doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.13.021

水稻钵苗柔性苗叶离散元模型构建与参数标定

孙　良[1,2]　金国杰[1]　王亚梁[3]　陈建能[1,2]　俞高红[1,4]

（1.浙江理工大学机械工程学院，杭州 310018；2.全省农业智能感知与机器人重点实验室，杭州 310018；
3.中国水稻研究所，杭州 310006；4.农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室，杭州 310018）

摘要：针对水稻钵苗薄壁苗叶离散元模型建模难，导致气力抛秧仿真分析时柔性苗叶与气流场互作关系分析受限，缺乏苗叶适用模型表征钵苗姿态变化对其运动轨迹影响的问题，本研究以三叶一心期水稻钵苗为研究对象，提出一种基于多视场角图像拟合的苗叶离散元模型逆向重构方法。该方法利用单元网格对苗叶连续轮廓进行离散化表征，将苗叶空间形态关系映射为颗粒坐标信息，并基于 Hertz－Mindlin with Bonding V2 接触模型，构建水稻钵苗柔性苗叶离散元模型。以柔性苗叶相对挠度为评价指标，通过 Plackett－Burman 试验对影响苗叶相对挠度的参数进行显著性筛选，并基于 Box－Behnken 试验建立苗叶相对挠度二阶回归模型。明确了单位面积法向刚度、单位面积切向刚度和粘结比例系数对苗叶柔性具有显著影响。采用标定后的参数进行仿真试验，结果显示，仿真与物理试验相对误差为 2.51%，验证了所建模型的有效性。可为后续建立适用于气力抛秧仿真分析的水稻钵苗离散元模型提供参考。

关键词：水稻钵苗；柔性苗叶；离散元；参数标定；多视场角图像拟合

中图分类号：S223.9　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)13-0259-10　　**OSID**：

Discrete Element Model Construction and Parameter Calibration of Flexible Leaves in Rice Pot Seedlings

Sun Liang[1,2]　Jin Guojie[1]　Wang Yaliang[3]　Chen Jianneng[1,2]　Yu Gaohong[1,4]

(1. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Intelligent Perception and Robotics, Hangzhou* 310018, *China*
3. *China National Rice Research Institute, Hangzhou* 310006, *China*
4. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Southeast Hilly and Mountainous Areas, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: Regarding the challenge of constructing a discrete element model for the thin-walled leaves of rice pot seedlings, which limits the simulation analysis of pneumatic seedling throwing due to the lack of a suitable leaf model to characterize the effect of seedling posture changes on its trajectory under the interaction between flexible leaves and airflow fields, taking rice pot seedlings at the three-leaf and one-heart stage as the research object, a reverse reconstruction method for the discrete element model of seedling leaves was proposed based on multi-view image fitting. This method discretized the continuous contour of the leaves using unit grids, mapped the spatial morphological relationships of the leaves into particle coordinate information, and constructed a discrete element model of the flexible leaves of rice pot seedlings based on the Hertz－Mindlin with Bonding V2 contact model. Using the relative deflection of the flexible leaves as the evaluation index, the parameters affecting leaf relative deflection were screened for significance through a Plackett－Burman design. A second-order regression model for leaf relative deflection was established based on a Box－Behnken design. It was clarified that normal stiffness per unit area, tangential stiffness per unit area, and bonding ratio significantly affected leaf relative deflection. Simulation tests performed with the calibrated parameters showed a relative error of 2.51% between the simulation and physical experiment, verifying the validity of the constructed model. The research result can provide a reference for the subsequent development of discrete element models suitable for simulating

收稿日期：2026－01－20　修回日期：2026－02－13

基金项目：国家重点研发计划项目(2024YFD2000200、2023YFD2301404)和国家自然科学基金项目(52375275)

作者简介：孙良(1981—)，男，教授，博士，主要从事农业机械设计和智能装备技术研究，E-mail：liangsun@zstu.edu.cn

pneumatic seedling throwing.

Key words: rice pot seedlings; flexible seedling leaves; discrete element; parameter calibration; multi-view image fitting

0 引言

气力抛秧技术采用钵体育苗,通过气流携秧实现柔性抛栽,无植伤胁迫,具有根系损伤小、返青快、分蘖早等优势,有助于缓解双季稻茬口衔接压力[1-2]。然而,受制于水稻钵苗在气流场中的复杂动力学行为[3],秧苗并非理想质点,其自身柔韧性、质量分布不均性及钵体土壤易散性,使其与气流场相互作用时的姿态和轨迹难以预测与控制,导致抛秧均匀性存在区域性差异。因此,为实现高效、精准的气力抛秧作业,考虑苗叶在气流场中的动态力学特性,建立能够准确反映苗叶柔韧性与变形特征的柔性离散元模型,是构建水稻钵苗柔性植株模型,并揭示其与气流耦合机制的必要前提。

离散元法作为一种基于不连续假设的数值模拟方法,在农业工程领域,被广泛用于茎秆类作物与农机装备相互作用的研究,有助于缩短农机装备的研发周期[4],实现农机装备设计的可视化与参数化[5]。Zeng 等[6]运用离散元方法构建了刚性秸秆模型,并标定了秸秆和旋耕刀具间的接触参数,模拟秸秆受迫、抛射与翻转的运动过程,并揭示其在耕作部件作用下的动态行为。然而,该模型忽略了秸秆的柔性变形特性,无法表征出秸秆的挤压、弯曲、缠绕及破碎损坏等力学行为,限制了其在涉及形变场景中的适用性。夏俊芳等[7]针对刚性模型在模拟秸秆力学行为上的不足,通过颗粒替换法构建了水稻秸秆离散元柔性模型。以秸秆弯曲最大载荷为标定指标,对粘结模型进行标定,模拟了秸秆的弯曲、切割等力学过程。此外,其他学者还完成了对油菜、苜蓿等植物茎秆的离散元柔性模型构建工作[8-9],探究了作物与机具间的互作关系,验证了离散元方法用于反映植物力学特性研究的可行性[10-11]。综上所述,尽管前人在植株离散元模型构建方面已经积累了一定研究基础,但大多研究局限于植株茎秆或根土模型上[12-13],而针对植株苗叶的离散元模型,尤其是水稻钵苗这类苗叶具有薄壁异形特征的离散元建模研究还较为缺乏。

