doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.002

农业工程领域耦合仿真技术应用现状与展望

张青松[1,2]　郑中原[1]　廖庆喜[1,2]　于良航[1]　廖宜涛[1,2]　万星宇[1,2]
(1.华中农业大学工学院,武汉 430070;2.农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070)

摘要:耦合仿真技术作为一种先进的数值仿真方法,能将多个独立的物理场或物理现象的仿真模型结合,实现不同领域或不同物理学模型的数值仿真方法相互结合,彼此交换信息并相互影响,在农业工程领域展现出广阔的应用前景,为现代农业装备的数字化与智能化设计提供了新途径。为了系统总结耦合仿真技术在农业工程领域的应用现状和分析该技术的未来发展趋势,概述了耦合仿真技术的基本原理、仿真流程与类型以及相关数值模拟技术与软件,梳理了离散元-结构有限元耦合、离散元-计算流体力学耦合、离散元-多体动力学耦合、连续介质流固耦合以及刚柔耦合在农业工程领域的应用实例。同时,结合耦合仿真技术的应用现状,分析了目前该技术在模型构建与精确性、算法与计算资源、数据集成与处理、仿真软件设计和标准化等方面存在的问题,提出了耦合仿真技术应用发展趋势:多尺度建模与智能验证体系、高性能算法与算力、数据治理与交互模式智能化、标准化建设以及智能融合与场景扩展等,为耦合仿真技术在农业工程领域进一步应用发展提供参考。

关键词:耦合仿真;离散元;结构有限元;计算流体力学;计算固体力学;多体动力学
中图分类号:S-1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0020-18　　**OSID**:

Application Status and Prospect of Coupled Simulation in Agricultural Engineering Research

ZHANG Qingsong[1,2]　ZHENG Zhongyuan[1]　LIAO Qingxi[1,2]　YU Lianghang[1]　LIAO Yitao[1,2]　WAN Xingyu[1,2]
(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: As an advanced numerical simulation method, coupled simulation technology can combine multiple independent simulation models of physical fields or physical phenomena to realize the combination of numerical simulation methods in different fields or different physical models, exchange information and interact with each other. It showed a broad application prospect in the field of agricultural engineering and provided a way for the digital and intelligent design of modern agricultural equipment. In order to systematically summarize the application status of coupling simulation technology in the field of agricultural engineering and analyze the future development trend of this technology, the basic principle, simulation process and types of coupling simulation technology and related numerical simulation technology and software were summarized. The application examples of discrete element-structural finite element coupling, discrete element-computational fluid dynamics coupling, discrete element-multibody dynamics coupling, continuum fluid-solid coupling and rigid-flexible coupling in the field of agricultural engineering were sorted out. At the same time, combined with the application status of coupling simulation technology, the problems existing in the current technology in model construction and accuracy, algorithm and computing resources, data integration and processing, simulation software design and standardization were analyzed. The application development trends of coupling simulation technology were proposed, including multi-scale modeling and intelligent verification system, high-performance algorithm and computing power, intelligent data governance and interaction mode, standardization

收稿日期:2025-05-01　修回日期:2025-05-20
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000401)、湖北省自然科学基金项目(2025AFB596)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-12)
作者简介:张青松(1987—),男,副教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail:qszhang@mail.hzau.edu.cn
通信作者:廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail:liaoqx@mail.hzau.edu.cn

construction, intelligent integration and scene expansion, etc., which provided reference for the further application and development of coupling simulation technology in the field of agricultural engineering.

Key words: coupling simulation; discrete element; structural finite element; computational fluid dynamics; calculation of solid mechanics; multibody dynamics

0　引言

当前，现代农业装备的复杂性对计算机辅助工程技术在优化设计中的应用提出了更为严苛的要求。以往，依据理论分析和农艺标准设计出的农机理想性能数据与实际作业效果存在显著差异。同时，田间试验的实施也会受到气候条件、农时窗口短暂等因素的限制[1]。随着现代力学、数值分析和计算机技术的快速发展，仿真软件已成为揭示农业机械作业状况的关键工具。特别是计算机耦合仿真技术，以其显著优势和广泛适用性，受到了农机科研人员的广泛关注[2]。

在复杂的农业作业环境下，耦合仿真技术相较于单一仿真模式，能更准确地再现实际物理状态，解决了多尺度、多物理场和多相互作用等复杂问题，其结果不仅贴近实际，还能在一定程度上替代费时费力的田间试验，提升设计质量和效率，降低成本。此外，耦合仿真通过数据模拟分析动态工作情况，直观展示机具运作，比传统运动力学数值模拟更为精确和全面[3]。因此，农业工程研究中已从单一的离散元模拟分析逐步转向多项耦合仿真。目前，面对物料-机械、土壤-机械、流体-机械、结构-机械的相互作用分析及性能优化需求日益提升，基于耦合仿真的农业机械关键部件优化设计技术和方法成为该领域研究的重要前沿与热点之一。这种高级的数值模拟方法提供了一个深入理解农业工程系统行为的窗口。

耦合仿真技术已成为解析和优化复杂农业系统不可或缺的工具，但技术应用的系统性梳理和总结尚显不足。因此，本文聚焦于耦合技术在农业工程中已广泛应用的核心领域，探讨其应用现状和发展趋势，旨在为耦合仿真技术与农业工程研究的深度融合提供参考。

1　耦合仿真方法概述

1.1　基本原理与仿真流程

耦合仿真通过整合两个或多个单因素数值模拟技术，实现了不同仿真技术的相互作用和信息交流，从而精确地模拟复杂系统的行为。如图 1 所示，耦合仿真基于耦合场概念，即结构、流体、电磁等物理场之间存在着相互作用和影响，通过数学模型来描述这些物理场之间的相互作用[4]。例如，在热-结构耦合中，温度场的变化会影响结构的应力和变形，而结构的变形又会反过来影响温度场的分布，形成了一个动态的反馈循环。

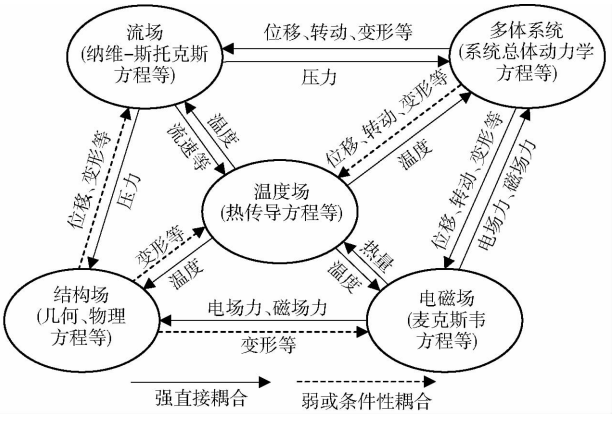


图 1　多物理场典型耦合关系和耦合变量示意图

Fig. 1　Schematic of typical coupling relationships and coupling variables in a multiphysics field

如图 2 所示，耦合仿真的关键在于明确仿真目标和识别需要耦合的物理领域及其相互作用，以实现系统的灵活性和可靠性[5]。耦合仿真的准确性取决于单个模型的精确度以及耦合方法和算法的选取。为了准确模拟复杂系统的行为，需要为不同的物理场建立适当的数值模型和动力学方程，并确保这些模型在仿真过程中能够有效地交换信息和数

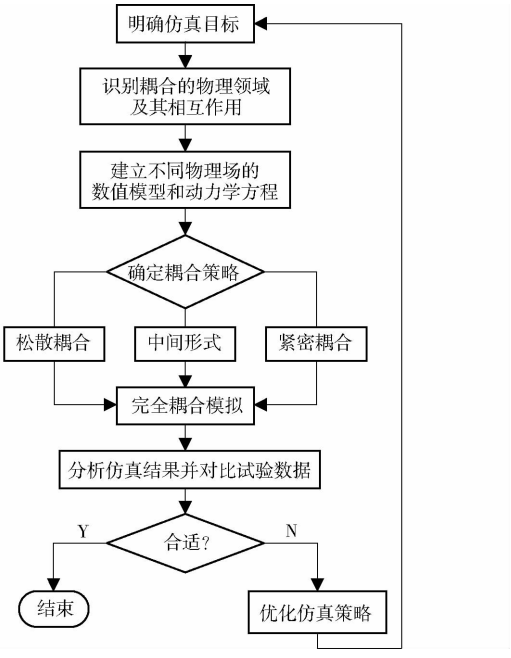


图 2　耦合仿真流程图

Fig. 2　Flowchart of coupled simulation

据。确定最合适的耦合策略是处理复杂系统仿真问题的核心步骤,这一策略可能涉及采用松散耦合、紧密耦合,或是这两者之间的某种中间形式[6]。特别是在面对大规模仿真任务时,考虑到并行处理的必要性,选择恰当的耦合方式显得尤为关键。在完成耦合仿真之后,通过分析仿真结果并将其与实验数据进行对比,可以进一步验证模型的准确性和耦合方法的可靠性,有助于优化仿真策略。此外,确保仿真流程的前后连贯性和准确性是耦合仿真成功的基础。

1.2 数值模拟技术与软件

数值模拟技术通过对现实世界的抽象与建模,能在计算机仿真平台上复现多种物理现象,为系统行为的深入分析与设计方案的优化开辟出高效的途径。

在数值模拟技术方面,离散元法基于颗粒系统的数值模型和牛顿运动定律来模拟颗粒间的相互作用和运动,能细致地描述颗粒材料的行为,包括碰撞、摩擦和破碎等过程,进而有效地分析颗粒集合体在力场作用下的动态行为[7]。计算流体动力学通过求解流体流动的纳维-斯托克斯方程,模拟流体在不同条件下的运动状态,详细地捕捉流体的速度场、压力场和温度场等特性,有效地分析湍流、层流以及多相流等多种流体现象[8]。多体动力学通过建立多体系统数学模型,利用牛顿-欧拉方程或拉格朗日方程等原理来描述系统的运动行为,能精确地处理系统中的连接和约束,以及高自由度和非线性问题,有效地模拟多刚体和多柔体系统在各种力作用下的动态响应[9]。计算固体力学通过解析或数值方法求解固体材料的应力-应变关系,以模拟固体结构在载荷作用下的响应,能深入地分析材料的弹塑性、断裂和疲劳等力学行为,有效地预测结构强度和稳定性[10]。结构有限元法是有限元法在结构力学中的具体应用,通过将连续结构离散为有限数量的互连单元,在单元上构造形函数近似场变量,并基于变分原理将控制方程转化为线性代数方程组求解。该方法兼具灵活性和适应复杂几何的能力,可有效处理多种边界条件[11]。

在计算机仿真软件方面,EDEM 与 PFC 均为离散元软件。在农业工程中,EDEM 可用于颗粒与机械设备的交互过程仿真,如模拟谷物在输送和筛选设备中的流动行为以及分析种子播种的均匀性和施肥效果。PFC 可用于非连续介质的微观力学研究,如解析旋耕刀具与土壤颗粒的接触力链演化以及预测不同耕作深度下的土壤阻力分布。Fluent 是一款计算流体动力学软件,能模拟湍流、层流以及无粘流等多种复杂的流体流动现象,可用于农业机械设计中的气流分析,如风机和通风系统的优化、喷洒装置的流体动力学研究等。ADAMS 与 RecurDyn 均为多体动力学软件。在农业工程中,ADAMS 可用于农机运动学与虚拟样机验证,如拖拉机液压机械臂作业轨迹优化与移栽机运动特性仿真。RecurDyn 能对刚柔耦合系统进行动态分析,如联合收获机传动链疲劳寿命预测和扎穴施肥机构动态载荷研究。Abaqus 是一款固体力学和结构力学分析软件,能处理非线性问题,可用于复杂载荷分析。例如,土壤耕作工具的磨损和断裂、评估农业机械部件在极端工况下的性能,以及模拟植物生长对结构支撑的影响。ANSYS 是一款多物理场仿真软件,能够进行结构、热力、流体动力学和电磁场等综合分析,可以用于分析农业机械在作业中的应力分布、预测收获机切割部件的热疲劳寿命以及评估灌溉系统中的流体流动特性。

