



余伟军,孙步功,祁渊,张鹏,徐先英,马新兵.曲柄摇杆-钉齿输送协同铺设草方格装置设计与试验[J].中国农业大学学报,2025,30(05):201-213.

YU Weijun, SUN Bugong, QI Yuan, ZHANG Peng, XU Xianying, MA Xinbing. Design and test of crank-rocker-peg-tooth conveyor synergistic grass-square-laying device[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(05): 201-213.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.05.17

曲柄摇杆-钉齿输送协同铺设草方格装置设计与试验

余伟军¹ 孙步功^{1*} 祁渊¹ 张鹏¹ 徐先英² 马新兵²

(1. 甘肃农业大学 机电工程学院, 兰州 730070;

2. 甘肃省治沙研究所, 兰州 730070)

摘要 为解决现有以散长草为原材料的草方格沙障打散输送装置效果不佳、秸秆铺设不均匀等问题,结合稻草秸秆特性和多级摇杆打散机构的受力,确定结构参数;明晰影响打散铺设性能的因素为曲柄半径、曲柄转速和拨草间隙,并采用单因素试验确定取值范围;利用 EDEM-RecurDyn 耦合方法,以稻草铺设秸秆质量均匀度和沙障孔隙度为试验指标,曲柄转速、曲柄半径和拨草间隙为试验因素,进行响应面优化试验,探究秸秆微观运动和受力等变化规律。结果表明:最优参数组合为,曲柄转速 200 r/min、曲柄半径 44 mm、拨草间隙 48.6 mm,秸秆质量均匀度 88.8%,沙障孔隙度 25%;田间试验秸秆质量均匀度平均值为 86.96%、沙障孔隙度为 26.05%,满足机械化铺设草方格要求。

关键词 草方格;铺设机构;柔性秸秆;响应面优化

中图分类号 S288

文章编号 1007-4333(2025)05-0201-13

文献标志码 A

Design and test of crank-rocker-peg-tooth conveyor synergistic grass-square-laying device

YU Weijun¹, SUN Bugong^{1*}, QI Yuan¹, ZHANG Peng¹, XU Xianying², MA Xinbing²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China)

Abstract To solve the problem of the poor effect of the existing straw square lattice sand barrier dispersing and conveying device with loose long grass as the raw material and uneven straw laying, combined with the characteristics of straw and multi-stage crank dispersing mechanism force, the structural parameters are specified, the factors affecting the performance of dispersing and laying for the crank radius, crank rotation speed and grass clearance are clarified, and the ranges of values are determined by using a single-factor test. Using the EDEM-RecurDyn coupling method, the response surface optimization test is carried out by exploring the changing rules of straw micro-motion and force with straw laying quality uniformity and sand barrier porosity as test indexes, and crank speed, crank radius and grass clearance as test factors. The results show that the optimal parameter combination is as follows: the crank speed of 200 r/min, crank radius of 44 mm, toggle clearance of 48.6 mm, strw quality uniformity of 88.8%, sand barrier porosity of 25%, field test straw quality uniformity average value of 86.96%, sand barrier porosity of 26.05%. The combination meets the requirements of the mechanized paving of grass square grid.

Keywords grass square; laying mechanism; flexible straw; Response surface optimization

收稿日期: 2024-11-27

基金项目: 甘肃省重大科技计划项目(21ZD4FA010)

第一作者: 余伟军(ORCID:0009-0007-5171-7625),硕士研究生,E-mail:ywj11401120@163.com

通讯作者: 孙步功(ORCID:0000-0002-3507-4312),教授,主要从事旱作农业全程机械化研究,E-mail:sunbg@gsau.edu.cn

稻草秸秆是一种易获取且储量丰富的草方格沙障原材料,经压制成型后的沙障不仅经济适用且环保可持续。机械化铺设散长草秸秆作为防风固沙中的关键一环,能有效减轻劳作强度、提升作业效率。但目前草方格沙障铺设主要靠人工,劳动强度大且用工成本高,加之秸秆自身乱序性和不规则性,导致机械化沙障铺设普及面积小。现阶段草方格沙障铺设机械技术难点是长散稻草秸秆易粘结、根部和头部大小形状不一、沙漠地质结构复杂多变等,亟需深入研究稻草秸秆打散输送装置,为我国机械化铺设沙障提供更好技术支撑^[1-5]。舒庆等^[6]设计了防风固沙草方格铺设机器人,为我国机械化固沙机械的研发提供了理论基础,但预制草帘成本高、时间长。常桥墩^[7]设计了一种偏心拨齿抓草,链条输草设备,为机械化铺设长散稻草秸秆提供了新思路,但链条取草仍会堵草缠绕。郭壮等^[8]利用耦合仿真技术对固沙设备中杆式物料输送机构的运动特性进行研究分析,多连杆耦合仿真为新型固沙机械装置的研发提供了参考。长散稻草秸秆机械化铺设时,仍存在秸秆成堆堵塞、断裂以及铺设均匀度不佳^[9]。因长散稻草秸秆铺设交互复杂,单一软件难以精确表征各部件与秸秆之间的相互作用,故采用仿真软件耦合技术研究^[10]。已有研究主要集中在稻草秸秆的本征参数、减损收获和秸秆机理方面,而对以长散稻草秸秆作为原材料铺设草方格沙障的

研究较少^[11-14],现有打散输送装置仍存在打散效果不佳、秸秆铺设不均匀等问题。

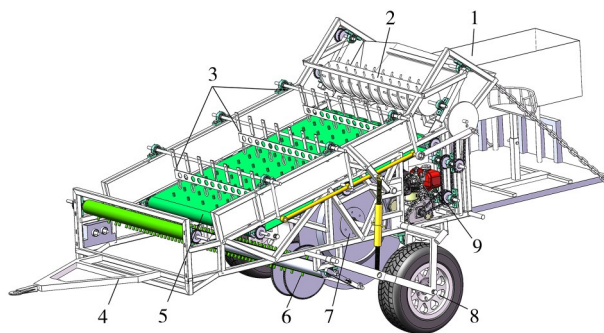
本研究拟根据人工铺设稻草秸秆动作,设计一种基于曲柄摇杆机构的拨齿式秸秆打散输送装置。采用EDEM-RecurDyn耦合仿真技术确定装置主要参数,实地验证装置作业效果,以期解决打散效果不佳和秸秆不均匀的问题,为草方格沙障铺设装置设计优化提供参考依据。

1 打散输送装置结构与工作原理

设计要求:在钉齿输送带与曲柄摇杆打散装置配合作业时,机器前进速度为1.38~8.30 m/s,可实现稻草秸秆的铺设打散,秸秆铺设厚度为20~30 mm,秸秆质量均匀度>75%,孔隙度为25%~50%,满足草方格沙障技术要求。

