸秆横向移动距离范围应为15~50 cm。

2 整体结构与工作原理

幅宽自动控制清秸防堵装置结构如图2所示,由固定架、平行四杆架、星齿凹面清秸盘和作业幅宽自动控制系统组成,其中作业幅宽自动控制系统由S型压力传感器、电动直线推杆、连接件和幅宽控制器组成,S型压力传感器和电动直线推杆通过连接件相连组成压力监控单元,其两端分别与固定架和平行四杆架铰接,幅宽控制器固定安装在机架上。

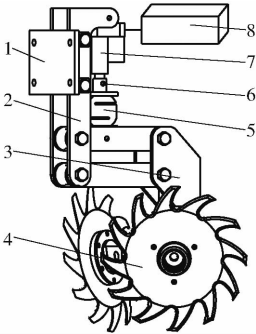


图2 幅宽自动控制清秸防堵装置结构示意图
Fig.2 Automatic width control row cleaners
1. 固定架 2. 平行四杆架 3. 清秸盘安装架 4. 星齿凹面清秸盘 5. S型压力传感器 6. 电动直线推杆 7. 连接件 8. 幅宽控制器

该装置作业前,根据地况条件和作业幅宽要求,通过幅宽控制器设定清秸装置的目标幅宽(即S型压力传感器的目标监测压力),使清秸盘在重力和下压力的作用下插入秸秆层并与预定深度的土壤层接触,达到设定作业幅宽。作业时,随着拖拉机的前进方向运动;通过微控制器将实时读取的压力传感器输出信号转换为对应的幅宽,当实测幅宽偏离设定的幅宽阈值范围时,单片机控制电动推杆做出相应伸长或收缩,使清秸装置在设定的作业幅宽下稳定运行;清秸盘在机具的拉力和土壤的反作用力共同形成的力偶作用下绕定轴进行被动转动,将清秸盘外侧的秸秆残茬沿着其外表面向条带两侧推移,且秸秆横向移动距离逐渐增加,当秸秆运动到清秸盘与地面交接的末端时,秸秆在旋转的清秸盘对其产生的合力的作用下沿着星齿部分的凹曲面的切线方向被侧向抛出;被抛掷的秸秆在惯性力和自身重力的作用下落在所清理条带的两侧,从而形成清洁

一致的条带。

3 关键部件设计

3.1 工作参数分析

清秸防堵装置的关键工作部件为星齿凹面清秸盘^[14]。图 3 为清秸盘垂直状态入土深度为 h 时,其与土壤间相对位置的简图,点 m 、 n 分别为清秸盘与地面的两个交点。由图 3 可知,清秸盘与地表相交线段 L_{mn} 长度可表示为

$$L_{mn} = 2r\sin\gamma = 2\sqrt{r^2 - (r - h)^2} \tag{1}$$

式中 r ——清秸盘半径,mm

γ ——清秸盘和地面交点与垂直方向夹角,
($^{\circ}$)

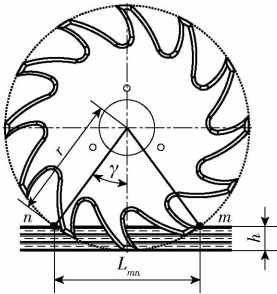


图 3 清秸盘与土壤相互作用简图

Fig. 3 Diagram of interaction between cleaner and soil

当清秸盘与前进方向的工作偏角为 α ,且与竖直平面的工作倾角为 β 时,以清秸盘圆心为坐标原点,建立 $Oxyz$ 空间直角坐标系,其中 x 轴为机具前进方向, y 轴为与机具前进方向垂直的水平方向, z 轴为竖直方向,如图 4 所示。

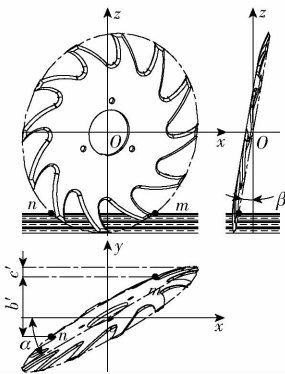


图 4 工作偏角为 α 和工作倾角为 β 时清秸盘的工作简图

Fig. 4 Working diagram of cleaner when deflection angle was α and inclination angle was β

此时,清秸盘与地面的交点 m 、 n 在 Oxy 平面内投影的坐标分别为 $(\sqrt{r^2 - (r - h)^2} \cos\alpha - (r - h) \cdot \sin\beta \sin\alpha, \sqrt{r^2 - (r - h)^2} \sin\alpha + (r - h) \sin\beta \cos\alpha)$ 、 $(-\sqrt{r^2 - (r - h)^2} \cos\alpha - (r - h) \sin\beta \sin\alpha, -\sqrt{r^2 - (r - h)^2} \sin\alpha + (r - h) \sin\beta \cos\alpha)$ 。

于是,单个清秸盘的有效作业幅宽 b' 和 y 方向的漏清区域 c' 为

$$b' = L_{mn} \sin\alpha = 2\sqrt{r^2 - (r - h)^2} \sin\alpha \tag{2}$$

$$c' = [r - \sqrt{r^2 - (r - h)^2}] \sin\alpha - (r - h) \sin\beta \cos\alpha \tag{3}$$