针对上述问题,本研究以水稻钵苗为研究对象,依据其实际生长姿态特征,构建柔性苗叶离散元模型。以物理试验与仿真试验相结合的方法,确定水稻钵苗基本物性参数。以苗叶相对挠度为指标,采用 Plackett-Burman 试验筛选影响苗叶柔性特性的显著因素,并通过 Box-Behnken 试验建立显著因素二次回归模型,进而实现对柔性苗叶离散元模型参数的标定与验证。以期为水稻钵苗植株离散元研究提供模型基础,并为后续探究钵苗与气流场互作机制下的运动规律与力学响应提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 水稻钵苗物性参数测定

1.1.1 基本特征参数测定

本研究所用水稻钵苗品种为甬优 1540,均培育自中国水稻研究所试验基地。供试秧苗均处于三叶一心期,无病虫害及机械损伤。

随机选取 50 株秧苗作为待测样本,统计显示,供试钵苗每钵包含 2~5 株苗,其中以 3 株/钵为主,占比 65%。为构建水稻钵苗的柔性复合离散元模型,水稻钵苗被分离为苗叶、茎秆与土钵(根土混合)3 部分,分别测定其基本特征参数。物性参数测定过程如图 1 所示。采用游标卡尺(量程:0~150 mm;精度 0.1 mm)测量各部分的轮廓尺寸,千分尺(量程:0~12.7 mm;精度 0.01 mm)测量叶厚及茎秆直径,电热鼓风干燥机(温度范围:5~250℃;精度 1℃)测定含水率,并采用排水法测得密度。每项参数重复测量取平均值作为最终结果,获得其基本尺寸特征参数[9]如表 1 所示。

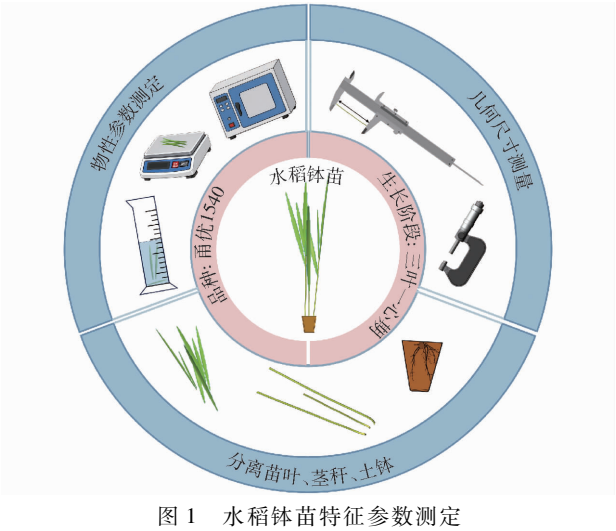

图 1 水稻钵苗特征参数测定

Fig. 1 Determination of characteristic parameters of rice pot seedlings

根据实测数据,水稻钵苗离散元模型的几何尺寸主要依据表 1 中各参数的平均值确定,土钵形态在平均值基础上参照实际秧盘内单个钵体的空间大

表 1　水稻钵苗基本特征参数

Tab. 1　Basic characteristic parameters of rice pot seedlings

组分	项目	参数					
		长度/mm	宽度/mm	高度/mm	密度/(g·cm^{-3})	含水率/%	质量/g
苗叶/(3 叶·株$^{-1}$)	数值	50. 30 ~ 96. 20	3. 30 ~ 5. 20	0. 14 ~ 0. 23	1. 06 ~ 1. 18	0. 78 ~ 0. 84	0. 10 ~ 0. 16
	平均值	95. 5/57. 3/76. 7	4. 50	0. 18	1. 13	0. 80	0. 13
	变异系数/%	7/5/6	14	16	5	2	15
茎秆/(3 株·钵$^{-1}$)	数值	30 ~ 72	0. 72 ~ 1. 10	–	1. 10 ~ 1. 19	0. 86 ~ 0. 88	0. 12 ~ 0. 18
	平均值	63. 0/32. 9/65. 5	0. 9	–	1. 14	0. 87	0. 15
	变异系数/%	5/8/5	9	–	3	0. 8	16
土钵(上/下面)	数值	9 ~ 16	8 ~ 15	17 ~ 18	1. 04 ~ 1. 06	0. 30 ~ 0. 35	1. 91 ~ 2. 48
	平均值	15. 1/9. 9	15. 0/8. 9	17. 1	1. 05	0. 34	2. 23
	变异系数/%	2/3	1/2	2	1	6	8

注：“ – ”表示测量对象不涉及该项指数。

小确定。此外，三叶一心期钵苗的苗叶生长姿态呈现明显的形态分布规律：从第一完全叶开始，随着叶位升高，苗叶长度迅速增加，且奇数叶与偶数叶分布于茎秆两侧。值得注意的是，叶尖与叶宽之比保持相对稳定，约为 8∶1。在构建水稻钵苗苗叶部分离散元模型时，为保持其实际形态特征，模型保留了上述苗叶生长姿态及叶宽比例作为基础几何要素，并依据三叶期钵苗各尺寸平均值及所述比例关系确定苗叶几何参数。

1.1.2　泊松比与剪切模量

为构建水稻钵苗离散元模型，探究影响柔性苗叶的显著性因素，分别测量水稻钵苗茎秆与苗叶的泊松比、剪切模量。本研究从健壮水稻秧苗中随机取样 10 株，鉴于茎秆与苗叶在几何形状与力学特性上存在显著差异，试验采用不同的样品制备方法。其中，茎秆制备成直径约 0. 9 mm、长度 40 mm 的圆柱形试件；对于形状不规则的苗叶，则将其修剪为5 mm × 40 mm 的矩形条带。试验前，使用游标卡尺测量试件的初始尺寸，作为应变计算基准。拉伸试验在万能力学试验机(型号：WDW – 1000；测量范围：0 ~ 1 000 N；测量精度：0. 5%)上进行，加载速度为 1 mm/min，基于预试验确定的线弹性范围将加载时间控制在 10 s 内，确保变形处于弹性阶段。试件竖直安装于夹具间，通过对中与预紧避免局部应力集中，试验过程如图 2 所示。每次加载后使用千分尺测量轴向与径向变形，并据此计算横向应变与轴向应变，泊松比定义为两者绝对值之比，计算式为[14]

$$\mu = \frac{|\varepsilon_x|}{|\varepsilon_y|} = \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{H}{\Delta H} \tag{1}$$