本研究设计的小型草方格沙障铺设机的打散输送装置主要由机架、喂入装置、储料箱、发动机、多级梳分拨草齿、钉齿输送带和压草碾轮等组成,总体结构示意图1。

将成捆长散稻草秸秆放置在喂入装置初步处理,随后秸秆被传输到打散输送装置。发动机为多级摇杆打散机构提供动力,固定在摇杆上的拨草齿往复摆动和钉齿输送带协同作用,对秸秆摊薄和打散,稻草秸秆最终以20~30 mm的厚度均匀铺设在沙面。



1. 储料箱;2. 喂入装置;3. 多级摇杆打散机构;4. 机架;5. 钉齿输送带;6. 小牙盘;7. 压草碾轮;8. 行走装置;9. 发动机
1. Storage box; 2. Feeding device; 3. Multi-stage rocker dispersing mechanism; 4. Machine frame; 5. Nail tooth conveyor belt;
6. Small tooth disc; 7. Grass roller; 8. Travelling device; 9. Engine

图1 打散输送装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the breaking and conveying device

2 关键部件设计与秸秆受力分析

2.1 拨草齿形

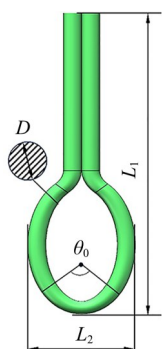
为防止勾草和破坏秸秆原有状态,拨草齿端部

采用圆弧仿形设计,结构参数仿照手指端部的弧度^[15],人手指长度平均值约为87 mm,宽度15~20 mm。拨草齿截面直径太大,功耗增加易损坏;截面直径太小,强度低易断裂变形。拨草齿端部结构

参数见图2, 拨草齿形端部结构参数设计应满足:

$$\begin{cases} L_1 \geq 87 \\ 15 < L_2 \leq 20 \\ 90^\circ < \theta_0 < 180^\circ \\ 2D < 20 \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_1 为拨草齿端部长度, mm; L_2 为拨草齿宽度, mm; D 为拨草齿截面直径, mm; θ_0 为弧度所对圆心角, ($^\circ$)。由式(1)得 $L_1=100$ mm, $L_2=20$ mm, $D=8$ mm, $\theta_0=120^\circ$ 。



L_1 为拨草齿端部长度; L_2 为拨草齿宽度; D 为拨草齿截面直径; θ_0 为弧度所对圆心角。

L_1 is the length of the end of the toggle tooth; L_2 is the width of the toggle tooth; D is the cross-section diameter of the toggle tooth; θ_0 is the angle of the center of the circle opposite to the radian.

图2 拨草齿端部结构参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the structural parameters of the end of the rasp teeth

2.2 多级摇杆打散机构

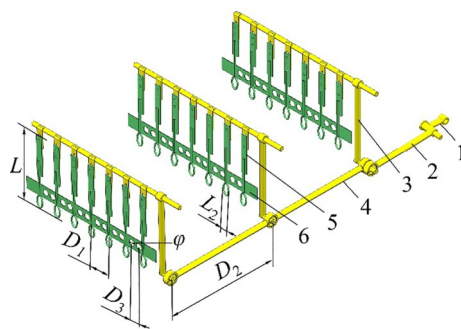
本研究设计的多级摇杆打散机构功能是将成捆的长散稻草秸秆打散输送。主要由曲柄、连杆、摇杆、拨草杆和挡草板构成(图3)。拨草杆长度根据稻草秸秆捆直径设计确定, 本研究测得稻草秸秆捆直径约300 mm, 故摇杆长(L)为300 mm, 横向分布7个齿, 齿间距(D_1)为200 mm, 各级拨草齿间距(D_2)为500 mm。为减少拨草齿往复运动引起的气流影响打散效果, 挡草板上设通风孔径 φ 为40 mm, 孔间距(D_3)为50 mm。

曲柄转动时, 固定在各级摇杆上的梳分拨草齿往复摆动并配合钉齿输送带, 对秸秆进行打散输送。该机构满足余弦定理:

$$\begin{cases} \left(2c \sin \frac{\phi}{2}\right)^2 = (b+a)^2 + (b-a)^2 - 2(b+a)(b-a)\cos\theta \\ (b-a)^2 = c^2 + d^2 - 2cd\cos\phi_0 \\ (b+a)^2 = c^2 + d^2 - 2cd\cos(\phi_0 + \phi) \\ (d-a)^2 = c^2 + b^2 - 2cb\cos\gamma_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

式中: a 为曲柄长度, mm; b 为连杆长度, mm; c 为摇杆长度, mm; d 为机架长度, mm; ϕ 为摆动角度, ($^\circ$); θ 为极位夹角, ($^\circ$); $\gamma_{\min}$ 为最小传动角, ($^\circ$)。

本研究设计 $c=300$ mm, $\phi=30^\circ$, 行程速比系数 $K=1.1$, $\gamma_{\min}=40^\circ$, 该取值下, 由式(2)得: $a=64$ mm, $b=640$ mm, $d=500$ mm, 初始摆角 $\phi_0=86^\circ$ 。



1. 曲柄; 2. 连杆; 3. 摇杆; 4. 多级摇杆连接杆; 5. 拨草杆; 6. 挡草板

L 为摇杆长度; D_1 为拨草齿间距; D_2 为每排拨草齿间距; D_3 为挡草板孔间距; φ 为挡草板孔径。

1. Crank; 2. Connecting rod; 3. Rocker; 4. Multi-stage rocker connecting rod; 5. Toggle; 6. Grass stopper

L is the length of the rocker; D_1 is the pitch of the toggle teeth; D_2 is the pitch of each row of toggle teeth; D_3 is the pitch of the grass stopper holes; φ is the diameter of the grass stopper holes.

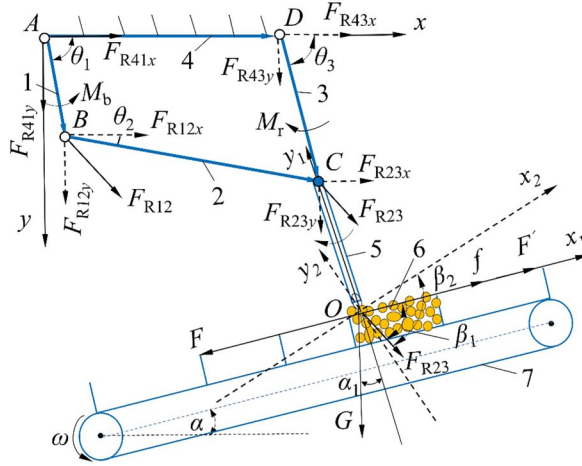
图3 多级摇杆打散机构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the structure of the toggle bar

