doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.005

滴灌区宽窄行玉米免耕播种带秸秆清理装置设计与试验

袁盼盼[1,2]　李洪文[1]　蒋贵菊[3]　何　进[1]　卢彩云[1]　黄圣海[1]

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052;
3. 博乐市农业农村局, 博乐 833400)

摘要: 针对在滴灌区进行玉米免耕播种作业时,窄行内铺设的滴灌带与秸秆残茬易缠绕形成壅堵、影响播种机具通过性和作业质量等问题,提出适用于滴灌区宽窄行玉米免耕播种带的秸秆清理方法。设计了播种带秸秆残茬分区清理装置,该装置通过纵向错位布置拨草机构对播种带秸秆进行清理,对清理装置作业过程和秸秆抛撒轨迹进行了分析,确定了关键影响因素及参数取值范围;运用 EDEM 离散元仿真技术,以机具作业速度、入土深度和纵向间距为试验因素,以播种带秸秆清理率为评价指标进行了回归正交仿真试验,建立了响应面数学模型,并进行了参数优化和田间验证试验。结果表明,影响播种带秸秆清理率因素显著性由大到小依次为机具作业速度、纵向间距和入土深度;当作业速度为 9 km/h、纵向间距为 1 100 mm、入土深度为 45 mm 时,装置作业通过性良好,播种带秸秆残茬清理率均值为 87.61%,比模型优化理论值低 1.8 个百分点,播种带清理宽度为 508.0 ~ 540.4 mm,满足滴灌区玉米免耕播种的农艺要求。

关键词: 免耕播种; 滴灌玉米; 宽窄行; 秸秆残茬清理装置

中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)06-0043-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Straw Cleaning Device for Wide - Narrow Maize No-tillage Sowing Strip in Drip Irrigation Area

YUAN Panpan[1,2]　LI Hongwen[1]　JIANG Guiju[3]　HE Jin[1]　LU Caiyun[1]　HUANG Shenghai[1]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
3. *Agriculture and Rural Bureau of Bole*, *Bole* 833400, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of no-tillage maize planting in drip irrigation area, the drip irrigation tape in narrow row is easy to entangle with straw, which affects the trafficability of no-till planter. The straw partition cleaning method suitable for no-tillage wide - narrow row in drip irrigation area was put forward, and the device for cleaning straw in sowing strip was designed, which adopted longitudinal dislocation arrangement straw cleaning mechanism to clean up straw in sowing strip. Based on the theoretical analysis of the interaction law between the key components and straw, key influencing factors and value ranges were determined. Based on the EDEM discrete element simulation technology, the working speed, soil contacting depth and the longitudinal spacing were selected as the influencing factors, and straw cleaning rate was selected as the response value for three factors and three levels sub-regression orthogonal test design. The regression equations to describe the relationships between the factors and straw cleaning rate were established by using the regression analysis and response surface analysis with the software Design-Expert 10.0.7. The optimum combination of the selected parameters was obtained, and the field test verification was also conducted. The results showed that the significant effects of working speed, the longitudinal spacing and soil contacting depth on cleaning rate were in a decreasing order. While the working speed was at 9 km/h, the longitudinal spacing was 1 100 mm and soil contacting depth was 45 mm, straw cleaning rate of the device was 87.61%, which was 1.8 percentage points lower than the theoretical value of model optimization. The cleaning width of sowing strip was ranged from 508.0 mm to 540.4 mm.

Key words: no-tillage sowing; drip irrigation maize; wide - narrow row; straw and stubble cleaning device

收稿日期: 2020 - 12 - 25　修回日期: 2021 - 02 - 23

基金项目: 现代农业产业技术体系建设项目(CARS - 03)和新疆维吾尔自治区科技特派员农村科技创业行动项目(2021259)

作者简介: 袁盼盼(1989—),女,博士生,新疆农业大学讲师,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: ypp_xnd@163.com

通信作者: 李洪文(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: lhwen@cau.edu.cn

0 引言

滴灌区玉米免耕种植采用宽行和窄行相间排列的方式,这种方式通风、透光性较好[1-2],且将保护性耕作技术、滴灌和宽窄行种植模式相结合,利用水肥一体化管理,实现了节本增效。滴灌区进行玉米免耕播种时,不仅需清理播种带上秸秆残茬,同时还需在窄行内铺设滴灌带,而滴灌带与秸秆易缠绕形成壅堵。为减少蒸发,需在少动土的前提下铺设滴灌。因此,为满足滴灌区玉米免耕播种农艺要求,亟需开发适用于滴灌区的玉米免耕播种带秸秆清理装置。

国内外学者在免耕播种带秸秆清理方面进行了大量研究[3-6],其方法主要是将播种带上的秸秆残茬切断或移位,以清理出无秸秆覆盖的洁净播种区[7-11]。切断清理主要利用带刃口的切刀将秸秆或根茬切断,以防止秸秆缠绕或壅堵。SHARMA[12]利用动力圆盘耙切断秸秆,在秸秆量小且韧性低的区域秸秆清理效果较好;王庆杰等[13]利用旋转式缺口圆盘刀进行切茬;黄玉祥等[14]提出驱动切茬和被动导草思路,将秸秆切割、拨抛和引导分流;林静等[15]基于阿基米德螺线刃口设计了缺口圆盘破茬刀,与清茬盘配合进行清茬、防堵;贾洪雷等[16]利用组合刀片式被动切茬,只切断秸秆不处理根茬。移位清理主要采用拨、抛、扫等方式将秸秆清理至播种带侧方,以保证机具作业时的通过性。TORBERT 等[17]利用两根聚乙烯软管推动播种带上的秸秆,通过拨草轮将秸秆拨离播种带;SHARIPOV 等[18]利用滑靴式分草开沟器,通过传感器识别地表凸起轮廓信息,从而实现动态防堵;张喜瑞等[19-20]采用驱动拨指链式和水平拨草轮式两种清理方法,将秸秆移位、纵向分离;陈海涛等[21]采用残茬侧向抛出的秸秆清理方式,将秸秆抛撒至播种带侧方;王韦韦等[22]利用交叉对偶立式刀片,将待播区地表的秸秆沿回转刀尖切线方向旋转扰动至播种区的一侧。