式中　μ——泊松比

ε_x、ε_y——横向应变、轴向应变

ΔL——横向绝对变形量，mm

L——原始横向尺寸，mm

ΔH——轴向绝对变形量，mm

H——原始轴向尺寸，mm

重复进行 10 次试验，计算得苗叶和茎秆的泊松比分别为 0. 26 和 0. 36。



图 2　试样拉伸试验

Fig. 2　Tensile test of specimens

进一步地，根据试验机记录的载荷–位移数据，结合试件的初始横截面积与初始长度，可计算得到试件弹性模量。在弹性变形阶段的比例极限范围内，材料所受切应力与相应切应变之比，称为剪切模量。基于以上方法计算得出，水稻钵苗苗叶与茎秆的剪切模量分别为 3. 77 × 10^6 Pa 和 1. 11 × 10^7 Pa。该参数表征了材料抵抗剪切变形的能力，计算公式为[15]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F}{S\varepsilon} \tag{2}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \tag{3}$$

式中　E——弹性模量，MPa

σ——应力，MPa

ε——应变

F——轴向载荷,N

S——试样初始横截面积,mm^2

G——剪切模量,MPa

1.2 水稻钵苗接触参数测定

1.2.1 静摩擦因数

静摩擦因数是物体所受最大静摩擦力 f_s 与法向支撑力 F_N 的比值。静摩擦因数 μ_s 与静摩擦角 α 的关系为[9]

$$\mu_s = \frac{f_s}{F_N} = \frac{G_m \sin\alpha}{G_m \cos\alpha} = \tan\alpha \tag{4}$$

式中 G_m——待测物体所受重力,N

为测定不同对象间的静摩擦因数,试验前分别以水稻钵苗茎秆、苗叶、土钵和 PVC 材料制备接触板作为斜面。试验时,将待测茎秆、苗叶或土钵沿轴向放置于接触板上,并在接触板适当位置固定角度仪。随后缓慢抬升接触板自由端,直至待测物体在板面上发生滑动时立即停止,记录此时角度仪显示角度值,如图 3 所示。

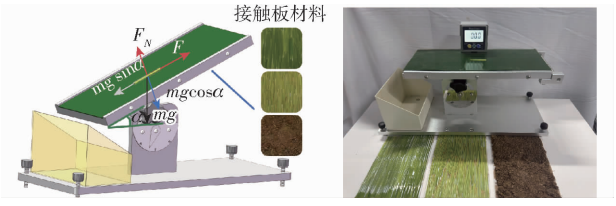

图 3 静摩擦试验

Fig. 3 Static friction test

每组试验重复 10 次,取角度平均值计算静摩擦因数。最终测得茎秆、苗叶、土钵和 PVC 材料之间的静摩擦因数如表 2 所示。

表 2 静摩擦因数与滚动摩擦因数测定结果

Tab. 2 Static friction coefficient and rolling friction coefficient measurement results

项目	静摩擦因数	滚动摩擦因数
茎秆-茎秆	0.98	0.21
茎秆-苗叶	1.23	0.23
茎秆-土钵	1.03	0.26
茎秆-PVC	1.29	0.31
苗叶-苗叶	0.89	0.16
苗叶-土钵	1.07	0.28
苗叶-PVC	0.93	0.27
土钵-土钵	0.94	0.29
土钵-PVC	0.75	0.25
PVC-PVC	1.05	0.28

1.2.2 滚动摩擦因数

滚动摩擦是指一个物体在另一个物体表面产生无滑移的滚动或有滚动趋势时,因接触面局部形变而产生的阻碍作用。滚动摩擦因数 f 与动摩擦角 θ 的关系为[9]

$$f = \frac{M}{F_N} = \frac{rG_m \sin\theta}{G_m \cos\theta} = r\tan\theta \tag{5}$$

式中 M——滚动摩擦力矩,N·mm

r——待测物体的半径,mm

本试验沿用静摩擦测试所制备的装置,将待测的苗叶、茎秆或土钵水平放置于不同材质的接触板上,缓慢抬升接触板自由端使其倾斜,直到物料发生滚动立即停止,记录此时角度仪显示角度值,如图 4 所示。每组试验重复 10 次,取角度平均值计算滚动摩擦因数。最终测得苗叶、茎秆、土钵和 PVC 材料之间的滚动摩擦因数如表 2 所示。

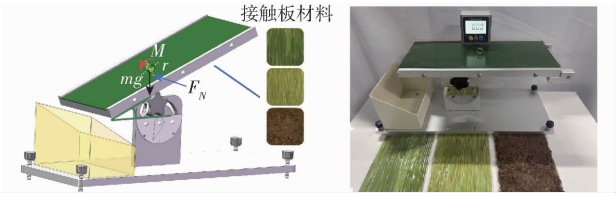

图 4 滚动摩擦试验

Fig. 4 Rolling friction test

1.2.3 碰撞恢复系数

碰撞恢复系数是衡量物体碰撞变形后恢复原来形状能力的参数,表达为碰撞结束时接触点的瞬时法向分离速度与碰撞前法向接近速度的比值。该系数 e 的计算可简化为[16]

$$e = \sqrt{\frac{h_1}{h_2}} \tag{6}$$

式中 h_1——物体最大弹起高度,mm

h_2——物体自由落体高度,mm

碰撞恢复系数测定试验装置如图 5 所示,主要由跌落架(高度:350 mm)、坐标纸(尺寸:350 mm × 500 mm;刻度:1.0 mm)、高速摄像机(型号:Phantom VEO640;分辨率:2 560 像素 × 1 600 像素)、水稻钵苗各待测部件和碰撞接触板组成。选取水稻钵苗茎秆、苗叶、土钵及 PVC 材料制备碰撞接触板。试验时,待测的水稻钵苗苗叶、茎秆、土钵从落料口自由下落与不同材质的接触板碰撞。通过高速摄像机以

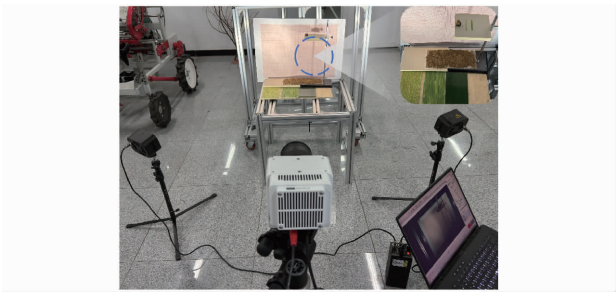

图 5 碰撞恢复系数测定装置

Fig. 5 Experimental setup for measuring coefficient of restitution

240 f/s 的拍摄频率，采集水稻钵苗各部件之间及其与 PVC 间相互跌落碰撞的视频。每组试验重复 10 次，结果取平均值，最终测得茎秆、苗叶、土钵和 PVC 材料之间的碰撞恢复系数如表 3 所示。

