

水稻秸秆离散元柔性模型参数标定与试验验证

夏俊芳^{1,2} 张 朋¹ 苑宏文¹ 杜 俊^{1,2} 郑 侃^{1,2} 李宇飞^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对秸秆还田机具关键部件设计优化过程中秸秆-刀具互作关系分析缺乏准确秸秆离散元模型的问题, 本文以水稻秸秆为研究对象, 基于 Hertz-Mindlin with Bonding 接触模型, 采用颗粒替换方式构建水稻秸秆离散元柔性模型, 开展了离散元接触模型参数标定与多工况试验验证。通过物理试验测定了水稻秸秆摩擦因数, 以秸秆弯曲试验测得最大载荷作为参数标定试验指标, 通过 Plackett-Burman 试验和最陡爬坡试验筛选柔性模型显著性因素及其最优值范围, 并由 Central-Composite 试验确定了显著性因素的最优值组合为: 法向接触刚度 $3.040 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$ 、切向接触刚度 $2.296 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$, 该标定参数值所得最大载荷仿真值与实测值相对误差为 1.82%, 表明标定参数有效。通过刀具弯曲试验和旋耕刀旋转切割试验验证上述标定方法在不同工况下的有效性, 刀具弯曲试验中仿真所得最大载荷与实测最大载荷相对误差不大于 4.55%, 旋耕刀旋转切割试验中仿真所得最大扭矩与实测最大扭矩相对误差不大于 7.95%, 研究结果表明, 以弯曲试验参数标定法构建的水稻秸秆柔性模型在秸秆弯曲试验和旋耕刀旋转切割过程仿真中均准确有效, 适用于旋耕作业条件下仿真分析, 可为秸秆还田机具旋耕部件优化设计提供参考。

关键词: 水稻秸秆; 离散元; 参数标定; 切割; 旋耕

中图分类号: S222.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)09-0174-11

OSID:



Calibration and Verification of Flexible Rice Straw Model by Discrete Element Method

XIA Junfang^{1,2} ZHANG Peng¹ YUAN Hongwen¹ DU Jun^{1,2} ZHENG Kan^{1,2} LI Yufei^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Rice straw in the fields of the middle and lower reaches of the Yangtze River exhibits high stubble retention and a substantial straw volume. The interaction between straw and tools are complicated and have a significant impact on the performance of straw incorporation implement. The lack of accurate rice straw model by discrete element method (DEM) limits the analysis of the interaction between straw and tools during the design and optimization of key components of straw incorporation implement. A flexible rice straw model was established by the particle replacement method based on the Hertz-Mindlin with Bonding contact model in DEM. Calibration of the discrete element model and multi-condition experimental verification were conducted. The friction coefficients of rice straw were determined through physical experiments, and the maximum load was measured in the straw bending test as the calibration index. The Plackett-Burman experiment and the steepest ascent experiment were used to select significant factors and their optimal value ranges for the flexible model, and the optimal parameter combinations for significant factors of the straw bonding model were determined by Central-Composite tests. The result was the normal contact stiffness was $3.040 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$, and the tangential contact stiffness was $2.296 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$. The relative error between the maximum load obtained from the simulation with the calibrated parameters and the actual maximum load with the experiment was 1.82%. It indicated the effectiveness of the calibration method. To verify the effectiveness of the above calibration

收稿日期: 2024-04-01 修回日期: 2024-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(32101625, 32271994)和中央高校基本科研业务费专项(2662023GXYP004)

作者简介: 夏俊芳(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业装备设计与测控研究, E-mail: xjf@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 杜俊(1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事现代农业装备设计与测控研究, E-mail: dujun@mail.hzau.edu.cn

method under different working conditions, the bending test of blades and the rotating cutting test of the rotary blade were conducted. The relative error between the maximum load obtained with the simulation and experiment in the bending test of blades was not more than 4.55%, while the relative error of the maximum torque between the simulation and experiment in the rotating cutting test of the rotary blade was not more than 7.95%. It indicated that the flexible rice straw model by DEM calibrated using the bending test was accurate and effective in simulating straw bending test and rotating cutting of the rotary blade processes and applicable to simulation analysis under the rotary tillage operating conditions. The research provided an effective model and method to analysis of the interaction between straw and tools for the optimization design of key components of straw incorporation implement.

Key words: rice straw; discrete element; parameters calibration; cutting; rotary tillage

0 引言

长江中下游是我国水稻主要种植区,田间秸秆留茬高、秸秆量大、农时短、季节性强^[1];在长江中下游地区实施机械化秸秆还田是提高秸秆资源利用率、减少环境污染、推动可持续发展的有效途径^[2-6]。在秸秆还田过程中,秸秆与旋耕刀具接触,互作关系复杂,直接影响机具作业性能^[7-10]。因此,研究水稻秸秆力学特性及其与刀具之间的互作关系是秸秆还田机具设计与优化的关键。

近年来,源于分子动力学理论的离散元法在农业物料仿真中得到了广泛应用^[11-13],建立了多种秸秆离散元模型,为秸秆-刀具互作关系的离散元仿真分析提供了重要方法。SHI等^[14]采用多球单元法构建了多个长度的水稻秸秆力学模型,对免耕播种机进行了优化,为秸秆还田装备研究提供参考;方会敏等^[15]使用5个间隔10 mm的球形单元构建长度56 mm的小麦秸秆模型,分析了旋耕刀具耕后土壤中的秸秆位移,与土槽试验对比,两者结果差异明显,但运动趋势一致。上述秸秆模型均基于Hertz-Mindlin模型构建,模型结构简单、计算速度较快,实现了秸秆还田过程模拟,但Hertz-Mindlin模型在仿真过程中假设秸秆为不变形刚体^[16],在力学特性上与真实秸秆有明显差异,难以模拟切割、挤压、拉伸等形变过程。

为解决上述问题,国内外研究人员基于Hertz-Mindlin with Bonding接触模型构建了可体现物料形变过程的柔性茎秆模型。WANG等^[17]建立了柑橘果柄离散元柔性模型,对柑橘果柄弯曲剪切过程进行模拟;LENAERTS等^[18]构建了分段固定节点弯曲的小麦秸秆离散元模型,模拟了联合收获机麦茬分离过程;朱惠斌等^[19]利用Gambit软件建立了玉米秸秆柔性模型,将秸秆视为单介质,可用于免耕播种机防堵装置仿真优化。此外还有众多学者完成了胡麻、莲藕、玉米颗粒、香蕉秸秆等离散元柔性模型构建^[20-23],探究作物与机具间的互作关系。

