

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.07.007

稻茬麦覆秸还田播种机均匀抛撒机理分析与机构优化

施丽莉^{1,2} 顾峰玮^{1,2} 胡志超^{1,2} 吴峰^{1,2} 高学梅^{1,2} 徐弘博^{1,2}

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 农业农村部现代农业装备重点实验室, 南京 210014)

摘要: 针对传统稻茬麦机播设备费工费时、效率低下的问题,对稻茬麦覆秸还田播种机均匀抛撒机构的作业机理进行了研究,并进行了抛撒作业的原理分析、作业过程的受力分析。在 EDEM 中构建了粉碎后水稻秸秆的模型,对其抛撒过程的运动进行了仿真分析、运动特性研究、运动速度变化和轨迹分析。在仿真分析和理论分析基础上,利用 Design-Expert 软件开展响应面分析,以抛撒作业幅宽合格率 Y_1 、抛撒不均匀度 Y_2 作为稻茬麦覆秸还田播种机抛撒叶轮机构作业的评价指标,以抛撒叶轮杆齿形打散叶片数、抛撒叶轮倾斜角、抛撒叶轮回转轴转速作为试验因素,对机具均匀抛撒叶轮机构进行优化试验。软件优化的最佳机具参数为:抛撒叶轮杆齿形打散叶片数为 4 排、抛撒叶轮倾斜角为向上倾斜 15° 、抛撒叶轮回转轴转速为 1 195 r/min,此时抛撒作业幅宽合格率和抛撒不均匀度的优化值分别为 80.79% 和 9.24%,在此基础上进行了田间验证试验,调整到最佳参数时,抛撒作业幅宽合格率和抛撒不均匀度的实际作业平均值分别为 80.84% 和 9.32%,满足作业要求,误差小、符合预期结果,说明仿真试验结果可靠且机具作业效果良好。

关键词: 覆秸还田播种机; 水稻秸秆; 抛撒机理; 离散元; 结构优化

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)07-0074-10 **OSID:** 

Analysis and Optimization of Uniform Throwing Device by No-tillage Planter of Wheat after Rice

SHI Lili^{1,2} GU Fengwei^{1,2} HU Zhichao^{1,2} WU Feng^{1,2} GAO Xuemei^{1,2} XU Hongbo^{1,2}

(1. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China
2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: In agricultural fields with full straw retention, due to the large amount of rice straw and the high humidity and toughness of the rice straw, it is difficult for the wheat to be spread uniformly after wheat planting. To achieve uniform crushed straw throwing in dense fields of rice stubble and high-quality straw mulching in dense fields, the uniform throwing device of a no-tillage planter to perform uniform throwing of crushed straw stubble on fields was analyzed and the device operation mechanism was determined. From kinematics and dynamics analyses of particles of crushed rice straw during spread uniformly, a flexible-body model of crushed straw was developd based on EDEM. By adopting the Box – Behnken design, the cover straw inhomogeneity and percent of pass for scatters width as the evaluation index was set and a response surface test was performed on the rotation speed of throwing impeller, the number of pole tooth blade of throwing impeller, angle of throwing impeller. Through a field verification test, the respective parameters for maximum implementation performances were obtained: when the number of pole tooth blade of throwing impeller was 4, the angle of throwing impeller was 15° , and the rotation speed of throwing impeller was 1 195 r/min, the cover straw inhomogeneity and percent of pass for scatters width by the models were 80.84% and 9.32%. The research result can provide a theoretical basis and data support for innovating seeding technologies and optimizing equipment to uniform crushed straw throwing in dense fields of rice stubble. The uniform throwing device provided high spreading

收稿日期: 2021-08-04 修回日期: 2021-09-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(31901418)、江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(20)3066)和江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2019-23)
作者简介: 施丽莉(1989—),女,助理研究员,主要从事农业机械化装备研究,E-mail: 1301706961@qq.com
通信作者: 顾峰玮(1984—),男,副研究员,主要从事农作物机械化种植与收获技术研究,E-mail: gfwsl@163.com

performance for actual operation. Design and optimization of uniform throwing device by no-tillage planter of wheat after rice provided a theoretical basis and data support for innovating seeding technologies and optimizing equipment to evenly throw.

Key words: no-tillage planter under full straw mulching field; rice straw; throwing mechanism; discrete element; structural optimization

0 引言

农作物秸秆是一类含丰富氮、磷、钾及有机质养分的可再生生物质资源,是农业生产的主要副产品,我国每年农作物秸秆量约占全球总量的 20%,如何实现秸秆经济有效资源化利用而不焚烧污染环境,关系到我国农业的绿色可持续发展^[1]。近年来,针对大量秸秆不收集移出、全量就地还田利用的现状,急需研发出一次下田可完成秸秆处理、苗床整备、播种施肥等一体化作业的复式播种设备,以实现全量秸秆硬茬地作业工况下高质顺畅机播^[2-3]。

传统稻茬麦机播设备费工费时、效率低下,且机播作业顺畅性、抛撒均匀性难以保证。尤其是在稻麦轮作区,前茬水稻秸秆量大、湿度高、韧性强,碎秸秆易成团盘结,抛撒有效幅宽与覆秸均匀性难以准确控制,出现相邻作业幅宽交接处碎秸重叠覆盖和幅宽内碎秸局部过量覆盖,使秸秆均匀覆盖应有的保温保墒、封闭杂草效应缺失,造成后茬小麦缺苗弱苗,国内外专家学者也已进行了各种研究,取得一些进展^[4-8]。

本文针对稻茬麦覆秸还田播种机,深入研究其均匀抛撒机构的工作原理,对秸秆的运动过程、轨迹进行理论分析,并结合 EDEM 软件进行运动状态的仿真分析,直观分析其运动特性。在此基础上对均匀抛撒机构进行田间试验,优化抛撒机构关键部件结构及参数^[9-16]。探明稻茬麦覆秸还田播种机均匀抛撒叶轮机构作业机理,解决播后秸秆抛撒覆盖不均匀性难题,为相关设备研发提供基础理论与数据支撑。