表 3　碰撞恢复系数测定结果

Tab. 3　Determination results of coefficient of restitution

项目	数值
茎秆-茎秆	0.20
茎秆-苗叶	0.17
茎秆-土钵	0.18
茎秆- PVC	0.23
苗叶-苗叶	0.10
苗叶-土钵	0.14
苗叶- PVC	0.10
土钵-土钵	0.12
土钵- PVC	0.16
PVC - PVC	0.18

1.3　水稻钵苗离散元模型构建

1.3.1　离散元模型构建方法

水稻钵苗因其外形复杂且不规则，常规建模方法难以准确还原其真实形态特征。Liu 等[17]研究指出，通过为植株各部分建立具有各向异性特征的离散元模型，能有效提高其在力学特性上的拟合度。因此，本研究将水稻钵苗分解为茎秆、苗叶和土钵 3 部分，并采用一种基于多尺度颗粒聚合的方法构建水稻钵苗离散元模型，以更好表征钵苗各部分形态特征。

三维扫描逆向建模技术是目前准确获取植株几何外形轮廓的常用方法。植株茎秆和土钵部分因其结构相对简单、外形较为规则，可在三维扫描后借助颗粒填充技术快速构建其离散元模型。然而，水稻钵苗苗叶因其具有叶薄、质软、易翘曲等特性，在三维扫描过程中常出现难以修补的破损曲面，导致重建模型存在几何失真。这一现象在 Kempthorne 等[18]研究中也得到了证实，在基于三维扫描数据重建小麦叶片的过程中发现，由于扫描仪的视场角较小，且叶片形态呈细长条状，沿长度方向视觉上相似，导致扫描叶片时难以重建。这对水稻钵苗这类具有薄壁特征的植株建模方法提出了更高要求，凸显了构建水稻钵苗柔性复合离散元模型所面临的独特挑战。为克服上述难点，本研究沿用逆向建模基本思路，如图 6 所示，采用环绕水稻钵苗的多视场角图像采集方法，获取覆盖其整体形态的序列图像。通过对图像序列进行特征拟合，精准界定水稻钵苗轮廓，有效规避因苗叶视觉相似性造成的特征误匹配。在此基础上，使用 Solidworks 软件通过曲面建模，依据苗叶翘曲形态特征进行轮廓重建，逆向建模得到水稻钵苗实体模型。

进一步地，本研究将数值积分“以离散逼近连续”的思想，拓展至离散元法的不连续假设数值模拟框架中，提出将具有连续轮廓的苗叶实体表征为一个可通过结构化网格进行拓扑镶嵌的域。与有限元法构建场函数的插值单元来表征连续的物理场不同，通过结构化网格对苗叶进行几何离散，每个网格单元都被视为一个具有独立质量和自由度的物理实体，苗叶的力学特性表征为单元间动态接触关系的累积演化。该方法的优势在于，将上述构成苗叶的网格单元空间中心坐标映射为颗粒位置信息，并以单元尺寸所确定的颗粒排布间距为基准，通过设置小于单元网格尺寸的粒径，苗叶便可被构建为一个在空间上规则排布的颗粒集合体，如图 6 所示。Zhang 等[19]指出离散元模拟的颗粒越接近真实物体，模拟精度就越高。在此框架下，植株离散元模型与真实物体之间复杂的几何拟合关系被简化为仅与

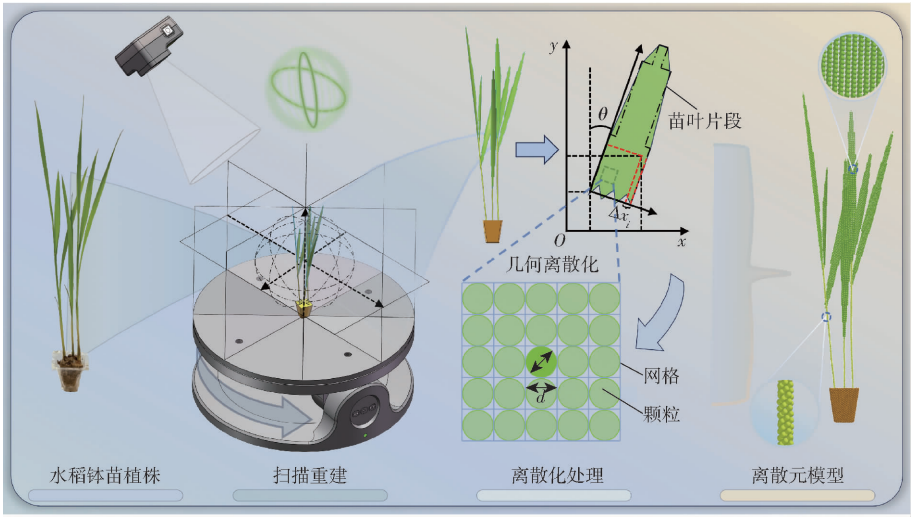

图 6　水稻钵苗离散元模型构建过程

Fig. 6　Construction process of discrete element model for rice pot seedlings

网格数量相关的标度问题。区别于非结构化网格在构建离散元模型时因存在过渡网格而导致颗粒填充互嵌的固有局限[20],本文所提方法实现了颗粒分布规则化编排,为后续接触模型的正确建立提供了必要前提。

综上所述,水稻钵苗离散元模型可采用多尺度颗粒聚合方法进行构建,由 3 种颗粒材料复合形成,用于表征茎秆、苗叶和土钵物理结构的力学特性。各部分颗粒半径依据前期仿真预试验结果及水稻钵苗形态尺寸特征而定。与茎秆-土钵部分通过颗粒自然堆积法生成不同,苗叶部分因其具有叶薄、翘曲等结构特点,采用上述的颗粒规则化编排方法进行构建。模型填充结果如图 6 所示。