该清秸防堵装置采用交错对置的形式进行清秸盘的布置,如图 5 所示。

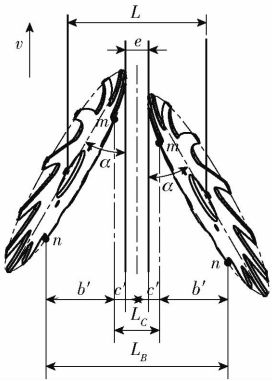


图 5 清秸防堵装置幅宽示意图

Fig. 5 Schematic of width of row cleaners

根据式(2)和式(3)将星齿凹面盘式清秸防堵装置的理论作业幅宽和两个清秸盘间的理论漏清区域表示为

$$\begin{cases} L_B = 2b' + L_c \\ L_c = 2c' + e \end{cases} \tag{4}$$

式中 L_B ——清秸装置理论作业幅宽,mm
 L_c ——清秸装置理论漏清宽度,mm
 e ——两个清秸盘间交点的水平距离(两清秸盘重叠时为负值;否则为正值),mm

整理得

$$\begin{cases} L_B = 4\sqrt{r^2 - (r - h)^2} \sin\alpha + 2[r - \sqrt{r^2 - (r - h)^2}] \sin\alpha - 2(r - h) \sin\beta \cos\alpha + e \\ L_c = 2[r - \sqrt{r^2 - (r - h)^2}] \sin\alpha - 2(r - h) \sin\beta \cos\alpha + e \end{cases} \tag{5}$$

由式(5)可知,该清秸防堵装置的作业幅宽 L_B 和理论漏清宽度 L_c 的尺寸取决于清秸盘半径 r 、入土深度 h 、工作偏角 α 、工作倾角 β 和 2 个清秸盘间交点的水平距离(即两个清秸盘中心的水平距离 L)。

综合上述分析,结合东北地区玉米生产实际情况,春季播种时覆盖在地表的秸秆层厚度为 40 ~ 50 mm,常规垄距为 650 mm,为提高清秸盘转动效率,设定清秸盘入土深度 h 为 20 mm,星齿凹面清秸盘半径 r 为 152.5 mm。综合上述设计要求,参考圆盘犁和圆盘耙的工作偏角^[22],经计算,确定各参数取值范围为 $90\text{ mm} \leq L \leq 195\text{ mm}$ 、 $15^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ 、 $10^{\circ} \leq \beta \leq 25^{\circ}$ 。



图9 幅宽自动控制系统实物图

Fig. 9 Picture of automatic width control system
1. S型压力传感器 2. 连接件 3. 直线电动推杆 4. 幅宽控制器

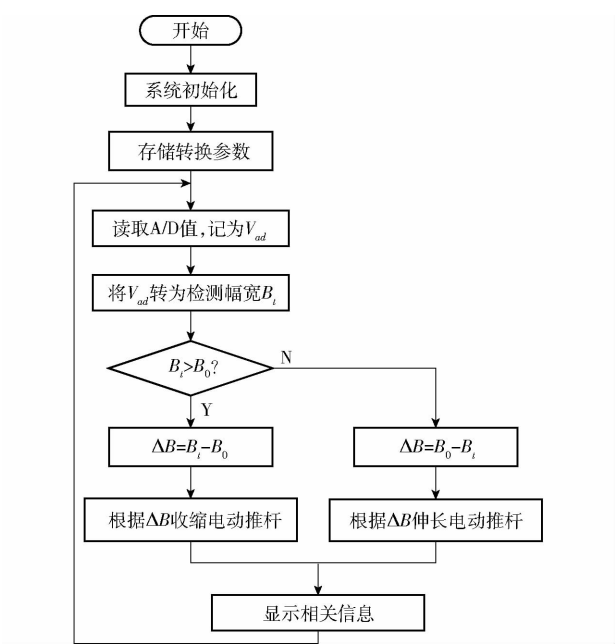


图10 幅宽自动控制系统软件设计流程图

Fig. 10 Working flow chart of automatic width control system

值 V_{ad} , 并根据存储的转换参数将 V_{ad} 换算成对应的幅宽 B_t , 此时的幅宽 B_t 即为实时检测幅宽。当实时检测幅宽 B_t 大于设定的作业幅宽阈值 B_0 时, STM32 单片机将计算出对应的差值 ΔB ($\Delta B = B_t - B_0$), 并据此控制电动推杆作出相应地收缩, 使清秸装置回到设定的作业幅宽; 反之, 当 B_t 小于 B_0 时, STM32 单片机根据二者差值 ΔB ($\Delta B = B_0 - B_t$), 使电动推杆伸长相应的行程, 以保持装置按设定幅宽进行作业。同时, 相关信息 (如设定幅宽 B_0 和实时检测幅宽 B_t 等) 将在液晶显示屏上予以显示。

4 离散元仿真试验与分析

运用离散元仿真软件 EDEM 建立作业部件-土壤-秸秆间作用模型对清秸防堵装置田间作业环境进行模拟, 分析影响其作业性能的主要因素, 从而寻求最优工作参数组合。

4.1 离散元模型建立

为合理有效地进行仿真模拟与计算, 对清秸防

堵装置模型进行简化处理, 去除其工作过程中无关的部件。运用三维制图软件 Creo 对清秸防堵装置进行实体建模 (比例 1:1), 以 .igs 格式导入 EDEM 软件 Geometry 项中, 仿真模型如图 11 所示。设置仿真模型的材质属性为 45 号钢, 泊松比为 0.31, 剪切模量为 7.0×10^{10} Pa, 密度为 $7\,800\text{ kg/m}^3$ 。

