

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.005

农业工程领域颗粒运动研究综述*

马征 李耀明 徐立章

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 现代农业装备的作业对象或工作介质经常涉及到离散颗粒体或颗粒群,对相关颗粒体或颗粒群的运动研究往往涉及到颗粒碰撞、流固耦合等具体细分研究领域,其研究方式、研究手段和研究结果对现代农业工程领域相关研究工作的重要性愈加显著。本文首先对农业工程领域颗粒运动的研究手段与方法从理论分析、数值模拟和实测试验3个方面分别进行了分析和归纳,然后对国内农业工程领域各典型农业装备所涉及的颗粒运动研究现状和国内外本领域的研究概况分别进行了综述,并提出了农业工程领域颗粒运动研究的未来发展趋势。

关键词: 颗粒运动 农业工程 农业装备 综述

中图分类号: S220.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)02-0022-08

Summarize of Particle Movements Research in Agricultural Engineering Realm

Ma Zheng Li Yaoming Xu Lizhang

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Discrete particles often become the work objects or working medium of the modern agricultural equipment. Research work of particle collisions and fluid-solid coupling is always be involved in the study of particles movement. It is show that the methods and results of these researches are more and more important to the other research work in modern agricultural engineering field. The research methods of particle movement in agricultural engineering field were respectively illuminated from these aspects like theory analysis, numerical simulation and actual experiment. Then the status of particle movement research for a few typical agricultural equipments both in China and aboard was reviewed. Finally, the development tendency of particle motion research in agricultural engineering realm was proposed.

Key words: Particle movements Agricultural engineering Agricultural equipment Summarize

引言

散体颗粒物质属于软凝聚态物理的研究范畴,在自然界广泛存在^[1]。由于其存在的广泛性,在采矿、医药、水利、化工和农业等多个领域都涉及到对相关散体颗粒物质的运动研究。在工农业生产过程中,农业装备经常接触到大量的散体颗粒(物料),

散体颗粒既可能是其工作对象,也可能是其承载介质。散体颗粒与农业装备(或其相关接触部件)的接触关系和动态响应特性直接关系到农业装备的工作效率和作业性能,因而有关散体颗粒运动和动力学响应特性的研究得到了农业工程领域相关学者的广泛关注。

在查阅相关文献的基础上,本文拟从研究手段

收稿日期: 2012-09-03 修回日期: 2012-09-14

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA10A502)、江苏省高校自然科学研究资助项目(11KJA460002)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2011469)、江苏省农业装备与智能化高技术研究重点实验室资助项目(BM2009703)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏财教(2011)8号)和江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXLX12_0624)

作者简介: 马征, 博士生, 主要从事现代农业机械设计及理论研究, E-mail: benmamazheng@gmail.com

通讯作者: 李耀明, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业机械设计及理论研究, E-mail: ymli@ujs.edu.cn

和应用分类两个方面对农业工程领域散体颗粒运动的研究现状进行综述,以期能为相关学者提供若干参考。

1 农业工程领域颗粒运动研究手段与方法

在农业工程领域对各类散体颗粒运动常见的研究手段与方法主要有3类:①以牛顿定律、微分方程和数理统计概率等基础理论为基石,并结合连续介质力学(包括离散元法在其中的应用)、混沌动力学和随机过程理论等经典理论,通过逐步推导的方式对单颗粒体或颗粒群的运动规律建立方程式的描述方式。②选择经典的颗粒接触模型或重新建立独特的颗粒接触模型(包括颗粒之间和颗粒与壁面之间),使用通用离散元商业软件或使用计算机语言自行编程(包括自行开发的离散元程序软件)对单颗粒体或颗粒群的运动过程进行数值模拟和分析。③采用实际试验手段,使用一些通用或专用试验设备对实际散体颗粒物料(包括单颗粒体或颗粒群)在特定试验条件下的运动过程进行记录与分析。

