doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.001

农业装备领域离散元法应用研究进展

赵宏波[1,2]　王学振[3]　郑智旗[1,2]　李相辉[1,2]　黄玉祥[1,2]

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;
2.农业农村部保护性耕作(黄河流域)机械化科研基地,陕西杨凌 712100;3.河南科技大学农业装备工程学院,洛阳 471003)

摘要:离散元法是研究农业装备作业机理及机具参数优化设计的重要方法之一,其通过可靠的模型构建实现农业装备-农业物料互作关系仿真。近年来,国内外学者借助离散元法建立了系列农业物料模型,对农业生产各环节中农业装备与农业物料相互作用的离散元仿真分析取得了新进展。本文总结了土壤、种子、茎秆、肥料等常见农业物料的离散元模型构建技术与关键参数标定方法,综述了耕整地、播种、田间管理、收获及农产品加工与贮藏等农业装备典型作业环节中离散元法的应用案例,以及基于离散元仿真开展的农业装备参数优化设计研究。分析了离散元法在农业装备领域应用中存在的主要问题,包括模型精度和通用性有待提高、模拟仿真速度有待提升及离散元的耦合仿真有待拓展等,最后对离散元法在农业装备领域的未来发展进行了展望,包括:提高模型精度和通用性,加强基础理论和本征模型研究,提高仿真效率,拓展与其他方法的耦合应用。

关键词:离散元法;农业装备;农业物料;参数标定;模拟仿真

中图分类号:S224.21　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0001-19　　**OSID**:

Research Status and Progress of Discrete Element Method Applications in Agricultural Equipment

ZHAO Hongbo[1,2]　WANG Xuezhen[3]　ZHENG Zhiqi[1,2]　LI Xianghui[1,2]　HUANG Yuxiang[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *Scientific Research Base for Conservation Tillage Mechanization (Yellow River Basin), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
3. *College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang* 471003, *China*)

Abstract: Discrete element method (DEM) has emerged as an important approach for investigating the operational mechanisms of agricultural equipment and optimizing their operation and structure parameters. By establishing reliable numerical models, DEM enables the simulation of interactions between agricultural equipment and agricultural materials. In recent years, scholars worldwide have developed a series of agricultural material models using DEM, achieving significant progress in simulating equipment - material interactions across various agricultural processes. The DEM modeling technologies and key parameter calibration methods for typical agricultural materials were systematically reviewed, such as soil, seeds, crop straw, fertilizers, etc. It summarized application cases of DEM in critical agricultural operations of tillage, seeding, crop management, harvesting, and post-harvest processing and storage, and equipment design research based on DEM simulations. Current challenges were critically examined: limited model accuracy and versatility across diverse soil textures and crop varieties, computational inefficiency in large-scale field simulations, insufficient coupling application with other numerical methods such as DEM - CFD, DEM - MBD and DEM - FEM. Future research directions of the application of DEM in agricultural equipment research was proposed, including improve model accuracy and universality, enhance research on basic theory and intrinsic model, increase simulation efficiency and expand its use coupling with other methods.

Key words: discrete element method; agricultural equipment; agricultural materials; parameter calibration; simulation

收稿日期:2025-05-04　修回日期:2025-05-30

基金项目:国家自然科学基金项目(32372009、32101630)、陕西省重点研发计划一般项目(2023-YBNY-226)和中国博士后科学基金面上项目(2020M683578)

作者简介:赵宏波(1990—),男,副教授,博士,主要从事旱作农业技术与智能装备研究,E-mail:zhaohb@nwafu.edu.cn

通信作者:黄玉祥(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail:hyx@nwsuaf.edu.cn

0 引言

加快推进农业装备研发对于提升农机作业效率、降低作业能耗、减少土壤-作物系统损伤、实现乡村振兴及农业强国战略具有重要意义。传统农机研发主要依靠理论分析、物理试验及经验设计,存在周期长、成本高、效率低等局限性,离散元法(Discrete element method, DEM)是一种分析复杂动态非连续力学离散系统问题的数值计算方法,其能够有效模拟土壤、种子、肥料、秸秆等散体农业物料的动力学行为,为土壤-机器-作物互作关系研究及农业装备优化设计提供了新视角[1]。近年来,随着计算机技术的迅速发展及多场耦合仿真模型的迭代更新,离散元法在农业装备领域的应用从单一的部件优化向农机作业全系统的虚拟仿真不断扩展,成为先进农业装备研发的主要手段之一。

分别以“离散元法 & 农业”和“DEM & Agriculture”为主题检索词,在中国学术期刊网络出版总库 CNKI 和 Web of Science 数据库进行检索发现,近 10 年农业工程领域,与离散元法相关的中英文发文数量整体呈现逐渐增加的趋势(2024 年发文量减少可能由于部分学位论文尚未公开);2015 年中英文总发文量不足 60 篇,2023 年总发文量已突破 400 篇,增加了近 6 倍,这表明离散元法在农业装备研究领域发挥着越来越重要的作用(图 1)。

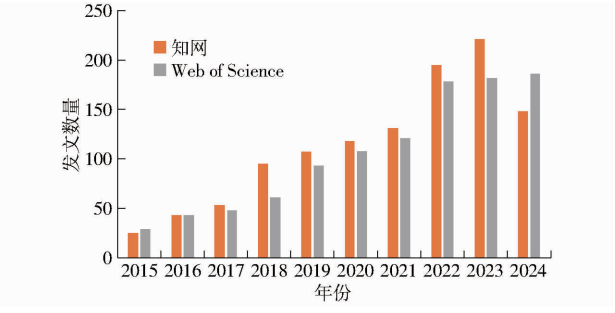


图 1 农业工程领域离散元法方面近 10 年文献数量

Fig. 1 Literatures of DEM application in agricultural engineering research

学者对离散元模型精准构建、仿真参数标定及农业装备作业过程数值模拟等方面研究取得了新进展:从土壤颗粒离散元模型构建到种子、肥料、饲料、秸秆、根茬等农业物料的离散元模型;从简单的球形土壤颗粒模型到复杂多球填充土块仿真模型[2-3](如块状、核状、柱状等);由单一物理机械土壤参数构建深松土壤扰动模型到分层土壤深松仿真模型[4-5];由刚性填充的秸秆模型到具有粘结键连接的柔性可破碎秸秆模型[6-7];由试错法确定离散元参数到多试验组合标定方法[8-9];由简单装置的作业过程仿真到整机多环节的高效复杂模拟;由离散元法独立仿真到离散元法与有限元法、计算流体力学等的耦合。离散元法的模拟对象越来越广泛,仿真模型及其参数标定的准确性越来越高,借助离散元法开展农业装备优化设计的研究也越来越丰富。

本文拟综述农业物料的离散元仿真模型构建及参数标定方法,包括土壤、种子、秸秆、肥料等农业物料离散元模型的类型和特点,模型参数标定过程涉及的物理试验及虚拟标定试验方法;然后对离散元法在农业生产的关键环节典型应用进行分类总结,包括耕整地、播种、田间管理、收获及农产品加工与贮藏;在此基础上,分析目前离散元法在农业装备研发领域应用中存在的问题,并对其应用前景进行展望,以期为应用离散元法开展更深入的农业装备研发提供参考。

1 农业物料离散元模型构建及参数标定

1.1 离散元接触模型及参数标定方法

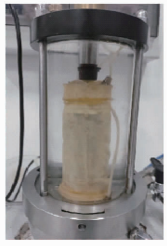
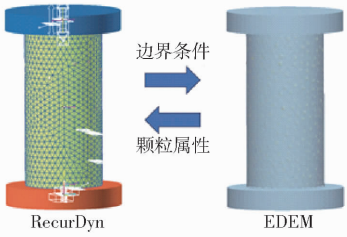
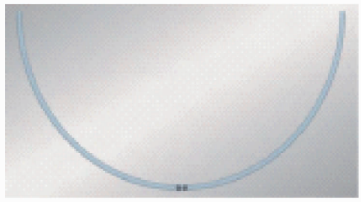
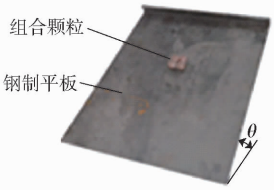
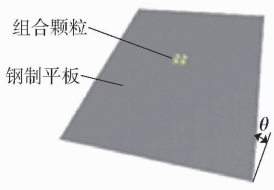
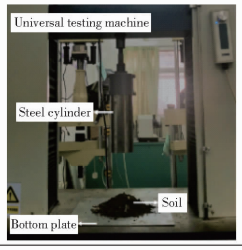
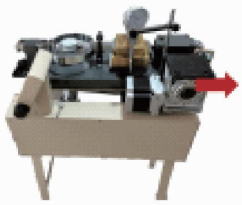
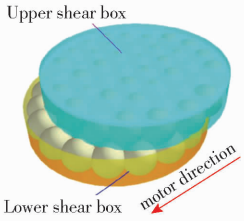
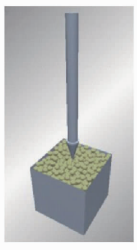
国内外开发了一系列开源及商业离散元软件,曾志伟等[10]归纳了主要软件特点和发展历程。这些离散元软件中仿真模型的基本构成元素主要为球体颗粒和几何体。在农业装备离散元模型构建中,通常采用球形颗粒或颗粒组合体模拟土壤、种子、肥料等农业物料,采用几何体模拟排种器、深松铲、铧式犁等刚性农业机械零部件。农业装备作业过程中,与农业物料产生各种相互作用,农业物料之间也会产生相互作用,进而影响其运动、受力等行为。离散元软件均内置了一系列接触模型,通过牛顿第二定律逐个计算颗粒及颗粒间力和动量的传递,进而对物料动力学等行为开展仿真:如通过 Hertz - Mindlin contact model,可对土壤颗粒之间及土壤和机具之间相互作用进行模拟,通过 PFC 中的平行粘结模型(Parallel bond model),可对粘质土壤之间的粘结、破碎行为以及秸秆等柔性可切断物料的变形、断裂行为进行模拟,通过传热模型可对热量传导温度变化过程开展仿真,这些本构模型为农业物料及其与农业装备的互作仿真提供了基础模型[11]。此外,部分软件还提供了 API 接口,可供使用者对模型进行二次开发,以满足个性化的仿真使用需求。

离散元模型构建的核心是模型参数的标定,这些参数取值将直接影响所构建模型的可靠性和准确性,主要包括密度、泊松比、剪切模量等本征参数,物料之间及其与接触材料之间的摩擦因数、恢复系数等物料基本接触参数,以及接触模型参数,例如平行粘结模型的颗粒刚度、粘结键刚度和强度、粘结半径

等。如表 1 所示，离散元模型参数标定方法大致可分为直接标定和间接标定两种。对于密度等本征参数，可直接通过试验测量或者计算得到；而部分模型参数无法通过实际试验直接测量，需通过试错法反复调整模型参数，并比对宏观试验与仿真的误差直至寻找到误差最小的参数值作为离散元模型参数。大部分农业物料离散元模型参数较多，模型构建过程中需要同时用到直接标定和间接标定方法。