目前,针对滴灌区宽窄行玉米免耕播种带秸秆残茬清理的研究较少。滴灌区玉米窄行中间铺设滴灌带,若按照常规技术将播种带秸秆残茬分别拨向宽行和窄行,则由于窄行内空间小、秸秆流动性差,滴灌带与秸秆残茬易缠绕形成壅堵,从而导致滴灌带无法正常铺设,影响播种机具的通过性和作业质量。本文针对滴灌区宽窄行玉米免耕播种模式,提出一种免耕播种带秸秆残茬分区清理方法,将窄行内秸秆残茬移位至相邻的宽行中,为滴灌带铺设提供良好的作业环境,设计播种带秸秆残茬清理装置,并对其作业过程进行分析,利用离散元仿真和正交旋转回归试验获取最优参数组合,通过田间试验验证装置的作业性能。

1 玉米免耕播种带秸秆残茬清理方法

新疆地区玉米为一年一熟,播种方式采用铺膜播种、直播播种(不铺膜,翻耕播种)和免耕播种。3 种播种方式均采用滴灌宽窄行模式,滴灌带铺设在窄行中间,其中玉米铺膜播种、直播播种宽窄行为(700 + 300) mm,玉米免耕播种宽窄行为(600 + 400)mm,其播种带宽度一般大于 480 mm,满足滴灌区玉米免耕播种环境要求。

图 1 为宽窄行玉米免耕播种常规清理秸秆残茬的覆盖方式,将播种带秸秆残茬清理移位至播种行两侧,裸露出播种行,清理后在宽行和窄行内均覆盖有秸秆。但对于滴灌区免耕玉米,若按照常规宽窄行免耕播种带秸秆残茬清理方式,清理后窄行内存在秸秆,滴灌带在铺设时,滴灌带与窄行内秸秆残茬易产生缠绕,形成雍堵,在外力作用下,滴灌带甚至产生断裂,导致无法顺利完成滴灌管铺设作业。

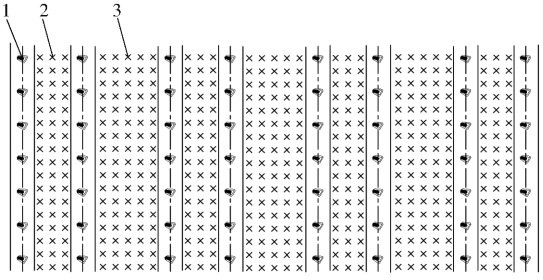

图 1 宽窄行玉米免耕播种常规清理秸秆的覆盖方式

Fig. 1 Straw mulching after conventional cleaning in no-tillage sowing of wide - narrow row maize

1. 玉米种子 2. 秸秆覆盖窄行 3. 秸秆覆盖宽行

针对滴灌区玉米免耕播种带秸秆残茬清理,要求清理后播种行和窄行内都无秸秆覆盖,提出了一种适用于滴灌区宽窄行玉米免耕播种带秸秆残茬分区清理方式,如图 2 所示,宽行间距 $L_1 = 600$ mm,窄行间距 $L_2 = 400$ mm,将窄行内秸秆残茬分为中间区和两侧边区,L_3 为播种带清理总宽度,$L_3 > L_2$,L_4 为中间区清理宽度,L_5 为左侧边区清理宽度,L_6 为右侧边区清理宽度,L_7 为中间区清理宽度 L_4 和左、右侧边区 L_5、L_6 的重叠宽度,重叠区域可防止中间区和两侧边区交接处有漏清洁区域。滴灌带铺设在窄行中间,清理的秸秆均在宽行内。

2 整体结构与工作原理

如图 3 所示,滴灌玉米宽窄行免耕播种带秸秆残茬分区清理装置主要由前置双侧拨草机构、机架、

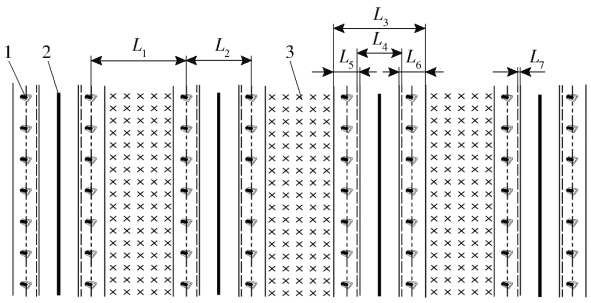

图 2　滴灌区宽窄行玉米免耕种带秸秆残茬清理要求

Fig. 2　No-tillage cleaning requirement of straw and stubble in wide－narrow row maize in drip irrigation area

1. 玉米种子　2. 滴灌带　3. 玉米秸秆

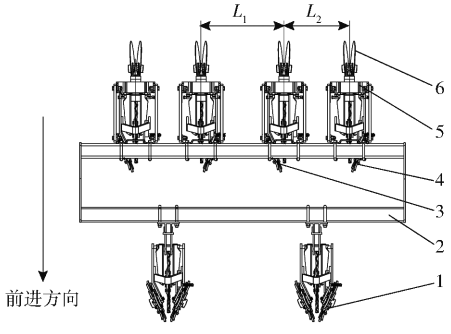

图 3　滴灌玉米免耕播种带秸秆残茬分区清理装置简图

Fig. 3　Diagram of straw and stubble cleaning device in no-tillage wide－narrow row for drip irrigation maize