1 整机结构与工作原理

稻茬麦覆秸还田播种机作业工序主要分为秸秆粉碎、碎秸捡拾收集、碎秸跨越提升输送、种床整备、无障碍施肥播种覆土、碎秸均匀抛撒覆盖。机具整体结构如图 1 所示,主要由悬挂装置、限深压秸轮、旋耕种床整备部件、施肥组件、撒播组件、镇压覆土辊、均匀抛撒叶轮机构、碎秸跨越抛送机构、横向输秸装置、秸秆粉碎捡拾机构组成。

机具前行作业时秸秆粉碎捡拾机构粉碎秸秆的同时将碎秸捡拾收集至横向输秸装置,碎秸被输送

至碎秸跨越抛送机构后,受其内部打击力与气力的作用,被向上提升、向后输送,碎秸在被跨越抛送的同时,下方旋耕种床整备部件完成种床整备工序,施肥组件、撒播组件和镇压覆土辊分别完成施肥、播种、覆土镇压工序,最后被跨越抛送的碎秸经均匀抛撒叶轮机构旋转打击,被均匀抛撒覆盖于地表,实现水稻茬小麦播种与秸秆均匀覆盖一体化机播。

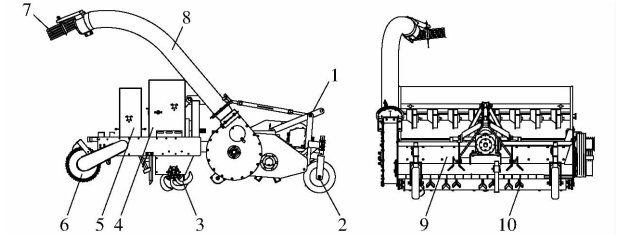


图 1 稻茬麦覆秸还田播种机结构简图
Fig.1 Structure diagram of no-tillage planter of wheat after rice

1. 悬挂装置 2. 限深压秸轮 3. 旋耕种床整备部件 4. 施肥组件 5. 撒播组件 6. 镇压覆土辊 7. 均匀抛撒叶轮机构 8. 碎秸跨越抛送机构 9. 横向输秸装置 10. 秸秆粉碎捡拾机构

由于水稻秸秆量大、湿度高、韧性强,实际作业时,碎秸秆易成团盘结从碎秸跨越抛送机构输出,要想获得较好的秸秆均匀覆盖效果、确保后期小麦出苗率,需设计并优化均匀抛撒叶轮机构实现打散碎秸团、均匀抛撒覆盖。

图 2 所示为水稻秸秆均匀抛撒叶轮机构结构简图,连接抱箍与碎秸跨越抛送机构固定连接,连接板末端装配抛撒叶轮回转轴,其上安装有杆齿形打散叶片。均匀抛撒作业的实质是打散叶片使碎秸从成群成团至分散撒铺地表的过程,在前期工作中^[12],对打散叶片的形式进行了高速摄影试验研究,因碎秸团流动性差,有柔韧性且容易穿插缠绕在一起,高

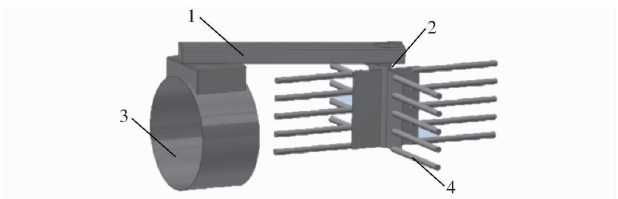


图 2 水稻秸秆均匀抛撒叶轮机构结构简图
Fig.2 Structure diagram of throwing impeller of no-tillage planter of wheat after rice

1. 连接板 2. 抛撒叶轮回转轴 3. 连接抱箍 4. 抛撒叶轮杆齿形打散叶片

速旋转的杆齿形打散叶片对碎秸团的导向携带和打击撕扯作用优于面板状打散叶片,更有利打散碎秸团。因此,在确定杆齿形打散叶片形状下,需要进一步对均匀抛撒机构作业机理进行研究,以及进行受力分析、碎秸团运动特性的研究,以确定机构结构参数和运动参数。

2 均匀抛撒机构机理分析

根据对水稻秸秆均匀抛撒过程的分析,可将其运动归结为如下过程:碎秸跨越抛送机构射出的碎秸团流被旋转的杆齿形打散叶片充分击打截断,在瞬时点上,碎秸团中紧贴叶片(杆齿)侧的碎秸相对于不紧贴叶片一侧的碎秸流动速度存在速度差,使碎秸团内部产生分离力的作用,发生撕扯,碎秸团内部分离力大于碎秸之间的盘结力,致使碎秸团分散,起到打散的效果;同时,在离心力的叠加作用下,团状碎秸在叶片上做滑移运动,打散效果更加明显;最后,直至碎秸离开叶片做平抛运动落地^[13-19]。所以抛撒过程可分为3个阶段:碎秸被打散叶片截断并撞击;在打散叶片上滑动;碎秸做三维空间抛撒。

(1) 碎秸被打散叶片截断并撞击过程

此为完全弹性碰撞,根据动能守恒定律得

$$\begin{cases} mv_1 + m'v_2 = mv'_1 + m'v'_2 \\ \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}m'v_2^2 = \frac{1}{2}mv_1'^2 + \frac{1}{2}m'v_2'^2 \end{cases} \quad (1)$$

化简后,可得

$$\begin{cases} v'_1 = \frac{m - m'}{m + m'}v_1 + \frac{2m'}{m + m'}v_2 \\ v'_2 = \frac{m' - m}{m + m'}v_1 + \frac{2m}{m + m'}v_2 \end{cases} \quad (2)$$