2.3 秸秆受力分析

秸秆滑移距离影响秸秆打散输送效果, 为探究钉齿输送带倾角与稻草秸秆打散输送过程中秸秆滑移距离的关系, 对输送带上的秸秆进行受力分析。以曲柄端点

A 为原点, 摇杆初始位置 AD 的延长线为 x 轴, 垂直摇杆初始位置 AD 线为 y 轴, 建立坐标系 xAy ; 以拨草齿5与秸秆接触点 O 为原点, 平行输送带面为 x_1 轴, 垂直输送带面为 y_1 轴, 建立坐标系 x_1Oy_1 。秸秆受力分析见图4。



1. 曲柄; 2. 连杆; 3. 摇杆; 4. 机架; 5. 拨草齿; 6. 稻草秸秆; 7. 钉齿输送带。

F 为拨草齿作用于稻草秸秆的外力; f 为秸秆与输送带的摩擦力; F' 为稻草秸秆之间的粘结力; G 为秸秆重力; F_{R12} 为曲柄作用于连杆上的总反力; F_{R12x} 和 F_{R12y} 分别为 F_{R12} 沿 x 和 y 坐标轴的分力; F_{R23} 、 F_{R23x} 、 F_{R23y} 、 F_{R34} 、 F_{R34x} 、 F_{R34y} 、 F_{R41} 、 F_{R41x} 、 F_{R41y} 含义相同; M_b 和 M_r 分别为曲柄上的驱动力矩和摇杆上的阻力矩; ω 为输送带的转速; α 为钉齿输送带相对地面倾角; α_1 为重力与 y_1 轴的夹角; β_1 和 β_2 分别为坐标系 x_1Oy_1 旋转前后 F_{R23} 与 x_1 轴的夹角; θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别为曲柄、连杆和摇杆的方位角。

1. Crank; 2. Connecting rod; 3. Rocker; 4. Frame; 5. Toggle teeth; 6. Straw stalks; 7. Nail teeth conveyor belt.

F is the external force of toggle teeth acting on straw; f is the friction between straw and conveyor belt; F' is the bonding force between straw; G is the gravitational force of straw; F_{R12} is the total reaction force of crank acting on connecting rod; F_{R12x} and F_{R12y} , respectively are the component forces of the total reaction force along the x and y coordinate axes; F_{R23} 、 F_{R23x} 、 F_{R23y} 、 F_{R34} 、 F_{R34x} 、 F_{R34y} 、 F_{R41} 、 F_{R41x} 、 F_{R41y} have the same meanings; M_b and M_r are the driving torque on the crank and the resisting torque on the rocking bar, respectively; ω is the rotational speed of the conveyor belt; α is the inclination angle of the pegged conveyor belt with respect to the ground; α_1 is the angle of gravity with the y_1 axis; β_1 and β_2 are the angles between F_{R23} and the x_1 axis before and after the rotation of the coordinate system x_1Oy_1 , respectively; θ_1 、 θ_2 、 θ_3 are the azimuthal angles of the crank, connecting rod and rocker respectively.

图4 稻草秸秆受力分析示意图

Fig. 4 Schematic diagram of straw force analysis

采用复数矢量法对稻草秸秆受力进行分析。
求解如下:

各力对 D 点取矩, 根据 $\sum M_D = 0$, 并应用欧拉公式 $e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta$, 得:

$$l_3 \cdot F_{R23} = l_3 F_{R23x} \sin\theta_3 - l_3 F_{R23y} - M_r + i(l_3 F_{R23x} \cos\theta_3 - l_3 F_{R23y} \sin\theta_3) = 0 \quad (3)$$

式中: l_3 为摇杆长度, mm; F_{R23} 为连杆 2 作用于摇杆 3 上的总反力, N; F_{R12x} 和 F_{R12y} 分别为总反力 F_{R12} 沿 x 和 y 坐标轴的分力, N; M_r 为摇杆上的阻力矩, N·m; θ_3 为摇杆的方位角, ($^\circ$)。由式(3)实部等于 0, 得:

$$l_3 F_{R23x} \sin\theta_3 - l_3 F_{R23y} - M_r = 0 \quad (4)$$

各力对 B 点取矩, 根据 $\sum M_B = 0$, 可得:

$$l_2 \cdot (-F_{R23}) = -l_2 F_{R23x} \sin\theta_2 - l_2 F_{R23y} \cos\theta_2 - i(l_2 F_{R23x} \sin\theta_2 - l_2 F_{R23y} \cos\theta_2) = 0 \quad (5)$$

式中: l_2 为连杆长度, mm; θ_2 为连杆的方位角, ($^\circ$)。由式(5)实部等于 0, 可得:

$$-l_2 F_{R23x} \sin\theta_2 - l_2 F_{R23y} \cos\theta_2 = 0 \quad (6)$$

式(4)和(6)联立求解得:

$$\begin{cases} F_{R23x} = \frac{F_{R23y} \cos\theta_2}{\sin\theta_2} \\ F_{R23y} = \frac{M_r l_2 \sin\theta_2 + l_3 \cos\theta_2}{l_2 l_3 \sin\theta_2 \cos\theta_3} \end{cases} \quad (7)$$

对输送带上的稻草秸秆受力分析得:

$$a = \frac{F_{R23} \cos\beta_1 + mg \sin\alpha - (\mu mg \cos\alpha + F')}{m} \quad (8)$$

式中: F' 为稻草秸秆之间的粘结力, N; a 为秸秆运动加速度, m/s^2 ; α 为钉齿输送带相对地面倾角, ($^\circ$); β_1 为 F_{R23} 与 x_1 轴的夹角, ($^\circ$); μ 为秸秆与输送带之间的摩擦因数; m 为秸秆累计质量, kg。

由速度位移公式得:

$$\begin{cases} v(t) = \int_0^t a(t) dt \\ v^2 = 2as \end{cases} \quad (9)$$

式中: t 为冲击作用力时间, s; v 为秸秆运动速度, m/s ; s 为秸秆滑移距离, 由式(8)和(9)得:

$$s = \frac{m((\int_0^t a(t) dt) - v)^2}{2(mg \sin\alpha - (\mu mg \cos\alpha + F'))} \quad (10)$$

秸秆滑移距离(s)由冲击作用力时间(t)、秸秆喂入速度(v)、秸秆与输送带之间的摩擦因数(μ)、输送带相对地面倾角(α)和秸秆之间的粘结力(F')决定。稻草秸秆滑移决定打散效果,本研究根据前期预试验选取 $\alpha=15^\circ$,稻草秸秆打散输送效果满足要求。

3 EDEM-RecurDyn 耦合仿真分析

3.1 仿真模型建立

在三维软件SOLIDWORKS中建立打散输送装置模型,完成建模与装配,保存为.step格式导入到RecurDyn中进行动力学仿真求解^[16]。在RecurDyn中添加约束和驱动。需添加的主要约束有:曲柄、摇杆

和三级梳分拨草齿分别以Ground为参考系建立旋转副,连杆和各级梳分拨草齿之间添加旋转副,给曲柄以恒定旋转速度^[17]。打开EDEM和RecurDyn的耦合接口,利用External SPI功能模块下的EDEM接口模块将各部件以.wall文件形式导出,通过EDEM中Geometries模块下的Import Geometry from RecurDyn功能将.wall文件导入EDEM中,导入生成柔性秸秆后的耦合仿真模型见图5。