1. 前置双侧拨草机构　2. 机架　3. 单右侧拨草机构　4. 单左侧拨草机构　5. 四杆仿形机构　6. 双圆盘开沟器

单右侧拨草机构、单左侧拨草机构、四杆仿形机构和双圆盘开沟器等组成。沿着机具前进方向，前置双侧拨草机构设置在机架前方，位于窄行的中间。后方拨草机构仅设置左、右单侧拨草轮，单右侧拨草机构和单左侧拨草机构均通过四杆仿形机构设置于机架的后方，在窄行的外侧。播种带秸秆残茬分区清理装置主要参数如表 1 所示。

表 1　滴灌玉米免耕播种带秸秆残茬分区清理装置主要参数

Tab. 1　Major parameters of straw and stubble cleaning device for drip irrigation maize

参数	数值
开沟播种行数	4
配套动力/kW	≥55
作业速度/(km·h^{-1})	4～10
适用模式/mm	600(宽行)+400(窄行)

免耕宽窄行播种带秸秆残茬单组清理装置轴测图如图 4 所示，播种带秸秆残茬单组分区清理装置由前置双侧拨草机构和对应的左、右单外侧拨草机构组成，前置双侧拨草机构与后方单外侧拨草机构沿机具前进方向纵向间距设置要求满足秸秆残茬在纵向方向的流动性。

图 5 为播种带秸秆残茬分区清理工作过程示意

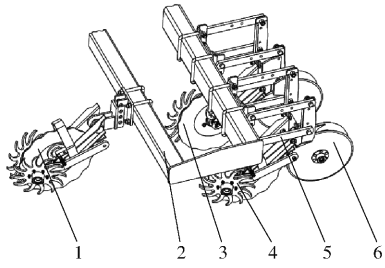

图 4　单组清理装置轴测图

Fig. 4　Axonometric drawing of of single group straw cleaning device

1. 前置双侧拨草机构　2. 机架　3. 单右侧拨草机构　4. 单左侧拨草机构　5. 四杆仿形机构　6. 双圆盘开沟器

图，L 为前后拨草轮沿机具前进方向的纵向间距，工作时，前置双侧拨草机构中波纹圆盘刀将玉米秸秆及根茬切断，拨草轮清理出无秸秆的中间区，由中间区清理出的秸秆残茬被抛送至两边侧边区(左侧边区和右侧边区)中，即窄行中间区播种带清理宽度为图 2、5 中的 L_4。后方单右侧拨草机构和单左侧拨草机构分别对右侧边区和左侧边区秸秆进行清理，清理出无秸秆的侧边区，左侧边区和右侧边区的秸秆分别被二次移位拨至相邻宽行中，最终播种带单组清理装置清理出的洁净种带宽度为图 2、5 中的 L_3。双圆盘开沟器在洁净播种带上进行开沟，滴灌带铺设在窄行中间。

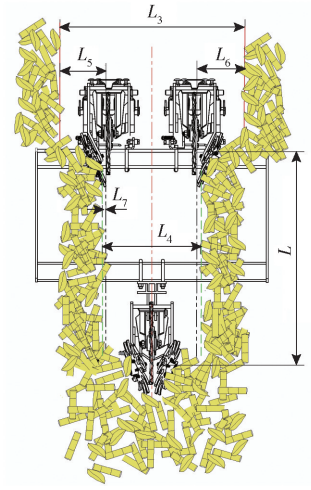

图 5　单组播种带秸秆残茬清理工作过程示意图

Fig. 5　Working process of single group sowing strip straw and stubble cleaning

根据上述单组播种带秸秆残茬清理工作过程，滴灌玉米播种带秸秆残茬清理流动方向如图 6 所示，虚线箭头代表中间区秸秆残茬流动方向，实线箭头代表两侧边区秸秆残茬流动方向。首先，虚线箭头代表的中间区秸秆残茬被移位拨至两侧边，其次，左、右两侧边的秸秆(中间区被移位过来的秸秆和侧边原有秸秆)分别按照实线箭头方向被二次移位拨至相邻宽行中，窄行内无秸秆，且清理的种带宽度

大于窄行宽度,为顺利完成播种和滴灌带铺设提供良好的作业环境。

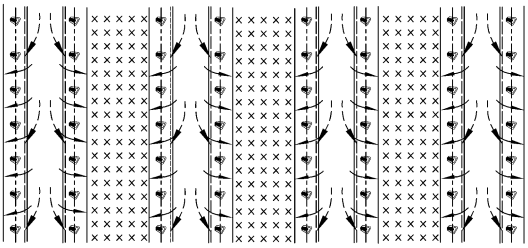

图 6 滴灌玉米播种带秸秆残茬清理流动方向

Fig. 6 Flow direction of straw and stubble cleaning for drip irrigation maize

3 关键部件理论分析

3.1 轮齿运动轨迹分析

拨草轮在拖拉机的牵引下沿着机具前进方向运动,拨草轮的轮齿与地表秸秆、土壤接触产生摩擦力,拨草轮的轮齿在拖拉机牵引力和土壤反力的耦合作用下,绕定轴进行被动的旋转运动,旋转方向与机具前进方向一致,旋转的拨草轮轮齿捡拾起地表秸秆并向侧后方向抛出,裸露出地表土壤,形成洁净的播种带。

拨草轮绕刀轴转动的同时随机具匀速前进,因此轮齿上任一点的绝对运动是旋转运动和机具前进运动的合成[23],如图 7 中红色标注的曲线,其运动轨迹为摆线,轮齿将秸秆抛撒至播种带两侧。以轮齿旋转中心为原点建立平面坐标系,x 轴正向与机具前进方向一致,z 轴垂直向上。