- 式中
- m ——碎秸质量, g

v_1 ——碎秸运动速度, m/s

m' ——叶片质量, m

v_2 ——叶片运动速度, m/s

v'_1 ——碰撞后碎秸运动速度, m/s

v'_2 ——碰撞后叶片运动速度, m/s

(2) 碎秸在打散叶片上滑动过程

图3为碎秸滑动过程受力分析,碎秸主要受力有重力、摩擦力、惯性力、离心力、科氏力,化简后计算可得

$$\frac{d^2R}{dt^2} = \omega^2 r - 2\mu\omega \frac{dR}{dt} \quad (3)$$

- 式中
- ω ——抛撒叶片角速度, rad/s

R —— t 时刻碎秸与中心 O 距离, mm

μ ——滑动摩擦因数

r ——抛撒叶轮回转轴半径, mm

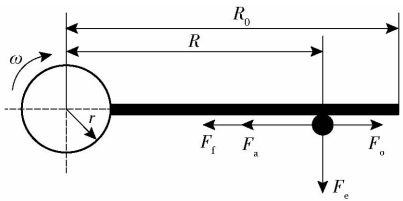


图3 碎秸滑动过程受力分析
Fig. 3 Force analysis diagram of smashing straw's sliding process

(3) 碎秸做三维空间抛撒运动过程

碎秸离开叶片后以初速度 v_0 被抛出,离开叶片后忽略风、碎秸自身旋转和相互之间的影响,仅受到空气阻力和重力的作用,又由于叶片的倾角不同,叶片上倾、不倾、下倾可以将运动分为上抛、平抛、下抛3种运动形式,如图4所示。

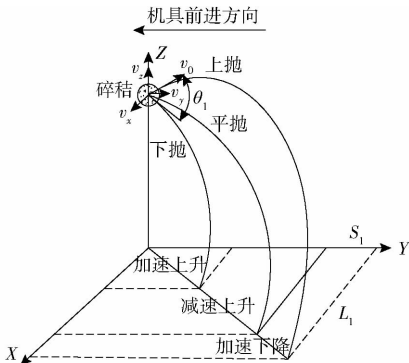


图4 叶片上倾时碎秸三维空间运动轨迹
Fig. 4 Motion locus diagram of smashing straw when blade was upward

通过对运动形式的分析,可将碎秸在空间的三维运动看成是在两个平面二维运动的叠加,根据碎秸上抛、平抛、下抛的3个运动路线,其二维平面的运动路线也可分为路线1、路线2、路线3,具体如图5所示,其中, L_1 、 S_1 为碎秸在上抛情况下在 X 、 Y 方向的运动距离, θ_1 为 v_0 与水平面的夹角。忽略风/秸秆自身的旋转和秸秆之间相互作用的影响,在空气中运动的秸秆只受到空气阻力和自身重力作用。设碎秸在抛撒运动的开始点为坐标原点,其在 YOZ 平面的运动落地后与坐标原点的距离 S 为碎秸的抛撒距离;其在 XOY 平面运动落地后与坐标原点的两倍距离 $2L$ 为碎秸抛撒的幅宽。

将碎秸的初始速度 v_0 分解为沿着 X 轴、 Y 轴、 Z 轴3个方向的分速度 v_x 、 v_y 、 v_z ,计算可得

$$\begin{cases} v_x = v_0 \sin\theta_1 \cos\varphi_1 \\ v_y = v_0 \sin\theta_1 \sin\varphi_1 \\ v_z = v_0 \cos\varphi_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中 φ_1 —— v_0 在 XOY 面的投影与 X 轴的夹角, $(^\circ)$

对碎秸进行平抛运动的轨迹计算,空气阻力计

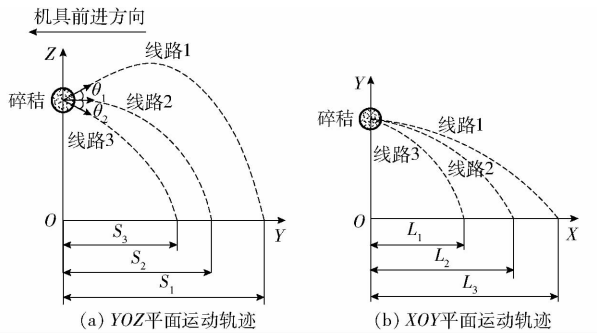


图 5 碎秸二维平面运动轨迹

Fig. 5 Motion locus diagrams of smashing straw in two-dimensional plane

算复杂,常用计算模型有两种,本文参考有空气阻力的抛射体飞行的轨迹计算,采用空气阻力与速度平方成正比的模型^[20-21]。

由运动学公式和牛顿第二定律,碎秸离开叶片后的平抛过程运动方程表示为:

$$X \text{ 方向} \quad m \frac{d^2 x}{dt^2} + k \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = 0 \quad (5)$$

$$Y \text{ 方向} \quad m \frac{d^2 y}{dt^2} + k \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 = 0 \quad (6)$$

Z 方向,当空气阻力与重力方向一致时

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + k \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 + mg = 0 \quad (7)$$

Z 方向,当空气阻力与重力方向相反时

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} - k \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 + mg = 0 \quad (8)$$

式中 x, y, z ——碎秸在 X, Y, Z 向的运动距离, mm

k ——空气阻力因子,取决于碎秸的形状、尺寸和质量等因素

在 X 方向:将 $v_x = dx/dt$ 代入式(5),并两边同时积分后,初始条件当 $t = 0$ 时, $v_x = v_{ox}$,继续进行积分计算,并取 $t = 0$ 时, $x = 0$,计算可得,在 X 方向的运动距离为

$$x = \frac{m}{k} \ln \left(\frac{ktv_{ox}}{m} + 1 \right) \quad (9)$$

在 Y 方向:将 $v_y = dy/dt$ 代入式(6)中,分离变量并进行积分,且初始条件当 $t = 0$ 时, $v_y = v_{oy}$, $y = 0$,可得在 Y 方向的运动速度和运动距离分别为

$$\begin{cases} v_y = \frac{mv_{oy}}{m + ktv_{oy}} \\ y = \frac{m}{k} \ln \left(\frac{ktv_{oy}}{m} + 1 \right) \end{cases} \quad (10)$$

在 Z 方向:将 $v_z = dz/dt$ 代入式(7)中,且初始条件当 $t = 0$ 时, $v_z = v_{oz}$,当空气阻力与重力方向一致时,分离变量并进行积分得

$$\int_0^t -\frac{1}{m} dt = \int_0^t \frac{1}{-kv_z^2 - mg} dv_z \quad (11)$$

$$\begin{aligned} mg \int_0^t -\frac{1}{m} dt &= \sqrt{\frac{mg}{k}} \arctan \left(\sqrt{\frac{k}{mg}} v_z \right) \Big|_0^t = \\ &= \sqrt{\frac{mg}{k}} \arctan \left(\sqrt{\frac{k}{mg}} v_z \right) - \sqrt{\frac{mg}{k}} \arctan \left(\sqrt{\frac{k}{mg}} v_{oz} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