在EDEM2022.1软件中建立稻草秸秆颗粒模型,在稻草秸秆内部添加Bonding V2键形成柔性颗粒。秸秆与各部件之间的接触模型均为Hertz-Mindlin (no slip),设置拨草齿、稻草秸秆和输送带

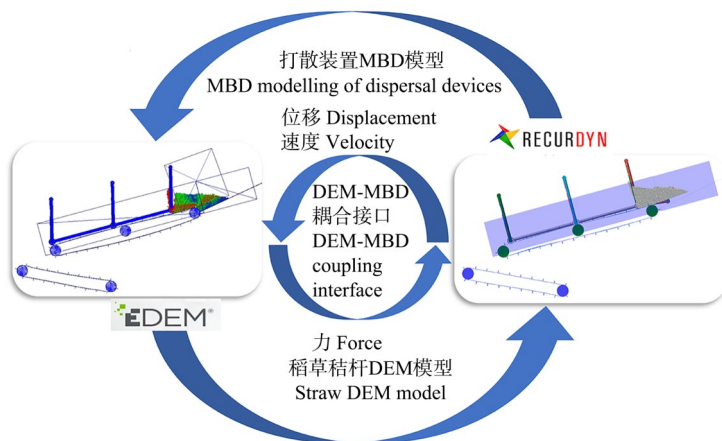


图5 打散输送装置EDEM-RecurDyn耦合模型

Fig. 5 Coupled EDEM-RecurDyn modeling of break-up conveyors

表1 稻草秸秆与打散输送装置的离散元仿真参数

Table 1 Discrete element simulation parameters between straw and dispersion conveying device

参数 Parameters	稻草秸秆 Straw	拨草齿 Toothing	输送带 Conveyor belt
泊松比 Poisson's ratio	0.4	0.3	0.48
剪切模量/Pa Shear modulus	1.0×10^6	7.9×10^{10}	1.0×10^9
密度/(kg/m^3) Densities	126.4	7.8×10^3	1.38×10^3
静摩擦因数 Static friction factor	0.19	0.20	0.784
滚动摩擦因数 Rolling friction factor	0.09	0.15	0.035
碰撞恢复因数 Crash recovery factor	0.21	0.30	0.711

注:静摩擦因数、滚动摩擦因数和碰撞恢复因数均为与稻草秸秆的接触参数。

Note: Static friction factor, rolling friction factor and collision recovery factor are with straw parameters.

3.2 试验指标

本研究以秸秆质量均匀度和沙障孔隙度评价打散输送装置的工作性能。

1) 秸秆不均匀度测定参照 GB/T24675.6—2021《保护性耕作机械·秸秆粉碎还田机》^[21], 计算公式为:

$$F_b = \frac{1}{\overline{M}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (M_{zi} - \overline{M})^2}{5}} \times 100 \quad (11)$$

式中: F_b 为秸秆覆盖不均匀度, %; $\overline{M}$ 为测定区域内各点秸秆平均质量, $\overline{M} = \sum_{i=1}^6 M_{zi} / 6$; M_{zi} 为第 i 个区域的秸秆总质量, kg。本研究定义秸秆质量均匀度 (U) 为:

$$U = 1 - F_b \quad (12)$$

2) 沙障孔隙度指沙障空隙面积与沙障总面积的比值, 是衡量沙障透风程度的指标^[22]。在仿真中利用 EDEM 后处理模块 Setup Selections 模块统计网格得到单位体积秸秆质量, 沙障孔隙度 (Φ) 为:

$$\Phi = \frac{w}{\rho} \times 100\% \quad (13)$$

式中: w 为单位体积内稻草秸秆质量, kg; ρ 为稻草秸秆密度, kg/m³。

3.3 单因素仿真试验

采用单因素仿真试验探究曲柄半径、曲柄转速和拨草间隙对秸秆质量均匀度和沙障孔隙度的影响规律。设置 EDEM 仿真时间步长为 10%, RecurDyn 时间步长为 500 步, 仿真时间为 5 s, 每组试验 3 次, 取平均值^[23-24]。

3.3.1 曲柄半径对秸秆质量均匀度和沙障孔隙度的影响

曲柄半径决定打散输送装置的摆动幅度和拨草力矩, 影响打散输送性能。根据前期预试验, 选取曲柄半径分别为 24、44、64、84、104 mm, 对秸秆质量均匀度和沙障孔隙度的影响见表 2。可知, 曲柄半径增大则摇杆摆动角度增大, 秸秆之间的粘结被破坏, 秸秆质量均匀度和沙障孔隙度随之上升。曲柄半径 < 44 mm, 摆动角度过小, 秸秆茎叶之间仍缠绕粘结, 打散效果不佳; 曲柄半径 > 84 mm, 摆动幅度过大, 各项性能指标均不满足技术要求。综上, 选择曲柄半径为 44~84 mm。

表 2 曲柄半径对秸秆质量均匀度和沙障孔隙度的影响

Table 2 Effect of crank radius on straw mass uniformity and sand barrier porosity

曲柄半径/mm Crank radius	秸秆质量均匀度/% Straw mass uniformity	沙障孔隙度/% Sand barrier porosity
24	69.8	16.7
44	77.5	26.5
64	78.8	25.4
84	75.6	26.8
104	73.4	19.7

3.3.2 曲柄转速对秸秆质量均匀度和沙障孔隙度的影响

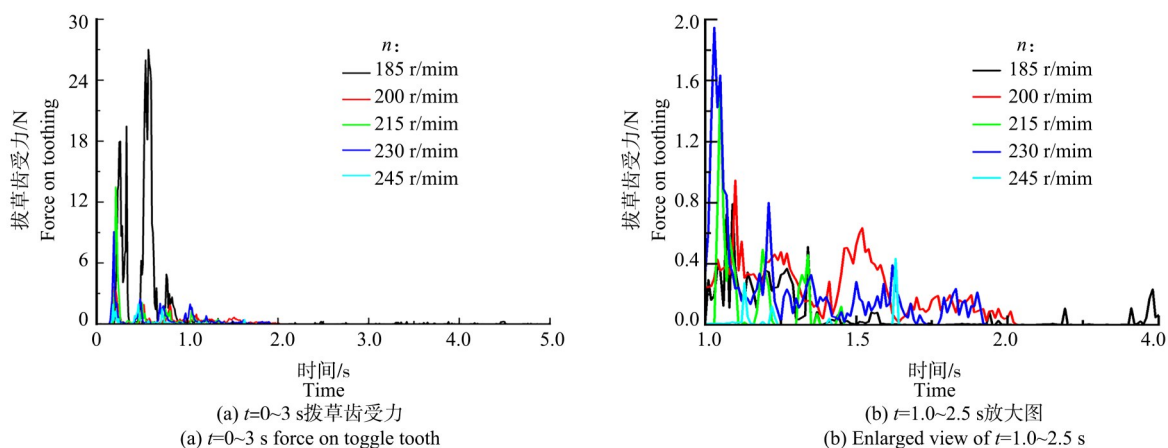
根据前期预试验, 选取曲柄转速分别为 185、200、215、230、245 r/min, 对秸秆质量均匀度和沙障孔隙度的影响见表 3。当曲柄转速 < 200 r/min 时, 曲柄转速过慢, 钉齿带强制从底层输送秸秆, 上层秸秆未被打散, 打散效果差; 当转速 > 230 r/min, 曲柄转速过高,