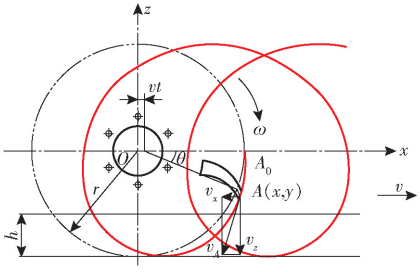

图 7 拨草轮轮齿工作端点运动轨迹

Fig. 7 Motion trajectory of endpoint on teeth of straw wheel

对轮齿上任一端点 A 的运动进行分析,如图 7 所示,开始时轮齿端点位于前方水平位置 A_0 处,与 x 轴正向重合,轮齿端点的运动方程为

$$\begin{cases} x = r\cos\theta + vt \\ z = -r\sin\theta \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$\theta = \omega t \tag{2}$$

式中 x——x 轴方向上位移,mm

z——z 轴方向上位移,mm

r——拨草轮回转半径,mm

θ——轮齿转动角,rad

ω——拨草轮运动角速度,rad/s

v——机具前进速度,km/h

t——时间,s

当 $t=0$ 时,端点 A 与 x 轴重合为 A_0 点。

将式(1)对时间求导数,可得轮齿端点 A 在 x 轴和 z 轴方向的分速度为

$$\begin{cases} v_x = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = v - r\omega\sin(\omega t) \\ v_z = \dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} = -r\omega\cos(\omega t) \end{cases} \tag{3}$$

轮齿端点 A 绝对运动速度 v_A 为

$$v_A = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} = \sqrt{v^2 - 2vr\omega\sin(\omega t) + (r\omega)^2} \tag{4}$$

根据图 7 及拨草轮结构可知

$$\sin(\omega t) = \frac{r-h}{r} = 1 - \frac{h}{r} \tag{5}$$

式中 h——拨草轮入土深度,mm

由式(4)、(5)可知,影响拨草轮轮齿端点绝对运动速度主要结构参数有:机具前进速度 v、拨草轮齿入土深度 h、回转半径 r 及角速度 ω。根据现有常用拨草轮齿的结构参数及免耕播种农艺要求[24],选取拨草轮回转半径为 320 mm、工作偏角为 30°,拨草轮转速和机具前进速度成正比。

3.2 轮齿抛撒秸秆运动学分析

拨草轮将地表覆盖的秸秆切断、破碎,并抛向侧后方,为研究拨草轮轮齿抛撒秸秆的运动轨迹及规律,对拨草轮轮齿抛撒秸秆的瞬时运动进行分析。将秸秆简化为一个质点,拨草轮为匀速运动,忽略空气阻力和秸秆间的相互碰撞[14,25],拨草轮的轮齿抛撒秸秆过程如图 8 所示。

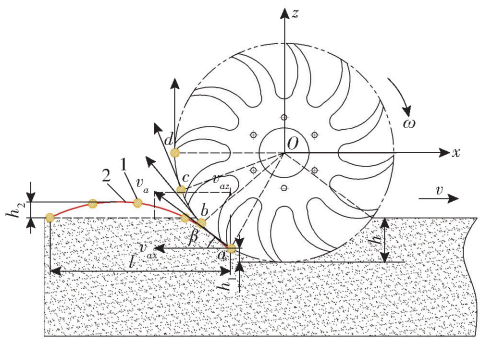

图 8 玉米秸秆抛撒过程运动学分析

Fig. 8 Kinematics analysis of maize straw scattering process

1. 玉米秸秆 2. 秸秆抛撒轨迹

点 a 为玉米秸秆与拨草轮轮齿脱离的临界点,拨草轮齿从点 a 运动到点 d 的过程中,玉米秸秆沿轮齿向外滑移,拨草轮轮齿将玉米秸秆拨抛至侧后方。点 a 为玉米秸秆被抛撒的起始点,则玉米秸秆在点 a 被抛撒瞬时速度 v_a 为

$$v_a = \omega r \tag{6}$$

玉米秸秆在点 a 被抛撒瞬时速度 v_a 在 x 轴方向分速度为 v_{ax}，在 z 轴方向分速度为 v_{az}，由式(6)可得

$$\begin{cases} v_{ax} = v_a\cos\beta = \omega(r - h_1) \\ v_{az} = v_a\sin\beta = \omega\sqrt{2rh_1 - h_1^2} \end{cases} \tag{7}$$

式中　β——玉米秸秆被抛撒瞬时方向与水平方向的夹角，(°)

h_1——玉米秸秆被抛撒起始点与沟底的垂直距离，mm

玉米秸秆脱离拨草轮的轮齿被抛出后做抛物线运动，其运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x_a = -\sqrt{2rh_1 - h_1^2} - (r - h_1)\omega t\sin\alpha \\ y_a = r\omega t\cos\alpha \\ z_a = h_1 - r + \sqrt{2rh_1 - h_1^2}\omega t - \dfrac{gt^2}{2} \end{cases} \tag{8}$$

式中　x_a——玉米秸秆在 x 轴方向抛出距离，mm

y_a——玉米秸秆在 y 轴方向抛出距离，mm

z_a——玉米秸秆在 z 轴方向抛出距离，mm

α——拨草轮工作偏角，(°)

根据式(8)可得拨草轮齿将秸秆水平向后的抛撒最大距离 l 为

$$l = \frac{2v_a^2\sin\beta\cos\beta}{g}\cos\alpha = \frac{2\omega^2(r - h_1)\sqrt{2rh_1 - h_1^2}}{g}\cos\alpha \tag{9}$$