1.3.2 离散元接触模型

本研究选用 Hertz - Mindlin 模型作为基础模型,该模型在力学计算方面具有较高的精度和效率。鉴于水稻钵苗苗叶属于柔性薄片结构,具有明显的弯曲变形特性,在仿真时还需引入 Bonding V2 模型[21],用于描述颗粒间粘结行为的非线性演化过程[19]。该模型在基础模型上补充了粘结力与粘结力矩的作用机制。

如图 7 所示(R_b 和 R_{bc}分别为颗粒半径和颗粒接触半径,mm;n 和 τ 分别为颗粒受力的法向和切向方向;F_n 和 F_τ 分别为颗粒所受法向力和切向力,N;M_n 和 M_τ 分别为颗粒所受法向力矩和切向力矩,N·m;L_b 为粘结长度,mm),当两个颗粒的中心距离小于二者接触半径之和时,颗粒间将生成 Bonding 键发挥粘结作用[15,22]。因此,颗粒的接触半径应设定为大于实际球体半径[23],并规定法向应力与切向应力同时超过预设阈值时,粘结作用将被破坏[24]。为探究水稻钵苗苗叶的柔性力学特性,仿真模型在苗叶颗粒之间设置了相应的 Bonding 键参数。颗粒接触模型表达式为

$$\begin{cases} F_n = -v_n K_n A \delta_t \\ F_\tau = -v_\tau K_\tau A \delta_t \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} M_n = -\omega_n K_n J \delta_t \\ M_\tau = -\omega_\tau K_\tau \dfrac{J}{2} \delta_t \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} \sigma_{\max} < \dfrac{-F_n}{A} + \dfrac{2M_\tau}{J} R_b \\ \tau_{\max} < \dfrac{-F_\tau}{A} + \dfrac{M_n}{J} R_b \end{cases} \tag{9}$$

式中 A——接触面积,m^2

v_n、v_τ——法向速度、切向速度,m/s

K_n、K_τ——单位面积法向刚度、单位面积切向刚度,N/m^3

δ_t——时间步长,s

ω_n、ω_τ——法向加速度、切向加速度,m/s^2

J——极惯性矩,m^4

$\sigma_{\max}$——临界法向应力,Pa

$\tau_{\max}$——临界切向应力,Pa

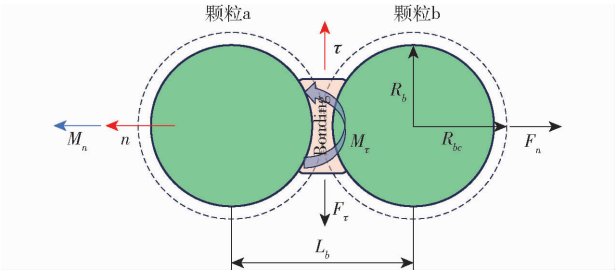

图 7 接触模型示意图

Fig. 7 Schematic of contact model

1.4 柔性苗叶标定试验设计

苗叶结构的离散元模型精准构建是水稻钵苗仿真的关键前提,针对其薄壁结构所表现出的弯曲力学特性,需通过柔性苗叶标定试验确定对应参数,从而建立可靠的离散元模型。柔性苗叶标定试验装置如图 8 所示。试验采用亚克力板作为苗叶的固定面,位于其下方的激光测距传感器(精度 0.01 mm)首先测量苗叶固定面至传感器的距离,作为基准值。试验时,预先测得苗叶全长,将其一端固定(固定距离 d 为 13 mm),另一端受重力作用自然下垂,再次使用激光测距传感器进行测量,将所得距离与基准值相减,即得到苗叶因柔性下垂产生的位移。该位移与苗叶全长之比,定义为表征苗叶整体柔性弯曲的挠度比,从不同秧苗随机选取苗叶,并确保苗叶取自植株的不同位置,分别进行 10 次试验,结果取平均值,得到苗叶的相对挠度约为 9.57%。

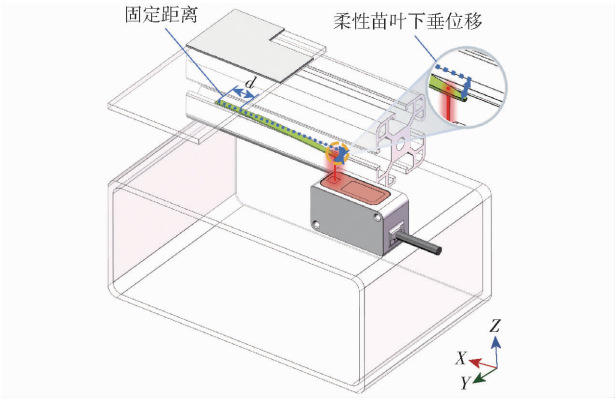

图 8 柔性苗叶标定试验

Fig. 8 Calibration test for flexible seedling leaves

在仿真试验中,基于 Solidworks 软件建立了与物理试验尺寸一致的试验平台模型,将其保存为 stp 格式后导入 EDEM 软件中,并设置重力方向沿 Z 轴负方向。为模拟实际试验,在 EDEM 软件中构建了苗叶的离散元模型。模型中所有颗粒的材料属性均

保持一致，并通过 Bonding V2 接触模型在颗粒间建立粘结作用。模拟时，将模型中部分颗粒施加固定约束，其约束距离的范围与实际试验中的固定距离相对应。剩余颗粒则在该粘结力与重力共同作用下自然下垂，从而用于标定苗叶的柔性力学特性。仿真过程时，时间步长设置为 5.0×10^{-8} s，数据保存间隔为 0.01 s，总时长 1 s。

离散元 Bonding V2 模型中，相邻颗粒间的粘结参数主要包括单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、临界法向应力、临界切向应力及粘结比例系数[25-26]。为探究各参数对苗叶柔性影响的显著性，本研究以苗叶柔性弯曲的相对挠度 Y 为目标变量，对上述参数进行显著性分析。首先采用 Plackett－Burman 试验方法筛选影响显著因素，并依据其效应方向确定最陡爬坡试验路径；仿真过程中非显著因素取中间值固定。在此基础上，通过最陡爬坡试验进一步逼近显著因素的优化区间。最后，基于 Box－Behnken 试验设计进行响应面分析，以获取仿真试验中的最佳参数组合。

2　试验设计与分析

2.1　苗叶柔性影响因素筛选

本研究采用 Plackett－Burman 试验设计，以柔性苗叶的相对挠度 Y 为响应指标，筛选对其具有显著影响的关键因素。各试验参数均设置两个水平，选取单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、临界法向应力、临界切向应力及粘结比例系数 5 个因素作为考察对象，并设置 6 个虚拟项以评估试验误差。通过预仿真试验，并参考与物料性质相近的仿真参数[14,27]，确定各因素的初始取值范围，试验因素编码如表 4 所示。试验共设计 12 组，每组重复 5 次，结果取平均值。