钉齿输送带未输送秸秆, 打散效果差。不同曲柄转速下拨草齿受力不同, 影响打散输送效果。结合不同曲柄转速 (n) 下拨草齿受力随时间 (t) 的变化 (图 6) 可知, 当曲柄转速 < 200 r/min 时, 拨草齿打草瞬间受力峰值高且剧烈变化, 稻草秸秆打散输送效果不佳; 当曲柄转速为 200~230 r/min 时, 拨草齿受力峰值较低且稳定, 满足要求; 当曲柄转速 > 230 r/min 时, 拨草齿受力

表 3 曲柄转速对秸秆质量均匀度和沙障孔隙度的影响

Table 3 Effect of crank speed on straw mass uniformity and sand barrier porosity

曲柄转速/(r/min) Crank speed	秸秆质量均匀度/% Straw mass uniformity	沙障孔隙度/% Sand barrier porosity
185	69.3	20.4
200	77.3	25.5
215	78.5	27.6
230	76.4	26.4
245	70.4	21.2

图 6 不同曲柄转速(n)下拨草齿受力随时间(t)的变化Fig. 6 Variation of force on tothing with time(t) at different crank speeds (n)

时间极短,表明秸秆被瞬间打飞,各项性能指标均不满足要求。综上,选择曲柄转速为200~230 r/min。

3.3.3 拨草间隙对秸秆质量均匀度和沙障孔隙度的影响

根据前期预试验,选取拨草间隙分别为20、30、40、50、60 mm,拨草间隙对秸秆质量均匀度和沙障孔隙度的影响见表4。可知,拨草间隙>30 mm

或<50 mm时,各项性能指标均不满足技术要求。不同拨草间隙下拨草齿和输送带受力不同,影响打散输送效果。结合不同拨草间隙下拨草齿受力和输送带沿y轴的受力(图7)可知,不同拨草间隙下,拨草齿受力峰值分别为12.5、47.7、67.8、28.5、16.4 N,输送带沿y方向受力平均值分别为-38.8、-23.8、-12.1、-18.2、-34.4 N,可知拨草

表 4 拨草间隙对秸秆质量均匀度和沙障孔隙度的影响

Table 4 Effect of rasp clearance on straw mass uniformity and sand barrier porosity

拨草间隙/mm Toggle clearance	秸秆质量均匀度/% Straw mass uniformity	沙障孔隙度/% Sand barrier porosity
20	74.7	18.5
30	76.2	25.5
40	79.5	26.3
50	75.5	25.4
60	67.4	20.5

间隙 <30 mm,稻草秸秆堵塞,输送带受 y 方向接触力变大;拨草间隙 >50 mm,拨草齿受力极小,导致秸秆摊薄效果不佳,各项性能均不满足技术要求。综上,选择拨草间隙为 $30\sim 50$ mm。

3.4 响应面优化试验

3.4.1 试验方案及结果分析

为进一步研究曲柄转速、曲柄半径和拨草间

隙对打散输送装置性能的影响,基于前期预试验和单因素仿真试验确定的因素范围,采用 Box-Behnken 试验法进行分析。以曲柄转速(x_1)、曲柄半径(x_2)和拨草间隙(x_3)为自变量,以秸秆质量均匀度(Y_1)和沙障孔隙度(Y_2)为试验指标,打散输送装置性能的试验因素编码见表5,试验方案及结果见表6。

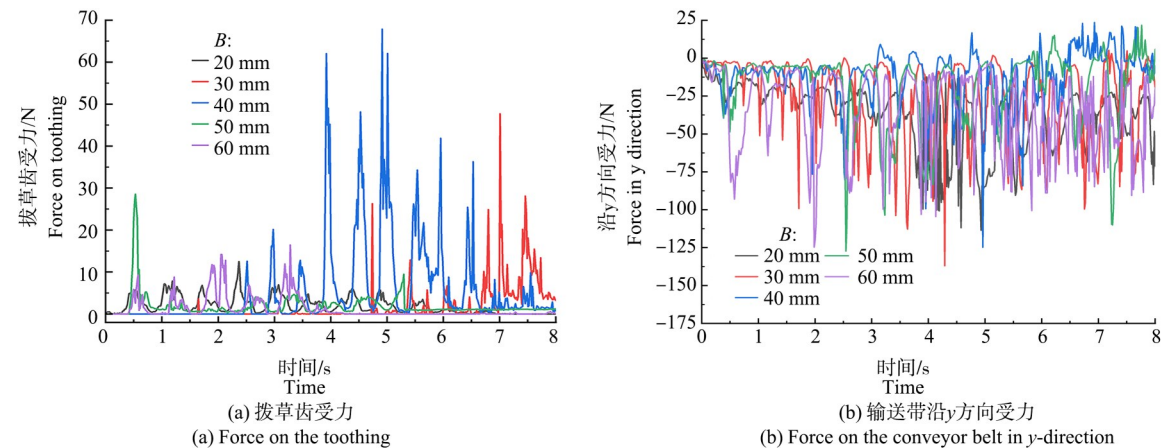


图7 不同拨草间隙(B)下拨草齿和输送带沿y轴的受力情况
Fig. 7 Variation of force on the tothing and conveyor belt along the y-axis for different tothing gaps (B)

表5 打散输送装置性能试验因素与水平
Table 5 Test factors and levels for breakaway conveyors

水平 Level	因素 Factor		
	x_1 ,曲柄转速/(r/min)	x_2 ,曲柄半径/mm	x_3 ,拨草间隙/mm
	Crank speed	Crank radius	Toggle clearance
1	200	44	30
0	215	64	40
-1	230	84	50

对试验结果进行方差分析,结果见表7。秸秆质量均匀度和沙障孔隙度与试验因素的回归模型均极显著($P<0.01$)。秸秆质量均匀度和沙障孔隙度模型决定性系数分别为0.991 4和0.966 2,模型拟合程度较高,与实际值相差较小。去除不显著因素后,分别建立秸秆质量均匀度 Y_1 和沙障孔隙度 Y_2 对曲柄转速 x_1 、曲柄半径 x_2 和拨草间隙 x_3 的二次多项式回归方程,如下:

$$Y_1=56.68-1.50x_1-2.06x_2-1.75x_3-3.02x_2x_3+13.31x_1^2+9.32x_2^2+6.88x_3^2$$

(14)

$$Y_2=28.57+1.5x_1x_2-2.58x_1x_3-1.88x_2x_3-3.7x_1^2-4.17x_3^2$$

(15)

