

离散元法在农业工程领域的应用进展

贺一鸣^{1,2}, 吴明亮^{1,2,3}, 向伟^{1,2,3}, 颜波^{1,2}, 王加跃^{1,2}, 包攀峰^{1,2}

(¹湖南农业大学工学院, 长沙 410128; ²南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128;

³湖南省现代农业装备工程技术研究中心, 长沙 410128)

摘要: 简述了离散元法在农业工程领域方面的研究成果, 根据离散元法在农业工程领域的不同应用, 分别讨论了离散元法在土壤散体颗粒、农业物料颗粒、多相流中单相介质的应用研究现状, 指出了存在数量级受限, 颗粒模型不精准, 复杂工况制约等问题。提出今后离散元法的研究趋势: 开发农业工程领域的专用离散元软件, 提高颗粒群的运算效率; 通过准确获取物料的细观参数, 从理论上完善接触模型, 使仿真颗粒与真实颗粒更为接近; 通过离散元法软件与其他软件耦合, 结合 API 的二次开发, 拓宽离散元法在复杂散体颗粒运动仿真的应用。

关键词: 离散元法; 农业工程; 应用进展; 仿真; 接触模型

中图分类号: S23-0

文献标志码: A

论文编号: casb17010049

Application Progress of Discrete Element Method in Agricultural Engineering

He Yiming^{1,2}, Wu Mingliang^{1,2,3}, Xiang Wei^{1,2,3}, Yan Bo^{1,2}, Wang Jiayue^{1,2}, Bao Panfeng^{1,2}

(¹College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128;

²Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410128;

³Hunan Province Modern Agricultural Equipment Engineering Technology Research Center, Changsha 410128)

Abstract: This paper introduced the research results of discrete element method in agricultural engineering field. According to different application aspects, the authors discussed the application progress of discrete element method in soil grain, agricultural particle material, single medium in multiphase flow, respectively, and pointed out existing problems, like the limited magnitude orders, inaccurate particle model, complicated work condition, etc. Then, the authors proposed future research trend of discrete element method: developing professional discrete element method software for agricultural to improve efficiency of the operation of particle group; perfecting contact model at the theoretical basis to make simulated and real particle more close; coupling discrete element method with other software with the combination of API secondary development, to broaden the application of discrete element method in particles complex movement.

Key words: discrete element method; agricultural engineering; application progress; simulation; contact model

0 引言

伴随着计算机性能和技术的飞速发展, 数值模拟在科研技术方面的辅助作用愈加显著, 在农业工程

领域, 数值模拟以其强大的优越性和广泛的适用性得到了越来越多专家学者的关注和重视^[1-5], 过去通用的纯动力学理论计算分析和经验公式推导的方法因其繁

基金项目: 湖南省科技厅重点项目“南方稻田油菜机械化起垄栽培技术研究与示范”(2016NK2105); 湖南省研究生科研创新项目“移栽油菜成孔器成孔机理及装备研究”(CX2016B286); 湖南省政府重大专项“湖南双季稻区油菜早熟品种选育和机械化生产技术研究及生产示范机械化生产部分”(湘府阅[2014]35号); 湖南省科技厅平台建设项目“湖南省现代农业装备工程技术中心”(湘财教指[2014]10号)。

第一作者简介: 贺一鸣, 男, 1993年出生, 湖南永州人, 硕士, 主要从事农业机械创新设计与试验研究。通信地址: 410128 湖南省长沙市芙蓉区农大路1号, Tel: 0731-84618190, E-mail: 1121006988@qq.com。

通信作者: 吴明亮, 男, 1972年出生, 湖南常宁人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事农业机械创新设计与试验研究。通信地址: 410128 湖南省长沙市芙蓉区农大路1号, Tel: 0731-84618190, E-mail: mlwu@hunau.edu.cn。

收稿日期: 2017-01-11, **修回日期:** 2017-03-29。

琐以及实际复杂环境工况等多层因素的影响,导致理论与实际情况相对偏离,反复多次的实测试验又需要耗费大量的人力物力,且针对于农业设备优化改进的导向性不明确。而数值模拟的原理则相对简单,并能直观展示农业设备实际的工作情况,极大地提高了优化改进的工作效率。

常用的数值模拟方法有边界元法,有限元法和有限差分法等,但均是基于连续介质的假定前提。农业散体颗粒附带自身的物料属性,并不满足连续介质的假定,因此模拟结果与实际生产现状并不一致。1971