表 1　常用离散元参数标定方法

Tab. 1　Commonly used parameter calibrating method

标定方法		真实试验	仿真	标定参数
直接标定方法	三轴试验			弹性模量、泊松比、内摩擦角、剪切模量[12-14]
	碰撞试验			种子间碰撞恢复系数[15]
	斜板滑动试验			物料颗粒与钢板间静摩擦因数[15]
间接标定方法	堆积角			物料间静摩擦因数、动摩擦因数、碰撞恢复系数等
	直剪试验			土壤间静摩擦因数、恢复系数、表面能、塑性变形比[16-18]
	贯入试验			时间步长、土壤颗粒间静摩擦因数、滚动摩擦因数[19]

直接标定方法是指通过相关仪器仪表直接测得或测量后经公式计算得到相关模型参数的方法，如物料的密度可通过排水法、浸液法直接测得；通过三轴剪切试验、静态压缩试验，可测出应力应变曲线，计算出土壤、种子的弹性模量、泊松比和剪切模量[12,20]；通过种子自由跌落反弹试验，可计算出种子与材料之间的碰撞恢复系数；通过物料碰撞试验，可测得种子之间的碰撞恢复系数；通过斜面滑移试验和滚动试验，可分别测得种子与材料间的静摩擦因数和滚动摩擦因数[21-22]。

间接标定方法先通过圆筒提升、贯入试验、土槽及田间机械作业等实际试验等获得物料堆积角、土壤扰动、作业阻力等数据,然后在离散元软件中对试验过程进行模拟,通过试错法不断改变影响评价指标的关键离散元模型参数,直至找出满足误差要求的模型参数组合,即完成参数标定。堆积角(安息角)指物料在重力作用下自由堆积时形成的表面与水平面之间的最大夹角,可对静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数等一系列参数开展标定,是离散元模型接触参数最常用的标定方法之一[23]。为提升堆积角测量的准确性,WU 等[24]还提出了一种基于点云的综合堆积角算法。贯入试验利用圆锥贯入土壤,测得贯入过程不同深度贯入阻力数值作为指标进行参数标定;土槽、田间作业试验指开展机具作业试验,以土壤扰动、作业阻力等指标对模型粘结键关键参数进行标定。参数间接标定过程中,常通过响应曲面法来寻找最优参数组合,BEHROOZ 等[25]对比发现,相较于传统的响应曲面方法,随机森林和人工神经网络方法在粘性材料参数标定中可大幅降低误差并提高拟合度,为人工智能技术在离散元法研究中的应用提供了新思路。

1.2 土壤模型构建与参数标定

1.2.1 土壤模型构建

不同地区、不同含水率、不同质地土壤物理力学特性参数存在显著差异,学者针对性构建了多种离散元土壤模型(表 2)。针对无粘性、不可压缩的土壤,学者利用 EDEM 软件中的 HMCM(Hertz - Mindlin contact model)模型,分别针对沙土、西北垄作覆膜区土、新疆耕后棉田土构建了土壤模型[26-28];孙鹏等[29]利用 PFC 软件中的线性接触刚度模型对沙土进行了仿真。UCGUL 等[2]在 HMCM 基础上增加了土壤塑性,构建了一种考虑土壤压缩的无粘性模型 HSCM(Hysteretic spring contact model),开沟阻力验证试验表明,相较于 HMCM 模型,HSCM 模型开沟器阻力准确性有所提升。

表 2 离散元土壤模型分类及其应用

Tab. 2 Typical soil models and their application

模型	是否可压缩	本构模型	应用	模型参数
无粘性模型	不可压缩	HMCM	沙土、西北垄作覆膜区土壤、新疆耕后棉田土壤[26-28]	土壤颗粒间滚动摩擦因数、静摩擦因数
	可压缩	HSCM	沙土[2]	土壤颗粒-钢板间静摩擦因数、滚动摩擦因数
粘性模型	不可压缩	Herzt - Mindlin with JKR	海南砖红壤、东北黏重黑土、甘蔗地粘土、含水沙土[13-14,30-31]	土壤间动静摩擦因数、土壤和钢板间动静摩擦因数、JKR 表面能
		Herzt - Mindlin with bonding	湿黏水稻土、西北旱区土壤[5,32]	临界应力、土壤-65Mn 钢、土壤颗粒间动摩擦因数
		Parallel bond model	土壤-熊爪互作模型、旋耕作业[33-34]	颗粒间刚度、粘结键粘结强度
	可压缩	EEPA	华北平原免耕壤土模型、湿润粘土模型[17-18]	土壤间静摩擦因数、恢复系数、表面能和塑性变形比
		MEPA	高粘性滩涂土壤[35]	卸载刚度、粘附系数

由于土壤中存在水分,土壤颗粒之间会生成液桥力,导致了粘结力的产生。EDEM 软件中的 Hertz - Mindlin with bonding 模型和 PFC 中的平行粘结模型是最常用的粘性土壤模型,通过在颗粒之间添加粘结键的方式模拟土壤粘性。当两相邻颗粒间隙小于预设值时粘结键生成,两个颗粒粘结在一起;当粘结键上作用的外力大于预设的阈值时,粘结键断裂,两个颗粒分开,土壤发生破碎。学者分别用上述模型对南方壤质粘土、加拿大砂壤土、华北沙壤土等进行了建模[32-34]。为了模拟颗粒间因静电、水分等原因产生更大粘结力的黏重土壤,学者采用 Hertz - Mindlin with JKR 模型,分别对海南砖红壤、东北黏重黑土、甘蔗地粘土、含水沙土等开展了建模工作[13-14,30-31]。

在粘性土壤模型基础上,石林榕等[36]整合延迟弹性模型(Hysteretic spring contact model)和线性内聚力模型(Liner cohesion model)优势,建立了不同含水率西北旱区农田土壤模型,该模型可对土壤塑性变形行为进行仿真,土壤直剪试验验证表明仿真相对误差小于 10%。THAKUR 等[37]提出了 Edinburgh elasto-plastic adhesion(EEPA)模型,该模型兼具弹塑性和黏性,基于此模型,王宪良等[17]、LI 等[18]分别构建了华北平原免耕壤土模型和一种湿润粘土模型。针对高粘性的滩涂土壤,梁喜凤等[34]基于仿真软件的二次开发提出了一种高湿黏弹塑性 Moist elasto-plastic adhesion(MEPA)模型,相较于

EEPA 模型和 Hertz－Mindlin with JKR 模型，对铲削阻力的模拟精度大幅提升。含水率不高时，土壤与机具之间黏附较小，因此大多数研究忽略土壤与机具之间的黏附，对土壤机具之间接触采用无粘结接触模型。CHENG 等[38]应用了线性内聚力模型(Linear cohesion model)表征土壤机具接触，实现了对长江下游湿黏水稻土旋耕作业土壤机具之间黏附的仿真。

1.2.2　土壤模型参数标定

针对上述构建的各类土壤模型，学者对涉及到的模型参数开展了一系列参数标定及模型准确性验证工作。颗粒形状与大小是所有土壤模型都会涉及到的基础参数，对模型准确性和仿真耗时有显著影响。许多研究采用单一球形颗粒构建土壤颗粒模型，并在颗粒工厂中设置实际土壤颗粒半径为名义半径的 0.95～1.05 倍，构建不同半径球形土壤颗粒的虚拟土槽，以实现与真实土壤相近的堆积效果[19,39-40]。此外，还有研究通过对不同深度土壤团聚体的形状进行分类，构建了核形、柱形、块形等不同形状的土壤颗粒仿真模型[4]。WANG 等[40]研究表明，适当减小土壤粒径能够降低深松作业阻力及土壤扰动面积等仿真结果与土槽试验的相对误差，但是耗时会相应增加，当颗粒直径从 5 mm 减小到 3 mm 时，仿真耗时增加 7 倍。因此，考虑到仿真效率，在基本满足误差要求的基础上，一般会适当选取较大土壤颗粒直径。UCGUL 等[41]研究发现，在 10 mm 半径土壤颗粒模型的土槽表面增加部分 1.5 mm 半径的土壤颗粒，能够获得更加真实的土壤流动性及更准确的土壤扰动轮廓，但是离散元仿真时间增加了一倍。此外，研究发现[42]，当对颗粒半径进行放大时，碰撞恢复系数、颗粒刚度等数值需要进行修正，以保证模型的准确性。

针对非粘性土壤模型，学者主要通过堆积角试验等方法标定了土壤颗粒之间的静摩擦因数、滚动摩擦因数和恢复系数；通过斜板滑动试验、斜板滚动试验、碰撞试验、摩擦因数仪等测定方法测定了土壤和材料间的恢复系数、滚动摩擦因数和静摩擦因数，然后利用分层施肥开沟、膜上覆土等田间试验进行了验证[26-28]；粘性土壤模型中除了上述接触参数外，还涉及到影响粘结力的相关参数。研究通过土槽试验以单把旋耕刀扭矩、沟宽、沟深等土壤扰动参数对土壤颗粒刚度、粘结键剪切应力进行了参数标定；通过堆积角等标定了 JKR 模型中的表面能，并通过开沟等试验验证了模型的准确性[13,14,29]；针对可压缩的 EEPA 模型，利用压板沉陷试验、直剪试验等标定了土壤间静摩擦因数、恢复系数、表面能、塑性变形比、动静摩擦因数、切向刚度系数等参数[17-18]；针对 MEPA 模型，对卸载刚度、粘附系数等参数进行了标定，并利用铲削试验进行了验证[34]。

多数研究采用各向同性土壤模型，模型参数处处一致，但实际土壤随着土壤区域、深度、位置变化，土壤种类、质地、含水率等有所差别，物理力学特性差异较大，模型参数也存在差异。王学振等[5]根据耕作层、犁底层、芯土层的土壤耕层结构，构建了一种三层复合土壤模型，分别标定了各层土壤颗粒间静摩擦因数、滚动摩擦因数及颗粒间粘聚能量密度，表征了各土层不同的物理力学参数。免耕地秸秆残茬多留在田间，根茬与土壤混杂在一起，改变了原有土壤的力学特性，ZHANG 等[7]构建了一种玉米根茬-土壤复合模型，并标定了土壤间静摩擦因数、滚动摩擦因数和恢复系数、土壤 JKR 表面能、土壤颗粒刚度和临界应力等参数。非免耕地作物生长过程根系与土壤混在一起构成复合体，其模型的构建对收获等过程研究也有重要意义。研究分别构建了甘草-土壤复合体和山药根-土壤复合体模型，并通过三点弯曲、压缩、剪切等试验对复合模型的单位面积刚度、临界应力、恢复系数、粘结半径等参数进行了标定[43-44]。