式中　g——重力加速度，m/s^2

玉米秸秆在水平面内垂直于机组前进方向的侧向最大抛撒距离为

$$L_5 = L_6 = \frac{L_4}{2} = l\tan\alpha = \frac{2\omega^2(r - h_1)\sqrt{2rh_1 - h_1^2}}{g}\sin\alpha \tag{10}$$

同理计算可得，玉米秸秆在垂直方向的最大抛撒高度 h_2 为

$$h_2 = \frac{(v_a\sin\beta)^2}{2g} = \frac{\omega^2(rh_1 - h_1^2)}{2g} \tag{11}$$

拨草轮轮齿从点 a 运动到点 d 的过程中，不断对秸秆进行抛撒，在此过程中，秸秆抛撒速度 v_a 大小相同，方向不同。当拨草轮齿运动到点 d 时，$v_{ax}=0$，秸秆不再被向外侧抛撒。由式(9)～(11)可知，秸秆在水平向后、侧向和垂直方向的抛撒距离随 v_a 方向的变化而改变，当 $\beta=45°$ 时，抛撒距离最大。影响抛撒距离的因素主要有：拨草轮转速、半径和入土深度。若机具作业速度取 6～10 km/h，并将工作偏角 α 取 30°，代入式(9)～(11)，可得秸秆水平向后的最大抛撒距离为 246.4～682.7 mm，水平面内向侧向最大抛撒距离为 142.2～393.9 mm，秸秆在垂直方向最大抛撒高度为 71.1～197.1 mm。

4　离散元仿真试验

运用离散元仿真软件 EDEM 建立滴灌免耕播种带秸秆清理装置-玉米秸秆-土壤间的互作模型，对播种带秸秆清理装置在田间实际作业工况进行模拟，以播种带秸秆清理率为评价指标，分析影响播种带秸秆清理装置作业性能的主要影响因素，寻求播种带秸秆清理装置最优结构和工作参数组合，为后续田间的验证试验提供参数依据。

4.1　仿真模型建立

运用三维制图软件 SolidWorks 创建播种带秸秆清理装置 1∶1 比例实体模型，简化处理装置模型，去除与工作过程无关的零部件，以. igs格式导入 EDEM 中 Geometry 项中。设置秸秆清理装置的材质属性为 45 号钢，密度为 7 800 kg/m^3，泊松比为 0.31，剪切模量为 7.0×10^{10} Pa。

综合考虑计算能力和仿真效率，选半径为 5 mm 的球形颗粒作为土壤颗粒，土壤颗粒间力学关系模型选用 Hertz－Mindlin with bonding 接触模型[26]，土壤密度为 1 850 kg/m^3，泊松比为 0.38，剪切模量为 1.0×10^6 Pa；结合田间秸秆的实际情况，采用由直径 16 mm 的球形颗粒、球心间隔 4 mm，组成长度为 88 mm 的长线性模型作为秸秆颗粒模型，并在此基础上设置 3 组不同尺寸秸秆，秸秆模型的力学关系模型选用 Hertz－Mindlin 无滑动接触模型，秸秆密度为 240 kg/m^3，泊松比为 0.4，剪切模量为 1.0×10^6 Pa，离散元仿真基本接触参数[27-29]如表 2 所示。

表 2　离散元仿真基本接触参数

Tab. 2　Basic contact parameters of discrete element simulation model

参数	数值
土壤-土壤滚动摩擦因数	0.31
土壤-土壤静摩擦因数	0.40
土壤-土壤恢复系数	0.20
土壤-钢铁滚动摩擦因数	0.04
土壤-钢铁静摩擦因数	0.50
土壤-钢铁恢复系数	0.30
秸秆-钢铁滚动摩擦因数	0.01
秸秆-钢铁静摩擦因数	0.30
秸秆-钢铁恢复系数	0.30

根据滴灌玉米免耕播种作业要求、宽窄行播种带秸秆清理装置的工作幅宽，结合滴灌区玉米春播前田间秸秆覆盖情况，在 EDEM 中建立适用于滴灌玉米免耕播种带清理装置的虚拟土槽，设定土槽的基本尺寸(长×宽×高)为 2 200 mm×1 200 mm×

120 mm,土壤层厚度为 80 mm,秸秆层厚度为 40 mm。土壤颗粒生成后,在重力作用下自然沉降,使仿真与实际土壤尽量保持一致;秸秆颗粒在重力作用下自然沉降,建立的虚拟土槽模型如图 9 所示。

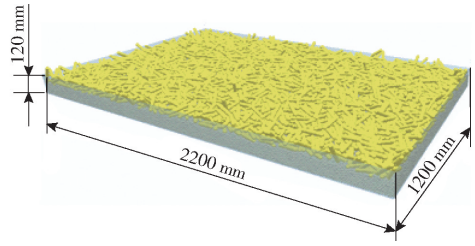

图 9 虚拟土槽模型

Fig. 9 Virtual soil bench model

4.2 仿真作业过程

设置播种带秸秆清理装置位于土槽的一端进行初始作业,在播种带秸秆清理装置作业过程中,为保证土壤及秸秆颗粒运动的连续性,设定仿真总时间为 2.0 s,网格尺寸设置为最小土壤颗粒尺寸的 2.5 倍。仿真作业过程如图 10 所示。

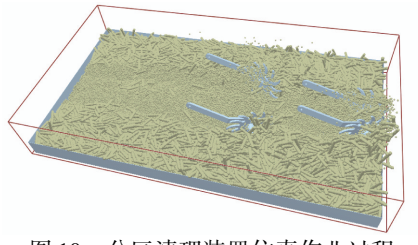

图 10 分区清理装置仿真作业过程

Fig. 10 Simulation operation process of partition cleaning device

4.3 试验设计

根据理论分析结果,选取作业速度、入土深度为试验因素,因清理装置采用纵向错位布置拨草机构对播种带秸秆进行清理,前后拨草机构的纵向间距是影响秸秆流动性的重要因素,因此,以作业速度、入土深度、纵向间距为试验因素,以播种带秸秆清理率为试验指标,采用 Box - Behnken 方法,试验因素及编码如表 3 所示。