继续计算并代入初始条件 $z|_{t=0} = H$, 可得在 Z 方向的运动速度和运动距离计算式:当 $z_y = 0$ 时, z 取得最大值,即

$$\begin{cases} t' = \sqrt{\frac{m}{kg}} \arctan \left(\sqrt{\frac{k}{mg}} v_{oz} \right) \\ z_{\max} = H - \frac{m}{k} \ln \left(\cos \left(\arctan \left(\sqrt{\frac{k}{mg}} v_{oz} \right) \right) \right) \end{cases} \quad (13)$$

此刻,碎秸团达到最高点,所用的时间即为 t' ,且最高点的高度即为 $z_{\max}$ 。

当空气阻力与重力方向相反时,初始条件 $v_z|_{t=t'} = 0, z|_{t=t'} = z_{\max}$,采用分离变量法进行积分,计算可得

$$\begin{cases} v_z = \frac{\sqrt{\frac{mg}{k}} [1 - e^{\sqrt{\frac{kg}{m}}(t-t')}] }{1 + e^{\sqrt{\frac{kg}{m}}(t-t')}} \\ z = z_{\max} + \frac{m}{k} \ln \frac{4e^{\sqrt{\frac{kg}{m}}(t-t')}}{[1 + e^{\sqrt{\frac{kg}{m}}(t-t')}]^2} \end{cases} \quad (14)$$

参考上述计算方法可进行打散叶片不倾、打散叶片下倾运动时的运动参数计算,本文不再赘述。

通过式(1)~(14)的计算,可得出碎秸在空中运动的时间、碎秸的抛撒幅宽以及运动距离。分析可知:影响碎秸均匀抛撒的主要因素有:初速度、初始位置、抛撒角度。初速度与碎秸跨越抛送机构的管道直径、管道风速密切相关,初始位置取决于机构的空间位置,抛撒角度取决于叶片的倾角。这为进一步的仿真及试验分析奠定了理论基础。

3 EDEM 碎秸抛撒过程仿真

3.1 数学及几何模型

本文采用离散元方法模拟碎秸的仿真运动过程,在 EDEM 的原型模型中创建碎秸模型。在开展相关仿真试验时,依据物料特性,其表面粘附力较小,且假设碎秸在运动过程中位移、力、速度等参数的变化是通过颗粒间或颗粒与接触材料之间产生的微小交叠量的不同来确定的,根据牛顿第二定律,每个模型在力和扭矩的作用下发生运动和旋转。基于以上假设,碎秸的相关运动过程采用 Hertz-Mindlin 无滑动接触力学模型^[22-25]。模型所受法向力 F_n 和

切向力 F_t 满足函数关系式

$$\begin{cases} F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \\ F_t = -S_t \delta_t \end{cases} \quad (15)$$

式中 E^* ——等效弹性模量
 R^* ——等效接触半径
 δ_n 、 δ_t ——法向、切向重叠量
 S_t ——切向刚度

$$\begin{aligned} E^* \text{ 和等效剪切模量 } G^* \text{ 为} \\ \frac{1}{E^*} &= \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \\ \frac{1}{G^*} &= \frac{2 - \nu_1^2}{G_1} + \frac{2 - \nu_2^2}{G_2} \end{aligned} \quad (16)$$

式中 E_1 、 E_2 ——颗粒 1、2 弹性模量
 ν_1 、 ν_2 ——颗粒 1、2 泊松比
 G_1 、 G_2 ——颗粒 1、2 剪切模量

模型中的法向阻尼力 $F_{n,d}$ 和切向阻尼力 $F_{t,d}$ 满足

$$\begin{cases} F_{n,d} = -2 \sqrt{\frac{5}{6} \beta} \sqrt{S_n m^*} v_{n,rel} \\ F_{t,d} = -2 \sqrt{\frac{5}{6} \beta} \sqrt{S_t m^*} v_{t,rel} \end{cases} \quad (17)$$

式中 β ——阻尼比
 m^* ——等效质量
 S_n ——法向刚度
 $v_{n,rel}$ ——法向相对速度
 $v_{t,rel}$ ——切向相对速度

碎秸团在运动中还会受到滚动摩擦力的影响,而滚动摩擦可以通过接触表面上的力矩 T_i 来说明,力矩 T_i 与滚动摩擦因数 μ_r 、颗粒质心至接触点间距 R_i 、颗粒在接触点处角速度 ω_i 的关系式为

$$T_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i \quad (18)$$

μ_r 为无量纲参数,取值会影响碎秸团阻抗滚动程度。

3.2 参数设定及模型建立

水稻秸秆具有特殊的剪切、弯曲、拉伸等性能,由于碎秸高长径比及性质的各向异性,仿真水稻碎秸一直是技术难题^[26-29]。表 1 所示为材料属性与相关接触参数。

秸秆由于其特殊的性质,在离散元仿真中一直难以模拟,试验中水稻秸秆易弯折性和空心结构等离散元都难以做到,考虑到仿真量较大,为了简化秸秆及减少仿真时间,秸秆颗粒采用刚性模型,以直径为 7 mm、球心间距为 3.5 mm 的球体,组合成总长为 100 mm 的长线型模型来模拟秸秆。图 6 所示为所建的秸秆模型图。

表 1 材料属性与相关接触参数

Tab. 1 Material physical and contact mechanical properties parameters

参数	数值
秸秆密度/(kg·m ⁻³)	241
秸秆剪切模量/Pa	1×10 ⁶
秸秆泊松比	0.4
铁密度/(kg·m ⁻³)	7 865
铁剪切模量/Pa	7.9×10 ¹⁰
铁泊松比	0.3
秸秆-铁恢复系数	0.3
秸秆-铁静摩擦因数	0.6
秸秆-铁滚动摩擦因数	0.01
秸秆-秸秆恢复系数	0.28
秸秆-秸秆静摩擦因数	0.54
秸秆-秸秆滚动摩擦因数	0.05



图 6 秸秆仿真模型

Fig. 6 Model of straw simulating

3.3 仿真结果及分析

3.3.1 仿真结果与实际作业比较分析

设置抛碎秸跨越抛送机构的管道直径为 220 mm,弯管段的曲率半径为 1 005 mm,EDEM 中颗粒工厂每秒产生 2.0 kg 的碎秸,碎秸跨越抛送机构抛送叶片的抛送转速设置为 2 400 r/min,打散叶片的倾角为 0°、数目为 4 个、转速设置为 1 500 r/min 进行仿真。