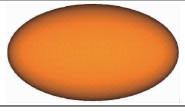
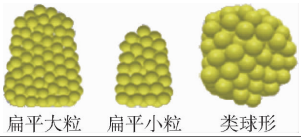
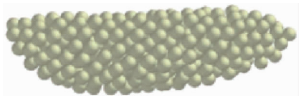
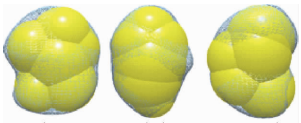
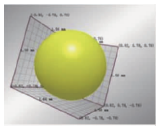
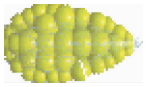
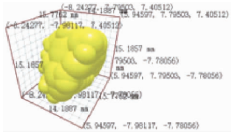
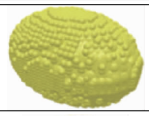
1.3　种子模型及参数标定

学者针对不同作物种子开展了一系列模型构建与参数标定工作，以开展排种、播种等农业装备作业过程的模拟仿真。油菜籽、黑胡椒等种子形状近似圆球形，有学者直接用球形颗粒进行了模型构建[45-46]。而对于其他形状不规则的种子，一是借助千分尺、游标卡尺等测量工具可直接测得种子模型的长、宽、高等三维尺寸；二是利用三维扫描仪或者 CT 扫描仪[47]，扫描后生成点云数据，再通过逆向工程重建出种子的三维模型。借助上述方法，学者构建出了小麦、玉米、水稻、大豆、马铃薯、胡麻籽粒、油茶籽、油橄榄、油莎豆等作物种子的三维模型[48-56]（表 3）。此外，同一种子也可能具有不同形状，如石林榕等[20]将马铃薯模型分为球形、椭球形和不规则 3 种，王云霞等[49]将玉米种子模型分为了扁平大粒、扁平小粒和类圆形 3 种，提高了仿真模型的准确性。

获取种子三维模型后，可通过手动方式将不同直径的圆球放置在不同坐标位置处，组合生成种子离散元模型，也可通过软件内置的自动填充功能，自动生成球体颗粒组合而成的三维模型。一般来说，颗粒数量越多，生成的形状越接近于种子的真实形状，但由于仿真过程需要用到大量种子模型，随着单个种子中颗粒数量的增加，会成倍增加总体颗粒数

表 3 离散元种子模型构建与参数标定

Tab. 3 DEM model establishment and parameter calibration of crop seeds

种子类型	3D 模型	标定方法	接触参数		本征参数
			种子间	种子材料间	
小麦[48]		自然堆料试验	静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数		泊松比、弹性模量
玉米[49]	 扁平大粒 扁平小粒 类球形	堆积角	静摩擦因数、滚动摩擦因数		
水稻[50]		堆积角	静摩擦因数、滚动摩擦因数		
大豆[51]		堆积角	静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数		泊松比、剪切模量
马铃薯[20]	 球形 椭球 不规则	压缩试验、斜面滑动试验、堆积角试验	静摩擦因数、滚动摩擦因数	静摩擦因数、滚动摩擦因数	泊松比、剪切模量
油菜[46,52]		压缩试验、斜面滑动试验、堆积角试验	静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数	静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数	泊松比、剪切模量、弹性模量
胡麻籽粒[53]		压缩试验、自由跌落试验、堆积角试验、斜面滑动试验	静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数	静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数	泊松比、弹性模量、剪切模量
油茶籽[54]		堆积角试验、碰撞试验、斜面滑动试验	静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数	静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数	
油橄榄[55]		压缩试验、旋转鼓试验	静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数		杨氏模量
油莎豆[56]		压缩试验、斜面滑动试验、碰撞试验、堆积角试验	静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数	静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数	泊松比、弹性模量、剪切模量

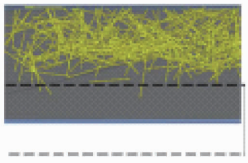
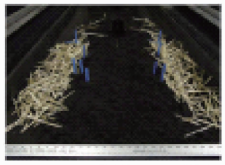
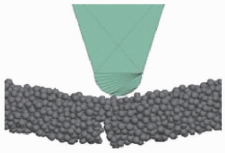
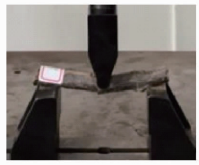
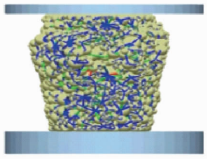
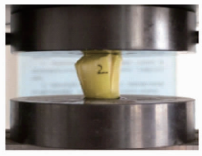
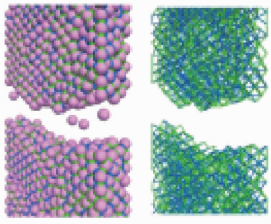
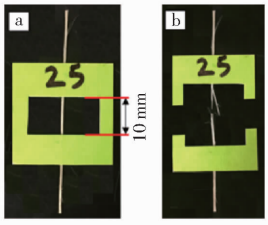
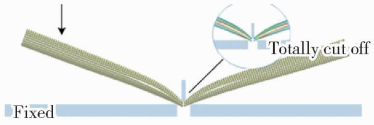
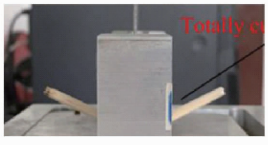
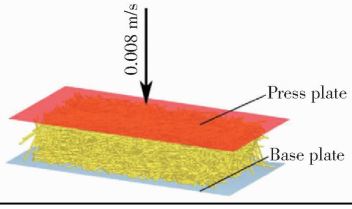
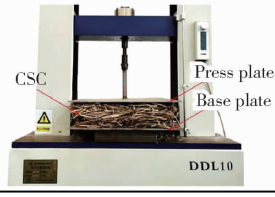
量进而增加仿真耗时。YAN 等[57]发现,自动填充方法相较于手动 8 球填充的玉米种子仿真精度更高,但仿真耗时大幅增加。LU 等[48]研究发现,采用一种椭球形颗粒模型仿真小麦种子,比颗粒填充法生成的模型在精度和效率上都更有优势。经颗粒填充形成种子模型后,学者利用堆积角试验、斜板滑动、碰撞等试验等对所构建模型开展了一系列参数标定工作,其主要包括颗粒的密度、泊松比、剪切模量,颗粒之间的动摩擦因数、静摩擦因数及碰撞恢复系数,颗粒和材料之间的动摩擦因数、静摩擦因数及碰撞恢复系数。上述接触模型及参数适用于单一、刚性物料,罗伟文等[22]为研究播后镇压过程,构建了一种小麦-土壤交互模型,并利用堆积角试验对小麦和土壤间摩擦因数等接触参数进行了标定。SU 等[58]为研究播种过程玉米种子破碎情况,构建了一种基于 Hertz - Mindlin with bonding 模型的玉米种子模型,并利用压缩破碎试验对玉米种子剪切模量、种子间恢复系数和临界应力进行了标定。

1.4 茎秆模型及参数标定

农作物茎秆、果树枝条离散元模型构建研究经历了从刚性到柔性可弯曲、可切断模型的发展历程(表 4)。通过颗粒组合的方式,ZENG 等[59]构建了一种类圆柱体刚性秸秆模型,并标定了秸秆和旋耕刀间的动、静摩擦因数及碰撞恢复系数,该刚性模型可以仿真秸秆移动、抛撒、翻转等运动过程,为采用离散元法开展作物茎秆细观运动学分析提供了参

表 4　农作物茎秆离散元模型

Tab.4　DEM models of crop straw

茎秆类型	离散元模型	真实物料	关键参数标定
刚性[59]			秸秆刚度、摩擦因数
弯曲[60]			粘结键有效模量、粘结强度、颗粒-钢材有效模量、法向切向刚度比
压缩[61]			法向刚度系数、切向刚度系数、临界法向应力、临界切向应力及粘结半径
拉伸[62]			拉伸强度、杨氏模量
剪切[63]			单位面积法向切向刚度、临界法向切向应力
整体压缩[64]			秸秆间滚动摩擦因数、表面能、抗拉强度

考。通过在两段秸秆之间添加铰接点的方法，LENAERTS 等[65]构建了一种可弯曲的柔性小麦秸秆模型，并标定了弹性模量等参数，通过三点弯曲试验验证了其可行性。基于离散元粘结模型，利用粘结键将相邻颗粒粘结在一起，调整粘结键的力学特性，不仅可以模拟茎秆的柔性弯曲行为，还可以模拟茎秆受到剪切、碰撞之后的断裂、破碎行为。学者通过三点弯曲试验、剪切试验、拉伸试验等建立了一系列柔性可切断的作物秸秆和果树枝条模型，如小麦秸秆、玉米秸秆、茶茎秆、饲料油菜茎秆、胡麻茎秆、三七茎秆、水稻秸秆、香蕉茎秆、新疆棉花秸秆、猕猴桃枝条模型，并对模型中临界切向应力、单位面积法向刚度、临界法向应力、粘结半径等影响粘结特性的参数进行了标定[61-63,65-73]。上述柔性可切断的茎秆模型组成颗粒数量较多，受限于计算机的计算能力，为减少仿真耗时，在旋耕、秸秆还田等颗粒数量比较大的场景应用仍较少，大多农业装备作业过程仿真仍采用刚性秸秆模型开展。ZHANG 等[64]对多根秸秆形成的草垛进行了压缩试验和模型构建，并对秸秆间滚动摩擦因数、表面能和张力幂指数等参数进行了标定，最后通过秸秆垛压缩试验验证了该模型的可靠性，拓展了离散元法使用的范围和边界。

1.5　肥料、饲料模型及其参数标定

肥料是农业生产过程重要的农业物料之一，包括无机肥和有机肥。无机肥较为干燥，颗粒之间几乎不存在粘结力，张宏建等[74]选择 Hertz－Mindlin 无滑动接触力学模型，用球形颗粒对控释肥颗粒进行了建模，利用堆积角等试验标定了肥料颗粒间接触参数及肥料颗粒与 PVC 间接触参数，并通过排肥试验验证了模型准确性；为研究肥料颗粒的破碎特性，都鑫等[75]基于 Hertz－Mindlin with bonding 模型构建了一种由多个球形颗粒粘结而成的肥料颗粒模

型,当受到较大外力作用时发生破碎,并对单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、临界切向应力和粘结半径进行了参数标定。有机肥含水率通常较高,肥料之间存在粘结现象,学者利用 Hertz - Mindlin with JKR 模型开展了猪粪、不同含水率的羊粪、纯牛粪发酵厩肥、蚯蚓粪基质等一系列离散元模型,并对肥料颗粒间滚动摩擦因数、静摩擦因数和表面能等参数进行了标定[76-79]。

彭飞等[80]利用 Hertz - Mindlin 无粘结模型,采用 27 球填充方法构建了一种饲料颗粒模型,并提出了一种注入截面法的休止角测定装置及方法,对滑动摩擦因数、碰撞恢复系数和滚动摩擦因数进行了标定。牛智有等[81]构建了一种柱状颗粒饲料多球模型,通过堆积角试验和单轴压缩破碎试验,对饲料间及饲料和软塑料(软 PVC)间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数,以及饲料颗粒粘结键的单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、临界法向应力、临界切向应力进行了标定,该模型可对饲料破碎行为进行仿真,为饲料输送破损机理研究提供了基础模型。