年,由Cundall^[6-7]提出的离散元法,作为解决不连续问题行之有效的方法,得到了广泛的关注和应用。

1 离散元法在土壤散体颗粒的应用

农业生产绝大多数与土壤有着密切的联系,学者对土壤运动的认知和研究大多依靠经验推算。在机具与土壤相互作用下,细观上土壤团聚体会发生破碎,如图1(a)所示,所形成的小土块或者细碎的土壤颗粒,表现出极强的离散性和非连续性,符合离散元法的理论研究基础,一般建立如图1(b)所示的土粒仿真模型进行离散元法模拟研究土壤散体颗粒^[8]。

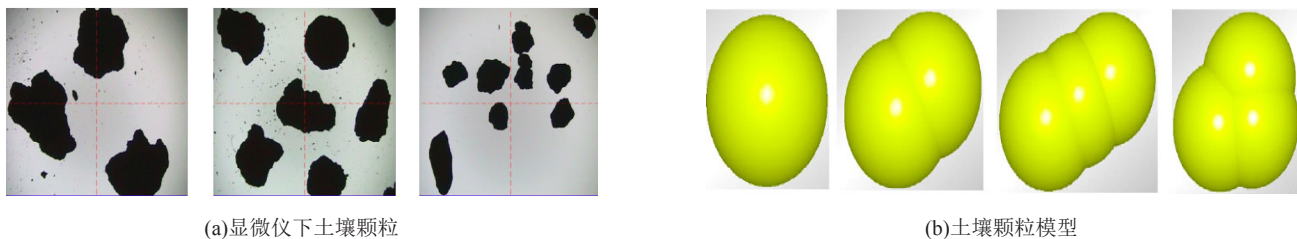


图1 土壤颗粒及仿真模型

1.1 复杂表面对土壤扰动的模拟

研究耕地土壤在农机具复杂表面作用下所产生运动与形变,对优化农机具方面具有重要作用。张锐等^[9-11]应用离散元法研究土壤在仿生波纹板表面干扰状态下的动态行为,通过液桥力和并行约束描述土壤颗粒间黏性特性,建立非线性土壤颗粒力学模型,定性的描述了两种推土板作用下土壤的动态行为,验证了离散元细观模拟模型的可靠性。Shmulevich等^[12-14]采用Asaf等建立的软化模型对土壤建模,对比分析4种不同表面形状的推土板对土壤的扰动情况,对比发现,STR (a straight blade)型推土板在工作过程中需要最小的水平力,而LC (a parabolic blade with a relatively large moldboard radius)型推土板所受的竖直方向力接近于0,与McKyes的经典土壤力学理论进行了对比,发现与该理论在水平方向有很好的一致性,然而在竖直方向相关性不是很大。刘国敏等^[15]利用离散元法仿真蚯蚓体波纹表面,通过研究接触过程土壤颗粒位移,速度和受力的变化情况,得出波形纹能减少接触表面的面积,降低行进阻力。

1.2 旋耕刀旋耕下土壤运动模拟

土壤旋耕是一项高耗能的农业生产活动,通过研究旋耕部件作用下土壤散粒体的运动与受力而对机具进行优化设计,可有效提高机具工作性能和作业效率。方会敏等^[16-17]采用离散元法,建立赋予物料特性的土壤散粒体模型,模拟旋耕作业并记录土壤颗粒的运动轨迹,对比土壤动力学实验室内示踪块试验,研究旋

耕轴4种转速下与旋耕刀前进方向垂直的土壤颗粒的位移情况,得出水平与侧面误差分别为24.9%和15.3%。王金武等^[18]运用离散元法建立土壤颗粒力学模型,应用EDEM软件进行秸秆还田仿真虚拟试验,仿真结果表明,耕深在20 cm时,土壤表层覆盖率为93.87%,通过与土槽台架试验结果进行比较,结果证明虚拟仿真结果与实际试验数据中土壤运动趋势均基本一致。

1.3 圆锥入土运动模拟

圆锥仪作为测量土壤机械物理性质的常用仪器,其贯入土壤中对周围土壤的影响,是土壤动力学中的一个难以定量分析的热点问题。李艳洁等^[19-21]运用离散元法对圆锥指数仪贯入沙土的过程展开研究,从早期的二维圆盘颗粒到后期的三维着色颗粒料床,研究分析锥尖入土过程贯入阻力的变化,后期仿真与试验结果比较吻合,定性描述贯入深度与颗粒位移的关系。孙鹏等^[22]应用离散元法对圆锥入土的贯入阻力变化问题做了相应研究,采用二维圆盘模型,模拟仿真与土槽试验结果在趋势上达到一致,但数值对比存在一定的差异。