表 3 试验因素与编码

Tab. 3 Test factors and coding

编码	因素		
	机具作业速度 x_1/(km·h^{-1})	入土深度 x_2/mm	纵向间距 x_3/mm
-1	6	40	800
0	8	50	1 000
1	10	60	1 200

利用 EDEM 软件 Analyst 选项中的 Selection 模块,提取作业前后网格区域内的秸秆数量变化,如图 11 所示,试验结果如表 4 所示(X_1、X_2、X_3 为因素编码值)。

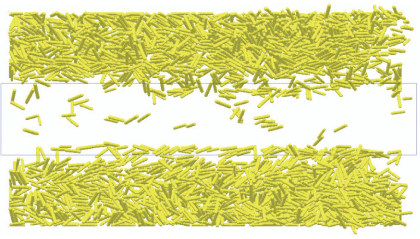

图 11 播种带秸秆清理效果测试区域

Fig. 11 Test area of sowing strip straw cleaning

4.4 试验结果与分析

根据表 4 中的试验数据,利用 Design-Expert 10.0.7 软件对播种带秸秆清理试验结果进行二次回归分析,建立秸秆清理率对机具作业速度、入土深度、纵向间距的二次响应面回归模型

$$y = 88.39 + 1.92X_1 + 0.18X_2 + 1.73X_3 + 0.41X_1X_2 - 0.68X_2X_3 + 0.57X_1^2 - 2.50X_2^2 - 2.16X_3^2 \quad (12)$$

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Experimental design and results

序号	因素			秸秆清理率 y/%
	机具作业速度 X_1	入土深度 X_2	纵向间距 X_3	
1	-1	-1	0	84.72
2	1	-1	0	87.71
3	-1	1	0	84.39
4	1	1	0	89.02
5	-1	0	-1	83.43
6	1	0	-1	87.03
7	-1	0	1	86.31
8	1	0	1	90.45
9	0	-1	-1	81.05
10	0	1	-1	82.64
11	0	-1	1	86.17
12	0	1	1	85.06
13	0	0	0	88.47
14	0	0	0	88.42
15	0	0	0	88.15
16	0	0	0	88.47
17	0	0	0	88.43

表 5 为显著性方差分析结果,回归模型中秸秆清理率 y 模型 $P < 0.01$,则表明回归模型极显著,X_1、X_3、X_1X_2、X_2X_3、X_1^2、X_2^2、X_3^2 影响极显著;X_2 影响显著($P < 0.05$);X_1X_3 影响不显著;3 个因素对秸秆清理率显著性由大到小为 X_1、X_3、X_2,即机具作业速度、纵向间距和入土深度;失拟项检验 $P > 0.1$,说明回归方程拟合度高,不存在其他因素与试验指标间具有显著的二次关系。

图 12a 为播种带秸秆清理率对作业速度和入土深度交互因素的响应曲面,当作业速度一定时,播

表 5　秸秆清理率方差分析

Tab. 5　Variance analysis of straw cleaning rate

变异来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	105. 14	9	11. 68	274. 30	<0. 000 1 ***
X_1	29. 49	1	29. 49	692. 44	<0. 000 1 ***
X_2	0. 27	1	0. 27	6. 26	0. 040 9 **
X_3	23. 94	1	23. 94	562. 18	<0. 000 1 ***
X_1X_2	0. 67	1	0. 67	15. 79	0. 005 4 ***
X_1X_3	0. 073	1	0. 073	1. 71	0. 232 1
X_2X_3	1. 82	1	1. 82	42. 79	0. 000 3 ***
X_1^2	1. 38	1	1. 38	35. 52	0. 000 7 ***
X_2^2	26. 35	1	26. 35	618. 63	<0. 000 1 ***
X_3^2	19. 58	1	19. 58	459. 76	<0. 000 1 ***
残差	0. 30	7	0. 043		
失拟项	0. 23	3	0. 075	4. 12	0. 102 5
误差	0. 073	4	0. 018		
总和	105. 44	16			

注：*** 表示极显著（$P<0.01$）；** 表示显著（$0.01<P<0.05$）。

种带秸秆清理率随入土深度的增大呈先增大后减小的趋势；当入土深度一定时，播种带秸秆清理率随作业速度的增大呈增大趋势。图 12b 为播种带秸秆清理率对纵向间距和入土深度的响应曲面，当纵向间距一定时，播种带秸秆清理率随入土深度的增大呈先增大后减小的趋势；当入土深度一定时，播种带秸秆清理率随纵向间距的增大呈先增大后趋于稳定趋势。原因为拨草轮是被动转动，当机具作业速度增大，拨草轮的转速提高，播种带清理率提高；拨草轮