离散元法、计算流体动力学、多体动力学、计算固体力学和结构有限元法等数值模拟技术在工程仿真中相辅相成,各自针对不同类型的物理问题,但在处理复杂系统时,往往需要相互结合,以实现全面模拟和分析。

1.3 耦合仿真类型

在农业工程领域,模拟复杂系统时,需将多个单因素数值模拟仿真相互耦合,以全面反映系统的真实情况。耦合方式因模拟系统而异,各有优势和应用场景。选择合适的耦合方式需要考虑系统复杂性、模型精度、计算效率和模型调试等因素,以获得最佳的仿真结果。表 1 介绍了部分耦合仿真技术的特点、主要优势以及具体应用。

离散元-结构有限元耦合(DEM - structural FEM coupling)通过结合离散元法对颗粒物料微观非连续行为(如破碎、流动)的精细化模拟,与结构有限元法对连续结构宏观力学响应(如变形、应力)的高效计算,实现颗粒-结构相互作用的多尺度分析。方法核心是将离散元计算的颗粒接触力转换为结构有限元的节点载荷以驱动结构响应,同时将结构变形反馈至离散元以更新接触边界,从而兼顾颗粒微观力学与结构宏观性能的耦合评估,适用于颗粒-机械系统强度、刚度及动态行为的高效仿真[12]。

离散元-计算流体力学耦合(CFD - DEM coupling)主要用于模拟复杂的多相流动问题,例如颗粒在流体中的悬浮、运动以及颗粒与流体之间的相互作用。该方法融合了离散元法对颗粒微观行为的精细描述和计算流体力学对流体宏观流动的模拟,从而能够精确捕捉颗粒间的碰撞、堆积等动态过

程以及流体流动和压力场的分布[13]。在农业工程领域，离散元-计算流体力学耦合方法被广泛应用于预测颗粒群的悬浮速度、分析种子和肥料在气力输送设备中的运动轨迹，以及探究联合收获机中谷物分离效率和土壤渗透系数的深度变化，为农业机械的设计和优化提供了重要的依据。

表 1　耦合仿真技术

Tab. 1　Coupling simulation technology

类型	技术特点	主要优势	具体应用场景
离散元-结构有限元耦合	利用离散元法模拟颗粒材料，结构有限元法模拟连续介质，实现颗粒材料与连续介质之间的相互作用	模拟全面，模型适用性高，能应对多尺度问题	能模拟土壤与农业机械部件之间的相互作用，如耕整地机械的土壤压实等
离散元-计算流体力学耦合	离散元法用于颗粒动力学模拟，计算流体力学用于流体流动模拟，两种方法相互结合，能有效模拟颗粒与流体之间的相互作用	颗粒流动的复杂动态捕捉效率高，模拟结果可靠，能进行气固两相流的精确分析	能分析种子在气力输送过程中的分布和运动特性，粮食物料加工过程中的气固流以及优化播种机的排种器结构
离散元-多体动力学耦合	结合离散元法与多体动力学在颗粒模拟、多体系统的动力学分析等方面优势，可有效模拟颗粒材料与多体系统的相互作用	模拟精确，动态响应分析准确，可处理复杂地形条件下的机械分析	能分析农业机械在复杂地形条件下的动态响应，如拖拉机在不平坦地面上的行驶稳定性等
连续介质流固耦合	基于连续介质假设，通过流体求解器与结构求解器的双向耦合，解析流体与连续弹性体的相互作用，实现压力场、速度场与位移场的动态传递	模拟精确，能处理动态或静态条件下的流固问题	能分析流体与结构耦合作用，如水泵叶片流激振动、输水管水锤预测等
刚柔耦合	能处理刚体动力学和柔性体动力学的耦合问题，应对多体系统中的复杂运动分析	模拟精度高，增强了机械设计可靠性，可进行高精度运动分析	可在农业采摘机械中，模拟水果与机构交互过程中的动态耦合关系

离散元-多体动力学耦合（DEM - MBD coupling）融合了离散元法对颗粒物质的微观模拟和多体动力学对复杂机械系统的宏观分析，常用于模拟多体系统中的复杂力学行为，如土壤与农机部件相互作用[14]。在这一仿真过程中，土壤被视为由无数微小颗粒组成的集合体，而农机部件则作为刚体或弹性体进行建模。两者之间的相互作用通过力的传递和能量交换来实现，包括颗粒对农机部件的撞击、摩擦以及由此产生的磨损。为了确保模拟的准确性，计算时必须实时更新颗粒与刚体间的接触状态和相互作用力，同时考虑农机部件的运动状态对颗粒分布和流动的影响。这种耦合仿真为农机设计提供了宝贵的反馈，预测了农机在实际作业中的性能和耐久性，从而在提高农业生产效率的同时，减少了对环境的潜在影响。

连续介质流固耦合（Continuum FSI）常用于分析固体在流体动力学环境中的变形行为、固体几何形态变化对流体流动特性（如流速、压力分布等）的影响，以及不同条件下两相介质间相互作用产生的多样化连续介质流固耦合现象[15]。连续介质流固耦合技术对于深入解析流体动力学与结构力学之间的相互作用至关重要。例如，在农业工程领域，该技术被应用于分析联合收获机的工作部件在作物处理过程中的动态行为和性能分析，以及灌溉系统中水流与土壤相互作用的动态特性和影响分析。通过这些分析，可以优化联合收获机部件的动态性能，并提高灌溉系统中水流与土壤相互作用的效率。

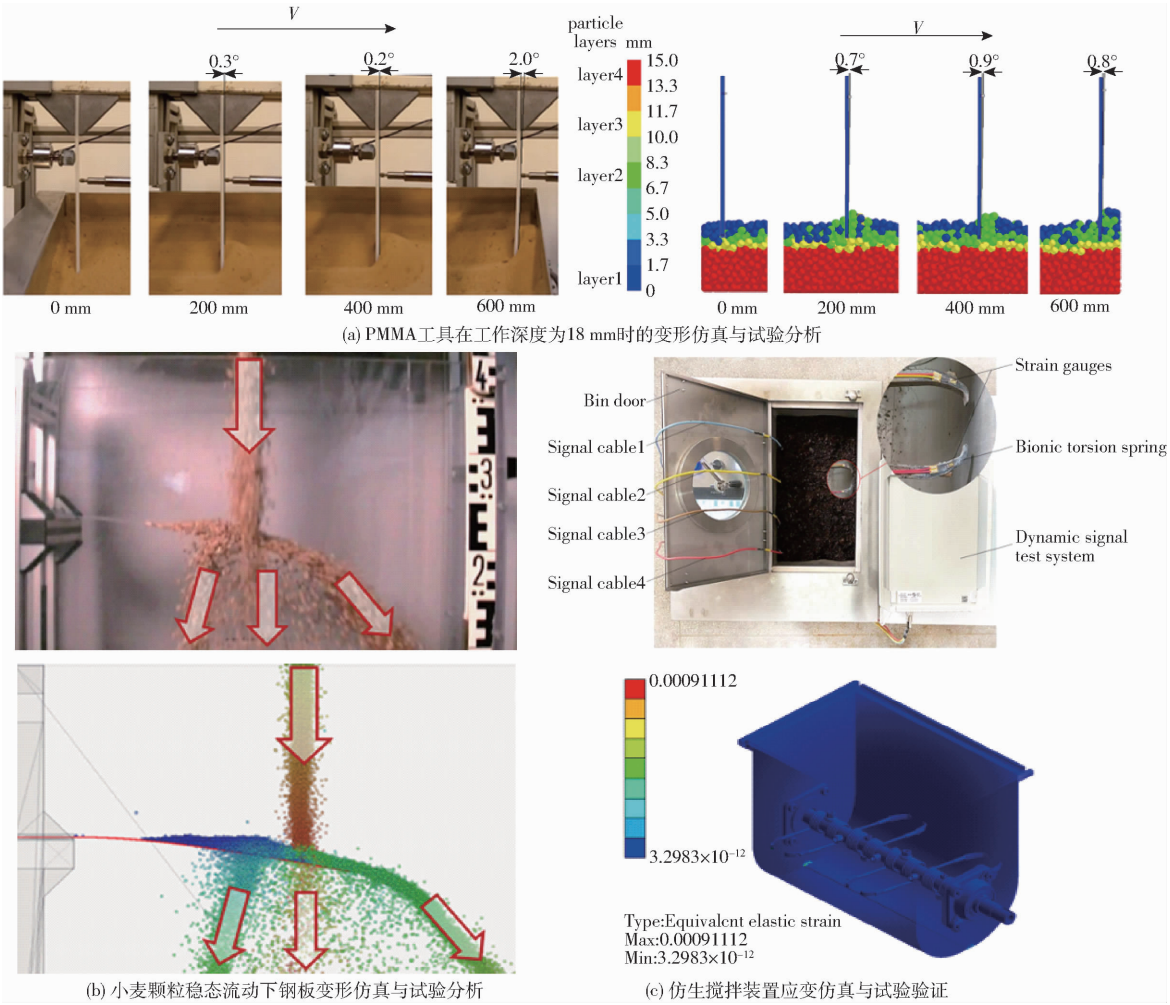
刚柔耦合（Rigid - flexible coupling）常用于分析刚体与柔性物体间的相互作用，特别是柔性体变形与大范围空间运动之间的耦合效应[16]。作为多刚体系统动力学的延伸，该领域在动力刚化现象和刚柔耦合问题上已发展出多种建模方法，包括浮动坐标系、随转坐标系和惯性坐标系等。这些方法能够精确描述刚体与柔性结构之间的动态相互作用，对于理解和预测复杂机械系统的动态响应具有重要意义。通过这些建模技术，可以更准确地捕捉刚柔耦合系统中的动力学特性，为工程设计和性能优化提供科学依据。

2　耦合仿真在农业工程研究中应用

2.1　离散元-结构有限元耦合

离散元法在模拟颗粒材料力学特性方面具有独特优势，能够细致地获取颗粒材料的微观力学信息。结构有限元法基于宏观连续体模型，计算效率较高，但在模拟颗粒材料的微观非连续破坏过程及其力学机理方面存在局限性。为整合两类方法的优势，离散元-结构有限元耦合技术被引入农业工程领域。图 3 展示了离散元-结构有限元耦合的部分应用场景，图 3a、3b、3c 分别引自文献[17]、[18]、[19]，表 2 进一步对图 3 所示案例进行了说明。

在耕作机械设计优化领域，ZHU 等[20]通过 ANSYS 与 EDEM 构建刀辊-秸秆-泥水多相耦合模



(a) PMMA工具在工作深度为18 mm时的变形仿真与试验分析

(b) 小麦颗粒稳态流动下钢板变形仿真与试验分析

(c) 仿生搅拌装置应变仿真与试验验证

图 3 离散元-结构有限元耦合仿真示例

Fig. 3 Example of DEM - structural FEM coupling simulation

表 2 图 3 示例具体说明

Tab. 2 Specific description of example in Fig. 3

图号	具体说明
图 3a	在 200 ~ 400 mm 的刀具位移之间,在 18 mm 的工作深度下,刀具后倾角实测值为 0.2° ~ 0.3°,而仿真值为 0.7° ~ 0.9°。该误差源于局部颗粒堆积差异的建模偏差。仿真结果显示工具前部土壤呈现显著隆起特征,验证了被动振动状态下土壤与工具的动态相互作用机制,与实测数据的总体趋势一致性达 85%[17]
图 3b	在小麦颗粒稳态流动阶段,试验测得钢板的平均变形量为 -26 mm,仿真结果与之高度吻合。此时,粒子流速稳定,冲击区域粒子层速度低于 1 m/s,仿真准确复现了粒子堆积与滑移的动力学行为,验证了耦合算法的长期稳定性[18]
图 3c	仿生搅拌装置的仿真与试验应变值之间的相对误差为 1.74%,验证了模型的可靠性。仿真结果显示,弹簧根部存在显著的应力集中现象,其最大应变区域与试验中的高断裂风险区域一致,为结构优化提供了可靠的闭环支持[19]