1.6 其他农业物料模型及其参数标定

覆膜种植在寒旱地区应用较多,为仿真覆膜、残膜捡拾等过程,GUO 等[82]基于 Yade 软件构建了一种柔性可变形的残膜离散元模型,对弹性模量、抗拉强度系数等进行了标定,并通过薄膜拉伸、撕裂试验验证了模型的可靠性;靳伟等[83]基于悬浮实验,构建了一种残膜离散元模型,可对其空气动力学特性进行 DEM - CFD 耦合仿真;申世龙等[84]进一步采用 Hertz - Mindlin with bonding 模型来模拟棉田残膜,并通过拉伸试验对单位面积法向刚度、临界法向应力和粘结半径等参数进行了标定,为残膜回收过程中拉伸、断裂行为仿真提供了参考。

2 离散元法在农业装备研究领域的应用

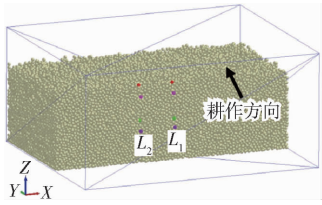
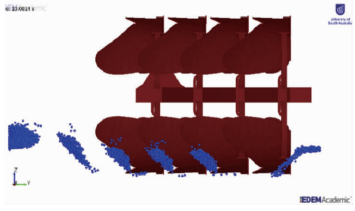
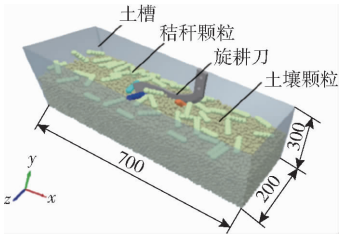
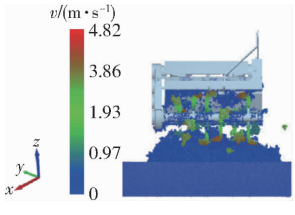
通过仿真揭示农业装备与农业物料互作关系是加快推进农业装备研发的重要途径之一。借助离散元法可以方便地开展农业装备作业过程仿真,并对作业指标进行实时、准确的监测。宏观上,阻力、扭矩及土壤的扰动面积、清秸率等作业性能指标均可通过离散元仿真软件进行统计分析;微观上,代表性位置的土壤、种子、肥料等颗粒的速度、加速度、受力、位移、轨迹及土壤颗粒间粘结键断裂等难以在田间试验中获取的参数,均可通过离散元法进行监测和分析,从而深入理解农业装备的作业机理,为机具创新设计和优化提供基础数据支撑。利用离散元法开展农业装备研究的过程中,学者一般首先借助离散元法寻求较优的工作参数及结构参数组合,然后对具有最优参数的机具进行试制加工,最后通过土槽、台架或田间试验对仿真结果进行验证。离散元仿真的应用大幅降低了农业装备的研发成本,缩短了研发周期,提高了装备研发质量与效率。

2.1 耕整地环节离散元仿真

耕整地环节包括深松、旋耕、翻耕等作业,主要涉及土壤、秸秆与农机具的相互作用,表 5 总结了典型耕整地机械作业过程离散元仿真应用实例,并给出了具体应用案例。

表 5 耕整地机械典型离散元仿真应用实例

Tab.5 Typical DEM simulation examples in soil preparation process

机械类型	仿真模型	离散元应用
深松机		测定深松后不同深度、不同位置土壤最大位移的变化规律,探究深松铲翼铲安装高度对标记的代表性土壤颗粒的临界运动状态的影响[5]
铧式犁		将土壤模型按深度分层,测定作业后土壤在不同层的分布情况,探究铧式犁对表层土壤的翻埋效果[85]
旋耕机		通过标记代表性位置秸秆并导出其在旋耕刀的不同转速下的水平方向及侧向位移,分析旋耕刀转速对秸秆分布均匀性的影响规律[86]
		通过离散元软件内置功能,统计旋耕机上所黏附的土壤质量作为减黏设计指标,对刀轴转速、切土节距、耕作深度进行优化设计[87]

2.1.1 深松

深松作业的目的在于打破犁底层,提高土壤的蓄水保墒效果。通过离散元仿真,可监测深松作业阻力及土壤扰动情况,为深松作业机理探索和深松铲减阻设计提供数据支撑。通过构建的耕作层、犁

底层和芯土层复合土壤离散元仿真模型，王学振等[5]分析了深松铲翼铲安装高度对不同深度、不同位置土壤的三向临界运动状态的影响，郑侃等[88]针对性设计了三段式深松铲破土刃，对滑切角进行了高效减阻优化，并对比分析了优化的破土刃深松铲与传统圆弧形深松铲对各层土壤混合程度的影响。袁军等[89]通过 DEM－MBD 耦合，实现了振动深松过程的仿真，得到了弹簧和牵引力的动力学响应，为振动深松机理分析提供了参考。

2.1.2　翻耕

翻耕作业的目的是松碎土壤，并且将表层土壤和秸秆杂草埋入深层，离散元法的使用为定量分析杂草种子等翻埋效果及各层土壤混合程度提供了便利。UCGUL 等[85,90－92]基于构建的多层土壤模型，通过统计表层土壤颗粒作业后移动到下层的数量，定量分析了铧式犁翻耕过程各层土壤混合程度，并测量了不同耕作深度和速度及犁体宽度时犁耕后土壤扰动轮廓，为铧式犁作业效果改善提供了依据；LI 等[18]针对湿黏土壤，分析了作业速度和深度对翻耕阻力和土壤扰动的影响；HADI 等[93]通过离散元法统计草种埋入土壤中的比例，对铧式犁切土角、作业速度等参数进行了优化设计。

2.1.3　旋耕

旋耕的目的是松碎土壤，平整地表，将地表秸秆残茬混入耕层土壤。离散元法可以监测旋耕过程土壤、秸秆扰动及作业扭矩阻力，为旋耕作业减阻增效设计提供支撑。方会敏等[94]对单把旋耕刀作业过程进行了一系列离散元仿真研究，分析了单把旋耕刀的扭矩、受力，结果表明离散元记录的作业过程扭矩受力曲线变化趋势与实际试验相一致；通过标记单个颗粒和秸秆，分析了旋耕刀对土壤、秸秆在空间各向的扰动，并利用土壤示踪块和土槽旋耕装置验证了仿真的准确性[86]；何瑞银等[95]对多组旋耕作业过程进行仿真，得到了不同工作参数下旋耕后秸秆空间分布质量。

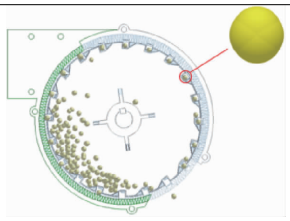
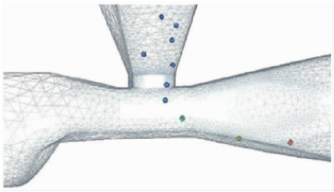
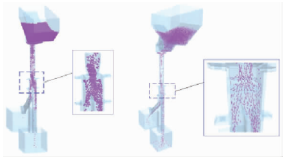
减阻、减粘是利用离散元方法开展旋耕机具设计的重要方向，减阻研究方面：郑侃等[88]通过对振动切土过程进行仿真，发现了增加振动源可以减小作业阻力和能耗；YANG 等[96]利用 DEM－FEM 耦合仿真，探究 3 种类型旋耕刀的刀齿结构参数对甘蔗根茬土壤复合体临界切削速度及最大切削力的影响；CHENG 等[97]将典型旋耕刀分为刀身等部分，通过仿真得到了不同部位摩擦力。减黏设计方面：借助构建的黏附模型，通过把土壤粘附量作为指标，刘国阳等[87]、CHENG 等[98]分别设计了不同形式的减粘旋耕刀辊。

2.2　播种环节离散元仿真

播种环节涉及排种、排肥、覆土、镇压等多个环节，排种、排肥和镇压过程离散元仿真的典型应用案例如表 6 所示。

表 6　播种机具典型离散元仿真实例

Tab. 6　Typical DEM simulation examples in seeding process

机械类型	仿真模型	应用场景
排种		通过离散元仿真机械式高速精量大豆排种器作业过程，对排种器梯度喂入控种结构进行了优化设计[99]
		DEM－CFD 气固耦合仿真气力式排种过程，观测不同参数下种子运动情况，分析了不同增压管结构下的种子分布均匀度和分配均匀性[100－101]
排肥		仿真获取了分层施肥中肥料从肥箱到排肥口的颗粒分布及速度矢量图，分析了直径对肥料颗粒散乱状态和拥堵情况的影响[102]
镇压		通过记录镇压后种子的位移及种子上方土壤厚度，得到了镇压对种子位移、覆土厚度的影响[103]

2.2.1　排种

借助离散元仿真，不同工作及结构参数下排种过程种子的运动情况、漏播、重播及合格率等指标可得到准确记录，为排种装置的设计提供依据。CHEN 等[99]针对一种机械式大豆高速精量排种器充种清种过程进行了仿真，对所设计排种器梯度喂入控种结构进行了改进；任定林等[104]分析了玉米大豆兼用组合孔式排种盘种群定向运移平均速度和拖拽充种角，优化设计了该排种器的前进速度、工作负压；张春岭等[105]设计了一种交错凸齿式宽苗带小麦精量排种器，借助离散元分析了凸齿角、凸齿高、作业速度及其交互作用对排量一致性、排种均匀性的影响，并得到了最优参数组合；鹿芳媛等[106]分析了振动匀种装置中，振频和振幅对杂交稻种群匀种情况的影响；高位投种时种子落地后会产生弹跳

位移,颜丙新等[107]利用离散元分析了播种作业速度、粒距和投种角对着床位置的影响,为投种相关装置的优化设计提供了依据。

气力式排种装置是实现高速排种作业的有效载体,雷小龙等[100-101]通过 DEM-CFD 气固耦合方法对排种排肥过程进行了仿真,种子肥料模型通过离散元构建,而气流则通过 CFD 软件仿真,研究了气流速度等工作和结构参数对流场、种子运动、排种性能的影响,并分析了不同增压管结构下种子分布均匀度和分配均匀性。XU 等[108]通过 DEM-CFD 对一种蔬菜气吸排种器排种过程进行了耦合仿真,分析了种子速度和拖拽力之间的关系,并设计了取种勺厚度等关键结构参数。