表 4　Plackett－Burman 试验因素编码

Tab.4　Plackett－Burman test factors coding

因素	编码	
	－1	1
单位面积法向刚度 x_1/(N·m^{-3})	8.0×10^{12}	2.4×10^{13}
单位面积切向刚度 x_2/(N·m^{-3})	1×10^{10}	5×10^{10}
临界法向应力 x_3/Pa	3×10^{6}	6×10^{6}
临界切向应力 x_4/Pa	2×10^{6}	4×10^{6}
粘结比例系数 x_5	0.5	0.7

Plackett－Burman 试验设计及结果见表 5，其中 $X_1\sim X_5$ 分别为 5 个因素所对应的编码值。为评估各因素的显著性，采用 Design-Expert 软件对试验结果进行方差分析，所得各因素显著性检验结果如表 6 所示。方差分析结果表明，模型 P 值小于 0.001，表明所建立的回归模型具有高度显著性。进一步分析显示，单位面积法向刚度 X_1、单位面积切向刚度 X_2 和粘结比例系数 X_5 对柔性苗叶相对挠度影响显著。各因素对水稻钵苗苗叶弯曲相对挠度的影响程度从大到小依次为：X_1、X_5、X_2、X_3、X_4。其中，X_1、X_5 为极显著影响因素，且均表现为负效应。因此，在爬坡试验中，各因素取值将按固定梯度逐步减小，以进一步探究各因素对苗叶柔性变形的影响规律。

表 5　Plackett－Burman 试验结果

Tab.5　Plackett－Burman test results

序号	因素					Y/%
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	
1	1	1	－1	1	1	4.04
2	－1	1	1	－1	1	10.80
3	1	－1	1	1	－1	8.91
4	－1	1	－1	1	1	10.80
5	－1	－1	1	－1	1	11.61
6	－1	－1	－1	1	－1	23.41
7	1	－1	－1	－1	1	4.33
8	1	1	－1	－1	－1	8.01
9	1	1	1	－1	－1	8.01
10	－1	1	1	1	－1	19.40
11	1	－1	1	1	1	4.33
12	－1	－1	－1	－1	－1	24.10

表 6　Plackett－Burman 方差分析

Tab.6　Plackett－Burman analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	534.20	5	106.84	33.14	0.000 3
X_1	325.42	1	325.42	100.92	<0.000 1
X_2	20.36	1	20.36	6.31	0.045 7
X_3	11.27	1	11.27	3.50	0.110 7
X_4	1.35	1	1.35	0.419 7	0.541 0
X_5	175.80	1	175.80	54.52	0.000 3
残差	19.35	6	3.22		

注：$P\leqslant0.01$ 为极显著；$P<0.05$ 为显著。下同。

各因素对柔性苗叶相对挠度 Y 的回归方程为

$$Y=11.48-5.21X_1-1.30X_2-0.969\,2X_3+0.335\,8X_4-3.83X_5 \quad (10)$$

2.2　最陡爬坡试验

根据 Plackett－Burman 试验的显著性分析结果，单位面积法向刚度 X_1、单位面积切向刚度 X_2 及粘结比例系数 X_5 对苗叶相对挠度有显著影响。依据各因素影响的程度，按相应步长增加或减小参数取值，以使苗叶相对挠度进一步接近物理试验值，从而初步定位最优值所在区间。临界法向应力 X_3 和临界切向应力 X_4 对苗叶相对挠度影响不显著，因此将其分别固定在中间水平。

所设计的最陡爬坡试验方案及结果如表 7 所示，试验中柔性苗叶挠度呈逐渐升高趋势，并在试验

表 7 最陡爬坡试验设计及结果

Tab. 7 Steepest ascent test design and results

序号	因素			Y/%
	x_1/(N·m^{-3})	x_2/(N·m^{-3})	x_5	
1	2.40×10^{13}	5.0×10^{10}	0.70	4.10
2	2.00×10^{13}	4.0×10^{10}	0.65	5.61
3	1.60×10^{13}	3.0×10^{10}	0.60	8.16
4	1.20×10^{13}	2.0×10^{10}	0.55	12.88
5	8.00×10^{12}	1.0×10^{10}	0.50	23.58

3 附近区间苗叶相对挠度最符合物理试验,因此,以试验 3 的参数作为中心点,并选取试验 2 和试验 4 的水平分别作为 Box - Behnken 响应面设计的低水平与高水平,以进一步开展优化分析。

2.3 参数组合优化

以最陡爬坡试验 3 水平作为零水平,试验 2、4 水平分别作为低水平和高水平,进行 Box - Behnken 试验设计,中心水平设置 3 组重复,共进行 15 组柔性苗叶仿真试验,其余非显著性参数与粘结参数同上述试验设定一致。Bonding V2 模型显著性参数编码如表 8 所示。试验方案与结果如表 9 所示。

表 8 Box - Behnken 试验因素编码

Tab. 8 Box - Behnken test factors coding

编码	因素		
	x_1/(N·m^{-3})	x_2/(N·m^{-3})	x_5
-1	1.20×10^{13}	2.00×10^{10}	0.55
0	1.60×10^{13}	3.00×10^{10}	0.60
1	2.00×10^{13}	4.00×10^{10}	0.65

表 9 Box - Behnken 试验设计与结果

Tab. 9 Box - Behnken test design and results

序号	因素			Y/%
	X_1	X_2	X_5	
1	-1	0	-1	12.60
2	0	0	0	8.16
3	0	1	-1	9.65
4	-1	-1	0	10.60
5	1	-1	0	6.71
6	0	1	1	6.78
7	0	0	0	8.21
8	0	-1	1	7.04
9	1	0	-1	7.96
10	0	-1	-1	9.96
11	-1	1	0	10.46
12	1	1	0	6.60
13	1	0	1	5.68
14	0	0	0	8.10
15	-1	0	1	9.00