型,采用 Hertz - Mindlin 接触模型表征土壤粘弹性,结合 CFD 模拟泥水流变特性,设置动态网格与 FSI - WALL 边界实现交互,通过正交试验优化参数,结合多尺度网格与土壤箱验证,精准还原旋耕多场耦合机制。PÁSTHY 等[17]构建了双向离散元-结构有限元耦合模型,结合 Altair EDEM 与自研软件,通过分层土壤参数校准和动态有限元求解工具振动响应,实时交互节点力和位移数据,实现土壤颗粒运动与工具变形的多尺度动态耦合,为耕作多物理场仿真提供方法框架。张青松等[21]基于 EDEM 建立土壤-秸秆离散元模型,结合 Solidworks 构建冷浸田起垄平整装置模型,利用 Hertz - Mindlin 接触模型表征颗粒相互作用,在 ANSYS 中完成起垄辊结构有限元分析,实现土壤流动与部件应力的双向耦合仿真,验证了起垄辊在最优参数下的应力应变特性。张智泓等[22]利用离散元-结构有限元耦合仿真分析了仿生布利冈结构在农机耐磨部件中的应用。试验表明,布利冈结构内部较大形变和应力可有效吸收冲击能量,降低磨损。曹成茂等[23]采用 EDEM 建立除草轮-土壤离散元模型,模拟颗粒动态行为并导出载荷

数据，结合 ANSYS 对除草轮进行结构有限元分析，通过网格划分与材料属性设置，评估应力分布及形变量，验证除草轮在碎石土壤中的抗变形能力。

在机械部件力学分析领域，KEŠNER 等[24]运用离散元-结构有限元耦合仿真技术，研究了土壤耕作机具框架及凿形铲柄的应力分布。仿真结果表明，带翼片的凿形铲因接触面积增大导致阻力显著提升，应力分布更复杂。李骅等[25]利用离散元-结构有限元耦合仿真，对滚筒式堆肥反应器的通风系统和搅拌装置进行结构分析。实验中，EDEM 模拟堆肥过程获取载荷数据，ANSYS 有限元分析得到通风系统和搅拌装置的应力分布、形变量和安全系数，结果表明系统强度满足设计要求。DRATT 等[18]提出了一种离散元-结构有限元耦合方法，用于分析机器部件与散体材料相互作用时的载荷、变形和应力。试验显示，料斗中悬臂梁的最大变形为 52.8 mm，与模拟结果的 54.3 mm 高度吻合。ZHAO 等[26]基于离散元-结构有限元耦合仿真结果，设计了包含蓄能器的液压系统。研究利用 DEM 模拟水稻秸秆的喂入过程，分析喂入量和结构参数对喂入装置负载的影响；利用 FEM 进行结构可靠性分析，计算出不同喂入量和喂入口径下喂入装置的安全系数。

在作业装置参数优化领域，WANG 等[19]通过离散元-结构有限元耦合仿真，优化了仿生搅拌装置的设计参数，提高了餐厨垃圾分解效率。在最佳参数组合下，物料蓬松度提高 18.69%，结构失效风险降低至 0.000 38。WANG 等[27]使用离散元法和结构有限元法模拟了滚揉过程，并确定了最佳参数组合，包括滚筒速度、水平倾角、混合叶片倾角和叶片螺距。试验结果显示，优化后的滚揉装置有效地提高了食物垃圾堆肥的稳定性和溶氧效率。GAO 等[28]基于 EDEM 构建颗粒-模具耦合模型，结合 Hysteretic Spring 与 Archard 磨损模型建立接触算法，通过载荷谱映射 FEA 分析，集成 nCode SN 模块重构应力场，揭示模具孔口应力集中机制，实现多场耦合磨损定量评估。

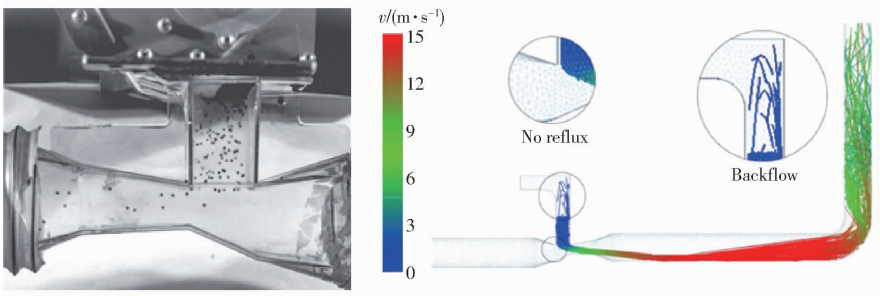
离散元-结构有限元耦合技术在机械设计优化、力学分析及参数优化等领域具有较高应用价值。该技术结合了离散元法的微观力学信息获取能力与有限元法的高效计算，能深入地探究颗粒物料与农业机械装置的相互作用，提升了机械设计与优化水平，增强了机具的作业性能和可靠性。

2.2　离散元-计算流体力学耦合

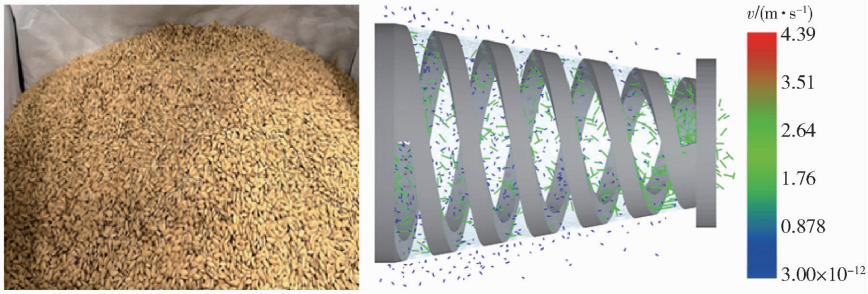
农业工程领域中，流体与颗粒物料或机具间的相互作用十分复杂，传统的宏观计算公式难以准确解释这些力学行为。离散元-计算流体力学耦合方法为研究这类问题提供了强有力的工具。图 4 展示了离散元-计算流体力学耦合的部分应用场景，图 4a、4b、4c 分别引自文献[29]、[30]、[31]，表 3 进一步对图 4 所示案例进行了说明。

在播种与气力输送技术方面，针对突扩文丘里混种装置，廖宜涛等[32]通过 EDEM 建立油菜和小麦颗粒模型，Fluent 模拟气流场，基于 Hertz - Mindlin 模型模拟 15 ~ 18 m/s 风速下种子与结构碰撞，发现 12% 油菜碰撞后保持定向运移，验证装置防堵机制。WANG 等[29]基于离散元-计算流体力学耦合分析了 6 种混合组件对油菜籽和小麦种子运动轨迹及输送性能的影响，发现加速混合段的 Venturi 混合室和 L 形弯头输送管组合表现最佳。针对小麦气流辅助直线投种装置，王龙宝等[33]基于 Fluent 建立稳态流场模型，结合 Rocky DEM 离散元模拟种子运动，通过设定压力边界条件与颗粒接触参数，分析入口气压、管长对总压损失及种子轨迹的影响，验证压力梯度方向与种子运动的一致性。王磊等[34]通过离散元-计算流体力学耦合仿真和台架试验对比了 4 种气送式排肥分配装置的性能，发现穹顶式因圆弧形结构形成的稳定气流场，显著提升了排肥均匀性并降低破损率，而倒锥式结构因截面突变导致颗粒碰撞加剧，破损率最高达 7.81%。苏微等[35]设计了一种带有平带辅助充气装置的气息式蚕豆精量播种机，并通过离散元-计算流体力学耦合仿真和单因素试验，确定了影响性能的主要部件参数。衣淑娟等[36]采用 EDEM 建立玉米种子颗粒模型，Fluent 模拟气流场，分析了种子在导槽内的速度轨迹及气流分布特性，揭示了导槽结构参数对种子运动约束的影响，并结合材料力学参数与接触模型，优化导槽宽度比例及气流正压范围。王磊等[37]基于 EDEM - Fluent 耦合平台，构建油菜种-肥同播装置导种管气固耦合模型，设置导种管入口为气流与种子入口、出口为边界条件，监测不同倾斜角度下种子速度场与受力分布，验证了气流辅助输送对种子加速排出及滞留抑制的有效性。

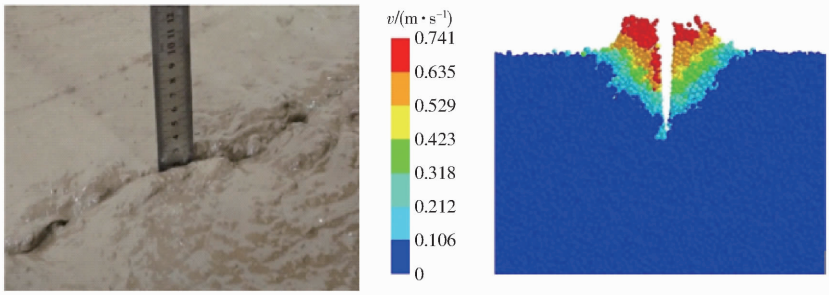
在物料分离与清选技术方面，徐鹏庆等[38]为提高胡麻脱粒清选装置作业效率，建立了清选系统的计算流体力学模型和胡麻脱出物的离散元模型，并通过离散元-计算流体力学耦合，分析各组分脱出物料的运动轨迹与空间位置分布，得出清选系统内胡麻脱出物分离规律。LIU 等[30]设计了一种螺旋阶梯式清选装置，通过涡流防止筛网堵塞，降低再生稻清选的杂质率和损失率。离散元-计算流体力学耦合模拟和台架试验验证了装置的有效性，与传统装置相比，杂质率和损失率降低，为再生稻收获机清选



(a) 混合部件中油菜籽运动轨迹仿真与试验分析



(b) 螺旋阶梯式清选装置中涡流防堵塞机理的仿真与试验分析



(c) 开沟装置土壤回填高度仿真与试验验证

图 4 离散元-计算流体力学耦合仿真示例

Fig. 4 Example of DEM - CFD coupling simulation

表 3 图 4 示例具体说明

Tab. 3 Specific description of example in Fig. 4

图号	具体说明
图 4a	混合组件采用加速混合室和 L 形弯管结构,可确保油菜籽集中分布且无回流产生。在 20 r/min 的转速测试中,模拟运动与实际运动的一致性得到验证,同时观测到回流抑制现象,充分证明了流场优化设计的有效性[29]
图 4b	仿真结果表明,涡流效应驱动碎屑定向迁移至骨架连接处,溢出筛网的杂质占比为 10.1% ~13.7%。仿真预测筛网堵塞率低于 0.05%,台架测试实测值为 0.08%,两者误差为 0.03%,未出现显著堵塞。试验数据与仿真结果的杂质率和损失率偏差为 5% ~5.5%,验证了涡流场对碎屑运动的控制精度,满足设计规范要求[30]
图 4c	土壤回填高度定义为沟槽底部至回填表面的垂直距离。仿真结果清晰地展示了开沟器形成的沟槽形态及动态回填过程,并通过对比仿真预测与试验实测值,验证了 CFD - DEM 耦合模型的可靠性。二者的高度一致性为开沟器结构参数优化提供了直接依据[31]