图 7 所示为在 EDEM 中碎秸抛撒过程仿真模型,水稻秸秆运动至管道口处,受到打散叶轮的击打作用,碎秸被打散开来,抛撒覆盖于播后地表。但是湿度高、韧性大、易成团的特性使其无论是在管道中输送还是受到打散叶片的击打作用,都依旧存在成团的特点,必须进行机构设计优化,尽可能保证秸秆在有效播种幅宽内实现较优均匀抛撒。

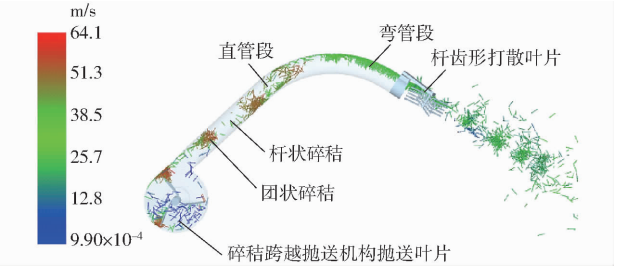


图 7 碎秸抛撒过程仿真模型

Fig. 7 Distribution diagram of straw and air flow velocity

为验证 EDEM 中碎秸抛撒过程仿真模型的合理性,对抛出口处碎秸的抛出速度进行比较,如表 2 所示,仿真与实际作业速度均值误差小,说明仿真结果可信。

表 2 EDEM 仿真计算值与实际作业值比较

Tab.2 Comparison of EDEM measured and simulated suspension velocity

序号	试验时秸秆抛出速度	仿真时秸秆抛出速度
1	17.2	17.6
2	17.9	18.6
3	18.5	18.9
4	17.6	18.2
5	18.3	17.6
均值	17.9	18.18

3.3.2 秸秆被抛撒后的运动分析

仿真模拟时观察 0.40、0.41、0.42 s 时的运动轨迹,如图 8 所示。并且在运动稳定之后,随机选取 3 个秸秆进行分析,记录其速度变化曲线,如图 9 所示。

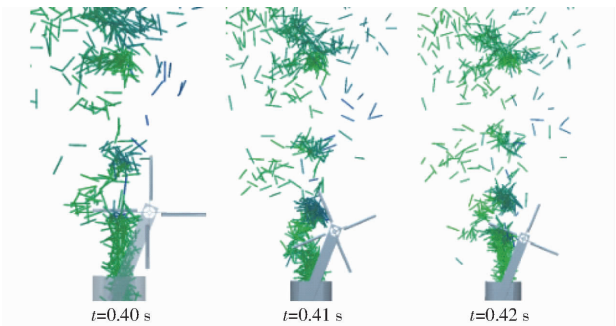


图 8 3 个时刻的秸秆运动仿真结果

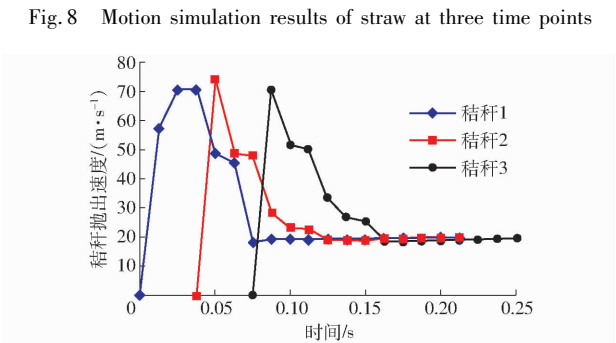


图 9 秸秆速度变化曲线

Figure.9 Diagram of change progress with straw velocity

秸秆的抛撒运动规律:先是被旋转叶片击打截断,之后碎秸在叶片上做滑移运动,最后离开叶片做平抛运动直至落地。此规律的理论分析与秸秆运动图、速度变化图吻合,说明仿真结果与理论分析结果以及实际作业情况一致,分析正确,可在此基础上做进一步的分析。

3.3.3 影响抛撒运动的因素确定

通过对抛撒过程的运动仿真分析可知,影响秸秆覆盖均匀性能的抛撒装置结构和运动参数主要包括:抛撒叶轮回转轴转速,由图 7、8 可知,抛撒叶轮回转轴直接与秸秆相作用,其转速直接影响秸秆被击打后的抛出速度,以及抛出的秸秆能否被及时打

散开来;抛撒叶轮数决定了击打的频率,并且数目越多会导致叶轮之间的空间越小,不能有效截断秸秆流;叶轮倾角会影响秸秆的落地时间、行程等,最终会对抛撒结果有较大影响。

在上述分析基础上,对设备进行进一步的田间试验,以确定最佳的运动参数组合。

4 田间试验优化

4.1 试验设计与结果

图 10 所示为抛撒作业幅宽示意图,抛撒作业幅宽合格率公式为

$$Y_1 = \frac{M_1}{M_2} \times 100\% \tag{19}$$

式中 M_1 ——抛撒覆盖在机具单行程播种带上方(即有效播种幅宽)的秸秆质量,g
 M_2 ——实际抛撒作业幅宽秸秆总质量,g

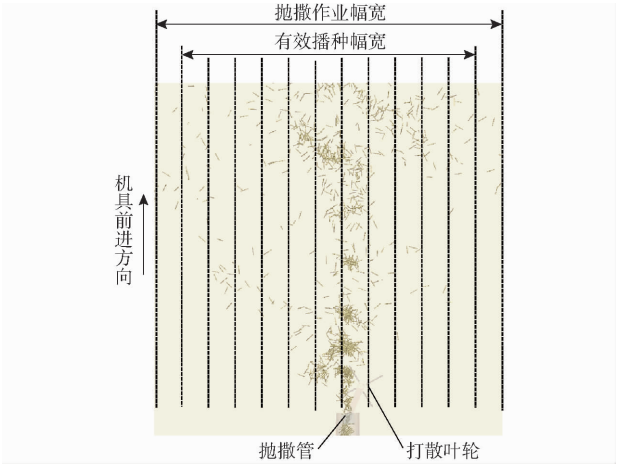


图 10 抛撒作业幅宽示意图

Fig.10 Sketch map of scatters width

根据分析结果以及实际试验可操作性,参考行业标准 NY/T 500—2015《秸秆粉碎还田机 作业质量》、团体标准 T/CAMA 21—2019《全秸硬茬地洁区播种机》进行秸秆抛撒不均匀度计算,即

$$Y_2 = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{zi} - \overline{M})^2}{n - 1}} \times 100\% \tag{20}$$