1.4 开沟器工作过程模拟

开沟器作为常用的农机具部件,研究开沟过程中土壤的受力与运动情况,为开沟器的优化设计提供理论基础。于建群等^[23]应用离散元软件建立二维土壤分析模型,仿真分析开沟器的工作阻力,对比开沟器的土槽试验结果,阻力变化趋势一致,误差在10%~20%之

间,优化土壤颗粒模型可进一步减少误差。Mustafa等^[24]应用离散元法就开沟器的入土刃角问题进行了多因素的仿真模拟分析,仿真与试验测量值的相关系数为0.92,模拟仿真结果为机具优化提供理论依据。张青松等^[25]应用离散元法就开沟犁体曲面参数和机具前进速度进行仿真模拟研究,以得到系统所受牵引阻力的影响规律,并通过土槽试验验证了仿真的准确性,其开沟犁试验的优化效果显著。

2 离散元法在农业物料颗粒的应用

农业生产中普遍存在着农业物料颗粒,研究生产过程中物料颗粒与农机装备相互作用的运动情况,对于优化农业装备有着指向性作用。离散元法仿真模拟物料颗粒,建立精准的细观模拟力学模型,能直观再现实颗粒物料与农机装备相互作用后的力学行为及运动情况,如图2所示,谷物颗粒在螺旋装置内受力运动。观察分析物料颗粒在农机装备中的运动情况,可针对性的对农机装备进行优化设计。

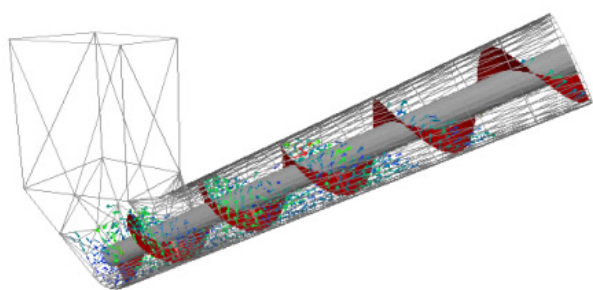


图2 物料输送装置模拟

2.1 物料输送装置模拟

农业颗粒物料的高效稳定输送是实现农业生产全程机械化的关键工序,在农业生产中也逐渐被人们重视。罗胜等^[26]针对螺旋不连续加料装置加料不稳定,高耗能等问题应用离散元法开展了仿真优化试验,分析不同内径与螺距对螺旋输送装置性能的影响,其仿真优化结果与实验结果有较好的一致性。张西良等^[27]应用离散元法就球形谷物的颗粒粒径对螺旋加料机性能的影响进行仿真模拟研究,定量加料的仿真结果与试验结果变化规律基本一致,并得出颗粒尺寸大小与加料稳定性的关联性。

2.2 施肥机具作业模拟

分层施肥是实现直播类农作物在生长期全部养分供应的关键技术,针对不同的农作物,肥料的控比施放具有较高的研究价值。顿国强等^[28]采用仿真试验及验证试验的方法对肥料调配器关键部件肥料均布器进行参数优化试验研究,得出排肥装置结构参数变化对排肥性能的影响。王云霞等^[29]应用离散元法对可调式分

层施肥器的结构相关参数与肥料颗粒运动规律进行了仿真模拟研究,得到安息角和施肥片长度对施肥配比的影响。苑进等^[30-31]应用离散元法就多肥料的变量施肥及排肥结构的优化问题进行了仿真模拟试验,仿真得到不同高度排肥管和落肥管波纹对肥料在排肥管的运动规律特性的影响,优化了排肥管与落肥管的结构参数,验证了离散元法对改良优化肥料调配装置是可行的。

2.3 筛分运动模拟

研究农业颗粒物料在振动筛面上的运动规律,对提高振动筛的透筛性能有很大帮助。李洪昌等^[32]基于离散元法仿真模拟振动筛的筛分过程,通过对振幅,频率,振动角三因素的改变测试透筛性能,在籽粒分布图与透筛效率上,仿真与试验结果基本吻合,并得到了最优参数。李菊等^[33]应用离散元法对并联机构8种组合筛分运动进行了仿真模拟研究,测定并验证了筛分效率的影响因素。Cleary等^[34]运用离散元法模拟了振动筛的整个筛分过程。王成军等^[35]应用离散元软件EDEM与ADAMS耦合,分析筛面棉籽颗粒体的运动规律,依据仿真优化结果对筛分机构进行优化,提高筛分效率。