2.2.2 排肥

排肥过程与排种类似,由于肥料颗粒数量庞大,离散元法的应用聚焦于施肥分层效果、肥料空间分布情况等指标。王守江等[102]模拟了分层施肥过程,通过离散元仿真得到了不同层肥料分布数量,为分层施肥装置创新设计提供了参考;苑进等[109]对配比变量排肥过程进行了仿真,得到了不同排肥转速下肥料掺混均匀度,为大量颗粒肥料排肥效果定量统计分析提供了参考;陈桂斌等[110]以肥料颗粒质量变化、螺旋桨叶扭矩、有机肥颗粒受力和平均运动速度为指标对固体有机肥条施机桨叶的运肥和碎肥过程进行分析,明确了机具结构变化对肥料运动的影响并优化设计了相关参数;刘彩玲等[111]对离心甩盘式排肥装置作业过程进行了仿真,得到了作业后种子肥料空间分布特征,为装置作业质量评价方法构建提供了参考;基于流固耦合,温翔宇等[112]测定了肥料颗粒悬浮速度,并采用 Lagrangian 模型对肥料悬浮过程进行了数值模拟,为肥料颗粒空气动力学分析提供了支撑;刘正道等[113]借助 DEM-CFD 耦合分析了不同投肥路径气流作用下肥料清肥率和成团性能,为投肥路径选取提供了依据。

2.2.3 镇压

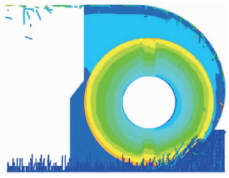
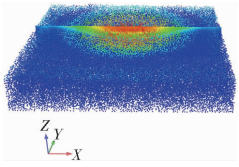
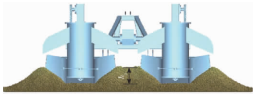
镇压过程不仅涉及到土壤、机具之间的接触,还影响种子覆土厚度,离散元法通过统计接触键数量和应力,可定量分析农机具与土壤及土壤与种子的接触情况。杨波等[114]对播种镇压过程进行了仿真,得出了作业速度等对镇压后地表平整度的影响;赵亚君[115]利用 DEM-FEM 耦合,对农机轮胎镇压过程进行了仿真,得出了载荷、速度、胎压、通过次数对土壤压实和轮胎沉陷作用的影响,并开展了试验验证;学者分别通过离散元仿真得出了镇压轮配重、镇压次数、前进速度等对镇压轮下陷量和土壤应力等压实指标的影响[116-118]。ZHOU 等[118]通过种子-土壤之间接触键数量,定量研究了播种后种子和土壤的接触情况,为评价镇压效果提供了新的视角。SUN 等[103]则利用 DEM-MBD 耦合仿真分析了镇压对入土后玉米种子位移的影响,为提高播种深度一致性提供了支撑。

2.3 田间管理环节离散元仿真

田间管理包含中耕、除草、培土、秸秆还田等作业,除了土壤秸秆与机具的相互作用外,秸秆粉碎及分布情况也可通过离散元仿真得出。典型田间管理环节农机具离散元仿真案例如表 7 所示。

表 7 田间管理机具离散元仿真实例

Tab.7 Typical DEM simulation examples in field management process

机械类型	仿真模型	应用场景
秸秆粉碎还田		统计秸秆粉碎长度和抛撒质量作为指标,分析了机具内流场分布和秸秆运动状态,分析了刀轴转速、进气口间隙、粉碎起始角对粉碎抛撒效果的影响[119]
除草		通过传热模型分析得出火焰喷头距离地面高度与土壤传热影响范围和传热半径的关系,并设计了除草装置火焰喷头的高度和排列间距[120]
甘蔗中耕培土		采用离散元测量工具测量横截面中培土高度,通过扭矩计算得到作业功耗,综合评价机具作业效果[121]

LI 等[119]借助 DEM-CFD 耦合,分析了秸秆粉碎还田装置粉碎效果以及粉碎刀产生的流场对秸秆粉碎长度和抛撒质量的影响,并对刀轴转速、进气口间隙、粉碎起始角进行了优化设计;赵庆富[120]利用 CFD-DEM 耦合,建立了非预混燃烧模型和土壤多孔介质传热模型,仿真结果表明火焰喷头距离地面高度与土壤传热影响范围和传热半径呈线性关系,在此基础上设计了除草机火焰喷头的高度和排列间距等关键结构参数;武涛等[121]采用离散元测量工具,测量了甘蔗中耕作业时土壤横截面中的培土高度,结合作业功耗对所设计甘蔗中耕培土装置作业性能进行了评价,对旋耕深度、螺旋输送器转速开展了优化设计。

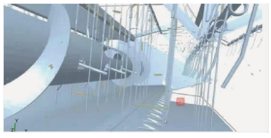
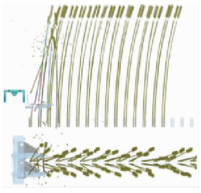
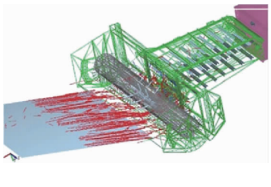
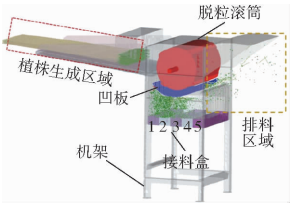
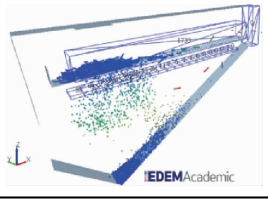
2.4 收获环节离散元仿真

谷物联合收获技术密集、结构复杂,是农业机械

化作业最重要、最典型的生产环节之一。如表 8 所示，应用离散元及与其他方法的耦合，学者完成了对小麦联合收获机拨禾、茎秆切割、输送、脱粒、清选全过程模拟仿真[122-125]，并通过仿真分析了拨禾轮弹齿的受力与变形程度，设计了弹齿的材料、长度和转速；以切割阻力、漏割率为指标，优化设计了割刀切割速度、切割速比和滑切角；以输送时间为指标，优化设计了喂入量、脱粒滚筒转速、螺旋输送器转速、倾斜输送器主动轴转速；分析了脱粒过程辊筒转速和脱粒间隙对含杂率和谷物破损率的影响规律，联合收获清选过程入口风速对清选损失等的影响。此外，为了提高谷物流量的测量精度，邱白晶等[126]模拟了谷物籽粒流与承载板冲击过程，分析了谷物质量与平均法向冲击力变化规律，可为谷物流量测量装置的开发提供技术支持。

表 8　收获过程典型离散元仿真实例

Tab. 8　Typical DEM simulation examples in crop harvesting process

机械类型	仿真模型	应用场景
拨禾		通过离散元对拨禾过程仿真，统计拨禾过程小麦落粒损失作为指标，得出对小麦植株造成的击打损失最小的拨禾轮转速和弹齿长度[122]
茎秆切割		利用基于 DEM－MBD 的小麦植株切割过程的联合仿真，利用正交试验对结构参数及工作参数进行优化，得到最大切割速度、切割速比及滑切角[123]
输送		分析了小麦在连续输送过程中的迁移规律、轴向速度和局部物料质量流率变化情况，分析了喂入量等作业参数对物料输送时间的影响[124]
脱粒		对籽粒和杂质的质量分布情况进行统计，最终可得到辊筒转速、脱粒间隙对试验指标（籽粒损失率、含杂率）的影响规律[123]
清选		利用 DEM－CFD 耦合仿真，分析了清选过程入口风速对短茎秆速度、物料厚度、和清选损失的影响[125]

梅志勇[127]利用 DEM－MBD 耦合对玉米摘穗过程进行了仿真，并分析了籽粒损伤规律；于亚军等[128]、FANG 等[129]均对玉米脱粒过程进行了仿真，利用离散元软件导出平均法向接触力等数据，分析了工作参数对脱粒质量的影响并进行了参数优化。张鑫等[130]对鲜食玉米秸秆联合收获粉碎过程进行了离散元仿真，得到了不同转速下的粉碎情况，并对粉碎刀进行了优化改进。基于机器学习技术，ARIFUZZAMAN 等[131]建立了一种 AI 分类模型，可对振动筛分过程影响堵塞的谷物尺寸、喂入量等多个指标进行综合分析，提高研究效率。

2.5　农产品加工、贮藏环节离散元仿真

谷物收获后，将经历运输、农产品加工、贮藏等环节，利用离散元仿真可对谷物筒仓压力分布、加工过程热量传递等情况开展离散元仿真，为农产品加工工艺及装备优化提供参考。李尚平等[132]分析了自走式甘蔗转运车卸料过程车厢质心偏移摆动情况，对比了两种车厢结构的稳定性。GHODKI 等[133]通过 DEM－CFD 耦合，利用离散元传热模型 Hertz－Mindlin with conduction contact model 模拟了低温碾磨时黑胡椒的传热过程，明确了碾磨过程碾磨机不同位置黑胡椒温度分布，为碾磨工艺和装备优化提供了参考。AMJAD 等[134]通过 DEM－CFD 耦合，对横流式谷物干燥机中 3 种不同谷物翻转器设计进行模拟，统计物料的含水量和温度，探究了结构改良对谷物干燥均匀性的影响，为干燥装置设计提供了参考。

3　发展趋势展望

近年来，国内外在农业物料离散元仿真模型构建、离散元参数高效标定方法及农业生产过程的离散元仿真等方面取得了诸多成果，为农业装备与农业物料互作关系研究及关键零部件优化设计提供了新途径。然而，从离散元法在农业装备领域应用的发展现状可知，尚存在离散元参数标定效率低和通用性差、离散元法基础理论有待突破、仿真效率低、多相耦合仿真应用少等问题，离散元法的应用潜力仍有待进一步开发。

（1）提高离散元模型精度和通用性

目前，国内外开展了一系列土壤等农业物料模型构建和参数标定的研究，但是离散元参数标定存在效率低、通用性差等问题，模型精度也有待进一步提高。探索多试验组合标定技术及人工智能技术等在离散元参数标定研究中的应用，将简化参数标定流程、提高参数标定效率，提升农业装备作业过程仿真的准确性。通用性参数标定方法的缺乏，限制了

离散元模型在不同软件中的跨平台通用性[10]。现有文献中,几乎每个模型均通过参数标定匹配了不同的物料参数,往往每个模型只针对单一作业过程构建,当作业对象有所变化,如用于深松仿真的模型进行旋耕作业时,其与真实试验的误差就可能成倍放大。通用性模型的缺乏增加了研究者利用离散元法开展研究的工作量,未来适用于不同作业过程、不同研究对象的通用离散元模型及参数的研究将是一个重要的发展方向。

(2)加强离散元法基础理论和本征模型研究

尽管国内外学者利用离散元软件内置的接触模型,针对农业物料之间及农业物料与装备间的弹性、黏性、塑性、摩擦、粘附等行为开展了一系列模拟仿真,但由于基础理论和本征模型的限制,其使用仍然存在一定的局限[135]。首先,现有土壤、种子等农业物料模型多采用各向同性模型进行构建,因此仿真中同一个模型展现出的物理力学特性也处处相同。然而实际农业物料如种子、秸秆等,不同部位生物学组成及力学特性均存在差异,同一块农田不同位置、不同深度处土壤力学特性也不尽相同。尽管当前涌现了多层土壤、根土复合体等复杂离散元模型构建的研究,但各向异性农业物料的精细化建模研究还相对较少。此外,实际农田土壤和水分、气体等彼此融合在一起,形成土壤-水分、土壤-气体等耦合体,受水分、气体含量等影响,这类耦合体物理力学特性极为复杂,现有模型无法准确反映其弹塑性、流动性等的变化及动力学行为表征。这类复杂农业物料的离散元模型构建有赖于加强离散元基础理论和本征模型研究。