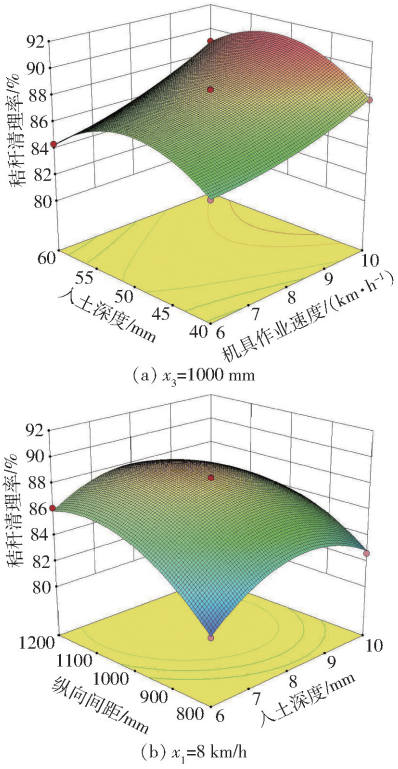

图 12　各因素交互作用对秸秆清理率影响的响应曲面

Fig. 12　Response surface of various factors interation on straw cleaning rate

前后布置纵向间距增大，秸秆流动空间增大，流动性增强，当纵向间距满足秸秆流动性的要求后，纵向间距继续增大，对秸秆清理率影响不大，且会增加整机纵向尺寸。

4. 5　参数优化

为获取播种带秸秆清理装置最优结构参数组合，对播种带秸秆清理率回归模型进行优化求解，利用 Optimization（最优化）模块，以播种带秸秆清理率最大为优化目标，建立目标函数为

$$\begin{cases} \max\ y(x_1,x_2,x_3) \\ 6\ \text{km/h} \leqslant x_1 \leqslant 10\ \text{km/h} \\ 40\ \text{mm} \leqslant x_2 \leqslant 60\ \text{mm} \\ 800\ \text{mm} \leqslant x_3 \leqslant 1\ 200\ \text{mm} \end{cases} \tag{13}$$

优化后最优参数组合：机具作业速度 9. 17 km/h、入土深度 45. 02 mm、前后拨草轮纵向间距 1 091. 32 mm，此时播种带秸秆清理率为 89. 41%，仿真试验优化的最优结构和工作参数组合为后续田间试验提供依据。

5　田间试验

5. 1　试验条件

于 2020 年 4 月 11—20 日，在新疆博乐市青得里镇中国农业大学国家保护性耕作研究院试验基地进行田间验证试验，北纬 44°56′25″，东经 81°59′48″，试验地为 2019 年秋季使用玉米收获机收获后的玉米茬地，秸秆未粉碎，秸秆覆盖量为 1. 72 kg/m^2，秸秆长度主要集中在 110 ~ 750 mm 范围内，秸秆覆盖率为 86. 53%，土壤坚实度为 1 427 kPa，播种前地块条件如图 13 所示。



图 13　作业前地表秸秆

Fig. 13　Surface straw before operation

5. 2　试验指标与方法

5. 2. 1　机具通过性

根据 NY/T 1768—2009《免耕播种机质量评价技术规范》性能试验要求，以正常的作业速度，在长度 60 m 的测试区内，往返一个行程，观察记录作业过程中机具堵塞和停机处理堵塞的次数，未发生堵塞或一次轻度堵塞为合格。

5.2.2 播种带秸秆清理率

试验作业前,测量单位长度播种带宽度内的秸秆及杂草质量,作业结束后,使用电子天平测量作业后播种带上残余的秸秆及杂草质量,测量点为稳定工作区内间隔为 1 m 的连续 10 个测点的数据,取平均值。计算得分区清理装置的播种带秸秆清理率为

$$c = \frac{m - m_1}{m} \times 100\% \tag{14}$$

式中 c——播种带秸秆清理率,%

m——作业前播种带秸秆及杂草总质量,kg

m_1——作业后播种带残余秸秆及杂草的质量,kg

5.2.3 播种带清理宽度

试验作业后,使用钢尺测量播种带的清理宽度,测点与播种带秸秆清理率的测点相同。

将滴灌区宽窄行玉米免耕播种带秸秆分区清理装置安装在 2BMG-4 型牵引式免耕精量播种机上,田间试验现场如图 14 所示。



图 14 田间验证试验现场

Fig. 14 Field verification test scene

5.3 试验结果与分析

根据优化后仿真结果,在作业速度为 9 km/h,前后拨草轮纵向间距为 1 100 mm、入土深度 45 mm 时,秸秆在纵向上流动性较好,机具作业顺畅,未发生堵塞现象,机具通过性良好。

作业后播种带秸秆清理效果如图 15 所示,播种带秸秆清理田间试验结果如表 6 所示。



图 15 播种带分区清理作业后效果

Fig. 15 Effect of sowing strip after partition cleaning

由表 6 可知,滴灌区玉米播种带秸秆残茬分区清理装置的平均清理率为 87.61%,比模型优化理论值低 1.8 个百分点,播种带清理宽度为 508.0 ~ 540.4 mm,大于播种带播种宽度 480 mm,且播种带内无漏清区域,则前置双侧拨草机构与后方单外侧拨草机构配置方式、间距设置合理,为滴灌带铺设及播种提供了良好的环境。田间验证试验结果表明,滴灌区玉米免耕播种带秸秆残茬分区清理装置作业性能稳定,未发生堵塞现象,机具通过性良好,作业后的播种带环境满足滴灌区玉米免耕播种及铺设滴灌带的农艺要求。

表 6 播种带秸秆清理田间试验结果

Tab. 6 Field test results of straw cleaning effect of sowing belt

序号	播种带秸秆清理率/%	播种带清理宽度/mm
1	89.26	523.7
2	85.71	515.4
3	90.37	531.3
4	85.52	526.9
5	88.34	508.0
6	86.58	521.3
7	91.34	517.5
8	84.72	512.2
9	87.84	535.9
10	86.44	540.4
平均值	87.61	523.3

通过与离散元仿真试验结果对比可知,田间播种带秸秆残茬清理率与仿真试验优化结果相比略低,产生误差的原因是仿真环境较理想,而田间实际作业工况较仿真环境复杂多变,不可控因素较多,秸秆长度不一,秸秆覆盖量、土壤含水率不同,上茬作物秋季收获时轮胎压实致地表不平整等,从而降低了播种带秸秆残茬清理率。