其中 $\overline{M} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{zi}}{n}$

式中 n ——测试小区数量
 M_{zi} ——第 i 点秸秆总质量,kg
 $\overline{M}$ ——测试区内各点秸秆平均质量,kg
 Y_2 ——抛撒不均匀度,%

在前期理论分析和仿真分析的基础上,本试验采取四因素三水平回归正交试验设计方案,依据 Box-Behnken 设计原理,以抛撒作业幅宽合格率

Y_1 、抛撒不均匀度 Y_2 作为稻茬麦覆秸还田装置的评价指标,以抛撒叶轮杆齿形打散叶片数(X_1)、抛撒叶轮倾斜角(X_2)、抛撒叶轮回转轴转速(X_3)作为试验因素。因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Factors codes of response surface test			
编码	因素		
	抛撒叶轮杆齿形打散叶片数/排	抛撒叶轮倾斜角/(°)	抛撒叶轮回转轴转速/(r·min ⁻¹)
-1	4	-15	1 000
0	5	0	1 200
1	6	15	1 400

试验方案与结果如表 4 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。试验数据进行二次多项式回归分析,根据表中的数据样本,利用 Design-Expert 软件开展多元回归拟合分析,寻求各因素对试验结果的影响规律,确定最优参数组合。

由表 5 分析可知,响应面模型中的抛撒不均匀度 Y_1 模型 $P < 0.000\ 1$ 、 Y_2 模型 $P < 0.000\ 1$,表明回归模型极显著;失拟项 $P > 0.05$,表明回归方程拟合

度高。因此,稻茬麦覆秸还田播种机均匀抛撒机构的工作参数可以用该模型来优化。

表 4 试验设计与结果

Tab.4 Test design and results					
编号	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	-1	-1	0	76.2	11.3
2	1	-1	0	72.7	12.9
3	-1	1	0	80.3	9.2
4	1	1	0	77.4	10.8
5	-1	0	-1	60.1	13.4
6	1	0	-1	59.1	15.8
7	-1	0	1	73.1	14.6
8	1	0	1	59.4	15.9
9	0	-1	-1	58.9	16.8
10	0	1	-1	65.5	15.8
11	0	-1	1	67.2	17.9
12	0	1	1	65.8	15.5
13	0	0	0	74.2	13.2
14	0	0	0	72.9	12.5
15	0	0	0	72.2	13.2
16	0	0	0	71.9	12.9
17	0	0	0	73.2	12.5

表 5 方差分析

Tab.5 ANOVA results								
来源	Y_1				Y_2			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	737.02	9	35.25	<0.000 1	83.40	9	102.23	<0.000 1
X_1	55.65	1	23.96	0.001 8	5.95	1	65.66	<0.000 1
X_2	24.50	1	10.55	0.014 4	7.22	1	79.65	<0.000 1
X_3	59.95	1	25.81	0.001 4	0.55	1	6.08	0.043 1
X_1X_2	0.09	1	0.039	0.849 5	1.421×10^{-14}	1	1.568×10^{-13}	1.000 0
X_1X_3	40.32	1	17.36	0.004 2	0.30	1	3.34	0.110 5
X_2X_3	16.00	1	6.89	0.034 2	0.49	1	5.41	0.053 0
X_1^2	5.79	1	2.49	0.158 4	12.06	1	133.06	<0.000 1
X_2^2	28.41	1	12.23	0.010 0	0.058	1	0.64	0.449 6
X_3^2	521.35	1	224.44	<0.000 1	59.45	1	655.84	<0.000 1
残差	16.26	7			0.63	7		
失拟项	12.99	3	5.30	0.070 5	0.14	3	0.39	0.769 8
误差	3.27	4			0.49	4		
总和	753.28	16			84.03	16		

影响抛撒作业幅宽合格率 Y_1 的显著性因素为: X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_2X_3 、 X_2^2 、 X_3^2 ,其它对 Y_1 影响不显著;影响抛撒不均匀度 Y_2 的显著性因素为: X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_3^2 ,其它对 Y_2 影响不显著。去除不显著项并重新对方程进行检验,建立的最终回归模型为

$$Y_1 = 73.37 - 2.64X_1 + 1.75X_2 + 2.747X_3 - 3.17X_1X_3 - 2X_2X_3 + 2.66X_2^2 - 11.07X_3^2 \quad (21)$$

$$Y_2 = 12.81 + 0.86X_1 - 0.95X_2 + 0.26X_3 - 1.7X_1^2 + 3.75X_3^2 \quad (22)$$

4.2 试验结果分析

从试验结果分析可知,抛撒叶轮数越多,碎秸所受抛撒叶轮击打频率越高,但秸秆互相缠绕成团,抛撒叶轮的打散叶片数过多,反而导致叶轮间的空间越小,不能及时被抛出,造成堵塞,影响作业顺畅性;试验结果表明,抛撒叶轮越多,抛撒作业幅宽合格率越低、抛撒不均匀度越高。对于叶轮倾角的设定,向下倾角过大会减少秸秆落至地面的时间,秸秆来不及被打散就抛撒出去,不均匀度高,向上倾角过大,

延迟了秸秆落入地面的时间,同时被杆齿形打散叶片携带更长的行程,因此虽秸秆抛撒更均匀,但同时也降低了抛撒作业的效果。试验结果证明叶轮倾角向上有利于抛撒运动,但是角度应保持在合理范围内。对于抛撒叶轮回转轴转速的设定,过低会导致打散效果差且不能保证秸秆在播种带上方均匀覆盖,转速过高容易将秸秆抛撒至有效播种幅宽外导致抛撒不均匀度低,试验结果表明抛撒叶轮回转轴转速应设定在合理范围内。