各因素对秸秆质量均匀度影响的主次顺序为:拨草间隙(x_3)、曲柄半径(x_2)和曲柄转速(x_1);交互因素 x_2x_3 影响极显著($P<0.01$)。当曲柄转速为215 r/min,曲柄半径一定时,秸秆质量均匀度随拨草间隙的增大先减小后增大;拨草间隙一定时,秸秆质量均匀度随曲柄半径的增大先减小后增大(图8(a))。

各因素对沙障孔隙度影响的主次顺序为:曲柄转速(x_1)、拨草间隙(x_3)和曲柄半径(x_2)。交互因素 x_1x_3

表 6 打散输送装置性能试验设计方案与结果

Table 6 Break-up conveyor test design programme and results

编号 Number	因素水平 Factor level			指标 Index		编号 Number	因素水平 Factor level			指标 Index	
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$		X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	1	1	0	82.95	24.71	10	0	−1	1	76.34	25.17
2	−1	1	0	79.75	24.22	11	0	1	−1	75.44	25.98
3	1	−1	0	78.44	21.09	12	0	−1	−1	65.23	21.24
4	−1	−1	0	76.10	26.62	13	0	0	0	58.97	30.31
5	1	0	1	79.97	17.37	14	0	0	0	55.29	28.19
6	−1	0	1	75.70	25.70	15	0	0	0	57.22	29.05
7	1	0	−1	76.99	20.87	16	0	0	0	55.96	28.36
8	−1	0	−1	74.82	18.90	17	0	0	0	55.95	26.96
9	0	1	1	74.48	22.38						

注： X_1 、 X_2 、 X_3 分别为曲柄转速、曲柄半径和拨草间隙的水平值； Y_1 和 Y_2 分别为秸秆质量均匀度和沙障孔隙度。
Note: X_1 、 X_2 、 X_3 are the horizontal values of crank speed, crank radius and toggle clearance, respectively; Y_1 and Y_2 are straw mass uniformity and sand barrier porosity, respectively.

表 7 秸秆质量均匀度与沙障孔隙度方差分析

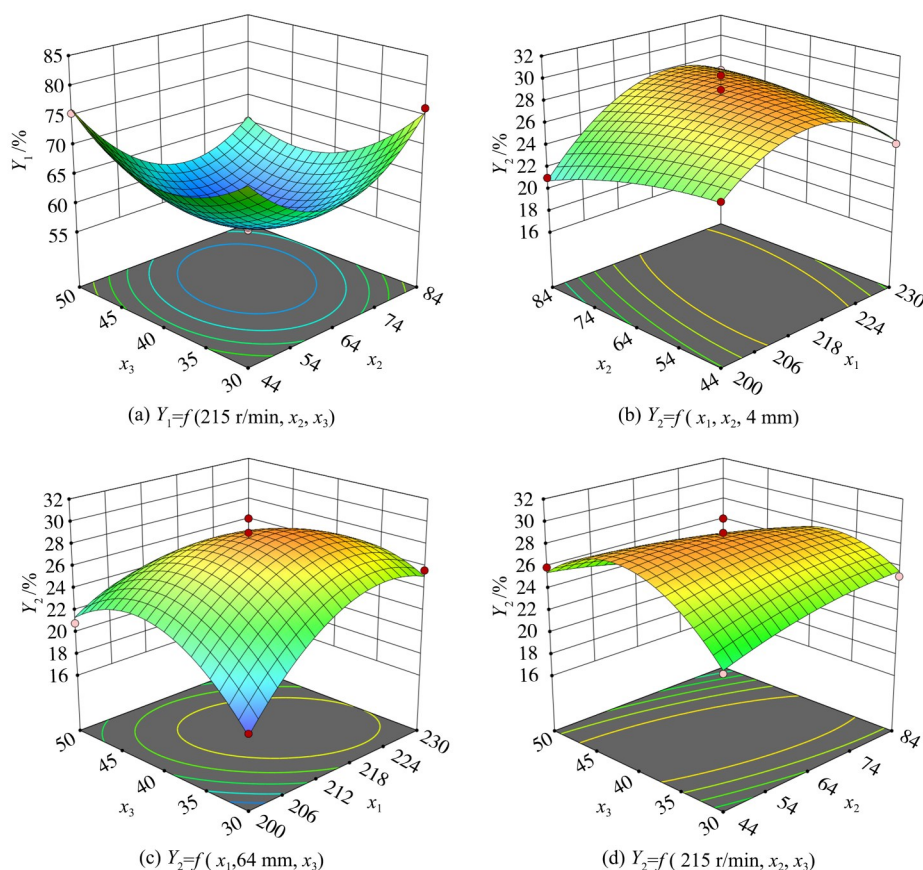
Table 7 Analysis of variance of straw mass uniformity and sand barrier porosity

来源 Source	秸秆质量均匀度 Straw mass uniformity				沙障孔隙度 Sand barrier porosity			
	平方和 Sum of square	自由度 Degree of freedom	F	P	平方和 Sum of square	自由度 Degree of freedom	F	P
模型 Model	1 564.71	9	89.68	<0.000 1	212.40	9	22.25	0.000 2
x_1	17.94	1	9.25	0.018 8	16.25	1	15.31	0.005 8
x_2	34.07	1	17.58	0.004 1	1.26	1	1.18	0.312 6
x_3	24.54	1	12.66	0.009 3	1.65	1	1.55	0.252 8
x_1x_2	0.184 9	1	0.095 4	0.766 4	9.06	1	8.54	0.022 3
x_1x_3	1.10	1	0.568 7	0.475 4	26.52	1	25.00	0.001 6
x_2x_3	36.42	1	18.79	0.003 4	14.18	1	13.36	0.008 1
x_1^2	746.45	1	385.04	<0.000 1	57.59	1	54.29	0.000 2
x_2^2	365.52	1	188.55	<0.000 1	2.16	1	2.03	0.196 9
x_3^2	199.14	1	102.72	<0.000 1	73.07	1	68.88	<0.000 1
残差 Residual	13.57	7			7.43	7		
失拟项 Lack of fit	5.05	3	0.790 6	0.559 1	1.39	3	0.306 3	0.820 8
误差 Pure error	8.52	4			6.04	4		
总计 Total	1 578.28	16			219.82	16		

注： $P<0.01$ 表示影响极显著， $0.01<P<0.05$ 表示影响显著。
Note: $P<0.01$ indicates highly significant effect and $0.01<P<0.05$ indicates significant effect.