采用 Design-Expert 软件对 Box - Behnken 试验结果进行方差分析,并建立响应值与离散元参数之间的回归模型。根据表 10 的方差分析结果,所建立的回归模型具有高度显著性($P<0.000\ 1$),且失拟项不显著,说明模型拟合良好,能够较准确地预测水稻钵苗柔性苗叶的相对挠度。最终得到的柔性苗叶相对挠度 Y 与显著影响因素之间的回归方程为

$$Y=8.16-1.96X_1-0.102\ 5X_2-1.46X_5+0.444\ 2X_1^2-0.008\ 3X_2^2+0.209\ 2X_5^2+0.007\ 5X_1X_2+0.330\ 0X_1X_5+0.012\ 5X_2X_5 \quad (11)$$

表 10 Box - Behnken 试验方差分析

Tab. 10 Box - Behnken test analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	49.25	9	5.47	1 077.52	<0.000 1
X_1	30.85	1	30.85	6 074.93	<0.000 1
X_2	0.084 1	1	0.084 1	16.55	0.009 7
X_5	17.02	1	17.02	3 533.20	<0.000 1
X_1X_2	0.000 2	1	0.000 2	0.044 3	0.841 6
X_1X_5	0.435 6	1	0.435 6	85.78	0.000 2
X_2X_5	0.000 6	1	0.000 6	0.123 1	0.740 0
X_1^2	0.728 4	1	0.728 4	143.44	<0.000 1
X_2^2	0.000 3	1	0.000 3	0.050 5	0.831 1
X_5^2	0.161 5	1	0.161 5	31.81	0.002 4
残差	0.025 4	5	0.005 1		
失拟项	0.019 3	3	0.006 4	2.12	0.336 0
纯误差	0.006 1	2	0.003 0		
总和	49.27	14			

进一步分析表明,单位面积法向刚度 X_1、单位面积切向刚度 X_2、粘结比例系数 X_5 对苗叶相对挠度影响极为显著。在此基础上,X_1 与 X_5 存在明显的交互效应,其对苗叶相对挠度影响的响应曲面如图 9 所示。从响应面可以看出,柔性苗叶相对挠度与因素之间呈非线性关系。X_1 方向的曲率变化比 X_5 更为显著,说明 X_1 对柔性苗叶相对挠度的贡献比 X_5 更

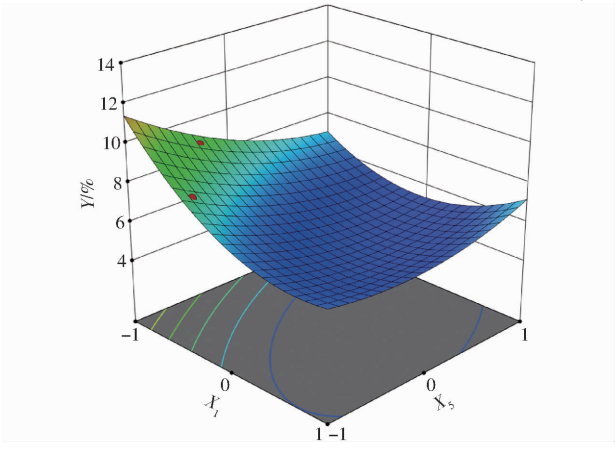

图 9 交互作用对苗叶挠度影响的响应曲面

Fig. 9 Response surface of interaction effects on leaf deflection

为显著，这与方差分析结果一致。

2.4　仿真参数标定与试验验证

为获得最佳参数组合，本研究以物理试验中苗叶相对挠度平均值（9.57%）为目标，运用 Design-Expert 软件对二阶回归方程进行优化求解。优化结果表明，单位面积法向刚度 X_1、单位面积切向刚度 X_2 和粘结比例系数 X_5 的最优参数组合为：1.47×10^{13} N/m^3、3.87×10^{10} N/m^3、0.58。为验证最优参数组合的准确性，将上述参数组合设置为 EDEM 仿真参数，并开展柔性苗叶模拟试验，如图 10 所示。试验重复 5 次，计算得到苗叶相对挠度为 9.33%，与物理试验结果的相对误差为 2.51%，该结果验证了所提出的苗叶离散元模型构建方法的可行性与数值模拟的准确性。

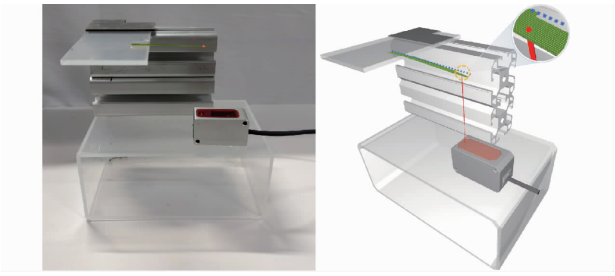

图 10　柔性苗叶挠度物理试验与仿真试验对比验证

Fig. 10　Comparative validation of physical test and simulation for flexible seedling leaf deflection

3　结论

（1）本研究提出一种基于多视场角水稻钵苗图像序列拟合与逆向建模的方法，获得了苗叶实体几何形态特征，并借助结构化网格对其几何形态进行离散化处理。随后，将网格单元映射为规则排布的颗粒集合体，进而基于 Hertz－Mindlin with Bonding V2 接触模型，构建出对应柔性苗叶离散元模型。

（2）以实际测得的物性参数作为仿真试验的参数依据，通过 Plackett－Burman 试验筛选出对苗叶柔性物理特性影响显著的因素，包括单位面积法向刚度、单位面积切向刚度和粘结比例系数。在此基础上，采用 Box－Behnken 试验建立了以上影响显著因素的二次回归模型，以柔性苗叶相对挠度为优化目标，求解得到最佳仿真参数组合：单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、粘结比例系数分别为1.47×10^{13} N/m^3、3.87×10^{10} N/m^3、0.58。

（3）使用优化求解所得到的粘结参数对秧苗苗叶进行参数标定，仿真试验中苗叶的相对挠度与实际值的相对误差为 2.51%，表明所建立的水稻钵苗柔性苗叶离散元模型与实际苗叶力学特性相近，验证了苗叶离散元构建方法的可靠性与仿真结果的准确性。所提出的离散元模型构建方法，可为同类薄壁异形植株作物仿真研究提供方法参考。

参　考　文　献

[1] Wang W Q, Xiang L, Zheng H B, et al. Orderly mechanical seedling-throwing: an efficient and high yielding establishment method for rice production[J]. Agronomy, 2022, 12(11): 2837.

[2] Xu L, Zhan X W, Yu T T, et al. Yield performance of direct-seeded, double-season rice using varieties with short growth durations in central China[J]. Field Crops Research, 2018, 227: 49－55.