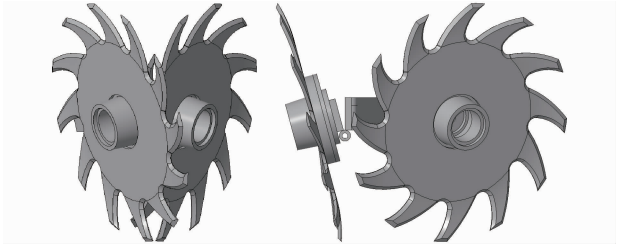


图11 清秸防堵装置仿真几何模型

Fig. 11 Simulation geometric model of row cleaners

为简化模型, 采用直径为 8 mm 的球体作为土壤颗粒模型^[25-26], 设定土壤颗粒力学关系模型为 Hertz - Mindlin with bonding 模型, 泊松比为 0.38, 剪切模量为 1.0×10^6 Pa, 密度为 $1\,850\text{ kg/m}^3$; 国家标准 GB/T 24675.6—2009《保护性耕作机械秸秆粉碎还田机》要求玉米秸秆粉碎长度不大于 100 mm, 并且根据田间粉碎秸秆实际尺寸采用 8 个直径为 20 mm、球心间距为 10 mm 的球体组成的长为 90 mm 的长线性模型作为秸秆颗粒模型, 设定秸秆颗粒力学关系模型为 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型, 泊松比为 0.4, 剪切模量为 1.0×10^6 Pa, 密度为 241 kg/m^3 。根据文献[26]得到仿真材料的接触参数如表 1 所示。

表 1 仿真材料的接触参数			
Tab. 1 Contact parameters of simulated materials			
参数	45 号钢- 土壤颗粒	45 号钢- 秸秆颗粒	土壤颗粒- 土壤颗粒
动摩擦因数	0.04	0.01	0.25
静摩擦因数	0.50	0.30	0.40
恢复系数	0.28	0.30	0.20

为模拟实际田间清秸作业状态, 运用 EDEM 软件建立虚拟土槽, 根据该地区春季播种前田间秸秆覆盖情况, 设定土壤层厚度为 50 mm, 秸秆层厚度为 40 mm, 设置土槽基本尺寸 (长 × 宽 × 高) 为 2 000 mm × 650 mm × 90 mm, 将其设定为虚拟颗粒工厂, 保证槽内存有充足颗粒进行仿真, 如图 12 所示。在生成土壤颗粒过程中, 使其仅在重力作用下自由沉降, 且整体生成后在颗粒群上方加载校准土壤密度所需的垂直载荷, 进行土壤模型压实, 使仿真与实际土壤保持一致。

4.2 虚拟仿真过程

在虚拟仿真过程中, 设置清秸防堵装置位于土

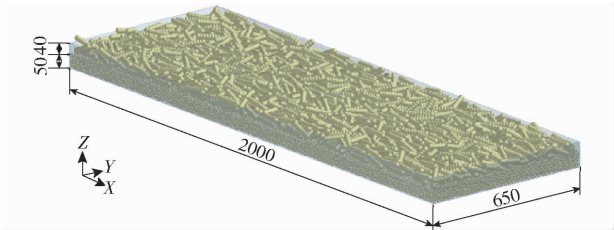


图 12 虚拟土槽模型

Fig. 12 Virtual soil bench model

槽一侧进行初始作业。根据机具实际作业状态及免耕播种农艺要求,设置该装置前进速度为 2.22 m/s、清秸盘入土深度为 20 mm。为保证仿真的连续性,设置其固定时间步长为 Rayleigh 时间步长的 15%,网格尺寸设置为土壤颗粒尺寸的 2 倍,数据导出时间间隔为 0.01 s,以便对后续数据精准处理。仿真过程如图 13 所示。

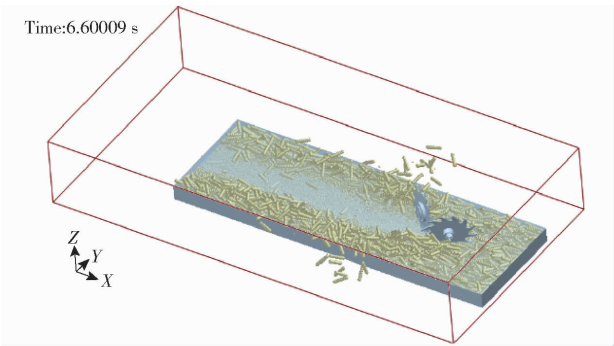


图 13 清秸作业 EDEM 仿真

Fig. 13 EDEM simulation processes of straw cleaning

4.3 试验设计

为提高试验的可控性及准确性,根据理论分析结果选取清秸盘间距、工作偏角和工作倾角为试验因素,使用 Design-Expert 软件进行三因素四水平正交试验,选用 $L_{16}(4^5)$ 正交表^[27-28],不考虑 3 个因素间的交互作用,因素和水平如表 2 所示。