离散元模型中部分参数难以测量,一般采用参数标定方法确定,众多学者以力学特性试验或休止角试验对参数进行标定。廖宜涛等^[24]利用茎秆弯曲破坏试验标定了饲料油菜茎秆柔性模型粘结参数,不同直径茎秆弯曲破坏最大载荷仿真值与实测值相对误差在4.21%以内。刘凡一等^[25]采用圆筒提升法获取小麦颗粒休止角,以此为响应值对小麦颗粒离散元模型仿真参数进行标定,所得模型可用于小麦颗粒休止角预测。谢伟等^[26]以弯曲力为响应值标定了收获期油菜茎秆仿真模型,并通过剪切和压缩试验结合相应仿真试验进一步优化标定参数,结果表明,最大弯曲力、最大剪切力与最大径向抗压力仿真值与实测值相对误差不大于3%,为油菜茎秆机械化离散元仿真分析提供了参考。上述研究验证了标定结果在模拟物理标定试验过程时的有效性,但机具真实作业工况与物理标定试验存有差异,物理标定试验确定的标定结果在不同工况条件下的有效性还有待确定。目前,使用离散元法建立水稻秸秆柔性模型并对其进行参数标定的研究较为少见,未见以旋耕作业条件验证标定方法的研究报道。

本文以水稻秸秆为研究对象,选用Hertz-Mindlin with Bonding接触模型构建水稻秸秆离散元柔性模型;以秸秆弯曲试验所测最大载荷为指标进行参数标定;搭建旋耕刀旋转切割试验平台,通过刀具弯曲试验和旋耕刀旋转切割试验对标定结果进行验证,以确定标定方法的有效性,为秸秆还田机具的关键部件优化设计及离散元仿真提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料选用华中农业大学现代农业科技试验基地水稻田秸秆,秸秆经水稻收获机收获后,平均留茬高度413 mm,随机选取100根未破损秸秆,根据旋耕刀旋转切割试验平台中秸秆固定夹具的夹持尺寸,从秸秆根部向上截取164 mm制作试验样本,如

图 1 所示。采用游标卡尺测量其外形尺寸,测得平均直径 D 为 6.93 mm、平均壁厚 d 为 0.79 mm。采用干燥法,将秸秆放置于 105℃ 环境下干燥 24 h,测得其平均含水率为 27.95%。



图 1 水稻秸秆
Fig. 1 Rice straw

1.2 基本接触参数与本征参数

秸秆-秸秆、秸秆-刀具之间接触参数包括摩擦因数和碰撞恢复系数,其中摩擦因数通过 TM2101-T5 型摩擦因数测试仪测定。将水稻秸秆制成薄片粘于测量装置,以速度 100 mm/min 与装置下表面的另一秸秆薄片和钢板分别产生摩擦运动,如图 2 所示。分别测量水稻秸秆间以及秸秆与钢之间的静摩擦因数与滚动摩擦因数。重复试验 30 次,测得摩擦因数如表 1 所示。碰撞恢复系数反映物料碰撞后的变形恢复能力,系数测定涉及两物体碰撞后的运动效果,由于水稻秸秆为空心细长型,秸秆质量过轻且外形不规则,直接测量秸秆碰撞后的反应距离误差较大,故碰撞恢复系数采用虚拟标定的方式确定。秸秆和钢密度、剪切模量、泊松比等本征参数选取参照文献[27-30]。

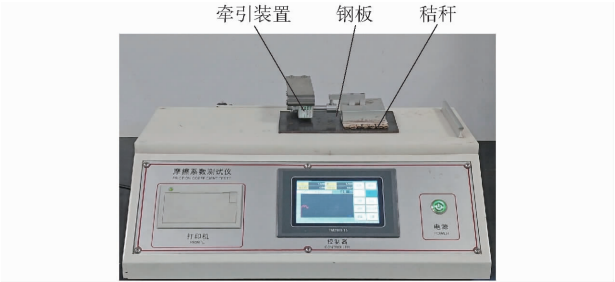


图 2 摩擦因数测量设备
Fig. 2 Measurement of friction coefficient

表 1 秸秆摩擦因数

Tab. 1 Friction coefficients of rice straw

参数	数值
水稻秸秆间静摩擦因数	0.146
水稻秸秆间滚动摩擦因数	0.104
水稻秸秆-钢静摩擦因数	0.164
水稻秸秆-钢滚动摩擦因数	0.088

1.3 水稻秸秆弯曲力学特性测定

通过 TMS-Pro 质构仪 (FTC 公司,美国) 对水稻秸秆进行弯曲试验,试验采用预制长度为 164 mm 的水稻秸秆样本 (图 1)。弯曲试验为有支撑弯曲,两固定支撑间距为 60 mm,采用质构仪自带的弯曲压头,以速度 300 mm/min 对水稻秸秆施加载荷,如图 3 所示,选取质构仪所受最大载荷作为指标。试验重复 30 次,统计平均最大载荷为 2.75 N,以此作为仿真试验目标值进行秸秆模型标定试验。

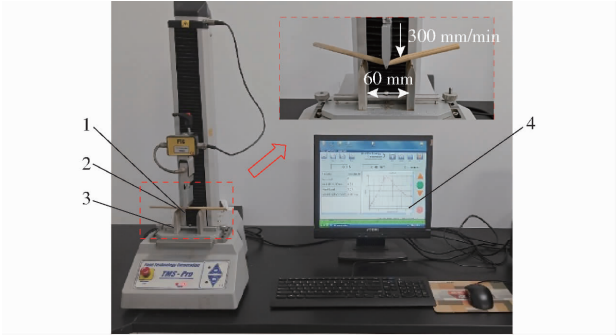


图 3 水稻秸秆弯曲试验
Fig. 3 Rice straw bending test

1. 弯曲压头 2. 水稻秸秆 3. 支撑 4. 计算机

1.4 刀具弯曲试验

旋耕刀结构参数是影响秸秆还田作业效果的重要因素^[31],根据国家标准以及课题组已有研究,选取 245 标准旋耕刀及螺旋横刀长度为 60 mm 的工作部位进行刀具弯曲试验,其中螺旋横刀为课题组前期研制成果,为七面螺旋体,取自人字形水旱两用旋埋刀辊^[32],宽幅 339 mm、螺旋升角 64.32°、螺距 2 653 mm,两刀具结构参数如图 4 所示;仪器设备及试验条件同 1.3 节水稻秸秆弯曲试验,验证参数标定方法在不同质构仪加载条件下的有效性。

1.5 旋耕刀旋转切割试验

秸秆还田作业过程中,旋耕刀与秸秆之间的切割为旋转切割,为验证参数标定方法在旋耕作业工况下的有效性,搭建了旋耕刀旋转切割试验平台。

1.5.1 试验平台总体结构

旋耕刀旋转切割试验平台主要由秸秆喂入装置、秸秆切割装置、测试系统等主体结构组成,如图 5 所示,平台整体尺寸 (长 × 宽 × 高) 为 760 mm × 580 mm × 350 mm。

试验平台中切割伺服电机经驱动器由 PC 端上位机控制,可根据工况调整旋耕刀转速,实现从 0 ~ 750 r/min 的无级变速调节。通过调整喂入装置中夹具下端与旋耕刀辊中心轴距离,可改变旋耕刀侧切刃切割秸秆部位,模拟耕深变化。