4.3 试验优化

图 11 所示为因素交互作用对抛撒作业幅宽合格率影响的响应曲面,可知,抛撒叶轮回转轴转速和撒叶轮杆齿形打散叶片数、抛撒叶轮回转轴转速和抛撒叶轮倾斜角交互作用对结果影响较大,必须综合考虑寻求最优解。为获得较优的均匀抛撒性能,要求抛撒作业幅宽合格率高,抛撒不均匀度低。故需综合因素对两个考核指标的影响,进行优化求解。约束条件为: $-1 < X_1 < 1$ 、 $-1 < X_2 < 1$ 、 $-1 < X_3 < 1$; 目标函数: $\max Y_1, \min Y_2$ 。优化求解得到的最优参数组合为:抛撒叶轮杆齿形打散叶片数为 4 排、抛撒叶轮倾斜角为向上倾斜 15° 、抛撒叶轮回转轴转速为 $1\,195\text{ r/min}$,抛撒作业幅宽合格率的优化值为 80.79% ,抛撒不均匀度的优化值为 9.24% 。为进一步验证优化结果和拟合模型,还需采用最佳参数组合进行田间试验验证。

4.4 验证试验

为验证稻茬麦覆秸还田播种机均匀抛撒性能,在江苏省农业科学院六合基地进行田间试验。在抛撒叶轮杆齿形打散叶片数为 4 排、抛撒叶轮倾斜角为向上倾斜 15° 、抛撒叶轮回转轴转速为 $1\,195\text{ r/min}$ 的最优参数下,进行 3 次重复试验,测定抛撒作业幅宽合格率和抛撒不均匀度,取平均值为试验验证结果,抛撒作业幅宽合格率和抛撒不均匀度的实际作业平均值分别为 80.84% 和 9.32% ,满足作业要求,与优化值相差 0.05 个百分点和 0.08 个百分点,说明前期分析及优化合理,图 12 所示为田间试验覆盖均匀效果和小麦出苗长势情况。



图 12 田间试验覆盖均匀效果和小麦出苗长势

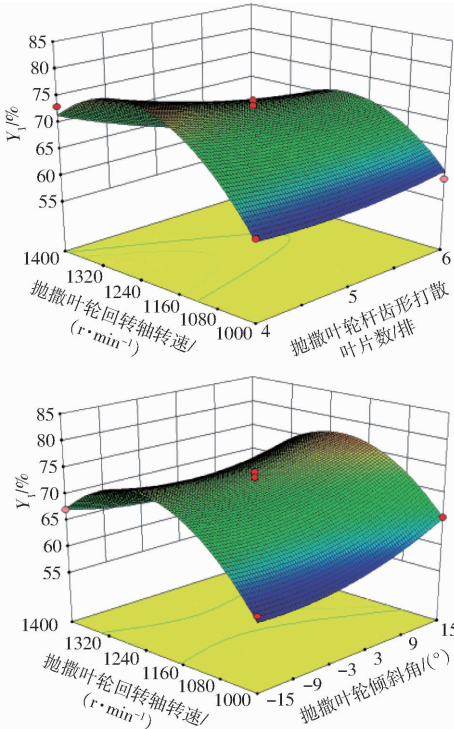


图 11 因素交互作用对抛撒作业幅宽合格率影响的响应曲面

Fig. 11 Effects of interactive factors on percent of qualified rate for scatters width

5 结论

- (1)对稻茬麦覆秸还田播种机均匀抛撒机构的作业机理进行了研究,进行了抛撒作业的原理分析、作业过程的受力分析。并在 EDEM 中构建了粉碎后水稻秸秆的模型,对其抛撒过程的运动进行了仿真分析、运动特性研究、运动速度的变化和轨迹分析。
- (2)在理论分析及仿真分析的基础上,依据 Box - Behnken 设计原理,开展仿真试验研究,以抛撒作业幅宽合格率 Y_1 和抛撒不均匀度 Y_2 作为评价指标,对抛撒叶轮杆齿形打散叶片数 X_1 、抛撒叶轮倾斜角 X_2 、抛撒叶轮回转轴转速 X_3 开展响应面试验,仿真得最佳机具参数:抛撒叶轮杆齿形打散叶片数为 4 排、抛撒叶轮倾斜角为向上倾斜 15° 、抛撒叶轮回转轴转速为 $1\,195\text{ r/min}$,抛撒作业幅宽合格率的优化值为 80.79% ,抛撒不均匀度的优化值为 9.24% 。
- (3)进行了田间验证试验,试验结果为抛撒作

Fig. 12 Experimental results and crop growth of no-tillage planter of wheat after rice