6 结论

(1)提出了适用于滴灌区宽窄行玉米免耕播种带的清理方法,设计的清理装置通过纵向错位布置拨草机构对播种带秸秆残茬进行清理,将窄行内秸秆残茬均移位至相邻的宽行中,从而避免滴灌带铺设时与秸秆缠绕形成壅堵。

(2)采用旋转正交试验方法,通过 EDEM 仿真试验获得影响播种带秸秆残茬清理率的因素显著性由大到小为机具作业速度、纵向间距和入土深度。

(3)田间试验表明,当作业速度为 9 km/h、纵向间距为 1 100 mm、入土深度 45 mm 时,该装置的作业通过性良好,播种带秸秆清理率均值为 87.61%,比模型优化理论值低 1.8 个百分点,播种带清理宽度为 508.0 ~ 540.4 mm,满足滴灌区玉米免耕播种的农艺要求。

参 考 文 献

[1] 王静静,贺洪军,张自坤,等. 宽行窄幅错位密播种植方式对夏玉米光合特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(3): 65 - 72,79.
WANG Jingjing, HE Hongjun, ZHANG Zikun, et al. Effects of wide - narrow row interlaced thick-planting pattern on photosynthetic characteristic and yield in summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(3): 65 - 72, 79. (in Chinese)

[2] 楚杰,路海东,薛吉全,等. 玉米宽窄行深旋免耕精量播种机田间试验及效果[J]. 农业工程学报,2014,30(14):34 - 41.
CHU Jie, LU Haidong, XUE Jiquan, et al. Field experiment and effect of precise mechanical sowing of maize based on wide - narrow row deep rotation and no-tillage technology[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(14): 34 - 41. (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? flag=1&file_no=20180401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)

[4] 陈海涛,侯磊,侯守印,等. 大垄玉米原茬地免耕播种机防堵装置设计与优化试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(8):59 - 67.
CHEN Haitao, HOU Lei, HOU Shouyin, et al. Design and optimization experiment of anti-blocking mechanism of no-tillage planter for grand ridge with raw corn stubble[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8):59 - 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180807&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.007. (in Chinese)

[5] 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.

[6] FALLAHI S, RAPUFAT M H. Row-crop planter attachments in a conservation tillage system: a comparative study[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(1): 27 - 34.

[7] 侯守印,陈海涛,邹震,等. 原茬地种床整备侧向滑切清秸刀齿设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(6):41 - 51,217.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 41 - 51, 217. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190605&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.005. (in Chinese)

[8] 牛萌萌,方会敏,CHANDIO F A,等. 秸秆分拨引导式玉米免耕防堵机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):52 - 58.
NIU Mengmeng, FANG Huimin, CHANDIO F A, et al. Design and experiment of separating-guiding anti-blocking mechanism for no-tillage maize planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 52 - 58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190806&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.006. (in Chinese)

[9] 卢彩云,赵春江,孟志军,等. 基于滑板压秆旋切式防堵装置的秸秆摩擦特性研究[J]. 农业工程学报,2016,32(11):83 - 89.
LU Caiyun, ZHAO Chunjiang, MENG Zhijun, et al. Straw friction characteristic based on rotary cutting anti-blocking device with slide plate pressing straw[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 83 - 89. (in Chinese)

[10] 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)

[11] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 58 - 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190407&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.007. (in Chinese)

[12] SHARMA V K. Development and performance evaluation of a multi-toolbar no-till seed drill for surface managed loose straw conditions after combining[D]. Pantnagar: G B Pant University of Agriculture and Technology, 2014.

[13] 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)

[14] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for

Agricultural Machinery, 2020, 51(5):67 - 78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200507&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.007. (in Chinese)
[15] 林静,李宝筏,李宏哲. 阿基米德螺线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)
[16] 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)
[17] TORBERT H A, INGRAM J T, PRIOR S A. Planter aid for heavy residue conservation tillage systems[J]. Agronomy Journal, 2007,99(2): 478 - 480.
[18] SHARIPOV G M, PARAFOROD D S, PULATOV A S, et al. Dynamic performance of a no-till seeding assembly[J]. Biosystems Engineering,2017,158: 75 - 94.
[19] 张喜瑞,何进,李洪文,等. 小麦免耕播种机驱动链式防堵装置设计[J]. 农业机械学报,2009,40(10):44 - 48.
ZHANG Xirui, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design of the powered-chain anti-blocking mechanism for wheat no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(10):44 - 48. (in Chinese)
[20] 张喜瑞,何进,李洪文,等. 水平拨草轮式玉米免耕播种机设计和试验[J]. 农业机械学报,2010,41(12):39 - 43.
ZHANG Xirui, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on no-till planter in horizontal residue-throwing finger-wheel type for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(12):39 - 43. (in Chinese)
[21] 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.
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. 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. (in Chinese)
[22] 王韦韦,朱存玺,陈黎卿,等. 玉米免耕播种机主动式秸秆移位防堵装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24):10 - 17.
WANG Weiwei, ZHU Cunxi, CHEN Liqing, et al. Design and experiment of active straw-removing anti-blocking device for maize no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 10 - 17. (in Chinese)
[23] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社, 2018.
[24] 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 Weihan, 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)
[25] 王汉羊. 2BMFJ - 3 型麦茬地免耕覆秸大豆精密播种机的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2013.
WANG Hanyang. Study on 2BMFJ - 3 type no-till soybean precision planter with straw-covering in wheat stubble fields[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2013. (in Chinese)
[26] 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)
[27] 方会敏,姬长英,Ahmed Ali Tagar,等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):60 - 67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw - soil - rotary blade system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016, 47(1): 60 - 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160109&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009. (in Chinese)
[28] 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)
[29] 王宪良,胡红,王庆杰,等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):78 - 85.
WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):78 - 85. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171209&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.009. (in Chinese)