由相关文献可知,农业工程领域相关学者不仅有单独使用上述3类研究手段与方式对单颗粒体或颗粒群运动过程进行研究的情况,更有综合使用几种研究手段与方式的情况存在(如理论分析结合数值模拟、数值模拟结合试验验证、理论分析结合试验验证等),但为了表述的方便,本文仍旧对这3类研究方式分别单独进行叙述。

1.1 颗粒运动的理论推导与分析

在农业工程领域,以理论推导的方式对离散颗粒的运动过程进行研究主要出现在相关颗粒运动过程非常复杂且研究处于初步阶段和数值模拟条件不成熟的情况(计算机硬件配置较低或缺乏成熟的计算程序和软件)。

理论推导所依据的理论包括牛顿力学、微分方程、统计概率、连续介质力学、混沌动力学、离散元法和随机过程理论等。推导的目的是建立颗粒(群)运动方程(组)。推导所面临和需解决的首要问题(也是核心问题)是颗粒接触关系的真实描述及其合理假设与简化,在此基础上才能建立起颗粒之间、颗粒与壁面之间的力学接触模型并对其动力学响应进行研究分析。理论推导中,对颗粒真实接触关系的认识程度和所建接触模型对真实接触关系的简化程度共同决定了该理论推导与分析的可靠程度。所建接触模型的复杂程度和采用的计算方法在很大程度上决定了后续计算的难度和理论分析的深度。对于颗粒特性较为单一、动态过程不太复杂且规律性较强的颗粒运动过程而言,研究者往往视颗粒为单

一性质颗粒(完全弹性体或粘性体等),并以单一性质碰撞(完全弹性碰撞或完全非弹性碰撞等)为基本模型对单颗粒建立较为简单的方程(组),此时的方程(组)一般是线性的;对于颗粒特性和动态过程都较为复杂且运动规律不甚明了的颗粒(群)运动过程而言,研究者则需要综合考虑颗粒的弹性与粘性等力学特性,建立起具有若干弹性元件与粘性阻尼元件并具有复杂结构的颗粒接触碰撞模型,此时的模型所对应的方程(组)往往具有非线性特征。图1为文献[2]所建立的土壤颗粒接触非线性力学模型。

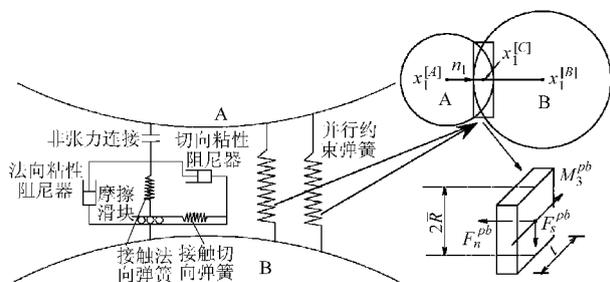


图1 土壤颗粒接触非线性力学模型

Fig. 1 Non-linear mechanics contact model of soil grains

对于单颗粒体,其运动过程可认为是一个确定性过程,因此在确定的力学接触模型下,只要给定初始条件,就可以确定其动力学响应过程。但从理论上对颗粒群运动过程进行推导与分析时,则往往需要引入统计概率理论。这是因为颗粒群的运动过程同时包含着确定性过程和随机性过程。文献[3]对流化床中农业物料的偏析运动过程的理论推导与分析就是在对颗粒进行受力分析后基于概率统计理论建立的随机微分方程并进行了分析。