业幅宽合格率和抛撒不均匀度的实际作业平均值分别 80.84% 和 9.32%, 满足作业要求, 误差小、符合预期结果, 说明仿真试验结果可靠且机具作业效果良好。

参 考 文 献

- [1] 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, 2019, 50(4): 58–67. (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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1–21. (in Chinese)
- [3] 孙妮娜, 王晓燕. 秸秆粉碎还田与整地复式作业机连接装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 15–24, 87.
SUN Nina, WANG Xiaoyan. Design and experiment of connection device of duplex straw crushing returning and soil preparation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 15–24, 87. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 王金峰, 张鑫, 唐汉, 等. 水稻秸秆反旋深埋滑切还田刀优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 28–39.
WANG Jinfeng, ZHANG Xin, TANG Han, et al. Optimal design and experiment of deep-buried reverse rotating sliding cutting straw returning blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 28–39. (in Chinese)
- [6] 郑智旗. 玉米秸秆捡拾粉碎埋还田机研究[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)
- [7] 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)
- [8] 牛琪, 王庆杰, 陈黎卿, 等. 秸秆后覆盖小麦播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 52–59.
NIU Qi, WANG Qingjie, CHEN Liqing, et al. Design and experiment on straw post-covering wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 52–59. (in Chinese)
- [9] SHI Y, SUN X R, WANG X, et al. Numerical simulation and field tests of minimum-tillage planter with straw smashing and strip laying based on EDEM software[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: 105021.
- [10] SHI Y, WANG X, HU Z, et al. Optimization and experiment on key structural parameters of no-tillage planter with straw-smashing and strip-mulching[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(3): 91–96.
- [11] 罗伟文, 顾峰玮, 吴峰, 等. 全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 42–52.
LUO Weiwen, GU Fengwei, WU Feng, et al. Design and experiment of wheat planter with straw crushing and inter-furrow collecting-mulching under full amount of straw and root stubble cropland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 42–52. (in Chinese)
- [12] 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 CSAE, 2016, 32(20): 15–23. (in Chinese)
- [13] 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 typemulti-function no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 18–26. (in Chinese)
- [14] 严伟, 吴努, 顾峰玮, 等. 叶片式抛送装置功耗试验研究与参数优化[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(7): 99–106.
YAN Wei, WU Nu, GU Fengwei, et al. Parameter optimization and experiment for the power consumption of impeller-blower[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(7): 99–106. (in Chinese)
- [15] 罗伟文, 胡志超, 吴峰, 等. 全秸硬茬地小麦播种机碎秸导流装置参数设计与优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 1–10.
LUO Weiwen, HU Zhichao, WU Feng, et al. Design and optimization for smashed straw guide device of wheat clean area planter under full straw field[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 1–10. (in Chinese)
- [16] 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 CSAE, 2019, 35(9): 19–28. (in Chinese)
- [17] 陈勇. 4YZ-8 型玉米籽粒收获机脱出物粉碎抛撒装置研制[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
CHEN Yong. Research of threshed mixtures cutting and throwing device for 4YZ-8 corn harvester[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [18] 张睿, 王秀, 赵春江, 等. 链条输送式变量施肥抛撒机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 20–25.
ZHANG Rui, WANG Xiu, ZHAO Chunjiang, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer preader with conveyor chain[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 20–25. (in Chinese)
- [19] 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)

- [20] 张新梅,陈国华.爆炸碎片抛射速度及飞行轨迹分析方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2009,37(4):106-110.
ZHANG Xinmei, CHEN Guohua. Approach to decoupling of multi-dimension sens inginformation based on multi-scale approximation[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2009,37(4):106-110. (in Chinese)
- [21] 李武钢.阻力系数和物体质量对斜抛运动影响的数值分析[J].广西师范学院学报(自然科学版),2006,23(2):112-114.
LI Wugang. Number analysis of projectile motion affected by the air resistance and the object mass[J]. Journal of Guangxi Teachers Education University (Natural Science Edition), 2006,23(2):112-114. (in Chinese)
- [22] 闵永林,陈池.两种空气阻力模型的抛射体飞行轨迹研究[J].装备制造技术,2009(12):15-17.
MIN Yonglin, CHEN Chi. Project track under two kinds of air resistance models[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009(12):15-17. (in Chinese)
- [23] 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.
FANG Huimin. Research on the straw-soil-rotary blade interaction using discrete element method[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [24] 袁长达.玉米收获机脱出物粉碎抛撒装置设计与试验[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
YUAN Changda. Corn haverster chopper and spreader design and validation[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [25] 韩燕龙,贾富国,唐玉荣,等.颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响[J].物理学报,2014,63(17):165-171.
HAN Yanlong, JIA Fuguo, TANG Yurong, et al. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17):165-171. (in Chinese)
- [26] 牟孝栋,姜慧新,孙延成,等.青贮玉米收获机碟盘式籽粒破碎装置仿真优化与试验[J].农业机械学报,2020,51(增刊1):218-226.
MOU Xiaodong, JIANG Huixin, SUN Yancheng, et al. Simulation optimization and experiment of disc-type grain crushing device of silage corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1):218-226. (in Chinese)
- [27] 陈海涛,李昂,史乃煜,等.玉米秸秆残茬侧向抛出动力学模型建立与试验[J].农业机械学报,2018,49(5):76-83.
CHEN Haitao, LI Ang, SHI Naiyu, et al. Kinetics modeling and experiment of lateral throwing of corn straws[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):76-83. (in Chinese)
- [28] 王国强,郝万军,王继新.离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M].西安:西北工业大学出版社,2010.
- [29] 文愿运,刘马林,刘荣正,等.颗粒离散单元法数值模拟与典型实验对比研究[J].中国粉体技术,2015(3):1-5.
WEN Yuanyun, LIU Malin, LIU Rongzheng, et al. Comparative study between numerical simulation by discrete element method and typical experimental research of particles[J]. China Powder Science and Technology, 2015(3):1-5. (in Chinese)

(上接第 66 页)

- [20] 丛锦玲.油菜小麦兼用型气力式精量排种系统及其机理研究[D].武汉:华中农业大学,2014.
CONG Jinling. Study on seeding system and mechanism of pneumatic precision metering device for wheat & rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [21] 关醒凡.现代泵理论与设计[M].北京:中国宇航出版社,2011.
- [22] RAJIA A O, FAVIER J F. Model for the deformation in agricultural and food particulate materials under bulk compressive loading using discrete element method. II: compression of oilseeds[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 64(3):373-380.
- [23] REZVANI F, AZARGOSHASB H, JAMIALAHMADI O, et al. Experimental study and CFD simulation of phenol removal by immobilization of soybean seed coat in a packed-bed bioreactor[J]. Biochemical Engineering Journal, 2015, 101:32-43.
- [24] 冯占荣.基于 CAD-DEM-CFD 耦合的气吹式排种器数字化设计方法研究[D].长春:吉林大学,2010.
FENG Zhanrong. Study on digital design method of air-blowing seed-metering device based on coupled CAD-DEM-CFD [D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- [25] 张涛,刘飞,赵满全,等.基于离散元的排种器排种室内玉米种群运动规律[J].农业工程学报,2016,32(22):27-35.
ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Movement law of maize population in seed room of seed metering device based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22):27-35. (in Chinese)
- [26] 雷小龙.油麦兼用型气送式集排器设计及其工作机理[D].武汉:华中农业大学,2017.
LEI Xiaolong. Design and working mechanism of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [27] 刘彩玲,黎艳妮,宋建农,等.基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J].农业工程学报,2017,33(14):32-39.
LIU Cailing, LI Yanni, SONG Jiannong, et al. Performance analysis and experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14):32-39. (in Chinese)
- [28] 姚露,廖庆喜,王磊,等.油菜旋转盘式高速集排器螺旋供种装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(6):78-88.
YAO Lu, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and experiment of spiral seed feeding device in spinning disc high-speed metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6):78-88. (in Chinese)