[3] Tian Y Y, Gong H, Feng X, et al. Development of a model to predict the throwing trajectory of a rice seedling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 108025.

[4] Schramm M, Tekeste M Z, Plouffe C, et al. Estimating bond damping and bond Young's modulus for a flexible wheat straw discrete element method model[J]. Biosystems Engineering, 2019, 186: 349－355.

[5] 赵宏波，王学振，郑智旗，等. 农业装备领域离散元法应用研究进展[J]. 农业机械学报，2025，56(7)：1－19.
Zhao Hongbo, Wang Xuezhen, Zheng Zhiqi, et al. Research status and progress of discrete element method applications in agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 1－19. (in Chinese)

[6] Zeng Z W, Chen Y. Simulation of straw movement by discrete element modelling of straw-sweep-soil interaction[J]. Biosystems Engineering, 2019, 180: 25－35.

[7] 夏俊芳，张朋，苑宏文，等. 水稻秸秆离散元柔性模型参数标定与试验验证[J]. 农业机械学报，2024，55(9)：174－184.
Xia Junfang, Zhang Peng, Yuan Hongwen, et al. Calibration and verification of flexible rice straw model by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 174－184. (in Chinese)

[8] 谢伟，欧阳琛，蒋蘋，等. 面向夹持采收的油菜薹夹段茎秆离散元参数标定与优化[J]. 农业工程学报，2024，40(7)：104－116.
Xie Wei, Ouyang Chen, Jiang Pin, et al. Calibrating and optimizing the discrete element parameters for clamping section stems during rape shoot harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(7): 104－116. (in Chinese)

[9] 李涛，王振华，翟改霞，等. 苜蓿草植株离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报，2024，55(增刊2)：187－199.
Li Tao, Wang Zhenhua, Zhai Gaixia, et al. Establishment and parameter calibration of discrete element model of alfalfa plant

[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S2): 187 – 199. (in Chinese)

[10] Chen Z F, Duan A X, Liu Y, et al. Discrete element contact model and parameter calibration of sticky particles and agglomerates[J]. Journal of Terramechanics, 2024, 116: 100998.

[11] 辛亮, 李泽泽, 庄智圆, 等. 基于水稻钵苗根系生长模拟的钵体根-土复合体离散元模型研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 128 – 138.
Xin Liang, Li Zeze, Zhuang Zhiyuan, et al. Discrete element model for pot-type root-soil composite based on root growth simulation in rice pot seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 128 – 138. (in Chinese)

[12] Zhang S L, Zhao H B, Wang X Z, et al. Discrete element modeling and shear properties of the maize stubble-soil complex [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107519.

[13] Zhao J W, Yu J Q, Sun K, et al. A discrete element method model and experimental verification for wheat root systems[J]. Biosystems Engineering, 2024, 244: 146 – 165.

[14] Li D D, Wang R Y, Zhu Y P, et al. Calibration of simulation parameters for fresh tea leaves based on the discrete element method[J]. Agriculture, 2024, 14(1): 148.

[15] Zhao W S, Chen M J, Xie J H, et al. Discrete element modeling and physical experiment research on the biomechanical properties of cotton stalk[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107502.

[16] He C B, Qiao D J, Du C Y, et al. Design and optimisation of a distribution header in an alfalfa air-blown seed metering device using CFD – DEM coupled simulation[J]. Biosystems Engineering, 2025, 260: 104306.

[17] Liu Y G, Zhao J G, Yin B Z, et al. Discrete element modelling of the yam root-soil complex and its verification[J]. Biosystems Engineering, 2022, 220: 55 – 72.

[18] Kempthorne D M, Turner I W, Belward J A, et al. Surface reconstruction of wheat leaf morphology from three-dimensional scanned data[J]. Functional Plant Biology, 2015, 42(5): 444 – 451.

[19] Zhang X, Zhu X Y. Simulation and experiment on the falling pattern of fresh tea leaves based on discrete elements[J]. Hortscience, 2023, 58(9): 1057 – 1067.

[20] 吴电建, 丁子璨, 黄帅康, 等. 克氏原螯虾双层柔性离散元粘结模型参数标定与优化[J]. 农业工程学报, 2025, 41(18): 309 – 318.
Wu Dianjian, Ding Zican, Huang Shuaikang, et al. Calibration and optimization of the parameters for the double-layer flexible discrete element bonding model of *Procambarus clarkii*[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(18): 309 – 318. (in Chinese)

[21] Li S B, Huan X L, Wang T Y, et al. Biomechanical properties and discrete element modeling of PSR stalks during silage harvest[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108644.

[22] Jiménez-Herrera N, Barrios G K P, Tavares L M. Comparison of breakage models in DEM in simulating impact on particle beds[J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29(3): 692 – 706.

[23] 张锋伟, 宋学锋, 张雪坤, 等. 玉米秸秆揉丝破碎过程力学特性仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 58 – 65.
Zhang Fengwei, Song Xuefeng, Zhang Xuekun, et al. Simulation and experiment on mechanical characteristics of kneading and crushing process of corn straw[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 58 – 65. (in Chinese)

[24] Liu F Y, Zhang J, Chen J. Modeling of flexible wheat straw by discrete element method and its parameters calibration[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(3): 42 – 46.

[25] 李骅, 孟煜柏, 齐新丹, 等. 基于 Bonding V2 模型的蒜种离散元建模与参数标定[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 150 – 157,169.
Li Hua, Meng Yubai, Qi Xindan, et al. Discrete element modelling method and parameter calibration of garlic species based on Bonding V2 model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025, 56(7): 150 – 157,169. (in Chinese)

[26] 张宏建, 陈修波, 李宏立, 等. 控释肥颗粒群仿真接触参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 80 – 90.
Zhang Hongjian, Chen Xiubo, Li Hongli, et al. Simulated contact parameters calibration and experiment of controlled-release fertilizer particles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 80 – 90. (in Chinese)

[27] 吕昊威, 武传宇, 涂政, 等. 基于 EDEM 的机采茶鲜叶振动式分级机分级参数优化[J]. 茶叶科学, 2022, 42(1): 120 – 130.
Lyu Haowei, Wu Chuanyu, Tu Zheng, et al. EDEM-based optimization of classification parameters of machine-picked tea fresh leaf vibratory classifier[J]. Journal of Tea Science, 2022, 42(1): 120 – 130. (in Chinese)