1.2 颗粒运动的数值模拟与分析

得益于计算机技术的飞速进步,各类数值模拟技术日趋成熟,已经在众多领域的科学研究与产品研发方面得到了广泛的应用。数值模拟技术所具有的优势有:①能够以较低的成本进行较多的科学试验,对于高风险、高成本的科学试验而言,这一优势尤其明显。②试验过程及结果完全可视化且可反复回放,对于复杂试验过程和快速试验过程而言,这一优势十分有利于科研工作者分析试验过程中的相关细节。针对颗粒(群)运动过程分析的数值模拟技术大都基于离散介质理论,其中尤其活跃的是所谓的离散元法(Discrete/distinct element method, DEM)。离散元法的本质思想是:通过跟踪各单颗粒的运动,利用颗粒之间、颗粒与边界之间碰撞产生的能量交换来预测颗粒群的详细运动过程。离散元技术在岩土、矿冶、农业、食品、化工、制药和环境等领域有广泛地应用。离散元模型由 Cundall 等于

1979年提出^[4],经过30多年的发展,其模型有了较大改进,且引入了复杂的算法,使得其效率提高、模拟准确,现在已经能够在复杂的边界条件下计算数百万的颗粒运动。

基于离散元法的成熟商业软件已有很多,如由美国ITSCA公司开发的UDEC、3DEC和PFC软件,Thornton研究组开发的GRANULE程序和英国DEM-Solutions公司开发的EDEM通用离散元软件等。近年来国内学者也陆续开发出了一些离散元软件,如王泳嘉等利用C语言开发了三维离散单元法软件TRUDEC;刘凯欣研究小组利用VC 6.0和OpenGL技术开发了较完整的SUPER-DEM软件^[5]。在农业工程领域,有越来越多的科研工作者应用离散元软件对各类散体颗粒群的运动过程进行了数值模拟与分析,其中文献[6~9]中所应用的离散元分析软件就是由各领域的学者自行开发的,而文献[10~11]则以开发该类软件为研究目的。

农业工程领域的散体颗粒大体可分为3类:土壤散体颗粒、农业物料颗粒和多相流体中的单相介质。其中,前两类散体颗粒普遍具有较明显的韧性、塑性和粘弹性等机械特性,且同一类散体颗粒也会因含水率、物料来源和微观结构等因素的不同而具有较大差异,这与岩土、矿业等领域所面对的颗粒特性有很大不同。农业工程领域颗粒物料性质的特殊性使得本领域的颗粒运动数值模拟不同于岩土、矿业等领域。到目前为止,专业用于农业工程领域颗粒(群)运动数值模拟的商业化软件尚未出现,这一方面是因为我们自身科研力量的不足,另一方面则是因为本领域各类农业装备在工作性质、工作方式和对象等诸多方面存在较大差异。因此,在本领域采用数值模拟的方法对颗粒(群)运动进行研究时,经常会出现3类情况:①使用通用离散元软件对相关研究对象进行较为简单的数值模拟。②在使用通用离散元软件时先根据自身需要对其进行二次开发,再对颗粒(群)运动进行数值模拟。③在小范围内使用自主开发的专用离散元软件(程序)进行数值模拟。图2是文献[7]中所述本领域学者自主开发用于排种器颗粒运动分析的离散元软件界面。

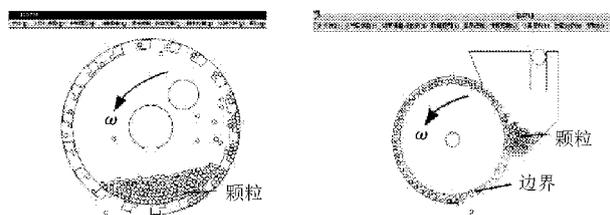


图2 排种器颗粒运动离散元软件界面

Fig. 2 Software interface of DEM for seeding apparatus

1.3 颗粒运动的实测试验与分析

由于实测试验数据更为准确和可靠,且能对相关理论分析和数值模拟起到基础性、指导性和验证性的作用,因此实测试验在科学研究中始终具有不可替代的重要地位。相对于上述的理论分析和数值模拟手段,在农业工程领域对颗粒(群)运动进行实测试验所需的科研经费投入较大。目前在农业工程领域对颗粒(群)运动进行的实测试验大都是基于图像或光学原理,大致可分为3类:①采用普通高速摄像手段进行的单颗粒运动轨迹跟踪试验。②采用高速摄像和粒子图像速度系统(PIV)进行的颗粒群瞬时全流场试验。③采用基于多普勒原理的激光衍射粒度仪(PDPA)进行的颗粒粒度和速度空间分布试验。