装置的设计提供了参考。ZHANG 等[39]采用 Solidworks 和 ANSYS 构建气力捡拾装置模型,EDEM 建立红枣非球形离散元模型,通过 Fluent 设置 $k-\varepsilon$ 湍流模型及瞬态求解器,结合双向流固耦合接口实现颗粒-流体交互,并利用正交试验优化机器速度与气流参数对捡拾性能的影响。冯鑫等[40]采用离散元-计算流体力学耦合方法模拟波浪筛清选装置内气固两相运动,揭示了近筛层气流速度分布对物料滞留与透筛的影响规律。仿真通过 ADAMS 提取筛片运动参数,Matlab 拟合运动方程并嵌入 EDEM,Fluent 分析气流场分布。张黎骅等[41]运用离散元-计算流体力学耦合仿真技术,对自走式谷物联合收获机的清选装置进行了优化研究,通过模拟不同操作参数,探究了清选效率与损失率的关系,并发现调整振幅、频率和振动方向角能有效提高谷物清洁度,降低损失。鲍国丞等[42]通过 Fluent 建立流体域多面体网格模型,结合 Rocky 离散元分析颗粒运动轨迹,设置空气密度、入口风速及颗粒物性参数,开展单因素试验研究密度与直径对分离效果的影响,验证收获机除杂装置流场稳定性与杂质分离能力。谢

建华等[43]基于 EDEM－Fluent 耦合方法建立分离装置模型，在 EDEM 中构建幼虫、虫砂和残膜的颗粒模型，采用 Hertz－Mindlin with JKR 接触模型表征黏附效应，Fluent 设置 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行瞬态气固耦合仿真。通过抽取流体域网格、协调时间步长及分析不同气流倾角下物料运动轨迹，优化分离装置结构参数。

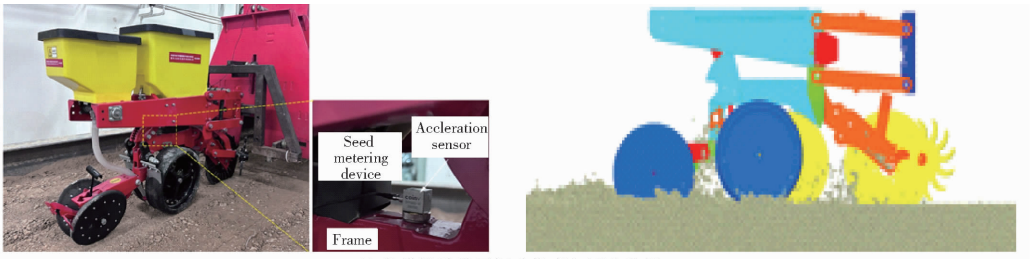
在施药与仿生装备设计方面，FU 等[44]通过离散元-计算流体力学耦合仿真方法，优化了气力式橡胶树粉剂施药装置的运行参数，优化后的装置粉剂有效沉积率达到 59.06%，显著高于传统背负式喷粉机，且单位面积冠层沉积量的变异系数仅为 3.8%，施药效果良好。TANG 等[31]设计了一款基于北美獾爪的仿生犁沟开沟器，并利用离散元-计算流体力学耦合建立了一个稻田土壤-开沟器相互作用模型，以评估不同曲率半径和宽度组合的开沟器性能。结果表明，当曲率半径和宽度分别为 25、30 mm 时，仿生开沟器性能最佳。

离散元-计算流体力学耦合方法在农业工程领域的应用，为研究流体与颗粒物料或机具间的复杂相互作用提供了新的视角和手段。该技术能更准确地模拟和优化农业机械的设计，提高播种、清选、输送和施药等机械的性能，从而提升农业生产的效率和效果。

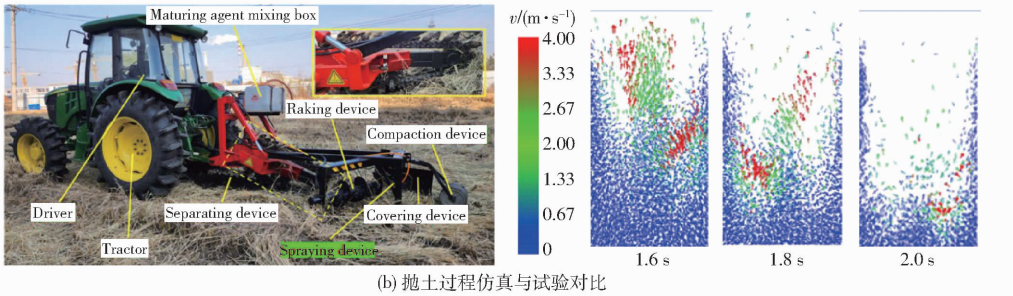
2.3　离散元-多体动力学耦合

离散元-多体动力学耦合技术通过离散元高精度解析颗粒物料的碰撞、破碎及堆积等细观力学行为，同时结合多体动力学对农机具复杂机构进行运动仿真与动态载荷解算，从而在农机-土壤-作物多相耦合系统中实现结构与散体物料相互作用机理的可视化建模与协同优化。图 5 展示了离散元-多体动力学耦合在机械设计优化领域的实际应用，图 5a、5b、5c 分别引自文献[45]、[46]、[47]，表 4 进一步对图 5 所示案例进行了说明。

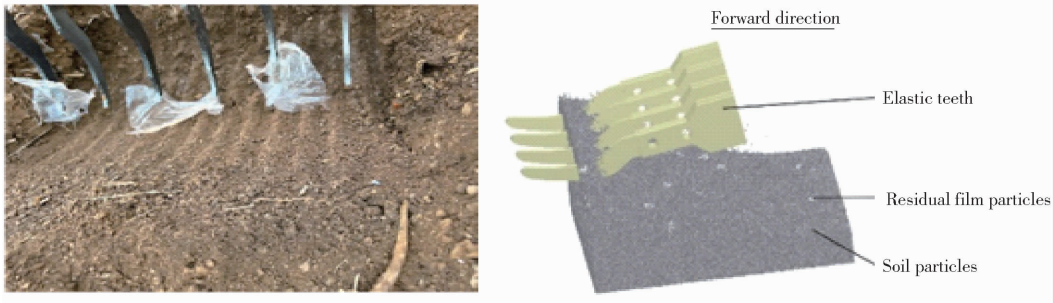
在播种与种植机械优化领域，HE 等[45]通过 RecurDyn 建立播种单体多体动力学模型，EDEM 建立离散元土壤交互系统，利用锥入试验标定土壤参数并构建 GeoSur 动态接触算法，实现“开沟-限深”耦合作业过程双向耦合仿真，定量解析耕作参数对系统振动的协同影响。廖庆喜等[48]采用离散元-多体动力学耦合方法对滚动式割膜装置进行仿真，通过 RecurDyn 构建多体动力学模型并柔性化地膜，结合 EDEM 建立土壤颗粒模型，实现机构-土壤动态交互分析，揭示了刀片运动轨迹对膜孔形态的影响。



(a) 免耕播种单元振动仿真与试验分析



(b) 抛土过程仿真与试验对比



(c) 弹性齿对土壤和残膜扰动效果仿真与试验分析

图 5　DEM－MBD 耦合仿真示例

Fig. 5　Example of DEM－MBD coupling simulation

表 4 图 5 示例具体说明

Tab. 4 Specific description of example in Fig. 5

图号	具体说明
图 5a	仿真揭示了双圆盘开沟器与土壤的相互作用特性,分析了限深机构的振动响应规律,并追踪了仿形机构的运动轨迹。田间试验测试了播种单元的实际工作性能,框架上振动传感器所采集的数据为模型验证提供了有效依据[45]
图 5b	仿真揭示了刀具抛土阶段的土壤颗粒运动规律,包括运动轨迹和速度分布特征,并通过田间试验验证了仿真对动态抛土特性的预测准确性。该模型有效降低了试验成本,为刀具参数优化提供了可靠的数字化工具支撑[46]
图 5c	仿真预测土壤扰动深度为 119 mm、宽度 500 mm,试验实测深度 121 mm、宽度 725 mm。宽度差异源于土壤动态响应的复杂性和模型简化假设,但扰动形态特征高度吻合。薄膜回收率仿真值与试验值仅相差 1.8%,验证了 DEM - MBD 耦合模型在弹性齿参数优化中的精确性与可靠性[47]

李汉青等[49]通过 EDEM 建立稻种离散元模型模拟充种过程,结合 RecurDyn 构建排种器多体动力学模型,利用 External SPI 接口实现双向数据交互,分析弹簧力对成穴性能影响并验证播量调节机构动态精度。侯加林等[50]在 EDEM 中建立蒜种离散元模型,通过 RecurDyn 构建排种器刚体模型,采用 Hertz - Mindlin 接触模型设置材料参数,通过双向耦合仿真分析取种勺线速度、倾斜角与多重扰动装置的交互作用,验证了凹槽结构参数对清种过程的影响规律。金永旺等[51]采用 RecurDyn 建立多叶片鸭嘴栽植机构动力学模型,EDEM 构建离散元土壤模型,通过软件接口实现栽植器运动与土壤变形的实时交互,通过参数化设置鸭嘴叶片数、开合角度及电机转速,分析其对土壤扰动量、回流量及穴口规则性的影响规律。

在触土部件与耕作机械设计领域,WANG 等[46]基于 RecurDyn - EDEM 双向耦合技术建立链式开沟装置-黏土耦合模型,利用 RecurDyn 求解动力学方程并同步位姿至 EDEM,基于 Hertz - Mindlin 模型解析刀具-土壤接触,实现运动参数与碰撞力闭环迭代。差异步长协同计算精准表征链轮驱动下刀具轨迹与土壤扰动响应。朱惠斌等[52]运用离散元-多体动力学仿真优化了稻茬地双轴破茬免耕装置的甩刀、粉碎装置等部件参数,确定了双轴破茬免耕装置的最佳参数配置。李蒙良等[53]通过 RecurDyn 建立微垄装置刚体动力学模型,EDEM 构建离散土槽模型,基于 Hertz - Mindlin 接触参数模拟装置被动旋转与土壤的动态交互,结合单因素和正交旋转试验,量化腹板参数对微垄成形的影响规律。魏松等[54]基于 EDEM - RecurDyn 耦合接口构建仿形开沟装置与土壤颗粒的双向力学交互模型。采用 Hertz - Mindlin 接触参数和运动副约束,实现土壤颗粒与机械刚体实时动力学耦合,分析弹簧刚度与作业速度对开沟装置动态响应的作用机理。肖茂华等[55]利用离散元-多体动力学耦合技术,建立了土壤与旋耕刀相互作用的仿真模型,并基于不同转速下旋耕刀的阻力与扭矩变化的仿真模拟,设计了一种自激振动旋耕刀装置,减少旋耕刀的能量消耗。马若飞等[56]通过 ADAMS 建立地面仿形机构多体动力学模型,EDEM 构建含 Hertz - Mindlin 粘附模型的土壤离散元模型,实现机构运动与土壤动态响应的双向耦合仿真,通过实时交互土壤反作用力与机构位姿数据,验证仿形机构参数对地形检测精度的影响机制。

在清土清秸机械优化领域,FANG 等[47]采用离散元-多体动力学耦合仿真优化了链式犁层残膜回收机的捡膜装置。得出的最佳参数组合为齿尖曲率 0.03、动力轮角度 54°及齿间距 83 mm。优化后,膜回收率达到 91.27%。牛丛等[57]针对卧式柔性清土辊性能优化方法存在仿真成本高的问题,提取清土辊最小结构特征,通过离散元法与多柔性体动力学局部耦合仿真技术优化求解最小特征结构的最优作业性能。马帅等[58]利用离散元-多体动力学耦合仿真技术,对自动避障式葡萄藤防寒土清土机进行了设计优化。通过模拟整机避障清土过程,研究了不同操作参数对土壤清除率的影响,进而确定了最佳作业参数,提高了机具的清土效率和自动化水平。侯守印等[59]利用离散元-多体动力学耦合仿真,对设计的清秸装置进行了参数优化试验。试验中考虑了作业速度、工作偏角、螺旋升角和螺旋叶片数等因素,以清秸率和工作阻力为评价指标,通过仿真分析得出了最优参数组合。