3 离散元法在多相流体中的应用

农业生产研究中,气力式排种、谷物的清选和干燥均为复杂的多相流问题,而颗粒物料作为流场中介质,在运动过程中会受到固相与固相,气相与固相等多种流体场的影响,如图3所示,谷物在气流场影响下的运动,气流与谷物之间有着复杂的能量交换。采用离散元法软件与流场软件耦合,可高效研究多相流中单相介质的运动,为农机具的设计提供理论依据。

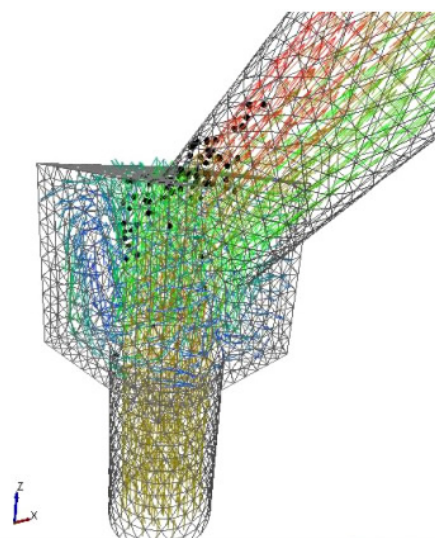


图3 气流场中的颗粒

3.1 气力式排种模拟

排种器是播种机的关键部件,排种效果的好坏直接决定着播种机的工作性能。气力式排种是基于机械式排种而提出的一种新型排种作业方式,采用离散元法研究作物种子在气流作用下的运动,可有效提高排种作业效率。心男^[36]应用 CFD-EDEM 耦合建立气相流场和种子模型研究密相气固两相流问题,仿真分析排种器内种子在流场中的运动,其结果对比发现,在转速较低时,误差较低,转速较高时,误差偏大,种子模型及其物料微观参数有待进一步修正。赖庆辉等^[37]采用 CFD-EDEM 耦合的方法,对气吸滚筒式排种器充种性能就气吸风压,振动频率,振动角度 3 个方面进行了仿真分析,得到排种最佳参数组合,仿真结果与效果与试验一致,验证了耦合模拟对研究排种器是可行的。

3.2 谷物清选模拟

物料的清选为复杂的两相流问题,研究物料颗粒在流场中的运动是提高清选效率的关键。蒋恩臣等^[38]应用 Fluent 与离散元软件 EDEM 进行耦合,采用 Fluent 中标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型分析并获得了谷物在分离室内的分布与运动情况。王立军等^[39]运用 CFD-EDEM 耦合模拟仿真,研究获得玉米脱出物在贯流式风筛清选装置中各脱出物的运动分布,得出在风机的作业转速低于 911 r/min 时,清选损失率满足设计要求。江涛等^[40]应用 CFD-EDEM 的耦合仿真,对 3 种不同结构的清选室进行了模拟分析,得到了清选室的最优结构参数,验证了应用 Fluent 耦合 EDEM 模拟研究气固两相流中的清选问题的准确性。

3.3 稻谷干燥模拟

作物收获时的含水率普遍较高,易导致霉变和发芽,不适合长期储存,干燥装置的设计是农业物料安全储存的核心问题。刘立意等^[41]应用 CFD-EDEM 耦合探究了稻谷在干燥过程中谷层阻力的变化规律,模拟研究气流场热风干燥过程通风阻力的变化,获得谷仓通风阻力计算的拟合方程,可用于通风阻力模拟计算。石林榕等^[42]应用 CFD-EDEM 耦合模拟研究滚筒干燥箱,模拟了气固热传导,定量描述了玉米种子在热气场的干燥升温情况。杨杰^[43]应用 CFD-EDEM 耦合对立式干燥机的颗粒流进行了仿真试验,仿真能很好的模拟干燥单元内的风速场,其仿真结果与实验结果基本一致,且符合实际规律。