1.5.2 秸秆喂入装置

切割伺服电机速度剧增所产生的瞬间扭矩大

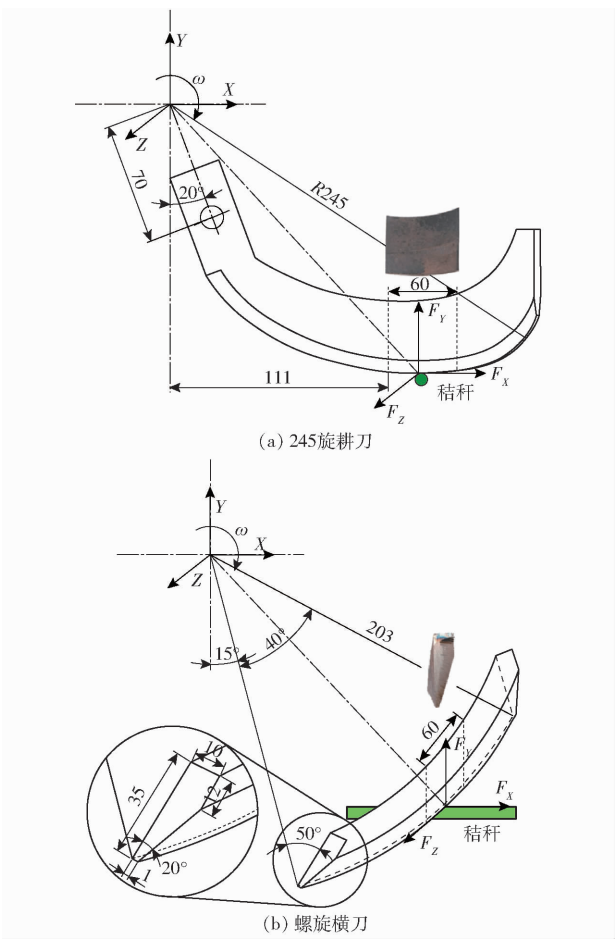


图 4 刀具结构参数图

Fig. 4 Structure parameters diagram of blades

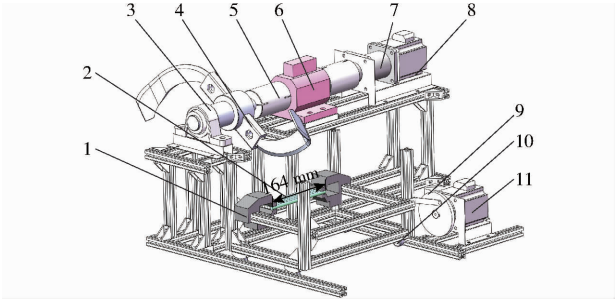


图 5 旋耕刀旋转切割试验平台示意图

Fig.5 Schematic of rotating cutting test platform of rotary blade

1. 秸秆固定夹具 2. 秸秆 3. 轴承支座 4. 旋耕刀辊 5. 联轴器 6. 高频扭矩传感器 7. 减速器 8. 切割伺服电机 9. 凸轮传送机构 10. 滚轮传动机构 11. 喂入伺服电机

于旋耕刀切割过程所受扭矩,待旋耕刀处于稳定工作状态后,通过喂入的方式将待切割秸秆送入旋耕刀作业区,减小试验误差。喂入装置包括喂入伺服电机、凸轮传送机构、滚轮传送机构和秸秆固定夹具等。其中伺服电机带动凸轮机构,实现秸秆喂入;两秸秆固定夹具外侧间隔 164 mm,如图 5 所示,对称安装于旋耕刀两侧,固定待切割秸秆。

1.5.3 测试系统

测试系统实现旋耕部件作业参数和性能参数测量,包括旋耕刀转速、旋耕刀切割过程所受扭矩等参数,其中旋耕刀切割过程所受最大扭矩作为切割试验的性能指标。旋耕刀转速由上位机伺服电机控制程序采集,扭矩采用高频扭矩传感器测量,由数据采集硬件实时采集扭矩传感器输出信号,通过 PC 端 LabVIEW 图形化编程软件进行数据实时显示与储存。测试系统组成如图 6 所示,性能参数如表 2 所示。



图 6 旋耕刀旋转切割试验平台测试系统

Fig. 6 Test system of rotating cutting test platform of rotary blade

表 2 测试系统性能参数

Tab. 2 Performance parameters of measurement system

仪器	量程/ (N·m)	输入 电压/V	输入(出) 特性/V	频率/ kHz
CKY-808 型高频扭矩传感器	5	24	±5	
NI9205 型数据采集卡		机箱供应 电压	±0.2、±1 ±5、±10	250
NI cDAQ 9184 型机箱		10 ~ 30		

2 水稻秸秆离散元柔性模型构建

2.1 离散元接触模型

采用 Hertz - Mindlin with Bonding 模型构建水稻秸秆模型,Bonding 模型在组成的球形单元间增添粘结作用,彼此之间通过 Bond 键粘结成一个整体,模拟秸秆内部纤维间作用力;Bond 键具有一定力学特性,当受到外力作用时,模型会产生形变,并产生内应力,当其超过单元间的极限内应力,单元间粘结键被破坏,进而不再具备粘结作用,单元与单元便可分离,模拟纤维断裂现象。Bond 键之间的粘结键为一虚拟的圆柱,其结构原理图如图 7 所示,图中 F_b 、 M_b 为两球形单元间的力与力矩。

当 Bond 键受到弯曲、压缩、拉伸等作用时,两个单元发生相对运动,单元间的力和力矩为

$$\begin{cases} \delta F_b^n = -v_n k_n A \delta_l \\ \delta F_b^t = -v_t k_t A \delta_l \\ \delta M_b^n = -\omega_n k_n J \delta_l \\ \delta M_b^t = -\omega_t k_n \frac{J}{2} \delta_l \end{cases} \quad (1)$$

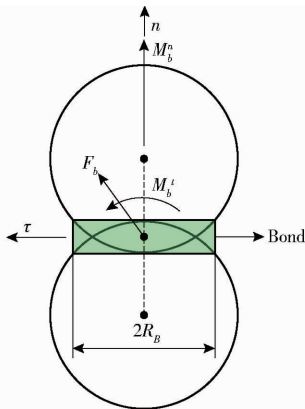


图 7 Bonding 粘结模型

Fig. 7 Bonding contact model

其中

$$\begin{cases} A = \pi R_B^2 \\ J = \frac{1}{2} \pi R_B^4 \end{cases} \quad (2)$$

式中 δF_n^b ——法向力, N δF_t^b ——切向力, N
 δM_n^b ——法向力矩, N·m
 δM_t^b ——切向力矩, N·m
 ω_n ——法向角速度, rad/s
 ω_t ——切向角速度, rad/s
 v_n ——法向速度, m/s
 v_t ——切向速度, m/s
 k_n ——法向接触刚度, N/m³
 k_t ——切向接触刚度, N/m³
 A ——单元间的接触面积, m²
 J ——球形单元惯性矩, m⁴
 R_B ——粘结半径, mm
 δ_t ——仿真时间步长, s

当 Bond 键受力超过最大法向应力 $\sigma_{\max}$ 和切向应力 $\tau_{\max}$ 时, 单元间 Bond 键发生断裂, 断裂条件为

$$\begin{cases} \sigma_{\max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_t^b}{J}R_B \\ \tau_{\max} < \frac{-F_t}{A} + \frac{2M_n^b}{J}R_B \end{cases} \quad (3)$$