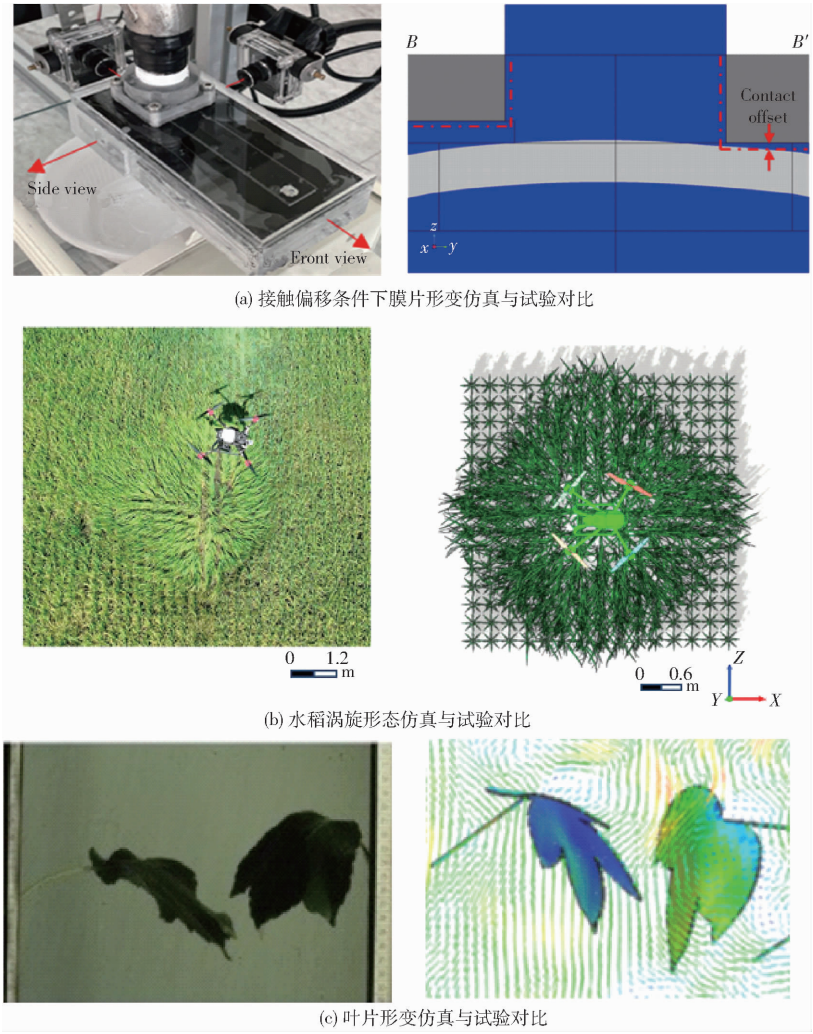
在收获机械优化领域,ZHANG 等[60]基于离散元-多体动力学耦合仿真设计白芦笋拉切末端执行器。该研究在 MBD 中构建执行器模型,在 DEM 中基于物理属性构建土壤-芦笋颗粒接触模型,通过实时交换运动状态与相互作用力实现双向闭环仿真,精准模拟了外场收获全过程。李航企等[61]利用离散元法构建滩涂底质与贝类混合物模型,多体动力学建立采收机简化机构模型,采用双向耦合计算方法模拟振动筛与螺旋滚刷协同作业过程,通过网格检测区域统计贝类运动轨迹及受力特性,为关键部

件参数优化提供依据。汪昕等[62]基于 EDEM – RecurDyn 耦合平台建立捡拾装置联合仿真模型，通过 RecurDyn 建立马铃薯捡拾装置多体动力学模型，并导入 EDEM 构建薯土运动场景，运用 Box – Behnken 试验设计和响应面法优化作业参数。

离散元–多体动力学耦合技术应用在播种、耕作、清土及收获等机械的设计优化中，可有效缩短研发周期，减少试验成本，提高农机具的实际作业效果，为分析和优化农机具的性能提供了强有力的工具。

2.4　连续介质流固耦合

连续介质流固耦合问题是一种既涉及固体求解又涉及流体求解，且两者均不能被忽略的数值模拟问题。在农业工程领域，连续介质流固耦合技术是研究基于连续介质假设的可变性固体在流场作用下的变化以及二者相互影响的重要手段。图 6 展示了连续介质流固耦合的部分应用场景，图 6a、6b、6c 分别引自文献[63]、[64]、[65]，表 5 进一步对图 6 所示应用场景进行了说明。



(a) 接触偏移条件下膜片形变仿真与试验对比

(b) 水稻涡旋形态仿真与试验对比

(c) 叶片形变仿真与试验对比

图 6　连续介质流固耦合仿真示例

Fig. 6　Fluid-solid coupling simulation example of continuous medium

表 5　图 6 示例具体说明

Tab. 5　Specific description of example in Fig. 6

图号	具体说明
图 6a	仿真与试验共同验证了接触偏移条件下膜片变形的物理一致性。仿真通过二维投影方法再现了膜片与出口壁接触过程中的对称变形，而试验则借助显微测量技术捕捉了实际变形形貌。仿真与试验的变形误差为 2.3%，表明接触偏移的引入有效避免了网格畸变，显著提升了仿真精度[63]
图 6b	试验展示了无人机下洗流与作物冠层耦合作用产生的“水稻涡旋”，揭示了植被动态响应特性。仿真基于双向流固耦合模型复现了椭圆形涡旋结构，验证了混合层动力学与植被运动协同预测模型的可靠性[64]
图 6c	仿真与试验揭示了棉花叶片在气流作用下的变形特性。仿真结果显示叶片倾角变化约 24.5°，叶尖位移达 18.7 mm，与试验观测到的 23.8°倾角变化和 17.9 mm 叶尖位移高度吻合。叶片均呈现一致的弯曲形态，验证了流固耦合模型对叶片动力学响应的适用性[65]

在流体机械设计优化领域,赵亚萍等[66]基于VOF模型与$k-\varepsilon$湍流模型构建三维流场,采用有限元法进行瞬态结构分析,通过动态压力映射将流场载荷传递至叶片网格,综合多物理场载荷后,经网格验证与双向耦合迭代建立连续介质流固耦合模型,揭示了流激振动与叶片动力响应的相互作用机制。ZHOU 等[67]通过连续介质流固耦合仿真分析了水射流与水、土层之间的相互作用,探讨了喷嘴直径、喷射角度等参数对土壤侵蚀及除草效果的影响,有效优化了水射流除草装置的工作参数,提高了除草效率。SEO 等[63]通过双向连续介质流固耦合仿真分析了压力补偿滴灌器的性能,验证了流体与隔膜之间的相互作用,并通过校准方法修正了流量预测。CHEN 等[68]通过连续介质流固耦合模拟与试验验证,揭示了压力补偿滴头恒流机制。研究表明,压力补偿腔能耗线性增长与迷宫通道能耗稳定间的动态平衡是维持恒流的核心,该平衡依赖弹性膜变形特性对过流面积的精准调节。郭强等[69]研究厚壁输水管在水锤作用下的连续介质流固耦合特性,建立了基于有限体积法的厚壁管耦合模型,结果表明该模型能更准确地预测厚径比大于 0.05 时的水锤和振动特性。

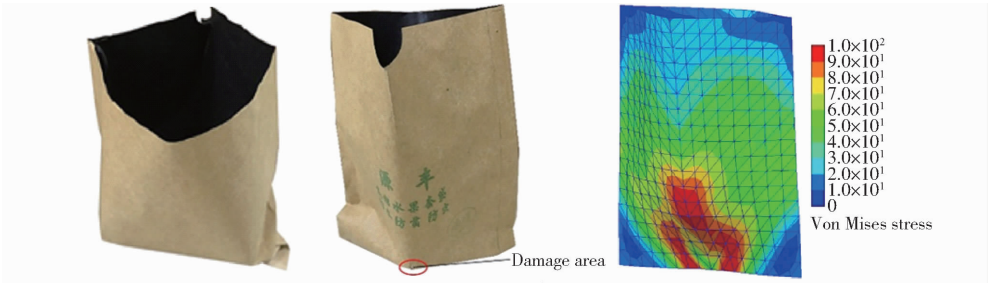
在植物与环境流体动态耦合领域,刘兴华等[70]基于 ANSYS 构建双向流固耦合模型,通过 Fluent 模拟气流场,Transient Structural 解析叶片动力学响应,利用 System Coupling 实现双向数据交互。结合正交试验与信赖域算法辨识参数,建立风速、弹性模量与叶片挠度的非线性映射模型。MAI 等[64]通过连续介质流固耦合仿真分析了四旋翼无人机下洗气流与水稻冠层的相互作用。研究发现,无人机气流引起水稻植株的弯曲变形,这种变形增强了喷雾液滴的穿透力、附着力和沉积性,从而改善了喷洒效果。FANG 等[71]结合格子玻尔兹曼-有限元-浸入边界耦合方法,模拟植被冠层混合层流场与柔性植被振动的双向耦合作用。通过隐式迭代与 Aitken 松弛技术提升低密度比工况的数值稳定性,构建参数空间并验证网格无关性,揭示了涡结构与植被动力学间的双向作用机制。YAN 等[72]基于双向连续介质流固耦合模型模拟分析了葡萄叶片在辅助气流作用下的变形行为。结果表明,叶片变形受生长特性和气流参数共同影响,并提出应根据叶片特性优化气流参数,以提高农药喷雾效果。CUI 等[65]提出了一种基于有限元和格子玻尔兹曼求解器的双向连续介质流固耦合方法,用于分析空气辅助喷雾过程中棉花叶片与气流的动态相互作用。研究表明,当气流速度为 10 m/s 时,叶片在约 0.4 s 后达到动态稳定状态,并且冠层内部的气流速度分布呈现复杂且不均匀的特点。同年,CUI 等[73]进一步结合了连续介质流固耦合仿真与机器学习,分析了空气辅助喷雾器在棉花冠层中气流的分布。研究显示,合理的气流速度和冠层结构对喷雾效果有显著影响,随机森林模型在预测精度和计算效率上表现最佳。WANG 等[74]提出一种连续介质流固耦合模拟方法,通过浸入边界法实现流体与结构的双向强耦合。该方法在湍流环境下分析植被茎秆和涡轮叶片时发现,单根柔性茎可降低阻力 20%,但在密集植被群中因协同效应柔性影响减弱;涡轮叶片因柔性变形导致功率下降 40%。

连续介质流固耦合技术能深入探究基于连续介质假设的流体与固体之间的相互作用,为植物与环境流体动态耦合、流体机械设计优化等领域提供了高精度的数值模拟工具,在农业工程领域展现了独特的应用价值。

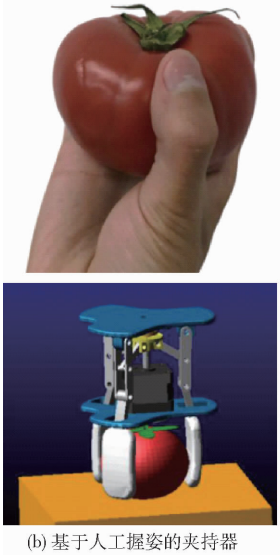
2.5 刚柔耦合

在农业机械设计领域,将运动组件简化为刚性系统可以满足常规设计精度。但在构件变形对性能影响显著的场合,刚性系统模型不足以达到高精度要求,需将关键构件模拟为柔性体以精确描述其动态响应。刚柔耦合的交互作用定义了柔性多体系统动力学的特性,使其与多刚体及结构动力学模型显著区分。图 7 展示了刚柔耦合在机械设计与动力学分析领域的实际应用场景,图 7a、7b、7c 分别引自文献[75]、[76]、[77],表 6 进一步对图 7 所示应用场景进行了说明。