(3)提高离散元法仿真效率

离散元仿真耗时和对计算机性能的要求仍然是限制其使用的一个重要因素。为了对农业生产的复杂过程进行仿真,往往需要构建颗粒数量庞大的模型,如对旋耕机整机开展仿真,采用毫米级颗粒构建土壤模型需要数百万个土壤颗粒,耗时往往较长且对计算机性能要求较高。其次,植物茎秆、果蔬等离散元模型,由于组成单个模型的颗粒数量较大,为减少仿真耗时,仿真中通常只采用单个或数量较少的模型,导致秸秆粉碎、果实收获等过程大量应用所构建模型开展作业过程的仿真研究较少,限制了离散元法的应用。解决这一问题有赖于对离散元方法基础理论的改进以及计算机技术和硬件性能的提升。

(4)拓展离散元法与其他方法耦合应用

实际农业生产过程较为复杂,除了农业物料和机具外,还涉及到水、热、气等众多元素。离散元法适用于非连续介质的耦合,对水分、气流、温度等连续介质的仿真存在短板,离散元法与其他方法的耦合研究弥补了这一不足,为对这些农业生产复杂过程仿真提供了新的思路。当前 CFD - DEM 耦合、DEM - MBD 耦合已在气力式排种器、多体动力学仿真方面展现出了强大的优势,应用离散元及其与其他方法耦合进一步对水分蒸发迁移、热量传导、农机具复杂运动机理、农机部件部位摩擦磨损等开展研究,将有助于拓展离散元在农业装备研发应用中的广度和深度。

参 考 文 献

[1] ZHANG S L, HUANG Y X, GAO X J, et al. Evaluating the influence of straight-plain types of rotary tiller blades with various edge curves on maize residue using DEM[J]. Biosystems Engineering, 2025,250:49 - 61.

[2] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDER C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015,129:298 - 306.

[3] 王法安, 倪畅, 张兆国, 等. 基于穿山甲前足的三七仿生挖掘铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(增刊 2):10 - 19.
WANG Faan, NI Chang, ZHANG Zhaoguo, et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* bionic digging shovel based on front foot of pangolin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(Supp. 2):10 - 19. (in Chinese)

[4] HANG C, YAO Y, HUANG Y, et al. High-speed photographic analysis of the soil disturbance affected by subsoiler rake angle [J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2017,19:42 - 50.

[5] 王学振, 岳斌, 高喜杰, 等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018,49(10): 124 - 136.
WANG Xuezheng, YUE Bin, GAO Xijie, et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 124 - 136. (in Chinese)

[6] 谢伟, 彭磊, 蒋蘋, 等. 收获期油菜薹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 Pin, et al. Discrete element model building and optimization 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)

[7] ZHANG S, ZHAO H, WANG X. et al. Discrete element modeling and shear properties of the maize stubble-soil complex[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204:107519.

[8] UCGUL M, SAUNDERS C, FIELKE J M. Discrete element modelling of top soil burial using a full scale mouldboard plough under field condition[J]. Biosystems Engineering, 2017,160:140 – 153.

[9] ZHAO H B, HUANG Y X, LIU Z D, et al. Applications of discrete element method in the research of agricultural machinery: a review[J]. Agriculture, 2021, 11:425.

[10] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 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 Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. 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] MAK J, CHEN Y, SADEK M A. Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. Soil Tillage Research, 2012,118:117 – 122.

[12] 王东伟, 路通, 赵壮, 等. 滨海盐碱地耕作层土壤离散元仿真参数标定方法[J].农业机械学报, 2024,55(11):240 – 249.
WANG Dongwei, LU Tong, ZHAO Zhuang, et al. Calibration of discrete element simulation parameters for cultivated soil layer in coastal saline alkali soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 240 – 249. (in Chinese)

[13] 张彪, 杨鑫三, 王京云, 等. 基于甘蔗耕地黏土离散元参数标定的流变模型构建[J]. 农业工程学报, 2024,40(13): 36 – 44.
ZHANG Biao, YANG Xinsan, WANG Jingyun, et al. Construction of a rheological model based on discrete element parameters calibration of clay from sugarcane cultivated land[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(13): 36 – 44. (in Chinese)

[14] 韩佃雷, 胡锦瑞, 刘海瑞, 等. 含水沙土颗粒离散元接触模型参数标定及试验[J]. 农业工程学报, 2025,41(8):70 – 78.
HAN Dianlei, HU Jinrui, LIU Hairui, et al. Parameter calibration and experiment of the discrete element contact model of water containing sandy soil particles[J]. Transactions of the CSAE, 2025,41(8):70 – 78. (in Chinese)

[15] 刘文政, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2018,49(5):125 – 135,142.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):125 – 135,142. (in Chinese)

[16] 周华, 车海龙, 耿端阳, 等. 玉米田耕层典型土壤离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报, 2023,54(11):49 – 60,113.
ZHOU Hua, CHE Hailong, GENG Duanyang, et al. Discrete element modeling and parameter calibration of typical soil in maize field tillage layer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(11):49 – 60,113. (in Chinese)

[17] 王宪良, 钟晓康, 耿元乐, 等. 基于离散元非线性弹塑性接触模型的免耕土壤参数标定[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23):100 – 107.
WANG Xianliang, ZHONG Xiaokang, GENG Yuanle, et al. Construction and parameter calibration of the nonlinear elastoplastic discrete element model for no-tillage soil compaction[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(23):100 – 107. (in Chinese)

[18] LI X, LUO Z T, HAO Z H, et al. Investigation on tillage resistance and soil disturbance in wet adhesive soil using discrete element method with three-layer soil-plough coupling model[J]. Powder Technology, 2024, 436:119463.

[19] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121:105 – 117.

[20] 石林榕, 孙伟, 赵武云, 等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J]. 农业工程学报, 2018,34(6): 35 – 42.
SHI Linrong, SUN Wei, ZHAO Wuyun, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(6):35 – 42. (in Chinese)

[21] 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)

[22] 罗伟文, 申海洋, 顾满, 等. 湿黏地播后镇压过程土壤-小麦交互模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2024,55(增刊 1):147 – 155.
LUO Weiwen, SHEN Haiyang, GU Man, et al. Parameter calibration of discrete element model for wet clay soil wheat mixture for simulating compaction process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(Supp. 1): 147 – 155. (in Chinese)

[23] HAMZAH M B A, OMAR S B A. A review on the angle of repose of granular materials[J]. Powder Technology, 2018(330): 397 – 417.

[24] WU Z Y, LI H W, LU C Y, et al. Development and evaluations of an approach with full utilization of point cloud for measuring the angle of repose[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023,209:107799.

[25] BEHROOZ J, MOHAMMADREZA E, FARHAD E, et al. Calibration of DEM input parameters for simulation of the cohesive materials: comparison of response surface method and machine learning models[J]. Particuology, 2025,100: 214 - 231.

[26] 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)

[27] 戴飞, 宋学锋, 赵武云, 等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J]. 农业机械学报, 2019,50(2):49 - 56,77.
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 49 - 56,77. (in Chinese)

[28] 宋少龙, 汤智辉, 郑炫, 等. 新疆棉田耕后土壤模型离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2021,37(20):63 - 70.
SONG Shaolong, TANG Zhihui, ZHENG Xuan, et al. Calibration of the discrete element parameters for the soil model of cotton field after plowing in Xinjiang of China[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(20):63 - 70. (in Chinese)

[29] 孙鹏, 高峰, 李雯, 等. 圆锥贯入过程的离散元仿真[J]. 农业机械学报, 2009,40(1):184 - 188,226.
SUN Peng, GAO Feng, LI Wen, et al. Discrete element simulation of cone penetration process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(1):184 - 188,226. (in Chinese)

[30] 李俊伟, 佟金, 胡斌, 等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6):130 - 140.
LI Junwei, TONG Jin, HU Bin, et al. Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil-engaging component in northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 130 - 140. (in Chinese)

[31] 邢洁洁, 张锐, 吴鹏, 等. 海南热区砖红壤颗粒离散元仿真模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2020,36(5):158 - 166.
XING Jiejie, ZHANG Rui, WU Peng, et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for latosol particles in hot areas of Hainan Province[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(5):158 - 166. (in Chinese)

[32] 丁启朔, 任骏, BELAL E A, 等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报, 2017,48(3):38 - 48.
DING Qishuo, REN Jun, BELAL E A, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 38 - 48. (in Chinese)

[33] LI B, CHEN Y, CHEN J. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM)[J]. Soil & Tillage Research, 2016,158:177 - 185.

[34] ZHAO H B, HE J, LI H W. et al. Comparison on soil, straw disturbance and resistance of conventional and plain-straight blade for strip-tillage with discrete element method[J]. Int. Agric. Eng. J., 2018, 27: 229 - 240.

[35] 梁喜凤, 胡泽, 郑立文, 等. 滩涂土壤离散元接触模型优化与现场铲削试验[J]. 农业工程学报, 2024,40(8):107 - 115.
LIANG Xifeng, HU Ze, ZHENG Liwen, et al. Optimization of the discrete element contact model for tidal flat soil and field shoveling experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(8): 107 - 115. (in Chinese)

[36] 石林榕, 赵武云, 孙伟. 基于离散元的西北旱区农田土壤颗粒接触模型和参数标定[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21):181 - 187.
SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei. Parameter calibration of soil particles contact model of farmland soil in northwest arid region based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 181 - 187. (in Chinese)

[37] THAKUR S C, MORRISSEY J P, SUN J, et al. Micromechanical analysis of cohesive granular materials using the discrete element method with an adhesive elasto-plastic contact model[J]. Granular Matter, 2014,16(3):383 - 400.

[38] CHENG J, ZHENG K, XIA J F, et al. Analysis of adhesion between wet clay soil and rotary tillage part in paddy field based on discrete element method[J]. Processes, 2021,9:845.

[39] YANG Y W, LI M, TONG J, et al. Study on the interaction between soil and the five-claw combination of a mole using the discrete element method[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2018,8:1 - 10.

[40] WANG X Z, ZHANG S, PAN H B, et al. Effect of soil particle size on soil-subsoiler interactions using the discrete element method simulations[J]. Biosystems Engineering, 2019,182:138 - 150.

[41] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. 3D DEM tillage simulation: validation of a hysteretic spring (plastic) contact model for a sweep tool operating in a cohesionless soil[J]. Soil and Tillage Research, 2014,144: 220 - 227.