调用 Hertz - Mindlin with Bonding 模型时, 仿真输入参数为法向接触刚度 k_n 、切向接触刚度 k_t 、法向临界应力 σ 、切向临界应力 τ 与粘结半径 R_B 。粘结半径 R_B 一般为球形单元半径的 1.1 ~ 1.2 倍^[33], 根据秸秆壁厚, 取粘结半径为 0.48 mm。水稻秸秆粘结模型仿真参数如表 3 所示。

2.2 水稻秸秆离散元模型建立

根据秸秆真实形态, 并考虑颗粒排布均匀性和仿真时长, 采用颗粒替换的方式构建规则空心水稻秸秆柔性模型。在 EDEM 仿真目录 Geometries 下导入 ParticleReplacement. dll 文件, 调用颗粒体力 API

表 3 水稻秸秆粘结模型仿真参数

Tab.3 Simulation parameters of rice straw bonding model

参数	数值
水稻秸秆泊松比 μ_1	0.4
钢板泊松比 μ_2	0.3
水稻秸秆剪切模量 K_1/Pa	1×10^6
钢板剪切模量 K_2/Pa	7.9×10^{10}
水稻秸秆密度 $\rho_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	241
钢板密度 $\rho_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 865
水稻秸秆间碰撞恢复系数 x_1	0.1 ~ 0.5
水稻秸秆-钢碰撞恢复系数 x_2	0.1 ~ 0.5
法向接触刚度 $x_3/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	$1 \times 10^{10} \sim 4 \times 10^{10}$
切向接触刚度 $x_4/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	$1 \times 10^{10} \sim 4 \times 10^{10}$
法向临界应力 x_5/Pa	$1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^9$
切向临界应力 x_6/Pa	$1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^9$

接触模型, 改写颗粒自定义插件设置颗粒生成方式; 根据实测水稻秸秆平均尺寸, 确定采用半径 0.4 mm 的球形单元进行颗粒替换, 设置颗粒工厂及粘结参数, 最终生成秸秆模型三向视图如图 8 所示, 组成秸秆柔性模型球形单元数量为 4 920 个, 沿径向、轴向均匀分布。

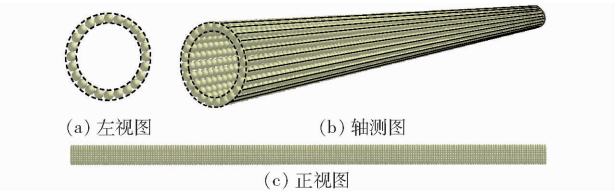


图 8 水稻秸秆柔性模型

Fig. 8 Rice straw flexible models

2.3 水稻秸秆弯曲试验仿真模型

在后处理界面将生成的秸秆模型经过 Simulation Deck 导出, 起始时间设置为 0 s, 用于后续仿真调用; 在导出文件中导入 Solidworks 绘制的质构仪弯曲试验三维模型, 构建水稻秸秆弯曲试验仿真模型, 如图 9 所示。仿真试验设置弯曲刀具下降速度为 300 mm/min, 两秸秆支座间距 60 mm, 取网格尺寸为 3 倍最小球形尺寸, 时间步长 5×10^{-7} s, 数据保存间隔 0.01 s。

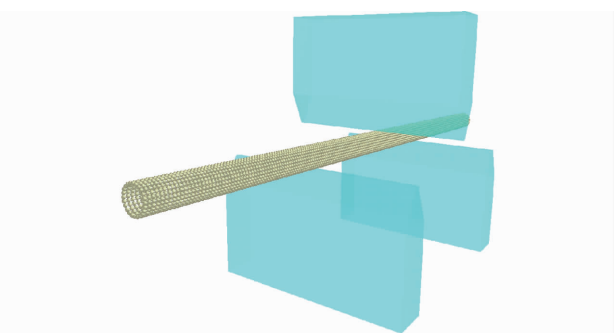


图 9 水稻秸秆弯曲试验仿真模型

Fig. 9 Simulation model of rice straw bending test

3 水稻秸秆离散元模型参数标定

3.1 标定方法

秸秆模型参数标定采用弯曲试验参数标定法,根据表 3 秸秆模型仿真参数范围,在 EDEM 仿真软件中开展水稻秸秆弯曲仿真试验,验证仿真参数对应的最大载荷。应用 Design-Expert 软件设计标定试验,通过筛选显著性因素、确定显著性因素最优值范围和显著性因素优化求解,使仿真模拟试验所得最大载荷趋近于实测最大载荷,获取两者结果最近似的最优值组合为秸秆模型仿真参数。

3.2 Plackett – Burman 试验设计

通过 Plackett – Burman 试验,筛选参数中对目标值有显著影响的因素。每个试验因素取高低两水平,对比其目标值差异,分析因素显著性。以水稻弯曲试验中压头所受平均最大载荷为仿真试验目标值,6 个试验影响因素及其取值范围如表 3 所示;取 1 个中心点水平,共设计 13 次试验,进行弯曲试验仿真模拟,试验结果如表 4 所示,利用 Design-Expert 软件进行显著性分析,如表 5 所示。

由表 5 可知,模型 $P < 0.000\ 1$,表明模型极显著,故该模型可靠,拟合程度好。决定系数 $R^2 = 0.989\ 2$,趋近 1,模型相关性较好;校正决定系数 $R^2_{adj} = 0.978\ 4$,变异系数 $C_v = 7.79\% < 10\%$,表明 Plackett – Burman 试验可信度和精确度较好;有效信号与噪声的比值为 23.181,大于 4.0,则该试验精密度较高;其中因素 x_3 的 P 小于 0.000 1,影响极显著, x_4 的 P 小于 0.01,影响极显著,其余项无显著影响。

通过 Plackett – Burman 试验结果方差分析得到因素半正态概率效应图以及帕累托图,如图 10、11 所示。半正态概率效应图中因素标准化效应离拟合线越远,表明因素越显著,由图 10 可知,因素 x_3 、 x_4 即法向接触刚度和切向接触刚度对最大载荷影响显著,且影响效应均为正,法向接触刚度显著性明显高于切向接触刚度。图 11 的帕累托图中因素 x_3 、 x_4 大于 t 值为显著因素,影响效应为正,进一步表明其显著性。在后续试验中不考虑非显著性因素影响,均取中间水平,即 x_1 取 0.3, x_2 取 0.3, x_5 、 x_6 取 $5.5 \times 10^8\ \text{Pa}$ 。