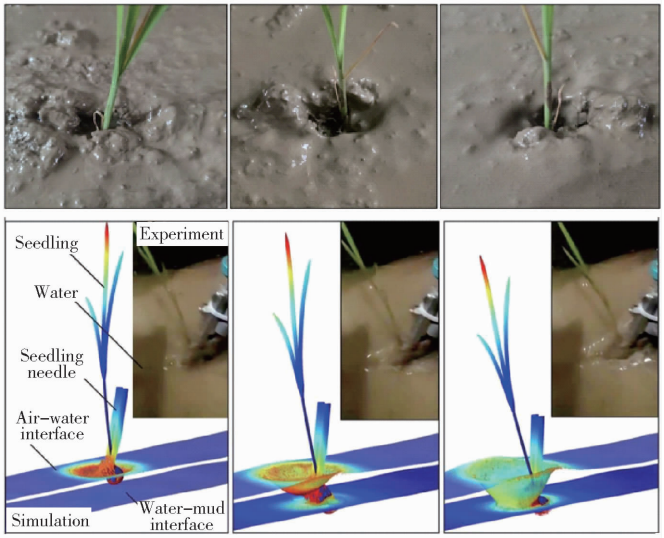
在柔性夹持与抓取机构设计方面,刘明勇等[78]采用 Abaqus 对夹持轮和传动轴进行柔性化处理和构建刚度-阻尼接触模型,通过多体动力学仿真分析输送振动特性,运用单因素试验与响应面法优化参数,最终实现机械-生物耦合动态特性的解析。XIA 等[75]通过刚性开袋机构和柔性双层水果纸袋的刚柔耦合仿真实验,发现滑块冲程对纸袋的等效应力分布、整体变形和开口尺寸有显著影响,过大的冲程会导致纸袋破裂率增高,而滑块速度对开袋效果影响不显著,但能缩短开袋时间。韩明兴等[79]基于 ADAMS 建立夹持装置刚柔耦合模型,将油菜茎秆处理为柔性体,夹持装置部件设为刚体,通过接触副实现相互作用。采用几何法对茎秆网格划分生成柔性体,设置摩擦因数并开展多因素动力学仿真,分析弹簧刚度对夹持稳定性的影响。ZHENG 等[76]基于 ANSYS 与 ADAMS 平台建立番茄-夹持器耦合模型,采用显式动力学求解器实现刚柔体双向流固耦合。研究通过多物理场协同分析硅胶指套应力松弛特



(a) 滑块最大行程下袋体变形仿真与试验



(b) 基于人工握姿的夹持器运动学匹配验证



(c) 水-泥界面流动特性与凹坑形貌仿真与试验

图 7　刚柔耦合仿真示例

Fig. 7　Example of rigid-flex coupling simulation

表 6　图 7 示例具体说明

Tab. 6　Specific description of example in Fig. 7

图号	相关介绍
图 7a	仿真结果表明，在 25 mm 滑块行程作用下，包装袋底部出现等效应力集中现象，表明存在较高的损伤风险。试验观察到袋口发生严重形变且底部出现可见破损，实际损伤形貌与模型预测的应力分布及失效模式高度吻合，证实滑块行程过大是导致失效的关键因素[75]
图 7b	仿真与试验数据对比，验证了仿生夹具设计的多维度匹配性。基于人手半包围握姿，仿真模型在食指-环指（90° ± 3.2°）、拇指-环指（135° ± 5.1°）的空间角度下重建了三指运动轨迹。试验数据显示，当指宽为 30 mm 时，手指与番茄的接触面积达 1 800 mm²，与仿真心形轮廓的接触模式具有一致性，验证了仿生抓握力的空间分布特性[76]
图 7c	模拟结果表明，当根-土复合材料以 2 m/s 的速度贯入水层时，水流绕其快速流动形成向外扩散的凹坑，而高粘度泥浆在压缩作用下形成边缘微隆的缓慢变形。试验数据验证了水层凹陷与泥浆表面抬升现象在时空演变上具有一致性[77]

性，结合参数化扫描优化指端曲率与柔性层厚度配比，并利用瞬态接触仿真验证界面能量传递机制。

在移栽种植机械方面，别琼等[80]基于 ADAMS 构建取苗爪刚柔耦合仿真模型，将苗爪片柔性化处理，其余部件设为刚体，通过设置材料属性、连接副及接触参数，模拟气缸驱动下预弯苗爪片的弹性变形过程，分析爪尖入钵轨迹及间距变化，验证取苗爪与穴孔壁的无干涉特性。周海丽等[81]基于 ANSYS 建立苗爪片柔性体模型，并导入 ADAMS 与刚体部件进行动力学耦合仿真，通过分析爪片尖点运动轨迹和接触力变化验证取苗轨迹合理性，最终确定爪片结构参数，实现了移植手结构的动态性能优化。王寒松等[82]基于 RecurDyn 建立移栽机械臂刚柔耦合模型，通过刚体导轨与柔性机械爪的协同仿真，设定三次/五次多项式驱动函数，结合同步带传动特性分析夹取针末端动态响应，优化运动控制参数。XUE 等[77]基于 CFD 构建机械-秧苗-土壤耦合模型，采用 Cahn－Hilliard－Navier－Stokes 方程模拟三相流，并结合动态网格实现双向耦合；通过罚函数法建立针齿-秧茎接触模型，利用土壤试验标定根土参数与泥浆特性，揭示机械-生物体互作机制。

在作物收获与处理机械方面，高自成等[83]设计了一款悬挂振动式油茶果采摘执行机构，并利用 ANSYS 和 ADAMS 软件进行刚柔耦合仿真分析。实

验表明,当激振频率为 15 Hz、夹持高度为 1 300 mm 时,落果率和落花率分别为 95.1% 和 4.8%,实现了较高的采摘效率和较低的落花率。张博文等[84]基于 ADAMS 软件构建切割装置与麦冬植株的刚柔耦合模型,运用 Flex 模块对根须进行柔性化处理,设置接触碰撞参数后开展正交仿真试验,分析刀具与根茎接触力及形变变化,并结合响应面试验优化切割参数。针对海棠果低效采摘问题,ZHAO 等[85]开发了一款树干振动采摘机。试验通过刚柔耦合仿真分析树干振动特性,侧枝加速度随频率增大至 12.7 Hz 时达峰值,超此值后衰减,与田间试验结论一致。付乾坤等[86]利用刚柔耦合及验证实验,确定了轮式刚柔耦合摘穗机构的最优参数。研究表明,缓冲弹簧和柔性触穗表面在减少碰撞时间和冲击力方面发挥了关键作用。李海同等[87]在 ADAMS 软件中建立了割晒机-油菜植株刚柔耦合模型,通过仿真试验研究了油菜植株铺放过程。结果显示,植株高度、质量密度等因素会显著影响铺放角。YU 等[88]开发了一种浮动式切根机构,并构建刚柔耦合动态仿真模型验证性能。仿真揭示了切割过程中根部扰动与瞬时惯性力的抗弯机制,验证了高速切割下 3 mm 最小残根距离和 48.48 mm 最大根质心偏移量的有效性。WANG 等[89]基于刚柔耦合仿真分析甘蔗收获机的螺旋式分离器与倒伏甘蔗的交互作用。试验通过建立分离器与茎秆动态模型,模拟不同倒伏姿态和作业速度下的抬升过程,发现侧向倒伏时质心抬升速度最快且滑移最少,侧前倒伏时抬升高度波动大、效率低。

刚柔耦合技术在农业工程领域的应用,为精确模拟和优化农业机械在复杂作业条件下的性能提供了新的视角和方法。通过将部分构件视为柔性体,该技术能更真实地反映机械系统在实际作业中的动态行为,特别是在作物收获机械设计优化、柔性动力学分析以及柔性加工装备设计等操作中。

3 技术难题与发展瓶颈

得益于计算机技术的飞速发展和仿真软件的日益成熟,耦合仿真技术已成为促进农业机械设备研究设计水平提升、缩短研发周期、降低试验成本、增强工作性能和延长使用寿命的重要手段,但随着应用复杂性的增加,其面临以下相关问题与挑战。

(1)模型构建与精确性问题:耦合仿真涉及多个物理场的相互作用,如何在保证模型精确性的同时,避免过度复杂化,是当前面临的一大挑战。简化模型可能导致仿真结果失真,而高度复杂的模型则可能需要巨大的计算资源;农业工程中的问题往往涉及从微观到宏观的不同尺度,如何有效地实现多尺度耦合仿真,确保各尺度间的信息传递和一致性,也是当前技术的一个难题;由于耦合仿真涉及多个物理场,模型的验证与确认变得更加复杂。缺乏足够的实验数据或基准案例,使得验证难度高。

(2)算法与计算资源问题:不同物理场之间的耦合算法需要高度精确和稳定,但目前许多耦合算法在处理非线性相互作用和动态过程时仍存在局限性,算法的开发和优化是技术发展的关键;在计算资源的需求方面,耦合仿真通常需要大量的计算资源,尤其是对于复杂的农业工程问题,高性能计算资源的需求与可用性之间存在差距。

(3)数据集成与处理问题:耦合仿真需要集成不同来源和类型的数据,难以在确保数据质量和仿真结果可靠性的前提下,处理和整合这些数据。同时,不同仿真软件间的数据交互障碍,如接口不兼容和格式差异,进一步加剧了集成难度。输入数据的准确性也受到实际工况复杂性和变化性的影响。

(4)仿真软件设计问题:仿真软件的用户界面和操作流程较为复杂,学习门槛高,非专业用户难以有效地使用。此外,仿真软件与其他工程软件之间的集成度不足,导致数据交换和流程衔接上存在障碍,影响了整体的工作效率和软件的应用范围。

(5)标准化问题:耦合仿真技术的标准化工作尚显不足,主要体现在模型参数的不一致性、仿真流程的多样性、数据交换格式的差异性以及较差的互操作性等方面。这些因素增加了仿真结果比较和验证的难度,限制了技术的集成与应用,阻碍了技术知识的有效传播和行业间的交流合作。

4 发展趋势分析

现代农业技术的不断发展,使得农业装备日益复杂,这对耦合仿真技术在优化设计中的应用提出了更为严苛的要求。在此背景下,耦合仿真技术在农业工程研究领域呈现以下发展趋势。

(1)多尺度建模与智能验证体系革新

耦合仿真技术将进一步推动 3 个及以上的物理场模型深度融合,构建跨尺度协同仿真框架,并通过自适应网格细化技术动态分配计算资源,实现从微观颗粒行为到宏观机械响应的耦合仿真。耦合仿真模型的智能验证技术,通过嵌入机器学习算法构建动态反馈机制,实现多维度交互模型的自适应校准。该技术融合传感器数据与仿真参数,智能优化模型精度,确保复杂耦合作用仿真的可信度,为农机系统数字化验证提供智能化支撑。

(2)高性能算法与算力创新

针对非线性耦合问题的复杂性,新型算法将重点解决动态交互中数值稳定性与计算效率的矛盾。分布式异构计算架构整合边缘设备的实时计算能力与云端超算资源,支持大规模农田场景的并行仿真。隐式-显式混合算法(IMEX)的开发将优化瞬态冲击问题的求解效率。基于量子计算原理的并行优化框架可能为超大规模耦合仿真提供算力突破。云边协同的弹性计算架构与轻量化算法能进一步推动算力资源共享,支持中小型机构实现高效仿真应用。

(3)数据处理与交互模式智能化升级

多源异构数据的智能处理体系加速发展。机器学习赋能的专用清洗算法与动态参数预测模型不断完善,实现农田环境参数与机械工况特征的精准提取。基于语义解析的多模态数据融合技术可突破数据孤岛限制,为精准仿真提供高质量数据基础。人机交互模式持续更新,知识图谱驱动的智能向导系统通过语义网络构建场景适配规则,可动态推荐最优耦合策略。交互模式的智能化升级将显著提升仿真技术在农业工程中的普适性。

(4)标准化建设

覆盖模型构建、接口规范与验证基准的标准化体系加速形成。基于统一数据交换格式的接口协议将解决不同仿真软件间的兼容性问题,促进多物理场耦合仿真的数据互通。明确模型参数标定、验证流程与结果评估的标准化方法,能降低技术集成门槛,推动耦合仿真技术从科研工具向工程应用转化。

(5)智能融合与场景扩展突破

深度学习驱动的参数自优化系统与智能仿真代理重塑建模范式。环境-经济-社会多目标协同优化框架,通过集成气候、土壤及生物动力学等因素,实现了生态效益的量化评估。生物-机械耦合建模与仿生学创新推动农业机器人群体智能仿真,支持复杂农田任务自主决策,扩展精准农业应用边界。

参　考　文　献

[1] 侯秀宁, 张学敏, 徐静, 等. 基于实际作业工况的拖拉机能效评价[J]. 农业工程学报, 2023, 39(21): 29 - 35.
HOU Xiuning, ZHANG Xuemin, XU Jing, et al. Evaluating the energy efficiency of tractors under actual operating conditions [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(21): 29 - 35. (in Chinese)

[2] 师丽娟, 杨敏丽. 基于科学计量的中国农业工程研究热点探析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 2): 430 - 438.
SHI Lijuan, YANG Minli. Ananlysis on research hotspots in agricultural engineering in China based on scientometrics[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp. 2): 430 - 438. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 詹顺达, 罗红平, 刘桂贤, 等. 铲削成形多孔翅片强化散热有限元分析与测试[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(12): 1914 - 1919.
ZHAN Shunda, LUO Hongping, LIU Guixian, et al. Analysis and experimental study of enhanced heat dissipation of perforated fin radiator formed in planning process[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(12): 1914 - 1919. (in Chinese)

[5] 何莉萍, 原江鑫, 李耀东. BMS 电路板多模块协同热-力耦合建模及仿真分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(8): 135 - 144.
HE Liping, YUAN Jiangxin, LI Yaodong. Thermal-stress coupling modeling and simulation analysis of multiple modules in BMS circuit board[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(8): 135 - 144. (in Chinese)

[6] HAQUE A, SALAMA A, LO K, et al. Surface and groundwater interactions: a review of coupling strategies in detailed domain models[J]. Hydrology, 2021, 8: 35.