[42] THAKUR S, AHMADIAN H, SUN J, et al. Scaling of discrete element model parameters in uniaxial test simulation[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Discrete Element Methods, Golden, CO, USA, 2013: 457 - 462.

[43] WAN L P, LI Y L, SONG J Y, et al. Modelling and verification of the liquorice-soil composite based on pulling test[J]. Biosystems Engineering, 2024,247:63 - 76.

[44] LIU Y, ZHAO J, YIN B, et al. Discrete element modelling of the yam root-soil complex and its verification[J]. Biosystems Engineering, 2022, 220: 55 - 72.

[45] GHODKI B M, KUMAR K C, GOSWAMI T K. Modeling breakage and motion of black pepper seeds in cryogenic mill[J]. Adv. Powder Technol., 2018, 29:1055 - 1071.

[46] XU L Z, WEI C C, LIANG Z W, et al. Development of rapeseed cleaning loss monitoring system and experiments in a

combine harvester[J]. Biosystems Engineering,2019,178:118 – 130.

[47] 苏微, 赵庆辉, 赖庆辉, 等. 辅助充种带气吸式蚕豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(7):144 – 155.
SU Wei, ZHAO Qinghui, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of air-suction broad bean seed metering device with flat belt auxiliary seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(7):144 – 155. (in Chinese)

[48] LU C Y, GAO Z, LI H W, et al, An ellipsoid modelling method for discrete element simulation of wheat seeds[J]. Biosystems Engineering, 2023, 226: 1 – 15.

[49] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016,32(22): 36 – 42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(22):36 – 42. (in Chinese)

[50] 张荣芳, 焦伟, 周纪磊, 等.不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020,51(增刊 1): 227 – 235.
ZHANG Rongfang, JIAO Wei, ZHOU Jilei, et al. Parameter calibration and experiment of rice seeds discrete element model with different filling particle radius[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp. 1): 227 – 235. (in Chinese)

[51] CUNHA R N, SANTOS K G, LIMA R N, et al. Repose angle of monoparticles and binary mixture: an experimental and simulation study[J]. Powder Technology, 2016,303:203 – 211.

[52] 王宝山. 小粒径种子兼用精量穴播集排系统设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
WANG Baoshan. Design and experiment of precision hill-seeding centralized metering system for small particle size seeds[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[53] 石林榕,马周泰,赵武云,等.胡麻籽粒离散元仿真参数标定与排种试验验证[J].农业工程学报, 2019,35(20):25 – 33.
SHI Linrong, MA Zhoutai, ZHAO Wuyun, et al. Calibration of simulation parameters of flaxed seeds using discrete element method and verification of seed-metering test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20), 25 – 33. (in Chinese)

[54] 丁辛亭, 李凯, 郝伟, 等. 基于 RSM 和 GA – BP – GA 优化的油茶籽仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2023,54(2): 139 – 150.
DING Xinting, LI Kai, HAO Wei, et al. Calibration of simulation parameters of *Camellia oleifera* seeds based on RSM and GA – BP – GA optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(2):139 – 150. (in Chinese)

[55] 徐天月, 于涵, 黄东岩, 等. 基于离散元法的油橄榄果实建模及杨氏模量参数灵敏度的分析[J]. 农业工程学报, 2025,41(9):175 – 182.
XU Tianyue, YU Han, HUANG Dongyan, et al. Modeling of olive fruit based on discrete element method and analysis of the sensitivity of Young's modulus parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2025,41(9):175 – 182. (in Chinese)

[56] 陈永, 高晓勋, 金鑫, 等. 油莎豆排种离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(12):58 – 69.
CHEN Yong, GAO Xiaoxun, JIN Xin, et al. Calibration and analysis of seeding parameters of *Cyperus esculentus* seeds based on discrete element simulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(12):58 – 69. (in Chinese)

[57] YAN H, LONG D. 3D scanner-based corn seed modeling[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2016,32(2):181 – 188.

[58] SU Y, XU Y, CUI T, et al. Determination and interpretation of bonded particle model parameters for simulation of maize kernels[J]. Biosystems Engineering, 2021,210:193 – 205.

[59] 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.

[60] ZHAO H B, ZHENG Z Q, TAN R H, et al. Modeling shearing and bending behavior of kiwifruit branches using the discrete element method[J]. Appl. Sci., 2024, 14:10920.

[61] 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)

[62] VAHID S, YING C. Simulation of tensile behavior of plant fibers using the discrete element method (DEM)[J]. Composites Part A, 2018,114:196 – 203.

[63] SHI Y Y, JIANG Y, WANG X C, et al. A mechanical model of single wheat straw with failure characteristics based on discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2023,230:1 – 15.

[64] ZHANG Z Y, MEI F W, XIAO P J. Discrete element modelling and simulation parameters calibration for the compacted straw cube[J]. Biosystems Engineering, 2023,230:301 – 312.

[65] LENAERTS B, AERTSEN T, TIJSKENS E, et al. Simulation of grain-straw separation by a discrete element approach with bendable straw particles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014,101:24 – 33.

[66] ZHENG Z Q, ZHAO H B, LIU P, et al. Maize straw cutting process modelling and parameter calibration based on discrete

element method (DEM)[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2021,63(1):461 – 468.
[67] 杜哲, 李邓辉, 李心平, 等. 茶茎秆离散元模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2025,56(1):311 – 320.
DU Zhe, LI Denghui, LI Xinping, et al. Calibration and experiment of discrete element model parameters for tea stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(1):311 – 320. (in Chinese)
[68] 郭辉, 郭烈红, 李海峰, 等. 适收期油菜茎秆离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2024,40(24):20 – 29.
GUO Hui, GUO Liehong, LI Haifeng, et al. Calibration and experiment of the discrete element simulation parameters for rapeseed stems during the suitable harvest period[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(24): 20 – 29. (in Chinese)
[69] 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)
[70] 张兆国,徐红伟,薛浩田,等.三七茎秆离散元参数标定与试验[J].农业机械学报,2023,54(11):61 – 70,91.
ZHANG Zhaoguo, XU Hongwei, XUE Haotian, et al. Calibration and experiment of discrete element parameters of *Panax notoginseng* stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 61 – 70,91. (in Chinese)
[71] 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)
[72] 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)
[73] 张佳喜, 张彭, 张虎, 等. 新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2024,55(1):76 – 84,108.
ZHANG Jiaxi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 76 – 84,108. (in Chinese)
[74] 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)
[75] 都鑫, 刘彩玲, 姜萌, 等. 基于离散元的包膜肥料 Bonding 模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2022,53(7):141 – 149.
DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Calibration of Bonding model parameters for coated fertilizers based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 141 – 149. (in Chinese)
[76] 彭才望, 许道军, 贺喜, 等. 黑水虻处理的猪粪有机肥离散元仿真模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2020,36(17): 212 – 218.
PENG Caiwang, XU Daojun, HE Xi, et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for pig manure organic fertilizer treated with *Hermetia illucen*[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(17):212 – 218. (in Chinese)
[77] 朱新华, 伏胜康, 李旭东, 等. 不同含水率羊粪离散元参数通用标定方法研究[J].农业机械学报, 2022,53(8):34 – 41.
ZHU Xinhua, FU Shengkang, LI Xudong, et al. General method for discrete element parameters calibration of goat manure with different moisture contents[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 34 – 41. (in Chinese)
[78] 韩树杰, 戚江涛, 坎杂,等. 新疆果园深施散体厩肥离散元参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2021,52(4):101 – 108.
HAN Shujie, QI Jiangtao, KAN Za, et al. Parameters calibration of discrete element for deep application of bulk manure in Xinjiang orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(4):101 – 108. (in Chinese)
[79] 罗帅, 袁巧霞, GOUDA S, 等. 基于 JKR 粘结模型的蚯蚓粪基质离散元法参数标定[J]. 农业机械学报, 2018,49(4): 343 – 350.
LUO Shuai, YUAN Qiaoxia, GOUDA S, et al. Parameters calibration of vermicomposting nursery substrate with discrete element method based on JKR contact model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 343 – 350. (in Chinese)
[80] 彭飞, 王红英, 方芳, 等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2018,49(4):140 – 147.
PENG Fei, WANG Hongying, FANG Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(4):140 – 147. (in Chinese)
[81] 牛智有, 孔宪锐, 沈柏胜, 等. 颗粒饲料破损离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2022,53(7):132 – 140,207.
NIU Zhiyou, KONG Xianrui, SHEN Baisheng, et al. Parameters calibration of discrete element simulation for pellet feed attrition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(7):132 – 140,207. (in Chinese)
[82] GUO W S, HU C, HE X W, et al. Construction of virtual mulch film model based on discrete element method and simulation

of its physical mechanical properties[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2020,13(4):211 - 218.

[83] 靳伟, 张学军, 丁幼春, 等. 基 EDEM - Fluent 的残膜与杂质悬浮分离仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(4): 89 - 98.
JIN Wei, ZHANG Xuejun, DING Youchun, et al. Experiment on suspension separation of residual film and impurity based on EDEM - Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 89 - 98. (in Chinese)

[84] 申世龙, 张佳喜, 蒋永新, 等. 基于离散元法的耕层残膜拉伸性能研究[J]. 农业机械学报, 2024,55(7):132 - 141.
SHEN Shilong, ZHANG Jiaxi, JIANG Yongxin, et al. Tensile properties of residual film in tillage layer based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(7):132 - 141. (in Chinese)

[85] UCGUL M, SAUNDERS C, FIELKE J M. Discrete element modelling of top soil burial using a full scale mouldboard plough under field condition[J]. Biosystems Engineering, 2017,160:140 - 153.

[86] 方会敏, 姬长英, CHANDIOFA, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报, 2016,47(3): 22 - 28.
FANG Huimin, JI Changying, CHANDIOFA, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(3):22 - 28. (in Chinese)

[87] 刘国阳, 夏俊芳, 郑侃, 等. 振动横挡阻隔式旋耕防粘结刀辊设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022,38(23):29 - 40.
LIU Guoyang, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Design and experiments of the barrier type rotary anti-adhesion blade roller with vibration crosspiece[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(23):29 - 40. (in Chinese)

[88] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J]. 农业机械学报, 2016,47(9):62 - 72.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(9):62 - 72. (in Chinese)

[89] 袁军,于建群. 基于 DEM - MBD 耦合算法的自激振动深松机仿真分析[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 1):17 - 24.
YUAN Jun, YU Jianqun. Analysis on operational process of self-excited vibrating subsoiler based on DEM - MBD coupling algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp. 1):17 - 24. (in Chinese)

[90] UCGUL M, SAUNDERS C. Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling[J]. Biosystems Engineering, 2020,190: 58 - 70.

[91] UCGUL M, SAUNDERS C, FIELKE J M. A method of quantifying discrete element method simulations of top soil burial from a mouldboard plough[J]. ASABE Annual International Meeting, Orlando, Florida, 2016: 162460870.