表 4 Plackett – Burman 试验设计与结果
Tab.4 Design and result of Plackett – Burman test

序号	因素						最大载荷 F/N
	x_1	x_2	$x_3/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	$x_4/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	x_5/Pa	x_6/Pa	
1	0.5	0.5	1.0×10^{10}	4.0×10^{10}	1.0×10^9	1.0×10^9	1.23
2	0.1	0.5	4.0×10^{10}	1.0×10^{10}	1.0×10^9	1.0×10^9	2.92
3	0.5	0.1	4.0×10^{10}	4.0×10^{10}	1.0×10^8	1.0×10^9	3.83
4	0.1	0.5	1.0×10^{10}	4.0×10^{10}	1.0×10^9	1.0×10^8	1.22
5	0.1	0.1	4.0×10^{10}	1.0×10^{10}	1.0×10^9	1.0×10^9	2.95
6	0.1	0.1	1.0×10^{10}	4.0×10^{10}	1.0×10^8	1.0×10^9	1.21
7	0.5	0.1	1.0×10^{10}	1.0×10^{10}	1.0×10^9	1.0×10^8	0.96
8	0.5	0.5	1.0×10^{10}	1.0×10^{10}	1.0×10^8	1.0×10^9	0.96
9	0.5	0.5	4.0×10^{10}	1.0×10^{10}	1.0×10^8	1.0×10^8	2.94
10	0.1	0.5	4.0×10^{10}	4.0×10^{10}	1.0×10^8	1.0×10^8	3.81
11	0.5	0.1	4.0×10^{10}	4.0×10^{10}	1.0×10^9	1.0×10^8	3.83
12	0.1	0.1	1.0×10^{10}	1.0×10^{10}	1.0×10^8	1.0×10^8	0.96
13	0.3	0.3	2.5×10^{10}	2.5×10^{10}	5.5×10^8	5.5×10^8	2.40

表 5 Plackett – Burman 试验结果显著性分析
Tab.5 Analysis of significance of parameters in Plackett – Burman test

参数	平方和	均方	自由度	F	P
模型	16.86	2.810	6	91.74	$< 0.000\ 1^{**}$
x_1	0.039	0.039	1	1.26	0.304 8
x_2	0.036	0.036	1	1.19	0.318 0
x_3	15.73	15.73	1	513.76	$< 0.000\ 1^{**}$
x_4	0.990	0.990	1	32.20	$0.001\ 3^{**}$
x_5	0.030	0.030	1	0.98	0.360 5
x_6	0.032	0.032	1	1.05	0.345 9

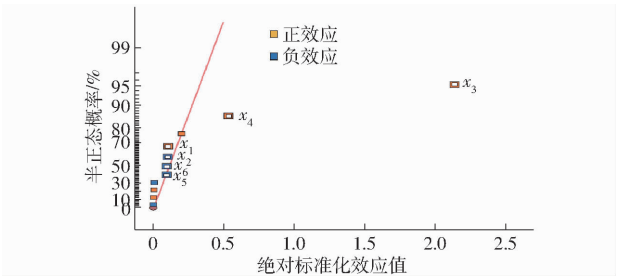


图 10 标准化效应半正态概率效应图
Fig.10 Half – normal probability effect diagram of standardized effect

注：**表示差异极显著($P \leq 0.01$),下同。

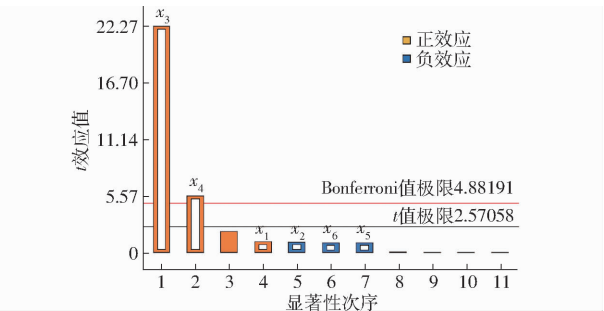


图 11 帕累托图

Fig. 11 Pareto charts

3.3 最陡爬坡试验设计

根据 Plackett – Burman 试验结果,选取显著因素进行最陡爬坡试验,进而确定显著性因素的最优值范围。在试验过程中记录得到的最大载荷与实测值的相对误差,以确定最优值范围。

Plackett – Burman 试验得因素 x_3 、 x_4 影响效应均为正,即最大载荷随着因素数值的增加而增加,试验时因素数值取值依次递增,参数取值及试验结果如表 6 所示;由表 6 可知,最大载荷仿真值与实测值的相对误差随仿真参数的增加先减小后增加,其中试验 4 的相对误差最小,为 2.55%。为得到最佳仿真参数,选取试验 4 为中间水平,试验 3 和试验 5 分别为低水平和高水平设计后续 Central – Composite 试验。

表 6 最陡爬坡试验设计与结果

序号	因素		最大载荷	相对误差
	$x_3/(N \cdot m^{-3})$	$x_4/(N \cdot m^{-3})$		
1	1.0×10^{10}	1.0×10^{10}	0.96	65.09
2	1.6×10^{10}	1.6×10^{10}	1.54	44.00
3	2.2×10^{10}	2.2×10^{10}	2.11	23.27
4	2.8×10^{10}	2.8×10^{10}	2.68	2.55
5	3.4×10^{10}	3.4×10^{10}	3.23	17.45
6	4.0×10^{10}	4.0×10^{10}	3.82	38.91

3.4 Central – Composite 响应面试验设计

根据最陡爬坡试验结果,法向接触刚度、切向接触刚度分别取高、中、低 3 个水平进行 Central – Composite 试验。两因素编码如表 7 所示,共设计 13 次响应面试验,Central – Composite 试验方案及结果如表 8 所示, X_3 、 X_4 为因素编码值。

表 7 Central – Composite 试验因素编码

编码	因素	
	$x_3/(N \cdot m^{-3})$	$x_4/(N \cdot m^{-3})$
-1.414	1.952×10^{10}	1.952×10^{10}
-1	2.200×10^{10}	2.200×10^{10}
0	2.800×10^{10}	2.800×10^{10}
1	3.400×10^{10}	3.400×10^{10}
1.414	3.648×10^{10}	3.648×10^{10}

表 8 Central – Composite 试验方案与结果

Tab. 8 Design scheme and results of Central – Composite test				
序号	因素		最大载荷 $F/$	相对误差 $\eta/$
	X_3	X_4	N	%
1	-1	-1	2.11	23.27
2	1	-1	2.99	8.73
3	-1	1	2.32	15.64
4	1	1	3.23	17.45
5	-1.414	0	2.10	23.64
6	1.414	0	3.38	22.91
7	0	-1.414	2.50	9.09
8	0	1.414	2.82	2.55
9	0	0	2.68	2.55
10	0	0	2.68	2.55
11	0	0	2.68	2.55
12	0	0	2.68	2.55
13	0	0	2.68	2.55

Central – Composite 试验显著性分析如表 9 所示。由表 9 可知,方程模型 $P < 0.0001$,呈极显著性 ($P < 0.01$)。决定系数 $R^2 = 0.9983$,校正决定系数 $R^2_{adj} = 0.9972$,两者趋近于 1,且 $R^2_{adj} = 0.9972$ 与 $R^2_{pre} = 0.9882$ 的差值小于 0.2,模型拟合性较好,可靠性高。能正确反映最大载荷 F 与因素 x_3 、 x_4 之间的关系,其中一次项 x_3 、 x_4 与二次项 x_4^2 极显著,二次项 x_3^2 显著,交互项不显著。