[7] 姜振平. 基于 CUDA 的离散元法 DEM 实现方法的改进[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
JIANG Zhenping. On improvement of DEM-implementation based on CUDA[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)

[8] CHEN X, HOU T, LIU S, et al. Design of a micro-plant factory using a validated CFD model[J]. Agriculture, 2024, 14(12): 2227.

[9] CHEN P, TAO W, ZHU L, et al. Effect of varying remote cylinder speeds on plough-breast performances in alternative shifting tillage[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 181: 105963.

[10] 杨泽天. 固体力学的发展及其在航空航天工程中的应用研究[J]. 中国设备工程, 2022(13): 116 - 118.

[11] 李磊, 窦昕捷. 有限单元法数值模拟研究现状及其发展综述[C]//北京力学会第 30 届学术年会论文集, 2024: 415 - 416.

[12] BAIDHE E, CLEMENTSON C L. A review of the application of modeling and simulation to drying systems for improved grain and seed quality[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 222: 109094.

[13] HORABIK J, MOLENDA M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: a review [J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 206 – 225.

[14] 梁绍敏. 航天器着陆过程分析的离散元-有限元-多体动力学耦合算法及应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
LIANG Shaomin. DEM – FEM – MBD coupling algorithm for spacecraft landing process analysis and applications[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)

[15] 吴欣烨, 虞晓巍, 胡敏,等. 基于流固耦合仿真的变压器离心风机叶片断裂故障分析[J]. 水动力学研究与进展, 2025, 40(1): 52 – 60.
WU Xinye, YU Xiaowei, HU Min, et al. Fracture fault analysis of transformer centrifugal fan blade based on fluid-structure interaction simulation[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2025, 40(1): 52 – 60. (in Chinese)

[16] YIN J, CHEN Z, LV S, et al. Design and fatigue life analysis of the rope-clamping drive mechanism in a knotter[J]. Agriculture, 2024, 14: 1254.

[17] PÁSTHY L, FARKAS Z J, HABA T, et al. Development of a multi-way coupled discrete-finite element method simulation procedure for modelling soil-passive vibration tool interaction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 216: 108459.

[18] DRATT M, KATTERFELD A. Coupling of FEM and DEM simulations to consider dynamic deformations under particle load [J]. Granular Matter, 2017, 19: 49.

[19] WANG J, LI C, ZHU Z, et al. Bionic stirring device for horizontal composter to improve aeration efficiency: design and optimisation using discrete and finite element methods[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 225: 109257.

[20] ZHU D, SHI M, YU C, et al. Tool-straw-paddy soil coupling model of mechanical rotary-tillage process based on DEM – FEM [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108410.

[21] 张青松, 蔡家顺, 于良航, 等. 冷浸田起垄平整装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 50 – 59.
ZHANG Qingsong, CAI Jiashun, YU Lianghang, et al. Design and experiment of ridging leveling device for cold waterlogged paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 50 – 59. (in Chinese)

[22] 张智泓, 陈朝阳, 赖庆辉, 等. 仿生布利冈结构农机耐磨触土部件设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 28 – 37.
ZHANG Zhihong, CHEN Zhaoyang, LAI Qinghui, et al. Design and experiments of the bouligand structure inspired bionic wear resistant soil-engaging component for the agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(1): 28 – 37. (in Chinese)

[23] 曹成茂, 向旺, 罗坤, 等. 抛推组合式草土分离前胡除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 106 – 114.
CAO Chengmao, XIANG Wang, LUO Kun, et al. Design and experiment of *Radix peucedani* weeding machine separating weeds and soil with combination of throwing and pushing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 106 – 114. (in Chinese)

[24] KEŠNER A, CHOTĚBORSKÝ R, LINDA M, et al. Stress distribution on a soil tillage machine frame segment with a chisel shank simulated using discrete element and finite element methods and validate by experiment[J]. Biosystems Engineering, 2021, 209: 125 – 138.

[25] 李骅, 朱振明, 王居飞, 等. 滚筒式堆肥反应器通风搅拌系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 395 – 404.
LI Hua, ZHU Zhenming, WANG Jufei, et al. Design and test of aeration and mixing system for rotary composting reactor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 395 – 404. (in Chinese)

[26] ZHAO Z, HUANG H, YIN J, et al. Dynamic analysis and reliability design of round baler feeding device for rice straw harvest [J]. Biosystems Engineering, 2018, 174: 10 – 19.

[27] WANG J, ZHU X, ZHU Z, et al. Enhancing oxygen-dissolving capacity of rotary drum food waste composting: tumbling process optimization and experimental validation with discrete and finite element methods[J]. Agronomy, 2024, 14(11): 2641.

[28] GAO A, DONG Q, SUN W. Study on flat die wear characteristics in flat die pelletizing with different material ratios based on DEM – FEM[J]. Agriculture, 2024, 14(6): 894.

[29] WANG L, LIAO Y, LI M, et al. Motion characteristics of rapeseeds and wheat seeds within mixing components of air-assisted centralized metering device based on DEM – CFD[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 221: 108986.

[30] LIU W, ZENG S, CHEN X. Design and experiment of spiral step cleaning device for ratooning rice based on CFD – DEM coupling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 109207.

[31] TANG Z Y, ZENG Z W, WU S L, et al. Optimizing soil resistance and disturbance of bionic furrow opener for paddy field based on badger claw using CFD – DEM method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109549.

[32] 廖宜涛, 王传奇, 施彬彬, 等. 油麦兼用气送式排种系统高通量混种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 134 – 146.
LIAO Yitao, WANG Chuanqi, SHI Binbin, et al. Design and text of high-throughput seed mixing device for rapeseed and wheat with air-fed seed discharging system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 134 – 146. (in Chinese)

[33] 王龙宝, 杨翰瑜, 王庆杰, 等. 小麦气流辅助直线投种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 111 – 120.

WANG Longbao, YANG Hanyu, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of air-assisted linear seeding device for wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 111 – 120. (in Chinese)

[34] 王磊, 廖庆喜, 廖宜涛, 等. 气送式排肥系统分配装置结构型式对排肥性能的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 24 – 34, 315.
WANG Lei, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Effects of distributor types on fertilizing performance in an air-assisted applicator [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(7): 24 – 34, 315. (in Chinese)

[35] 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)

[36] 衣淑娟, 张淯朋, 戴智博, 等. 玉米品字形高速精量播种机正压气流导槽式导种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 261 – 274.
YI Shujuan, ZHANG Yupeng, DAI Zhibo, et al. Design and experiment of positive pressure airflow guide groove seed guiding device for maize detal-row high-speed precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 261 – 274. (in Chinese)

[37] 王磊, 周国威, 张青松, 等. 丘陵山区轻简型油菜种-肥同播同施集排装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 89 – 101.
WANG Lei, ZHOU Guowei, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of lightweight and simple centralized seeding-fertilizing device for rapeseed in hilly and mountainous areas [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 89 – 101. (in Chinese)

[38] 徐鹏庆, 戴飞, 赵武云, 等. 胡麻脱粒清选装置作业过程仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 161 – 171.
XU Pengqing, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Simulation analysis and experiment of operation process of flax threshing and cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 161 – 171. (in Chinese)

[39] ZHANG Z, SHI G, LI J, et al. Analysis of jujube movement characteristics under positive and negative pressure airflow based on CFD – DEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 210: 107902.

[40] 冯鑫, 王立军, 于琨蒙, 等. 玉米籽粒清选波浪筛机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 142 – 154.
FENG Xin, WANG Lijun, YU Kunmeng, et al. Design and experiment of mechanism of wave screen for maize grain cleaning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 142 – 154. (in Chinese)

[41] 张黎骅, 邱清宇, 秦代林, 等. 大豆玉米兼用清选装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 21 – 30.
ZHANG Lihua, QIU Qingyu, QIN Dailin, et al. Design and test of the dual-purpose cleaning device for soybean and corn[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(15): 21 – 30. (in Chinese)

[42] 鲍国丞, 张振东, 杨晓微, 等. 基于康达效应的玉米小区收获机除杂装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 234 – 243.
BAO Guocheng, ZHANG Zhendong, YANG Xiaowei, et al. Design and experiment of separating impurities device for corn plot test harvester based on Coanda effect[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 234 – 243. (in Chinese)

[43] 谢建华, 李沅泽, 刘迎春, 等. 分段滚筒式气力协助白星花金龟幼虫转化残膜混合物分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 329 – 341, 428.
XIE Jianhua, LI Yuanze, LIU Yingchun, et al. Design and test of segmented drum pneumatically assisted potosia *Brevitarsis larva* residul film mixture separation device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 329 – 341, 428. (in Chinese)

[44] FU M, ZHANG H, WANG Y, et al. Parameter optimization and experiment of air-fed rubber tree pesticide application device based on CFD – DEM coupling method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 225: 109247.

[45] HE D, LI H W, HE J, et al. Research on vibration characteristics of no-tillage seeding unit based on MBD – DEM coupling [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 230: 109877.

[46] WANG J, XU Y, WANG C, et al. Design and simulation of a trenching device for rice straw burial and trenching based on MBD – DEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 207: 107722.

[47] FANG W, WANG X, HAN D, et al. Parameter optimization and disturbance analysis of the film picking device of the chain-type plough layer residual film recovery machine based on DEM – MBD coupling [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 222: 109041.