表 2 试验因素水平

Tab. 2 Test factors and levels

水平	因素		
	清秸盘间距	工作偏角	工作倾角
	x_1/mm	$x_2/(\text{^\circ})$	$x_3/(\text{^\circ})$
1	90	15	10
2	125	20	15
3	160	25	20
4	195	30	25

由于目前国内外尚无评价苗带清秸作业质量的统一标准,通过查阅相关资料并结合实际玉米免耕播种作业技术要求^[29-31],选取苗带清秸率和秸秆横向移动最大距离为试验指标。

利用 EDEM 软件获得的 solve report 模块,可得建立的秸秆颗粒在仿真作业前后的数量变化,

提取作业前后线框区域内秸秆颗粒数量,如图 14 所示。

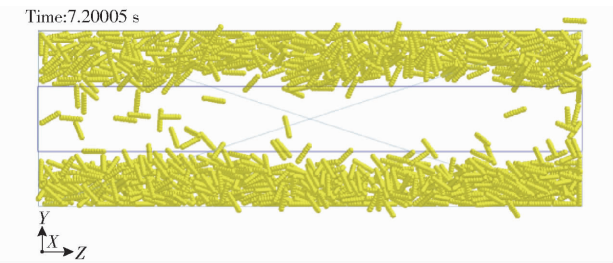


图 14 清秸率测试区域示意图

Fig. 14 Schematic of test area for row cleaning rate

利用 EDEM 软件的后处理功能输出带有尺寸基准的图片,再利用 Adobe Photoshop 软件添加实际尺寸标尺,读取被抛掷秸秆在标尺上的数值,即为秸秆横向移动最大距离 D ,如图 15 所示。每组试验随机选取位置记录 5 个数据并计算平均值,记为试验结果。

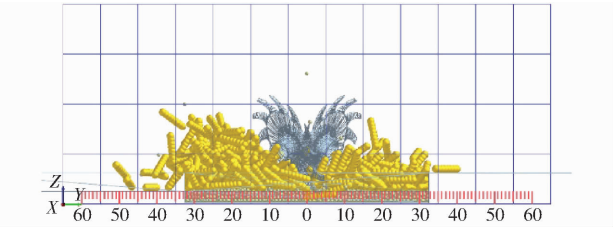


图 15 秸秆横向移动距离测定示意图

Fig. 15 Schematic of measuring straw horizontal movement distance

4.4 试验结果与分析

试验方案与结果如表 3 所示, A 、 B 、 C 为因素水平值。

在满足实际免耕播种作业要求的条带清秸宽度范围内,苗带清秸率越高,则综合作业性能越好。由表 3 极差分析可知,影响苗带清秸率指标的 3 个主次因素顺序为:工作偏角 B 、清秸盘间距 A 、工作倾角 C ,其较优参数水平组合为 $A_1B_4C_4$;影响秸秆横向移动最大距离的 3 个主次因素顺序为:清秸盘间距 A 、工作偏角 B 、工作倾角 C ,当参数组合为 $A_1B_1C_4$ 和 $A_4B_4C_1$ 时,分别为秸秆横向移动最大距离的最小值和最大值。根据实际田间生产作业要求及该清秸装置自身特点,确定影响该清秸装置综合作业性能的主次顺序因素为:工作偏角 B 、清秸盘间距 A 、工作倾角 C 。

清秸装置作业时,主要依靠清秸盘的被动转动将与之接触的地表残留秸秆推移和抛掷到苗带两侧。两个清秸盘的间距越大,则产生的漏清区域越大,使两个清秸盘间有越多的秸秆无法与清秸盘相接触,因此苗带清秸率随着清秸盘间距的增加而降

表 3 试验方案与结果
Tab.3 Test plan and results

序号	因素			指标	
	清秸盘 间距	工作 偏角	工作 倾角	苗带 清秸率	秸秆横向移 动最大距离
	A	B	C	$y_1/\%$	y_2/cm
1	1	1	1	62.0	26.3
2	1	2	2	75.7	29.1
3	1	3	3	88.0	35.1
4	1	4	4	95.1	35.9
5	2	1	2	55.2	30.2
6	2	2	1	67.3	35.8
7	2	3	4	86.5	36.5
8	2	4	3	90.1	44.2
9	3	1	3	60.3	36.9
10	3	2	4	76.0	36.5
11	3	3	1	70.8	46.4
12	3	4	2	87.6	48.7
13	4	1	4	54.4	37.2
14	4	2	3	62.9	42.9
15	4	3	2	75.4	53.8
16	4	4	1	75.4	60.3
y_1	K_1	320.8	231.9	275.5	
	K_2	299.1	281.9	293.9	
	K_3	294.7	320.7	301.3	
	K_4	268.1	348.2	312.0	
	R_1	52.7	116.3	36.5	
y_2	K_1	126.4	130.6	168.8	
	K_2	146.7	144.3	161.8	
	K_3	168.5	171.8	158.8	
	K_4	194.2	189.1	146.1	
	R_1	67.8	58.5	22.7	