4 存在的问题

数量级问题。农业物料颗粒数量级普遍偏大,如土壤,百、千万的数量级颗粒属于工业级别的模拟试验,仿真过程中颗粒生成时间过长,且粒径偏小导致仿

真计算量与时长成几何倍数增长,普通计算机难以满足该级别的运算量要求。

颗粒模型问题。农业散体颗粒具有形状不规则性和独特的物料特性,简化的圆球颗粒不能弥补颗粒形状差异所产生的偏差;物料特性微观参数不易准确获取,部分仿真参数主要靠经验获取,颗粒间的力学关系只能定性通过模型表示。如何准确建立颗粒体模型成为亟待解决的问题。

复杂工况的制约。离散元法在模拟颗粒体运动时多半依靠颗粒的自身重力,几何体的运动方式也受到相应限制。而实际的农业生产活动会涉及较为复杂的几何体运动,流场、热传导和机具损耗等问题。针对离散元软件与其他软件的耦合开发,仍需做更加深入的探究学习。

5 展望

离散元法经过几十年的发展,理论与算法愈加成熟。随着其在农业工程领域愈加广泛的应用,对百、千万的数量级颗粒运动分析,需进一步重视理论,完善理论不足之处,发展并行算法,开发农业工程领域的专用离散元软件,优化颗粒群的计算,从而提高计算机的运算速度,缩减仿真模拟耗时。

农业工程领域的离散元法模拟研究将更多地从逼近真实情况的角度进行考量,并更加重视散体颗粒间的微观接触关系和颗粒间的宏观运动表现。如研究土壤时,建立多样的颗粒体模型以适应不同类型的土壤,通过准确获取微观参数,构建完善的颗粒体接触模型以表征颗粒体间的力学关系。加强模拟结果与试验结果的对比,针对性的改进模型,更为真实的反应实际工作情况。

多软件耦合是目前离散元法发展的一个方向,针对离散元软件的 API 二次开发及自主研发的多软件耦合接口将会得到应用,如 E-A link(EDEM 与 Adams 的耦合)成功解决了 EDEM 仿真过程中几何体部件相对较为复杂的运动问题,与 ANSYS 的耦合,用于解决一些从连续介质到不连续介质的问题,扩展了离散元法的应用范围,这也是 CAE 未来发展的趋势。

参考文献

- [1] 李博,陈军,黄玉祥.机械与土壤相互作用的离散元仿真研究进展[J].农机化研究,2015,37(1):217-221.
- [2] 徐爽,朱浮生,张俊.离散元法及其耦合算法的研究综述[J].力学与实践,2015,35(1):8-15.
- [3] 田瑞霞,焦红光.离散元软件 PFC 矿业工程中的应用现状及分析[J].矿业,2011,20(1):79-82.
- [4] 边小雷,候亚娟,赵梅,等.离散元法及其在颗粒粉碎领域的应用现