表 9 响应面寻优试验显著性分析

Tab. 9 Significance analysis of response surface optimization test					
方差来源	平方和	均方	自由度	F	P
模型	1.73	0.35	5	844.92	$< 0.0001^{**}$
x_3	1.62	1.62	1	3959.53	$< 0.0001^{**}$
x_4	0.10	0.10	1	248.85	$< 0.0001^{**}$
x_3x_4	2.250×10^{-4}	2.250×10^{-4}	1	0.55	0.4825
x_3^2	2.959×10^{-3}	2.959×10^{-3}	1	7.23	0.0311 **
x_4^2	2.611×10^{-3}	2.611×10^{-3}	1	6.38	0.00394 **
残差	2.864×10^{-3}	4.092×10^{-4}	7		
失拟项	2.864×10^{-3}	9.548×10^{-4}	3		
纯误差	0	0	4		
总和	1.73		12		

注: * 表示差异显著 ($0.01 < P \leq 0.05$)。

采用 Design-Expert 软件对试验结果进行多元回归拟合分析,得到最大载荷 F 与法向接触刚度、切向接触刚度的回归方程为

$$F = 2.68 + 0.45X_3 + 0.11X_4 + 0.0075X_3X_4 + 0.02X_3^2 - 0.02X_4^2$$

(4)

根据回归方程得到法向接触刚度、切向接触刚度对最大载荷的响应面,如图 12 所示。由图 12 可

知,当法向接触刚度不变时,最大载荷随切向接触刚度的增大而增大,增大趋势逐渐平缓;当切向接触刚度不变时,最大载荷随法向接触刚度的增大而增大,增大趋势较为平稳;且最大载荷随法向接触刚度的变化趋势较切向接触刚度更为明显。

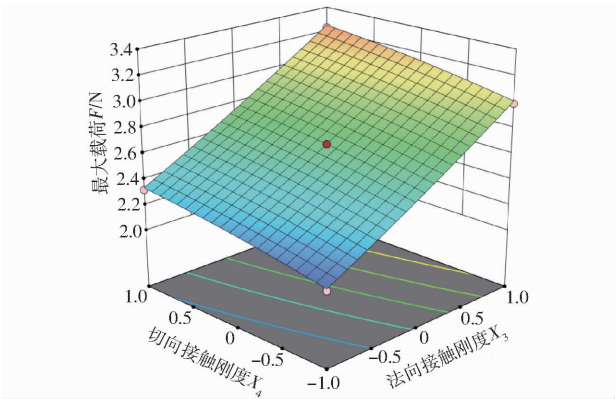


图 12 最大载荷响应面

Fig. 12 Response surface view of maximum load

以实测质构仪所受平均最大载荷为目标值,利用 Design-Expert 软件对显著性因素优化求解,通过软件计算得最优值组合:法向接触刚度为 $3.040 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$ 、切向接触刚度为 $2.296 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$ 。以此参数进行秸秆弯曲仿真模拟试验,得到最大载荷为 2.8 N,与实测最大载荷相对误差为 1.82%,误差较小,弯曲试验仿真与实测效果如图 13 所示,秸秆弯曲形态无明显差异,表明水稻秸秆柔性模型标定参数准确有效,弯曲试验参数标定法构建的秸秆模型在弯曲标定试验中力学特性拟合程度较高。为进

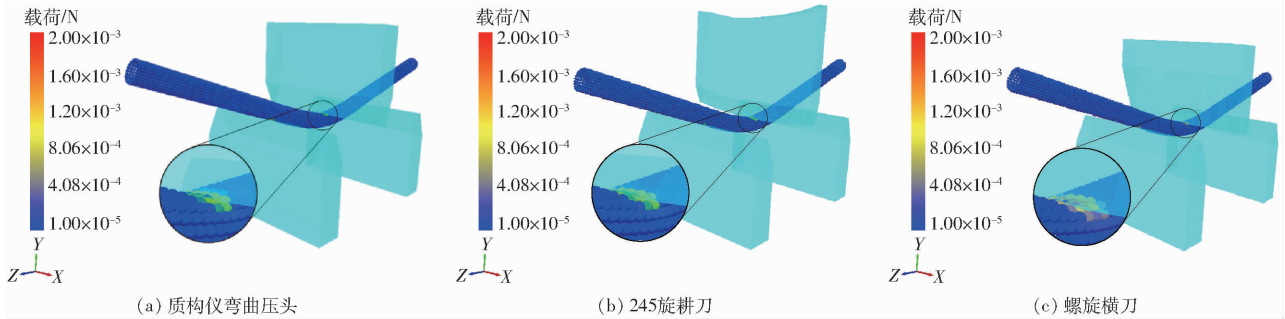


图 14 不同加载条件下弯曲试验仿真过程对比

Fig. 14 Comparisons of bending test simulation process under different loading conditions

表 10 刀具弯曲试验结果

Tab. 10 Blades bending test results

项目	最大载荷 F/N		
	质构仪弯曲压头	245 旋耕刀	螺旋横刀
实测值	2.75	2.64	2.70
仿真值	2.80	2.76	2.77
相对误差/%	1.82	4.55	2.59

由表 10 可知,仿真获取最大载荷与实测值的误差不大于 4.55%,表明标定结果可靠。由图 14 可

一步探究标定方法的有效性,以该最优值组合进行验证试验。

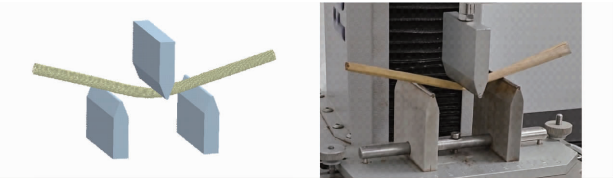


图 13 秸秆弯曲仿真试验与物理试验对比

Fig. 13 Comparison of straw bending simulation test with physical test

4 验证试验

验证试验包括刀具弯曲试验和旋耕刀旋转切割试验。通过刀具弯曲试验探究在质构仪加载条件下秸秆模型仿真可靠性;并通过旋耕刀旋转切割试验检验标定结果在模拟旋耕作业条件下的仿真有效性。

4.1 刀具弯曲试验

试验选取 1.4 节刀具,安装于质构仪传感器探头,试验时分别夹紧两刀具,以速度 300 mm/min 对水稻秸秆施加载荷,试验重复 30 次,记录刀具加载条件下质构仪所受最大载荷。对上述试验过程进行仿真模拟,在 EDEM 中构建刀具弯曲试验仿真模型,更换 2.3 节仿真模型中质构仪弯曲压头模型为 245 旋耕刀和螺旋横刀模型后重复弯曲试验,质构仪弯曲压头、245 旋耕刀与螺旋横刀弯曲试验仿真过程如图 14 所示,试验实测最大载荷与仿真试验结果如表 10 所示。

知,相同时间下质构仪弯曲压头、245 旋耕刀与螺旋横刀加载下的秸秆所受载荷无明显差异,且均在加载处和支撑处受载较大。由表 10 可知,质构仪弯曲压头、245 旋耕刀与螺旋横刀所受弯曲最大载荷近似,分析试验结果,原因极可能是秸秆直径较小,旋耕刀和横刀的结构曲线优势在单根秸秆上难以完全体现。