表 4 试验方差分析
Tab.4 Analysis of test variance

试验指标	方差来源	离差平方和	自由度	均方差	F	P	显著性
苗带清秸率 y_1	A	351.08	3	117.03	26.54	0.006 8	***
	B	1910.53	3	636.84	11.46	<0.000 1	***
	C	177.08	3	59.03	5.76	0.033 4	**
秸秆横向移动最大距离 y_2	A	635.83	3	211.94	61.88	<0.000 1	***
	B	523.12	3	174.37	50.91	0.000 1	***
	C	67.57	3	22.52	6.58	0.025 2	**

注：** 表示影响显著 ($P<0.05$)；*** 表示影响极显著 ($P<0.01$)。

$$\begin{cases} \max y_1(x_1, x_2, x_3) \\ 15\text{ cm} \leq y_2 \leq 50\text{ cm} \\ \text{s. t.} \begin{cases} 90\text{ mm} \leq x_1 \leq 195\text{ mm} \\ 15^\circ \leq x_2 \leq 30^\circ \\ 10^\circ \leq x_3 \leq 25^\circ \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

基于 Design-Expert 6.0.10 软件中的多目标参

低。工作偏角越大,清秸盘有效作业幅宽也随之增加,使漏清间距减小,提高了秸秆与清秸盘的有效接触面积,所以随着工作偏角的增加,清秸率升高。工作倾角的增大,使清秸盘向内侧倾斜,减小了漏清间距,使清秸率增加。

清秸盘间距越大,使秸秆脱离清秸盘的初始位置和秸秆被抛起后最终的下落位置越远离清秸装置的中心,因此,增加了秸秆的横向移动距离。工作偏角越大,同样使秸秆脱离清秸盘的初始位置与清秸装置中心的间距增加,同时增大的清秸盘偏角使秸秆与盘面间的相互作用更加强烈,且盘面对抛出秸秆的导流作用,使秸秆横向移动距离增大。工作倾角的分析与工作偏角相似,但是由于工作倾角向内侧倾斜,则使得秸秆横向移动最大距离随工作倾角的增加而减小。

为准确判断各因素水平对作业质量影响的显著性,运用 Design-Expert 6.0.10 软件对正交试验结果进行显著性判断,其显著水平设定为 0.01,方差分析计算结果如表 4 所示。

由表 4 可知,方差分析结果与上述极差分析相符合,即工作偏角和清秸盘间距对苗带清秸率和秸秆横向移动最大距离影响极显著;工作倾角对苗带清秸率和秸秆横向最大移动距离影响显著。

4.5 试验优化

为得到清秸装置最佳工作参数组合,对试验因素进行优化设计,遵循在秸秆横向抛掷不发生相互影响条件下提高苗带清秸率的原则,采用多目标变量优化方法,结合试验因素边界条件,建立非线性规划参数模型为

数优化(Optimization)模块对数学模型进行分析求解,可得多组优化参数组合,综合分析并从优化结果中选取一组合理参数组合为 $A_1B_4C_2$,即清秸盘间距为 90 mm、工作偏角为 30°、工作倾角为 15°时,该装置苗带清秸率为 93.2%,秸秆横向移动最大距离为 40.3 mm。

5 田间试验

5.1 试验条件

试验在 2018 年 10 月于吉林大学农学部试验田进行,土壤类型属于中国东北典型黑黏土,试验期间日平均气温为 12 ~ 16℃,几乎无降雨。试验地前茬作物为玉米,秋季收获时进行了全量秸秆粉碎覆盖还田(地上部分的玉米秸秆被全部粉碎并均匀地平铺在地表上),粉碎秸秆长度为 8 ~ 12 cm。试验地块 0 ~ 100 mm 深度内,土壤坚实度为 0.985 MPa,容积密度为 1.21 g/cm³,含水率为 24.6%,温度为 11.8℃。

5.2 试验设计

幅宽自动控制清秸防堵装置性能试验前,进行作业幅宽-清秸盘对地压力检测的标定试验,获取二者之间的对应关系。试验时,不开启幅宽自动控制系统,使用 LabView 系统程序,通过 USB66530 数据采集卡对 S 型压力传感器进行测试和数据存储;记录机具稳定运行 50 m 内的数据,通过 Excel 电子表格将采集数据换算为清秸盘对地压力,并计算平均值和标准差。试验过程中,调整星齿凹面清秸轮入土深度为 20 mm,并分别设定机具前进速度为 6、8、10、12 km/h 进行条带清秸作业,在各种速度工况下重复 3 次。试验情况如图 16 所示。



图 16 标定试验现场
Fig. 16 Calibration test site

1. 拖拉机 2. 机架 3. 计算机 4. 数据采集卡 5. S 型压力传感器 6. 清秸装置

为考察幅宽自动控制清秸防堵装置的作业性能,进行田间性能检测试验,并与安装仿形弹簧条件下进行对比试验。试验用清秸装置工作参数为:清秸盘间距为 90 mm、工作偏角为 30°、工作倾角为 15°,仿形弹簧参数为:线径为 5 mm、中心径为 30 mm、有效圈数为 22。试验前,调整星齿凹面清秸轮入土深度为 20 mm,调节所得标定结果设置检测初始值。试验过程中,分别设定播种机具以 6、8、10、12 km/h 进行条带清秸作业。每组试验的作业行程为 50 m,其中包括两端预留的 10 m 调整区和中间稳定工作的 30 m 数据采集区,在各种速度工况下重复 3 次,试验情况如图 17 所示,被测清秸防堵装