和 x_2x_3 影响极显著($P<0.01$);交互因素 x_1x_2 影响显著($P<0.05$)。当拨草间隙为40 mm时,曲柄转速一定时,沙障孔隙度随曲柄半径的增大而减小;曲柄半径一定时,沙障孔隙度随曲柄转速的增大先增大后减小(图8(b))。当曲柄半径为64 mm,曲柄转速一定时,沙障孔隙度随拨草间隙的增大先增大后减小;拨

草间隙一定时,沙障孔隙度随曲柄转速的增大先增大后减小(图8(c))。当曲柄转速为215 r/min,曲柄半径一定时,沙障孔隙度随拨草间隙的增大先增大后减小;拨草间隙为低水平时,沙障孔隙度随曲柄半径的增大呈上升趋势,拨草间隙为高水平时,沙障孔隙度随曲柄半径的增大而减小(图8(d))。



x_1, x_2, x_3 分别为曲柄转速、曲柄半径、拨草间隙。 Y_1 和 Y_2 分别为秸秆质量均匀度和沙障孔隙度。

x_1, x_2, x_3 are crank speed, crank radius, and toggle clearance, respectively. Y_1 and Y_2 are straw mass uniformity and sand barrier porosity, respectively.

图8 各因素交互作用对试验指标的响应曲面

Fig. 8 Response surface of the interaction of factors on the experimental indicators

3.4.2 试验结果目标优化

以秸秆质量均匀度(Y_1)和沙障孔隙度(Y_2)为最终优化目标,结合各试验因素取值范围,进行参数优化。设定目标函数及约束条件为:

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ 75\% < Y_1(x_1, x_2, x_3) < 100\% \\ 25\% \leq Y_2(x_1, x_2, x_3) \leq 50\% \\ 200 \text{ r/min} \leq x_1 \leq 230 \text{ r/min} \\ 44 \text{ mm} \leq x_2 \leq 84 \text{ mm} \\ 30 \text{ mm} \leq x_3 \leq 50 \text{ mm} \end{cases} \quad (16)$$

应用Design-Expert软件优化模块,对约束条件优化求解得:曲柄转速为200 r/min、曲柄半径为44 mm、拨草间隙为48.6 mm,秸秆质量均匀度为88.8%,沙障孔隙度为25%,打散输送装置性能最优。

4 验证试验

曲柄摇杆-钉齿输送协同铺设草方格装置参数优化验证试验于2024年3月在甘肃省民勤治沙研究所后面的沙漠深处进行。为减小其他因素对试验结果的影响,保证试验结果数据的可靠性,选用

含水率为10%~15%^[25],长度1.0~1.2 m的长散稻草秸秆捆为试验材料。以秸秆质量均匀度和沙障孔隙度为评价指标,对优化后的最优参数进行取整,设定曲柄转速为200 r/min、曲柄半径44 mm、拨草间隙为49 mm进行试验。试验后的指标每项试

验指标测量进行10组,求其平均值。测得秸秆质量均匀度为86.96%,沙障孔隙度为26.05%,与仿真实验值的相对误差分别为1.89%和4.03%,验证试验值与理论值差异较小。本研究所设计的打散输送装置及被打散后的稻草秸秆见图9。



1. 拨草齿; 2. 曲柄; 3. 储料箱; 4. 发动机; 5. 压草碾轮; 6. 钉齿输送带
1. Toothing; 2. Crank; 3. Hopper; 4. Engine; 5. Grass roller; 6. Spike conveyor belt

图9 打散输送装置及打散后的稻草秸秆

Fig. 9 Dispersing and conveying device and straw after dispersing

5 结 论

本研究基于草方格铺设技术要求,设计了一种基于曲柄摇杆机构配合输送带的新型稻草秸秆三级打散输送装置。对装置的关键部件进行结构和参数设计,利用EDEM-RecurDyn联合仿真技术,对稻草秸秆打散输送过程进行了模拟研究。采用前期预试验和单因素试验,以曲柄转速、曲柄半径和拨草间隙为影响因素,以秸秆质量均匀度和沙障孔隙度为响应值,探究各因素对响应值的影响规律。采用Box-Behnken试验法设计了三因素三水平试验,得到了最优参数组合:曲柄转速200 r/min、曲柄半径44 mm、拨草间隙48.6 mm。采用验证试验验证仿真优化结果的准确性,结果表明:打散输送装置处于最佳工作参数时稻草秸秆质量均匀度为86.96%,沙障孔隙度26.05%,验证试验结果值与理论值差异较小,满足机械化铺设草方格沙障的技术要求。

参考文献 References

[1] 李胜男, 纪雄辉, 邓凯, 朱坚, 李尝君, 简燕, 彭华. 区域秸秆资源分布及全量化利用潜力分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 221-228

Li S N, Ji X H, Deng K, Zhu J, Li C J, Jian Y, Peng H. Analysis of regional distribution patterns and full utilization potential of crop straw resources [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(12): 221-228 (in Chinese)

[2] 赵静. 中国农作物秸秆综合利用分析与对策[J]. 农业展望, 2019, 15(12): 121-124

Zhao J. Analysis and countermeasure of comprehensive utilization of crop straw in China [J]. *Agricultural Outlook*, 2019, 15(12): 121-124 (in Chinese)

[3] 张利文, 周丹丹, 高永. 沙障防沙治沙技术研究综述[J]. 内蒙古师范大学学报: 自然科学汉文版, 2014, 43(3): 363-369

Zhang L W, Zhou D D, Gao Y. Review of sand barrier desertification combat in China [J]. *Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 43(3): 363-369 (in Chinese)

[4] Abdoulaye, Aguibou, DIALLO. 水稻秸秆化学组成、机械特性及近红外光谱表征[D]. 北京: 中国农业大学, 2018

Abdoulaye, Aguibou, DIALLO. Chemical composition, mechanical properties and near infrared spectroscopy characterization of rice straw [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018 (in Chinese)

[5] 余伟军, 孙步功, 张鹏, 祁渊, 徐先英, 马新兵, 郑小宝. 我国固沙草方格机械装备的研究现状与展望[J]. 林业机械与木工设备, 2023, 51(6): 9-15, 20

Yu W J, Sun B G, Zhang P, Qi Y, Xu X Y, Ma X B, Zheng X B. Research status and prospect of checkered machinery equipment of straw checkerboard barrier [J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2023, 51(6): 9-15, 20 (in Chinese)

[6] 舒庆, 刘晋浩. 防风固沙草方格铺设机器人总体设计[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 1-10