4.2 旋耕刀旋转切割试验

旋耕刀旋转切割试验采用 1.5.1 节试验平台,

设定旋耕转速、耕深,平行排列 5 根预制的 164 mm 秸秆样本,夹紧于固定夹具。试验时启动喂入装置、切割装置和测试系统,采集扭矩传感器实时数据,并由上位机完成数据的记录储存。同时,利用弯曲试验参数标定法标定结果对上述试验过程进行仿真模拟,在 EDEM 中构建仿真模型,导入旋耕刀三维模型,通过调节几何体模型位置参数,实现不同转速与耕深的数值模拟,试验过程如图 15 所示。试验共设计 3 种工况,测量 3 种不同工况下的旋耕刀所受扭矩,每组试验重复 30 次,试验测量值及仿真值如表 11 所示。

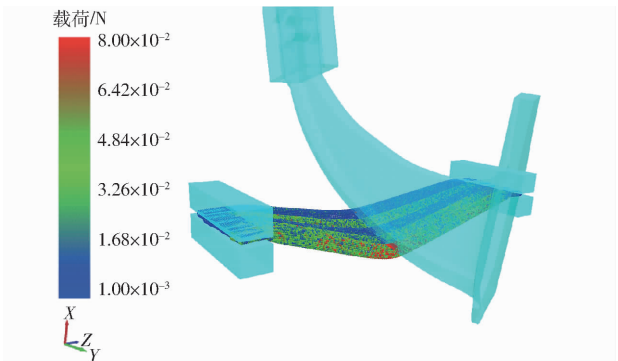


图 15 旋耕刀旋转切割仿真试验

Fig. 15 Simulation test of rotating cutting test of rotary blade

表 11 旋耕刀切割最大扭矩测量结果

Tab. 11 Maximum torque for rotary blade cutting measurement results

工况	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	耕深/ mm	最大扭矩 $T/(\text{N} \cdot \text{m})$		相对误差/%
			实测值	仿真值	
1	280	150	1.52	1.57	3.29
2	300	165	1.76	1.90	7.95
3	320	180	2.13	2.02	5.16

由表 11 可知,随着转速和耕深的增加,旋耕刀所受最大扭矩逐渐增加,最大扭矩在 3 种不同工况下实测值与仿真值相对误差分别为 3.29%、

7.95%、5.16%。试验表明秸秆模型标定结果准确,水稻空心柔性秸秆模型在模拟旋耕作业条件下拥有较高仿真精度,利用弯曲试验参数标定法构建的秸秆模型适用于旋耕刀旋转切割过程仿真分析,弯曲试验参数标定方法有效可靠。

5 结论

(1)试验测得水稻秸秆平均直径为 6.93 mm、平均壁厚为 0.79 mm,水稻秸秆间静摩擦因数、水稻秸秆间滚动摩擦因数、水稻秸秆-钢静摩擦因数、水稻秸秆-钢滚动摩擦因数分别为 0.146、0.104、0.164、0.088,通过秸秆弯曲试验,测得质构仪所受平均最大载荷为 2.75 N。

(2)基于 EDEM 仿真软件,选取 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型,通过颗粒替换的方式,构建水稻秸秆柔性模型。以最大载荷为目标值,对水稻秸秆离散元柔性模型进行参数标定。通过 Plackett - Burman 试验筛选出影响最大载荷的显著性因素:法向接触刚度和切向接触刚度;通过最陡爬坡试验进一步确定两显著性因素最优值范围。根据 Central - Composite 试验建立了最大载荷和显著性因素之间的回归模型,通过 Design-Expert 软件求解得最优值组合:法向接触刚度为 $3.040 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$ 、切向接触刚度为 $2.296 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$;以最优值组合进行弯曲试验仿真验证,与弯曲最大载荷实测值相对误差为 1.82%,表明秸秆模型标定参数准确有效。

(3)刀具弯曲试验测得 245 旋耕刀和螺旋横刀所受最大载荷实测值与仿真值相对误差分别为 4.55%、2.59%;旋耕刀旋转切割试验测得 3 种不同工况下旋耕刀所受最大扭矩实测值与仿真值相对误差分别为 3.29%、7.95%、5.16%,表明弯曲试验标定方法可靠,采用弯曲试验标定的水稻秸秆柔性模型适用于旋耕作业中秸秆-刀具互作关系模拟分析,可为秸秆还田机具的关键部件优化设计提供参考。

参 考 文 献

[1] 祝英豪,夏俊芳,曾荣,等.基于离散元的稻板田旋耕功耗预测模型研究[J].农业机械学报,2020,51(10):42-50.
ZHU Yinghao,XIA Junfang,ZENG Rong,et al. Prediction model of rotary tillage power consumption in paddy stubble field based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(10):42-50. (in Chinese)

[2] 杨庆璐,陈桂斌,谢立娟,等.伸缩指杆式玉米秸秆旋耕掩埋机设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(12):35-43.
YANG Qinglu,CHEN Guibin,XIE Lijuan,et al. Design and experiment of telescopic finger stalk of maize straw burying machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(12):35-43. (in Chinese)

[3] 齐智娟,宋芳,张忠学,等.保护性耕作对寒地黑土土壤水热效应与玉米产量的影响[J].农业机械学报,2022,53(12):380-389.
QI Zhijuan,SONG Fang,ZHANG Zhongxue,et al. Effects of different conservation tillage methods on soil hydrothermal conditions as well as maize yield in cold black soil region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(12):380-389. (in Chinese)

[4] GETAHUN G T,KATTERER T,MUNKHOLM L J,et al. Short-term effects of loosening and incorporation of straw slurry into the