置如图 18 所示。

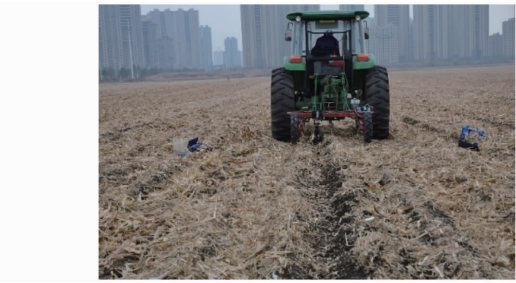


图 17 田间性能测试试验现场

Fig. 17 Field performance test site



(a) 安装幅宽自动控制系统 (b) 安装仿形弹簧

图 18 被测清秸防堵装置

Fig. 18 Tested row cleaners

5.3 试验指标

由于目前国内尚无评价条带清秸作业质量的统一标准,通过查阅相关资料及条带耕作技术要求,选取苗带清秸率、清秸幅宽稳定性系数和秸秆横向移动最大距离为田间试验的评价指标。

(1) 苗带清秸率

使用电子天平称量苗带清秸幅宽内残留秸秆质量,并与该区域试验前秸秆质量作比值,计算苗带清秸率,在稳定工作区内间隔 1 m 连续采集 20 个测点的数据,采样如图 19a 所示。



(a) 苗带清秸率 (b) 清秸幅宽 (c) 秸秆横向移动最大距离

图 19 清秸装置作业性能测定方法

Fig. 19 Measuring method of working performance of row cleaners

(2) 清秸幅宽稳定性系数

将钢板尺与机组前进方向垂直放置,测量清秸行两侧清理区域与未清理区域界线间距,记为清秸幅宽值,测点与苗带清秸率测点相同,测定方法如图 19b 所示。计算式为

$$U_j = \left(1 - \frac{S_j}{a_j} \right) \times 100\% \quad (10)$$

其中

$$a_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} a_{ji}}{n_j} \tag{11}$$

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (a_{ji} - a_j)^2}{n_j - 1}} \tag{12}$$

式中 a_j ——第 j 个行程幅宽平均值,cm
 a_{ji} ——第 j 个行程中第 i 个点的幅宽,cm
 n_j ——第 j 个行程中测定点数
 U_j ——第 j 个行程中幅宽稳定性系数
 S_j ——第 j 个行程幅宽标准差,cm

(3) 秸秆横向移动最大距离

使用钢板尺测量被抛掷秸秆到清秸区中心的最大距离,记为秸秆横向移动最大距离,测点与苗带清秸率测点相同,记录数据并计算平均值,测定方法如图 19c 所示。

5.4 试验结果

5.4.1 标定试验结果与分析

作业幅宽-清秸盘对地压力检测值标定试验结果如图 20 所示。由于地表秸秆覆盖不均匀和土壤紧实度不同等因素,使同一速度条件下被测装置在作业工程中的受力主要集中在某一数值范围内变化,并且随着前进速度升高,清秸盘对地压力呈上升趋势,这与其他土壤耕作部件的结论相似^[32-33]。

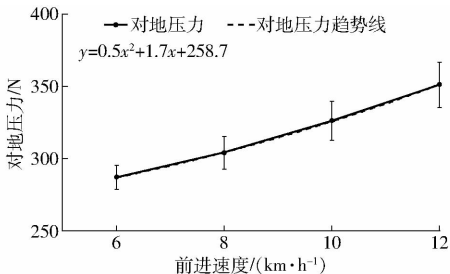


图 20 作业幅宽-清秸盘对地压力检测值关系

Fig. 20 Relationship between work width and pressure on ground of cleaner

根据标定试验结果,以平均值为初始阈值,误差精度设置为 15%,设定幅宽自动控制系统的初始阈值及范围如表 5 所示。

表 5 幅宽自动控制系统的初始阈值及范围
Tab.5 Initial threshold and range of automatic width control system

参数	速度/(km·h ⁻¹)			
	6	8	10	12
初始阈值/N	287	304	326	351
阈值范围/N	265 ~ 308	281 ~ 327	302 ~ 350	325 ~ 377

5.4.2 田间性能检测试验结果与分析

幅宽自动控制清秸防堵装置的田间性能检测试

验结果如表 6 所示。

表 6 幅宽自动控制清秸防堵装置田间试验结果
Tab.6 Field test results of automatic control row cleaners

清秸装置 类型	前进速度/ (km·h ⁻¹)	清秸率/ %	秸秆横向移动 最大距离/cm	幅宽稳定 性系数/%
安装幅宽自动 控制系统	6	90.5	36.4	93.7
	8	91.7	38.5	92.4
	10	93.6	41.6	91.4
	12	93.5	44.3	90.7
	平均值	92.3	40.2	92.1
安装仿形弹簧 机构	6	90.1	37.4	85.1
	8	91.4	39.6	87.5
	10	92.4	40.9	81.6
	12	90.9	42.5	79.4
	平均值	91.2	40.1	83.4