[92] UCGUL M, SAUNDERS C, LI P L. Analyzing the mixing performance of a rotary spader using digital image processing and discrete element modelling (DEM)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018,151:1 - 10.

[93] HADI A N, SEYED H K, MOJTABA N B. Weed seed burial as affected by mouldboard design parameters, ploughing depth and speed: DEM simulations and experimental validation[J]. Biosystems Engineering, 2022,216:79 - 92.

[94] 方会敏, 姬长英, 张庆怡, 等. 基于离散元法的旋耕刀受力分析[J]. 农业工程学报, 2016,32(21):54 - 59.
FANG Huimin, JI Changying, ZHANG Qingyi, et al. Force analysis of rotary blade based on distinct element method[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(21):54 - 59. (in Chinese)

[95] 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)

[96] YANG W, HUANG J X, LUO Z K, et al. The critical cutting speed for cane stubble stems and optimization of deep vertical rotary tillage blade[J]. Sugar Tech., 2025,3:1 - 15.

[97] CHENG J, XIA J F, ZHENG K, et al. Design and experiment of anti-adhesion rototiller based on staggered double-roller scraping[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024,17(4):165 - 175.

[98] CHENG J, XIA J F, ZHENG K, et al. Construction and analysis of a discrete element model for calculating friction resistance of the typical rotary blades[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023,214:108303.

[99] CHEN X H, ZHANG S L, DONG J X, et al. Development of high-speed and precision metering device with gradient-feeding and control seed for soybean planting[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2024,4:1574.

[100] 雷小龙, 廖宜涛, 王磊, 等. 油麦兼用型气送式集排器增压管气固两相流仿真与参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19):67 - 75.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, WANG Lei, et al. Simulation of gas-solid two-phase flow and parameter optimization of pressurized tube of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 67 - 75. (in Chinese)

[101] LEI X L, LIAO Y T, LIAO Q X. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM - CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016,131:29 - 39.

[102] 王守江, 颜丙新, 李立伟, 等. 基于离散元的肥料流重构玉米分层施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9):138 - 150,184.

WANG Shoujiang, YAN Bingxin, LI Liwei, et al. Design and experiment of corn layer fertilization device with fertilizer flow reconstruction based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 138 - 150,184. (in Chinese)

[103] SUN K, HE C, ZHOU Q, et al. Study on the influence mechanism of soil covering and compaction process on maize sowing uniformity based on DEM - MBD coupling[J]. Agronomy, 2024,14:2883.

[104] 任定林, 刘涛, 夏守浩, 等. 玉米大豆兼用腔盘组合孔式排种盘设计与充种性能试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2):73 - 89.
REN Dinglin, LIU Tao, XIA Shouhao, et al. Design and seed filling performance test of cavity plate combination hole type seeding plate for corn and soybean[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(2):73 - 89. (in Chinese)

[105] 张春岭, 刘涛, 郑子浩, 等. 交错凸齿式宽苗带小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024,40(5):47 - 59.
ZHANG Chunling, LIU Tao, ZHENG Zihao, et al. Design and test of the precision seeding dispenser with the staggered convex teeth for wheat sowing with wide seedling belt[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(5):47 - 59. (in Chinese)

[106] 鹿芳媛, 马旭, 齐龙, 等. 基于离散元法的杂交稻振动匀种装置参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 17 - 25.
LU Fangyuan, MA Xu, QI Long, et al. Parameter optimization and experiment of vibration seed-uniforming device for hybrid rice based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(10):17 - 25. (in Chinese)

[107] 颜丙新, 武广伟, 付卫强, 等. 基于 EDEM 的玉米精播高位投种着床位置影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2020,51(增刊 2):47 - 54.
YAN Bingxin, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Influencing factors of corn implantation distribution for high-height planting based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp. 2): 47 - 54. (in Chinese)

[108] XU J, SUN S L, HE Z K, et al. Design and optimisation of seed-metering plate of air-suction vegetable seed-metering device based on DEM - CFD[J]. Biosystems Engineering, 2023,230:277 - 300.

[109] 苑进, 辛振波, 牛子孺, 等. 基于 RVM 的配比变量排肥掺混均匀度离散元仿真及验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8):37 - 45.
YUAN Jin, XIN Zhenbo, NIU Ziru, et al. Discrete element model simulation and verification of fertilizer blending uniformity of variable rate fertilization based on relevance vector machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(8):37 - 45. (in Chinese)

[110] 陈桂斌, 王庆杰, 李洪文, 等. 固体有机肥破碎条施机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023,39(11):13 - 24.
CHEN Guibin, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and experiment of solid organic fertilizer crushing and striping machines[J]. Transactions of the CSAE, 2023,39(11):13 - 24. (in Chinese)

[111] 刘彩玲, 黎艳妮, 宋建农, 等. 基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器的性能分析与试验[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)

[112] 温翔宇, 贾洪雷, 张胜伟, 等. 基于 EDEM - Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3):69 - 77.
WEN Xiangyu, JIA Honglei, ZHANG Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM - Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(3):69 - 77. (in Chinese)

[113] 刘正道, 王庆杰, 李洪文, 等. 耦合 CFD - DEM 的气力式种肥穴施装置投肥路径分析与试验[J]. 农业工程学报, 2019,35(21):18 - 25.
LIU Zhengdao, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Fertilizer injecting route analysis and test for air-blowing seed-fertilizer hole-applicator via CFD - DEM coupling[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(21):18 - 25. (in Chinese)

[114] 杨波, 秦建国, 岑海堂, 等. 基于 EDEM 的播种机镇压轮作业质量仿真试验研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2024,43(4):330 - 337.
YANG Bo, QIN Jianguo, CEN Haitang, et al. Simulation experimental research on the operation quality of the press wheel of the seeder based on EDEM[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 43(4):330 - 337. (in Chinese)

[115] 赵亚君. 轮胎-土壤相互作用研究平台设计与试验[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2022.
ZHAO Yajun. Design and experiment of tire - soil interaction research platform[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[116] KOBBY A, CHEN Y. Discrete element modelling of soil pressure under varying number of tire passes[J]. Journal of Terramechanics, 2023,107:23 - 33.

[117] 耿元乐. 中小型玉米免耕播种机镇压部件设计与镇压力控制研究[D]. 淄博:山东理工大学. 2023.
GENG Yuanle. Research on the design of press devices and control of compaction pressure for small and medium-sized corn

no-till planter[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023. (in Chinese)
[118] ZHOU H B, CHEN Y, MOHAMMAD A. Modelling of soil-seed contact using the discrete element method (DEM)[J]. Biosystems Engineering, 2014,121:56 – 66.
[119] LI W X, ZHANG F B, LUO Z T. Straw movement and flow field in a crushing device based on CFD – DEM coupling with flexible hollow straw model[J]. Biosystems Engineering, 2024,242:140 – 153.
[120] 赵庆富. 基于 DEM – CFD 耦合的除草机火焰定向喷射研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2024.
ZHAO Qingfu. Research on directional flame injection of weeder based on DEM – CFD coupling[D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2024. (in Chinese)
[121] 武涛, 罗小伟, 蒋姣丽, 等. 立式螺旋送土甘蔗宽窄行中耕培土机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(12):71 – 80.
WU Tao, LUO Xiaowei, JIANG Jiaoli, et al. Design and experiment of vertical screw-feeding cultivator-hiller for sugarcane in wide and narrow planting mode[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(12):71 – 80. (in Chinese)
[122] 李轲. 小麦收获机柔性拨禾关键技术研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2022.
LI Ke. Research on the key technology of flexible dislodging of wheat harvester[D]. Taian: Shandong University of Agricultural, 2022. (in Chinese)
[123] 孙凯. 成熟期小麦籽粒与植株建模方法及切割和脱粒过程仿真分析与试验研究[D]. 长春:吉林大学, 2024.
SUN Kai. Modeling method for wheat grains and plants in the mature period and simulation analysis and experimental study of cutting and threshing process[D]. Changchun: Jilin University, 2024. (in Chinese)
[124] 王万章, 刘婉茹, 袁玲合, 等. 基于 EDEM 的收获期小麦植株离散元参数标定[J]. 河南农业大学学报, 2021,55(1):64 – 72.
WANG Wanzhang, LIU Wanru, YUAN Linghe, et al. Calibration of discrete element parameters of wheat plants at harvest period based on EDEM[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021,55(1):64 – 72. (in Chinese)
[125] LI H C, LI Y M, GAO F, et al. CFD – DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012,88:111 – 119.
[126] 邱白晶, 姜国微, 杨宁, 等. 水稻籽粒流对承载板冲击过程离散元分析[J]. 农业工程学报, 2012,28(3):44 – 49.
QIU Baijing, JIANG Guowei, YANG Ning, et al. Discrete element method analysis of impact action between rice particles and impact-board[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(3):44 – 49. (in Chinese)
[127] 梅志勇. 基于 DEM – MBD 耦合的玉米机械摘穗损伤规律研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2024.
MEI Zhiyong. Study on damage law of corn mechanical tassel picking based on DEM – MBD coupling[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2024. (in Chinese)
[128] 于亚军, 周海玲, 付宏, 等. 基于颗粒聚合体的玉米果穗建模方法[J]. 农业工程学报, 2012,28(8):167 – 174.
YU Yajun, ZHOU Hailing, FU Hong, et al. Modeling method of corn ears based on particles agglomerate[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(8):167 – 174. (in Chinese)
[129] FANG X W, ZHANG J S, ZHAO X L, et al. Maize kernel damage dynamic prediction in threshing through PSO – LSTM and discrete element modelling[J]. Biosystems Engineering, 2024,242:179 – 195.
[130] 张鑫, 赵伟, 叶彤, 等. 鲜食玉米收获机秸秆粉碎装置的设计与试验[J]. 农机化研究, 2025,47(6):140 – 146.
ZHANG Xin, ZHAO Wei, YE Tong, et al. Design and test of straw crushing device of fresh corn harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025,47(6):140 – 146. (in Chinese)
[131] ARIFUZZAMAN S M, DONG K J, ZOU R P. A classification AI model to predict choking of vibrating screen based on DEM and machine learning[J]. Powder Technology, 2025,460:121036.
[132] 李尚平, 张伟, 黄宗晓, 等. 基于离散元法的自走式甘蔗转运车车厢稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2020,51(2):374 – 382.
LI Shangping, ZHANG Wei, HUANG Zongxiao, et al. Stability of carriages of self-propelled sugarcane transporters based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(2):374 – 382. (in Chinese)
[133] GHODKI B M G, GOSWAMI T K. Modeling of granular heat transfer in cryogenic grinding system: black pepper seeds[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019,141:302 – 316.
[134] AMJAD W, CHEN Z P, AMBROSE K. Design assessment of grain inverters in cross-flow grain dryer via CFD – DEM numerical simulation[J]. Biosystems Engineering, 2024,239:147 – 157.
[135] HORABIK J, MOLENDA M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: a review[J]. Biosystems Engineering, 2016,147:206 – 225.