- upper subsoil on soil physical properties and crop yield[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 184: 62 – 67.
- [5] YANG H, XU M, KOIDE R T, et al. Effects of ditchburied straw return on water percolation, nitrogen leaching and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(4): 1141 – 1149.
- [6] XUE L, YU Y, YANG L. Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice – wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(11): 115010.
- [7] 王金峰, 杨东泽, 王震涛, 等. 水稻秸秆双轴深埋还田机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 21 – 30.
WANG Jinfeng, YANG Dongze, WANG Zhentao, et al. Design and experiment of rice straw biaxial deep-buried returning machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 21 – 30. (in Chinese)
- [8] 周华, 李栋, 刘政源, 等. 秸秆旋埋还田后空间分布效果仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 69 – 77.
ZHOU Hua, LI Dong, LIU Zhengyuan, et al. Simulation and experiment of spatial distribution effect after straw incorporation into soil by rotary burial[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 69 – 77. (in Chinese)
- [9] 何瑞银, 段庆飞, 陈信信, 等. 旋耕还田秸秆空间分布质量离散元分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 44 – 53.
HE Ruiyin, DUAN Qingfei, CHEN Xinxin, et al. DEM analysis of spatial distribution quality of rotary tillage straw returning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 44 – 53. (in Chinese)
- [10] 廖庆喜, 谢昊明, 张青松, 等. 驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 99 – 110, 195.
LIAO Qingxi, XIE Haoming, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of driven disc plow and double-edged rotary tillage combined tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 99 – 110, 195. (in Chinese)
- [11] 于庆旭, 刘燕, 陈小兵, 等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 123 – 132.
YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123 – 132. (in Chinese)
- [12] 马彦华, 宋春东, 宣传忠, 等. 苜蓿秸秆压缩仿真离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 22 – 30.
MA Yanhua, SONG Chundong, XUAN Chuazhong, et al. Parameters calibration of discrete element model for alfalfa straw compressing simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(11): 22 – 30. (in Chinese)
- [13] 张锐, 韩佃雷, 吉巧丽, 等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 49 – 56.
ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49 – 56. (in Chinese)
- [14] SHI Y, XIN S, 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.
- [15] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60 – 67. (in Chinese)
- [16] LIU Y, LI Y, ZHANG T, et al. Effect of concentric and non-concentric threshing gaps on damage of rice straw during threshing for combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2022, 219: 1 – 10.
- [17] WANG Y, ZHANG Y, YANG Y, et al. Discrete element modelling of citrus fruit stalks and its verification[J]. Biosystems Engineering, 2020, 200: 400 – 414.
- [18] LENAERTS B, TIJSKENS E, BAERDEMAEKER J, et al. Simulation of grain straw separation by discrete element modeling with bendable straw particles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 101: 24 – 33.
- [19] 朱惠斌, 钱诚, 白丽珍, 等. 基于 Plackett – Burman 试验设计与响应面法优化玉米秸秆离散元模型[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(12): 221 – 231.
ZHU Huibin, QIAN Cheng, BAI Lizhen, et al. Optimization of discrete element model of corn stalk based on Plackett – Burman design and response surface methodology[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(12): 221 – 231. (in Chinese)
- [20] 史瑞杰, 戴飞, 赵武云, 等. 胡麻茎秆离散元柔性模型建立与接触参数试验验证[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 146 – 155.
SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Establishment of discrete element flexible model and verification of contact parameters of flax stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 146 – 155. (in Chinese)
- [21] 焦俊, 张国忠, 杜俊, 等. 莲藕主藕体弯曲破坏离散元仿真分析[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 217 – 225.
JIAO Jun, ZHANG Guozhong, DU Jun, et al. Discrete element simulation of bending failure of main lotus root[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(5): 217 – 225. (in Chinese)
- [22] 张荣芳, 周纪磊, 刘虎, 等. 玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 69 – 77.
ZHANG Rongfang, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Determination of interspecific contact parameters of corn and simulation calibration of discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 69 – 77. (in Chinese)
- [23] 张喜瑞, 胡旭航, 刘俊孝, 等. 香蕉秸秆离散元仿真粘结模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 121 – 130.
ZHANG Xirui, HU Xuhang, LIU Junxiao, et al. Calibration and verification of bonding parameters of banana straw simulation model based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 121 – 130. (in Chinese)
- [24] 廖宜涛, 廖庆喜, 周宇, 等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 73 – 82.

- LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73–82. (in Chinese)
- [25] 刘凡一, 张舰, 李博, 等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 247–253.
- LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 247–253. (in Chinese)
- [26] 谢伟, 彭磊, 蒋苹, 等. 收获期油菜茎秆双层粘结离散元模型建立与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 112–120.
- XIE Wei, PENG Lei, JIANG Ping, et al. Discrete element model building and optimizing of double-layer bonding of rape shoots stems at harvest stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 112–120. (in Chinese)
- [27] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modeling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121: 105–117.
- [28] 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)
- [29] 施丽莉, 顾峰玮, 胡志超, 等. 稻茬麦覆秸还田播种机均匀抛撒机理分析与机构优化[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 74–83.
- SHI Lili, GU Fengwei, HU Zhichao, et al. Analysis and optimization of uniform throwing devices by no-tillage planter of wheat after rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 74–83. (in Chinese)
- [30] 郭俊, 张庆怡, MUHAMMAD Sohail Memon, 等. 仿鼯鼠足趾排列的旋耕-秸秆粉碎锯齿刀片设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 43–50.
- GUO Jun, ZHANG Qingyi, MUHAMMAD Sohail Memon, et al. Design and experiment of bionic mole's toe arrangement serrated blade for soil-rototilling and straw-shattering[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 43–50. (in Chinese)
- [31] ZHANG G S, ZHANG Z Q, XIAO M H, et al. Soil-cutting simulation and parameter optimization of rotary blade's three-axis resistances by response surface method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 164: 104902.
- [32] 祝英豪, 张居敏, 曾荣, 等. 人字型水旱两用旋埋刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 49–57, 273.
- ZHU Yinghao, ZHANG Jumin, ZENG Rong, et al. Design and experiment of herringbone type rotary blade roller for burying stubble in paddy field and dry land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 49–57, 273. (in Chinese)
- [33] 郝建军, 龙思放, 李浩, 等. 机收麻山药离散元模型构建及其仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 34–42.
- HAO Jianjun, LONG Sifang, LI Hao, et al. Development of discrete element model and calibration of simulation parameters for mechanically-harvested yam[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 34–42. (in Chinese)

(上接第 150 页)

- [26] 杨庆璐, 李洪文, 何进, 等. 基于气力分配的不同肥料分层深施装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 61–73.
- YANG Qinglu, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment of layered deep fertilization device of different fertilizers based on pneumatic distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 61–73. (in Chinese)
- [27] 刘立晶, 马超, 刘忠军. 基于 EDEM 的带状深松全层施肥铲作业参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 74–83.
- LIU Lijing, MA Chao, LIU Zhongjun. EDEM-based parameter optimization and experiment of full-layer fertilization shovel for strip subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 74–83. (in Chinese)
- [28] 石金杉, 齐浩凯, 孙富才, 等. 深松防堵分层施肥铲优化设计与试验[J]. 河北农业大学学报, 2020, 43(5): 96–102.
- SHI Jinshan, QI Haokai, SUN Fucui, et al. Optimization design and experiment of subsoiling and anti-blocking layered fertilizer shovel[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2020, 43(5): 96–102. (in Chinese)
- [29] 宋少龙, 张东超, 汤智辉, 等. 基于离散元法的分层施肥靴参数优化与试验[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(10): 125–136.
- SONG Shaolong, ZHANG Dongchao, TANG Zhihui, et al. Parameter optimization and test of layered fertilization boot based on discrete element method[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(10): 125–136. (in Chinese)
- [30] 何义川, 汤智辉, 温浩军, 等. 棉花基肥对行分层深施机的设计与试验[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(3): 528–536.
- HE Yichuan, TANG Zhihui, WEN Haojun, et al. Design and experiment of cotton basal fertilizer alignment row spacing and stratified fertilizing machine[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(3): 528–536. (in Chinese)
- [31] 第一机械部机械研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [32] 刘进宝, 汤智辉, 郑炫, 等. 2FHF-4.56 型宽行距作物基肥对行分层深施机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 1–11.
- LIU Jinbao, TANG Zhihui, ZHENG Xuan, et al. Design and experiments of the 2FHF-4.56 type base-fertilizer row-following and layered deep fertilizing machine for wide row spacing crops[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6): 1–11. (in Chinese)