由表 6 可知,在相同工况下,随着前进速度增加,清秸率和秸秆横向移动最大距离呈上升趋势,而幅宽稳定性系数呈降低趋势,原因可能是前进速度增加使清秸盘的转速升高,增大了其与秸秆的相互作用力和对秸秆的抛掷效率。对比试验结果可知,幅宽自动控制系统对幅宽稳定性系数具有极显著性影响($P < 0.01$),两种处理相差 8.7 个百分点,有效提高幅宽的稳定性。通过与仿真试验结果进行对比分析可知,田间作业质量与仿真试验优化结果基本一致,但是田间秸秆横向移动最大距离略小于仿真试验结果,产生误差的原因可能是仿真环境过于理想,而田间秸秆的含水率和容积密度更大,所需抛掷能量更多,但误差在可接受范围内。田间试验结果表明,幅宽自动控制清秸防堵装置具有较高的清秸作业质量,清秸率高达 92.3%,幅宽稳定性系数高达 92.1%,能够适应东北地区大秸秆覆盖量的作业地况,清理的条带满足玉米种植作业的农艺要求。

6 结论

(1)设计了一种幅宽自动控制清秸防堵装置,该装置能够实时监控清秸幅宽,其清秸率高,秸秆抛掷距离合理,工作性能稳定,作业后地表满足免耕播种作业要求。

(2)对清秸装置工作参数进行了理论分析,得出影响其作业性能的主要工作参数为清秸盘间距 L 、工作偏角 α 和工作倾角 β ,确定了各参数的取值范围为 $90\text{ mm} \leq L \leq 195\text{ mm}$ 、 $15^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ 、 $10^\circ \leq \beta \leq 25^\circ$ 。仿真试验表明,影响装置综合作业性能的主次因素顺序为:清秸盘间距、工作偏角和工作倾角,最优参数组合为 $L = 90\text{ mm}$ 、 $\alpha = 30^\circ$ 和 $\beta = 15^\circ$ 。

(3)运用 S 型压力传感器和电动直线推杆协同作用设计了幅宽自动控制系统,通过监控清秸盘对

地压力实时调节其作业幅宽。通过田间试验,得到了各速度水平下作业幅宽与作业阻力间的对应关系。

(4)田间试验表明,幅宽自动控制系统能够有效提高幅宽稳定性,幅宽稳定性系数提高了8.7个

百分点;该装置苗带清秸率为92.3%,秸秆横向移动最大距离为40.2 mm,幅宽稳定性系数为92.1%,具有较高的清秸作业质量,能够适应东北地区大秸秆覆盖量下的作业地况,清理的条带满足玉米种植作业的农艺要求。

参考文献

- [1] 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 CSAE, 2004, 20(1): 108-112. (in Chinese)
- [2] 王金武,唐汉,王金峰.东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J/OL].农业机械学报,2017,48(5):1-21. WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1-21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170501&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.001. (in Chinese)
- [3] 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. 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180401&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)
- [4] 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/OL].农业机械学报,2018,49(增刊):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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 132-140. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s018&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.018. (in Chinese)
- [5] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 212-219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2020s225&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.025. (in Chinese)
- [6] 贾洪雷,郭明卓,郭春江,等.免耕播种机动态仿生破茬装置设计与参数试验优化[J/OL].农业机械学报,2018,49(10):103-114. JIA Honglei, GUO Mingzhuo, GUO Chunjiang, et al. Design of dynamic bionic stubble cutting device and optimization test of parameters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 103-114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181012&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.012. (in Chinese)
- [7] CELIK A, ALTIKAT S, WAY R T. Strip tillage width effects on sunflower seed emergence and yield[J]. Soil Tillage Res., 2013, 131(4): 20-27.
- [8] BILEN S, CELIK A, ALTIKAT S. Effects of strip and full-width tillage on soil carbon IV oxide-carbon (CO₂-C) fluxes and on bacterial and fungal populations in sunflower[J]. Afr. J. Biotechnol., 2010, 9(38): 6312-6319.
- [9] JABRO J D, STEVENS W B, IVERSEN W M, et al. Bulk density, water content, and hydraulic properties of a sandy loam soil following conventional or strip tillage[J]. Appl. Eng. Agric., 2011, 27(5): 59-69.
- [10] RAOUFAT M H, MATBOOEI A. Row cleaners enhance reduced tillage planting of corn in Iran[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(1): 152-161.
- [11] VAITAUSKIENE K, ŠARAUSKIS E, ROMANECKAS K, et al. Design, development and field evaluation of row-cleaners for strip tillage in conservation farming [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 174: 139-146.
- [12] 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)
- [13] 林静,李宝筏,李宏哲.阿基米德螺旋型破茬开沟和切拨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] 贾洪雷,刘行,余海波,等.免耕播种机凹面爪式清茬机构仿真与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(11):68-77. JIA Honglei, LIU Hang, YU Haibo, et al. Simulation and experiment on stubble clearance mechanism with concave claw-type for no tillage planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 68-77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.008. (in Chinese)
- [15] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 68-77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190208&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.008. (in Chinese)
- [16] ANDEROTTI M, ENGINEERS A S O A. Terminology for soil-engaging components for conservation tillage planters, drills and seeders[S]. ASAE Standards 1996: Standards Engineering Practices Data, 1996.
- [17] FALLAHI S, RAOUFAT M. Row-crop planter attachments in a conservation tillage system: a comparative study[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(1): 27-34.
- [18] 苑严伟,白慧娟,方宪法,等.玉米播种与测控技术研究进展[J/OL].农业机械学报,2018,49(9):1-18. YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 1-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180901&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.001. (in Chinese)
- [19] 杨丽,颜丙新,张东兴,等.玉米精密播种技术研究进展[J/OL].农业机械学报,2016,47(11):38-48.

YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006. (in Chinese)

[20] 贾洪雷, 马成林, 李慧珍, 等. 基于美国保护性耕作分析的东北黑土区耕地保护[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 28-34.

JIA Honglei, MA Chenglin, LI Huizhen, et al. Tillage soil protection of black soil zone in northeast of China based on analysis of conservation tillage in the United States[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 28-34. (in Chinese)

[21] MCCARTHY J R, PFOST D L, CURRENCE H D. Conservation tillage and residue management to reduce soil erosion. Agricultural Publication G-1650[M]. Missouri: University of Missouri, 1993.

[22] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.

[23] 赵宏波, 何进, 郑智旗, 等. 少免耕播种机条带型行间侧抛清结防堵装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 24-34.

ZHAO Hongbo, HE Jin, ZHENG Zhiqi, et al. Strip tillage inter-row residue side-throwing device of no/minimum-till seeder for anti-blocking and seedbed-cleaning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 24-34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20201203&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.003. (in Chinese)

[24] 付卫强. 玉米免耕精密播种质量控制关键技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2019.

[25] 王金武, 唐汉, 王金峰, 等. 悬挂式水田单侧修筑埂机数值模拟分析与性能优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 72-80.

WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Numerical analysis and performance optimization experiment on hanging unilateral ridger for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 72-80. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170807&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.007. (in Chinese)

[26] 方会敏. 基于离散元法的秸秆-土壤-旋耕刀相互作用机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.

[27] 任露泉. 试验设计及其优化[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[28] 任露泉. 回归设计及其优化[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[29] 中国国家标准化管理委员会. 玉米免耕播种机作业质量: NY/T 1628—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[30] 中国国家标准化管理委员会. 免耕播种机质量评价技术规范: NY/T 1768—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[31] 中国国家标准化管理委员会. 旱地玉米机械化保护性耕作技术规范: NY/T 1409—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

[32] KUSHWAHA R L, VAISHNAV A S, ZOERB G C. Performance of powered-disc coulters under no-till crop residue in the soil bin[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1986, 28(2): 85-90.

[33] FIAZ A, DING Weimin, DING Qishou, et al. Comparative performance of various disc-type furrow openers in no-till paddy field conditions[J]. Sustainability, 2017, 9(7): 1143.

(上接第24页)

[17] 和贤桃, 郝永亮, 赵东岳, 等. 玉米精量排种器排种质量自动检测仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 19-27.

HE Xiantao, HAO Yongliang, ZHAO Dongyue, et al. Design and experiment of testing instrument for maize precision seed meter's performance detection[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 19-27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161003&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.003. (in Chinese)

[18] HAO Y, CUI T, BORA G, et al. Development of an instrument to measure planter seed meter performance[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2017, 33(1): 31-40.

[19] QI Jiangtao, JIA Honglei, YANG Li, et al. Design and test of fault monitoring system for corn precision planter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(6): 13-19.

[20] 纪超, 陈学庚, 陈金成, 等. 玉米免耕精量播种机排种质量监测系统[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 1-6.

Ji Chao, CHEN Xuegeng, CHEN Jincheng, et al. Monitoring system for working performance of no-tillage corn precision seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 1-6. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160801&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.001. (in Chinese)

[21] 贾洪雷, 路云, 齐江涛, 等. 光电传感器结合旋转编码器检测气吸式排种器吸种性能[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 28-39.

JIA Honglei, LU Yun, QI Jiangtao, et al. Detecting seed suction performance of air suction feeder by photoelectric sensor combined with rotary encoder[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 28-39. (in Chinese)

[22] 黄东岩, 朱龙图, 贾洪雷, 等. 基于GPS和GPRS的远程玉米排种质量监测系统[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 162-168.

HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Remote monitoring system for corn seeding quality based on GPS and GPRS[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 162-168. (in Chinese)

[23] 郭慧, 王刚, 赵佳乐, 等. 种子纵向分布均匀性指标及空间分布均匀性评价方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(3): 1120-1130.

GUO Hui, WANG Gang, ZHAO Jiale, et al. Seed longitudinal distribution uniformity index and seed spatial distribution uniformity evaluation method[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(3): 1120-1130. (in Chinese)

[24] YANG Lu, ZHANG Xiyi, CHEN Suying, et al. Increasing the planting uniformity improves the yield of summer maize[J]. Agronomy Journal, 2017, 109(4): 1463-1475.

[25] 杨硕, 王秀, 高原源, 等. 电动机驱动玉米气吸排种器总线控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 57-67.

YANG Shuo, WANG Xiu, GAO Yuanyuan, et al. Design and experiment of bus control system for corn vacuum seed meter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 57-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190207&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.007. (in Chinese)