- 状[J].矿上机械,2015,43(6):62-66.
- [5] 马征,李耀明,徐立章.农业工程领域颗粒运动研究综述[J].农业机械学报,2013,44(2):22-29.
- [6] Cundall P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky system[A].In Muller Led. Proceedings of Symposium of the International Society of Rock Mechanics[C]. Rotterdam;A.A.Balkema.1971(1):8-12.
- [7] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical method for granular assemblis[J].geotechnique,1979,29(1):47-65.
- [8] 徐泳,李红艳,黄文彬.耕作土壤动力学的三维离散元建模和仿真方案策划[J].农业工程学报,2003,19(2):34-38.
- [9] 张锐.基于离散元细观分析的土壤动态行为研究[D].长春:吉林大学,2005.
- [10] 张锐,李建桥,周长海,等.推土板表面形态对土壤动态行为影响的离散元模拟[J].农业工程学报,2007,23(9):13-19.
- [11] 张锐,李建桥,许述财,等.推土板切土角对干土壤动态行为影响的离散元模拟[J].吉林大学学报:工学版,2007,37(4):822-827.
- [12] Shmulevich I. State of the art modeling of soil-tillage interaction using discrete element method[J].Soil&Tillage Research,2010,11(1):41-53.
- [13] Z Asaf, Rubinsyein D. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J].Soil&Tillage Research,2007,92(1):227-242.
- [14] McKyes E. Soil Cutting and Tillage[M].Elsevier, Amsterdam, The Netherlands,1985:217.
- [15] 刘国敏,邹猛,徐涛,等.波纹表面接触土壤颗粒动态响应仿真分析[J].农业机械学报,2013,44(1):85-89.
- [16] 方会敏,姬长英,张庆怡,等.基于离散元的旋耕刀受力分析[J].农业工程学报,2016,32(21):54-59.
- [17] 方会敏,姬长英,Farman A C,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):22-29.
- [18] 王金武,王奇,唐汉,等.水稻秸秆深埋整杆还田装置设计与试验[J].农业机械学报,2015,46(9):112-117.
- [19] 李艳洁,林剑辉,徐泳.圆锥指数仪贯入沙土试验的离散元法模拟[J].农业机械学报,2011,42(11):44-49.
- [20] 李艳洁,刘翼晨,林剑辉,等.圆锥指数仪贯入沙土过程的三维离散元法模拟[J].农业机械学报,2012,43(7):63-68.
- [21] 李艳洁,吴腾,林剑辉,等.基于离散元法的贯入圆锥对沙土颗粒运动特性分析[J].农业工程学报,2012,28(24):55-61.
- [22] 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.
- [23] 于建群,钱立彬,于文静,等.开沟器工作阻尼的离散元法仿真分析[J].农业机械学报,2009,40(6):53-57.
- [24] Mustafa U, John M F, Chris S. Defining the effect of sweep tillage tool cutting edge geometry on tillage forces using 3D discrete element modeling[J].Information Processing in Agriculture,2015(2):130-141.
- [25] 张青松,廖庆喜,汲文峰,等.油菜直播机开沟犁体曲面优化与试验[J].农业机械学报,2015,26(1):53-59.
- [26] 罗胜,张西良,许俊,等.螺旋不连续加料装置结构优化与性能仿真[J].农业工程学报,2013,29(3):250-257.
- [27] 张西良,马奎,王辉,等.颗粒尺寸对螺旋加料机定量加料性能的影响[J].农业工程学报,2014,30(5):19-27.
- [28] 顿国强,陈海涛,冯夷宁,等.基于EDEM软件的肥料调配装置关键部件参数优化设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(7):36-42.
- [29] 王云霞,梁志杰,崔涛,等.玉米分层施肥器结构设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(S1):163-169.
- [30] 苑进,刘勤华,刘雪美,等.配比变量施肥中多肥料掺混模拟与掺混腔结构优化[J].农业机械学报,2014,45(6):125-132.
- [31] 苑进,刘勤华,刘雪美,等.多肥料变比变量施肥过程模拟与排落腔结构优化[J].农业机械学报,2014,45(11):81-87.
- [32] 李洪昌,李耀明,唐忠,等.基于EDEM的振动筛数值模拟与分析[J].农业工程学报,2011,27(5):117-121.
- [33] 李菊,赵德安,沈惠平,等.基于DEM的谷物三维并联振动筛筛分效果研究[J].中国机械工程,2013,24(8):1018-1022.
- [34] Cleary P W, Sawley M I. DEM Modelling of industrial Granular Flows:3D Case Studies and the effect of Particle Shape on Hooper Discharge[J].Applied Mathematical Modelling,2002,26(2):89-111.
- [35] 王成军,刘琼,马履中,等.棉籽颗粒在三自由度混联振动筛面上的运动规律[J].农业工程学报,2015,31(6):49-56.
- [36] 心男.基于EDEM-FLUENT耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D].长春:吉林大学,2013.
- [37] 赖庆辉,高筱钧,张智泓.三七气吸滚筒式排种器充种性能模拟与试验[J].农业机械学报,2016,47(5):27-37.
- [38] 蒋恩臣,孙占峰,王立军,等.基于CFD-DEM的收获机分离室内谷物运动模拟与试验[J].农业机械学报,2014,45(4):117-122.
- [39] 王立军,李洋,梁昌,等.贯流风筛清选装置内玉米脱出物运动规律研究[J].农业机械学报,2015,46(9):122-127.
- [40] 江涛,吴崇友,汤庆,等.基于CFD-DEM的联合收割机风筛清选仿真分析[J].农机化研究,2016(11):34-40.
- [41] 刘立意,郝世扬,张萌,等.基于CFD-DEM的稻谷通风阻力数值模拟与试验[J].农业机械学报,2015,46(8):27-32.
- [42] 石林榕,吴建民,赵武云,等.基于CFD-EDEM耦合的小区玉米帘式滚筒干燥箱数值模拟[J].干旱地区农业研究,2014,32(6):273-278.
- [43] 杨杰.基于DEM的立式干燥机颗粒流仿真模拟研究[D].武汉:华中农业大学,2012.