- 2007, 38(6): 199-201
- Shu Q, Liu J H. Overall design of grid laying robot for wind-proof and sand-fixing grass [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(6): 199-201 (in Chinese)
- [7] 常桥墩. 小型草方格固沙机的设计[D]. 银川:宁夏大学, 2021
- Chang Q D. Design of small grass grid sand fixation machine [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021 (in Chinese)
- [8] 郭壮, 郑威强, 张立萍, 李飞. 基于DEM-MBD固沙装备杆式物料输送机机构设计与分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(1): 169-177, 187
- Guo Z, Zheng W Q, Zhang L P, Li F. Design and analysis of rod material conveying mechanism for sand-fixing equipment based on DEM-MBD[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2022, 57(1): 169-177, 187 (in Chinese)
- [9] 刘大为. 草帘编织稻秆有序铺放机理与摊铺分束装置研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2020
- Liu D W. Studies on mechanism of rice straw orderly laying and device of spreading and raking fascicles for straw-curtain braiding [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [10] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 李泽华, 王曦成. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1-20
- Zeng Z W, Ma X, Cao X L, Li Z H, Wang X C. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(4): 1-20 (in Chinese)
- [11] 袁军. 基于DEM-MBD耦合的自激振动深松机作业过程仿真分析与试验研究[D]. 长春:吉林大学, 2022
- Yuan J. Simulation analysis and experimental study on operation process of self-excited vibration subsoiler based on DEM-MBD coupling [D]. Changchun: Jilin University, 2022 (in Chinese)
- [12] 薛军, 董朋飞, 胡树平, 李璐璐, 王克如, 高尚, 王涓州, 李少昆. 玉米倒伏对机械粒收损失的影响及倒伏减损收获技术[J]. 玉米科学, 2020, 28(6): 116-120, 126
- Xue J, Dong P F, Hu S P, Li L L, Wang K R, Gao S, Wang Y Z, Li S K. Effect of lodging on maize grain loss and loss reduction technology in mechanical grain harvest[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(6): 116-120, 126 (in Chinese)
- [13] 何进, 李洪文, 陈海涛, 卢彩云, 王庆杰. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 1-19
- He J, Li H W, Chen H T, Lu C Y, Wang Q J. Research progress of conservation tillage technology and machine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 1-19 (in Chinese)
- [14] 黄东, 姚灵, 武拉平, 朱欣頔. 中国水稻收获环节的损失有多高: 基于5省6地的实验调查[J]. 自然资源学报, 2018, 33(8): 1427-1438
- Huang D, Yao L, Wu L P, Zhu X D. Measuring rice loss during harvest in China: based on experiment and survey in five provinces [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(8): 1427-1438 (in Chinese)
- [15] 秦宽, 郎旭涛, 沈周高, 吴正敏, 毕海军, 曹成茂, 孙燕, 葛俊, 方梁菲. 茶园仿生往复开沟松土机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 29-39
- Qin K, Lang X T, Shen Z G, Wu Z M, Bi H J, Cao C M, Sun Y, Ge J, Fang L F. Design and experiment of reciprocating furrowing and loosening machine for tea garden [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(3): 29-39 (in Chinese)
- [16] 张红梅, 张晨明, 李志杰, 丁力, 朱晨辉, 张静. 基于EDEM-RecurDyn的玉米指夹式排种器振动特性分析与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(S1): 36-46
- Zhang H M, Zhang C M, Li Z J, Ding L, Zhu C H, Zhang J. Simulation analysis and optimization of vibration characteristics of corn finger clip seeding device based on EDEM-RecurDyn coupling [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(S1): 36-46 (in Chinese)
- [17] 赖庆辉, 贾广鑫, 苏微, 赵立军, 邱小宝, 吕勤. 基于DEM-MBD耦合的链勺式人参精密排种器研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 91-104
- Lai Q H, Jia G X, Su W, Zhao L J, Qiu X B, Lü Q. Design and test of chain-spoon type precision seed-metering device for ginseng based on DEM-MBD coupling [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(3): 91-104 (in Chinese)
- [18] 马紫涛, 赵智豪, 全伟, 石方刚, 高晨, 吴明亮. 基于EDEM的水稻残茬秸秆离散元仿真参数标定[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(11): 103-113
- Ma Z T, Zhao Z H, Quan W, Shi F G, Gao C, Wu M L. Calibration of discrete element parameter of rice stubble straw based on EDEM [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(11): 103-113 (in Chinese)
- [19] 龚凤, 胡媛, 鲍安红, 李丹, 高涛, 王春龙. 基于Hertz-Mindlin模型的稻草秸秆参数标定及显著性分析[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2022, 44(12): 186-196
- Gong F, Hu M, Bao A H, Li D, Gao T, Wang C L. Parameter calibration and significance analysis of rice straw based on Hertz-Mindlin Model [J]. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2022, 44(12): 186-196 (in Chinese)
- [20] 金秀南, 张军昌, 薛晶峰, 郭呈成, 何宸湜, 路力权. 玉米种子与橡胶带离散元接触参数标定[J]. 农机化研究, 2022, 44(07): 39-43
- Jin X N, Zhang J C, Xue J F, Guo C C, He C X, Lu L Q. Calibration of discrete element contact parameters of maize seed and rubber belt [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(7): 39-43 (in Chinese)
- [21] 李晓腾. 基于机器视觉的秸秆覆盖率和均匀度检测方法研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2023
- Li X T. Research on straw cover detection and unevenness detection based on machine vision [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [22] 李凯崇, 谭立海, 石龙, 魏永杰. 孔隙率对芦苇沙障风沙防护效果影响分析[J]. 铁道学报, 2022, 44(5): 166-170
- Li K C, Tan L H, Shi L, Wei Y J. Influence of porosity on blown sand protection effect of reed sand barrier [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(5): 166-170 (in Chinese)
- [23] 王小勇, 余志, 倪德江. 往复式茶叶振动抖筛机优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 143-153
- Wang X Y, Yu Z, Ni D J. Optimization design and experiment of reciprocating tea vibrating-sifting machine [J]. *Transactions of the*

- Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(9): 143-153 (in Chinese)
- [24] 戴奇. 基于DEM-MBD耦合的玉豆复合排种种群扰动过程分析与试验[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023
- Dai Q. Analysis and experiment on the perturbation process of corn-soybean composite row seed population based on DEM-MBD coupling [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [25] 孙占峰, 蒋恩臣. 稻草秸秆力学特性研究[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(5): 660-664
- Sun Z F, Jiang E C. Study on mechanical properties of rice straw [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007, 38(5): 660-664 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 余伟军, 中共预备党员, 甘肃农业大学硕士研究生。参与国家自然科学基金项目、甘肃省重大科技项目。以第一作者发表学术论文2篇。



通讯作者简介: 孙步功, 中共党员, 教授, 博士生导师。主要研究方向为旱作农业全程机械化、林草种子加工等。主持、参与完成国家自然科学基金、科技部科技成果转化项目等各类项目10余项, 获甘肃省科技进步三等奖1项(2/10), 在《农业机械学报》《农业工程学报》等期刊发表论文50余篇, 以第一发明人授权国家发明专利7项。获甘肃省教学成果奖二等奖1项(1/10)、厅级奖1项(2/7); 负责的“农业机械化及其自动化创新创业教育教学团队”获批省级教学团队; 主编教材7部。