[48] 廖庆喜, 裴立民, 张青松, 等. 油菜铺膜打孔播种机滚动式割膜打孔装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 85 – 98.
LIAO Qingxi, PEI Limin, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of rolling film cutting and hole punching device for rapeseed seeder with film mulching and perforating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 85 – 98. (in Chinese)

[49] 李汉青，颜丙新，武广伟，等. 双轨道弹射式水稻精量直播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(2)：60－72.
LI Hanqing，YAN Bingxin，WU Guangwei，et al. Design and experiment of double-track ejection rice precision direct seeding metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(2)：60－72.（in Chinese）

[50] 侯加林，方立志，张海阔，等. 多重扰动清种式大蒜单粒取种排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(1)：65－75，163.
HOU Jialin，FANG Lizhi，ZHANG Haikuo，et al. Design and experiment of multi-disturbance cleaning and single-seed sowing device for garlic[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(1)：65－75，163.（in Chinese）

[51] 金永旺，胡建平，吕俊鹏，等. 蔬菜自动移栽机多叶片式鸭嘴栽植机构设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(增刊1)：217－229.
JIN Yongwang，HU Jianping，LÜ Junpeng，et al. Design and experiment of multi-blade duck bill planting mechanism for automatic vegetable transpl anter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(Supp. 1)：217－229.（in Chinese）

[52] 朱惠斌，吴宪，白丽珍，等. 基于 EDEM－ADAMS 仿真的稻茬地双轴破茬免耕装置研制[J]. 农业工程学报，2022，38(19)：10－22.
ZHU Huibin，WU Xian，BAI Lizhen，et al. Development of biaxial stubble breaking no-tillage device for rice stubble field based on EDEM－ADAMS simulation[J]. Transactions of the CSAE，2022，38(19)：10－22.（in Chinese）

[53] 李蒙良，廖庆喜，裴立民，等. 油菜直播机旋切式微垄种床制备装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(5)：47－58，90.
LI Mengliang，LIAO Qingxi，PEI Limin，et al. Design and experiment of rotary-cut micro-ridge seedbed device for rapeseed direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(5)：47－58，90.（in Chinese）

[54] 魏松，张驰海，詹振宇，等. 基于 DEM－MBD 耦合的棉花直播机仿形开沟过程机理仿真与优化试验[J]. 农业机械学报，2025，56(2)：275－289，341.
WEI Song，ZHANG Chihai，ZHAN Zhenyu，et al. Simulation and optimization test of imitation furrowing process of cotton direct seeding machine based on DEM－MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(2)：275－289，341.（in Chinese）

[55] 肖茂华，钮约，汪开鑫，等. 自激振动旋耕刀设计与减扭降耗性能分析[J]. 农业机械学报，2022，53(11)：52－63.
XIAO Maohua，NIU Yue，WANG Kaixin，et al. Design of self-excited vibrating rotary tiller and analysis of its performance in reducing torsion and consumption[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(11)：52－63.（in Chinese）

[56] 马若飞，伟利国，赵博，等. 基于多传感器数据融合的旋耕耕深检测系统研究[J]. 农业机械学报，2024，55(9)：52－64.
MA Ruofei，WEI Liguo，ZHAO Bo，et al. Rotary tillage depth detection based on multi-sensor data fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(9)：52－64.（in Chinese）

[57] 牛丛，徐丽明，闫成功，等. 基于局部建模方法的卧式柔性清土辊性能优化[J]. 农业工程学报，2023，39(1)：50－59.
NIU Cong，XU Liming，YAN Chenggong，et al. Optimization of the performance of the horizontal flexible soil-clearing roller using partial modeling[J]. Transactions of the CSAE，2023，39(1)：50－59.（in Chinese）

[58] 马帅，徐丽明，袁全春，等. 自动避障式葡萄藤防寒土清土机研制[J]. 农业工程学报，2020，36(7)：1－10.
MA Shuai，XU Liming，YUAN Quanchun，et al. Development of automatic obstacle-avoiding grapevine cold-proof soil cleaners[J]. Transactions of the CSAE，2020，36(7)：1－10.（in Chinese）

[59] 侯守印，纪张驰，薛东辉，等. 适配免耕播种单体的清秸装置改进设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(7)：111－122.
HOU Shouyin，JI Zhangchi，XUE Donghui，et al. Improved design and test of straw cleaning device suitable for no-tillage seeding unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(7)：111－122.（in Chinese）

[60] ZHANG P，TUAN J，WANG D，et al. Development of a novel pull-cutting end-effector for ex-situ robotic harvesting of white asparagus based on MBD－DEM coupling simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2023，205：107641.

[61] 李航企，张国琛，刘法伟，等. 基于 DEM－MBD 仿真的滩涂贝类振动采收设备设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(增刊2)：361－370.
LI Hangqi，ZHANG Guochen，LIU Fawei，et al. Design and testing of mudflat shellfish vibrating harvester based on DEM－MBD simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(Supp. 2)：361－370.（in Chinese）

[62] 汪昕，杨德秋，刘萌萌，等. 自走式马铃薯捡拾机捡拾装置参数优化与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(增刊2)：20－29.
WANG Xin，YANG Deqiu，LIU Mengmeng，et al. Parameter optimization and experiment of picking device of selfpropelled potato collecting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54((Supp. 2)：20－29.

(in Chinese)

[63] SEO B H, LEE S, LEE J H, et al. Efficient two-way fluid-structure interaction simulation for performance prediction of pressure-compensating emitter[J]. Biosystems Engineering, 2024, 244: 53 – 66.

[64] MAI Y, WEN S, ZHANG J, et al. Analysis of the two-way fluid-structure interaction between the rice canopy and the downwash airflow of a quadcopter UAV[J]. Biosystems Engineering, 2025, 250: 343 – 364.

[65] CUI H, WANG C, LIU X, et al. Dynamic simulation of fluid-structure interactions between leaves and airflow during air-assisted spraying: a case study of cotton[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 209: 107817.

[66] 赵亚萍, 党梦帆, 冯建军, 等. 自由液面及水体重力对贯流式水轮机叶片应力应变的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 52 – 60.
ZHAO Yaping, DANG Mengfan, FENG Jianjun, et al. Effects of free surface and water gravity on the stress-strain of tubular turbine blades[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6): 52 – 60. (in Chinese)

[67] ZHOU W, SONG K, SUN X, et al. Design optimization and mechanism analysis of water jet-type inter-plant weeding device for water fields[J]. Agronomy, 2023, 13(5): 1305.

[68] CHEN X L, WEI Z Y, MA R J, et al. Research on the compensation mechanism of pressure compensating emitters based on numerical simulation and visualisation experiment[J]. Biosystems Engineering, 2025, 253: 104125.

[69] 郭强, 周建旭, 黄亚, 等. 考虑流固耦合的厚壁输水管水锤和振动特性分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 137 – 144.
GUO Qiang, ZHOU Jianxu, HUANG Ya, et al. Water hammer and vibration analysis of a thick-wall pipe considering fluid-structure interaction[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(21): 137 – 144. (in Chinese)

[70] 刘兴华, 苑进, 李扬, 等 采用双向流固耦合方法构建辅助气流作用下棉花叶片变形模型[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 68 – 76.
LIU Xinghua, YUAN Jin, LI Yang, et al. Deformation modelling of cotton leaf under assisted airflow using bidirectional fluid-structure coupling method[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 68 – 76. (in Chinese)

[71] FANG Z, GONG C, REVELL A, et al. Fluid-structure interaction of a vegetation canopy in the mixing layer[J]. Journal of Fluids and Structures, 2022, 109: 103467

[72] YAN C, NIU C, MA S, et al. CFD models as a tool to analyze the deformation behavior of grape leaves under an air-assisted sprayer[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107112.

[73] CUI H, WANG C, LIU X, et al. Prediction of the distribution of airflow within the cotton canopy using fluid-structure interaction simulation and machine-learning methods[J]. Biosystems Engineering, 2023, 232: 51 – 66.

[74] WANG M, AVITAL E J, BAI X, et al. Fluid-structure interaction of flexible submerged vegetation stems and kinetic turbine blades[J]. Computational Particle Mechanics, 2020, 7: 839 – 848.

[75] XIA H, ZHEN W, CHEN D, et al. Rigid-flexible coupling contact action simulation study of the open mechanism on the ordinary multilayer fruit paper bag for fruit bagging[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 105414.

[76] ZHENG Y, PI J, GUO T, et al. Design and simulation of a gripper structure of cluster tomato based on manual picking behavior[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 974456.

[77] XUE K, GAO K, KUANG F, et al. Machinery-plant-paddy soil coupling model based numerical simulation method of mechanical transplanting process of big rice seedling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107053.

[78] 刘明勇, 朱林, 欧阳周寰, 等. 基于刚柔耦合模型的黄鳝剖切机仿真及试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 63 – 71.
LIU Mingyong, ZHU Lin, OUYANG Zhouhuan, et al. Simulation and experiment of *Monopterus albus* dissecting machine using rigid-flexible coupling model[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(20): 63 – 71. (in Chinese)

[79] 韩明兴, 李淼, 段宏兵, 等. 植物茎秆柔性夹持装置刚柔耦合仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 109 – 118.
HAN Mingxing, LI Miao, DUAN Hongbing, et al. Rigid-flexible coupling simulation and experiment of plant stem clamping device based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 109 – 118. (in Chinese)

[80] 别琼, 颜华, 赵翔烽, 等. 漂浮穴盘苗取苗爪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 1): 230 – 236, 269.
BIE Qiong, YAN Hua, ZHAO Xiangfeng, et al. Design and experimentation of seedling gripper for floating tray seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 1):230 – 236, 269. (in Chinese)

[81] 周海丽, 刘珂, 童俊华, 等. 温室穴盘钵苗成排取苗移植手部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 82 – 90.
ZHOU Haili, LIU Ke, TONG Junhua, et al. Design and test of row picking end-effectors for potted seedlings in greenhouses [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 82 – 90. (in Chinese)

[82] 王寒松,杨自栋,韩党威, 等. 无纺布容器苗自动换钵移盆二次移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 84 – 92.
WANG Hansong, YANG Zidong, HAN Dangwei, et al. Design and experiment of automatic bowl changing and pot shifting secondary transplanting machine for non-woven container seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 84 – 92. (in Chinese)

(下转第 149 页)

[22] 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 experimental 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)

[23] 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. Calibration of simulation parameters of Xinjiang cotton straw based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1):76 – 84, 108. (in Chinese)

[24] 朱惠斌,钱诚,白丽珍,等. 基于 Plackett – Burman 试验设计与响应面法优化玉米秸秆离散元模型[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(12):221 – 231.
ZHU Huibin, QIAN Cheng, BAI Lizhen, et al. Optimization of discrete element model of corn stalk based on Plackett – Burman design and response surface methodology[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(12):221 – 231. (in Chinese)

[25] 廖宜涛,廖庆喜,周宇,等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6):73 – 82.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6):73 – 82. (in Chinese)

(上接第 37 页)

[83] 高自成, 赵凯杰, 李立君, 等. 悬挂振动式油茶果采摘执行机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 9 – 17.
GAO Zicheng, ZHAO Kaijie, LI Lijun, et al. Design and experiment of suspended vibratory actuator for picking *Camellia olerfera* fruits[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21): 9 – 17. (in Chinese)

[84] 张博文, 李爱潮, 郑志安, 等. 川麦冬往复切割式剪果装置设计与仿真试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 81 – 90.
ZHANG Bowen, LI Aichao, ZHENG Zhian, et al. Design and simulation experiments of reciprocating cutting tuber removal device for *Ophiopogon japonicus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 81 – 90. (in Chinese)

[85] ZHAO H, SU L, ZHANG Y, et al. Analysis and optimized design of rigid-flexible coupling characteristics of crab apple picking machines and crab apple trees[J]. Applied Sciences, 2023, 13: 10502.

[86] 付乾坤, 付君, 陈志, 等. 玉米摘穗割台刚柔耦合减损机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 60 – 68.
FU Qiankun, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Loss reduction mechanism and experiment on snapping of rigid-flexible coupling corn head[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 60 – 68. (in Chinese)

[87] 李海同, 吴崇友, 沐森林, 等. 基于 ANSYS – ADAMS 的立式油菜割晒机铺放角形成机理[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 96 – 105.
LI Haitong, WU Chongyou, MU Senlin, et al. Formation mechanism of laying angle of vertical rapeseed mower based on ANSYS – ADAMS[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(14): 96 – 105. (in Chinese)

[88] YU Z Y, YANG K, HU Z C, et al. Parameter optimization and simulation analysis of floating root cutting mechanism for garlic harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107521.

[89] WANG Q, ZHANG Q, ZHANG Y, et al. Lodged sugarcane/crop dividers interaction: analysis of robotic sugarcane harvester in agriculture via a rigid-flexible coupled simulation method[J]. Actuators, 2022, 11: 23.