采用高速摄像对单颗粒运动轨迹进行跟踪试验依据的是图像技术中对连续动态图像序列里某一特定目标的特征提取定位技术,这一试验的实现只需要一台高速摄像装置和若干光源,但只能对单颗粒的运动轨迹进行跟踪研究,文献[12]中所进行的试验即属此类。采用高速摄像和粒子图像速度系统(PIV)进行的瞬时全流场试验所依据的是PIV技术,该技术在20世纪80年代就已有之,由于引入了激光片光源(图3),能在同一时刻记录下整个测量平面的有关信息,因而可对颗粒运动的二维速度场等进行研究^[13]。事实上,本领域科研工作者对颗粒(群)运动进行的实测试验大都采用PIV技术进行。采用激光衍射粒度仪(PDPA)进行的颗粒粒度和速度空间分布试验依据的是激光相位多普勒原理,其测试区域由两束或两束以上的激光光束的交叉点决定,交叉点的大小为3 mm×3 mm区域,粒子经过该区域时光束被运动粒子散射,其光频发生变化,根据这一变化的差值,利用多普勒效应即可计算出粒子速度^[14]。

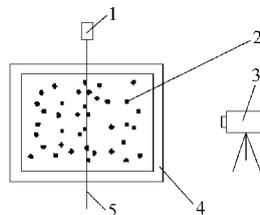


图3 PIV测量中激光片光源与CCD相机的布置示意图

Fig. 3 Layout drawing of laser piece and CCD in PIV test

1. 片光源 2. 示踪粒子 3. CCD摄像机 4. 有机玻璃管 5. 片光

2 国内农业工程领域颗粒运动研究现状

2.1 流体机械领域

流体机械领域的颗粒运动研究大都涉及到多相流体系,研究手段多以数值模拟和试验为主。该领

域的颗粒运动研究现状大体如下:

刘栋等使用 PIV 技术对离心泵内部盐析液固两相流场进行了测量, 分析了晶体颗粒对液相速度场的影响^[15]。刘建瑞等对离心泵叶轮三维固液两相流场进行了耦合计算, 得到了固相颗粒的浓度分布^[16]。赵斌娟等通过对比双流道泵内固液两相流湍流模拟结果、清水单相流模拟结果和泵外特性性能试验结果, 揭示了不同粒径及颗粒体积浓度条件下双流道泵全流道内的固液两相流流动规律和固相颗粒的分布情况^[17]。刘娟等应用雷诺应力模型、离散相流动模型和 Finnie 的塑性冲蚀磨损模型, 对离心泵固液流场中的颗粒运动轨迹、颗粒与过流部件表面的碰撞过程和固液两相流磨损进行了模拟分析, 揭示了颗粒密度、粒径和质量对颗粒运动过程和叶片磨损的影响^[18]。王瑞红等基于多相流动的拉格朗日离散相模型, 对准直管磨料射流喷头内部的液固两相流进行了数值模拟, 通过从磨料入口跟踪 7 个颗粒的运动轨迹, 分析了磨料入口在混合室上的位置对磨料颗粒运动状态的影响^[19]。牛文全等通过流场数值模拟和颗粒运动试验观测相结合的手段研究了迷宫流道转角对灌水器水力性能和抗堵塞性能的影响, 并揭示了转角与流量系数及流态指数之间所呈现的负相关关系^[20]。

2.2 植保机械领域

植保机械领域的颗粒运动研究涉及到多相流场和电场等, 理论分析、数值模拟和实测实验等研究手段在该领域都有应用, 其研究现状大体如下:

高良润等基于颗粒的扩散特性和颗粒对流体湍流脉动响应的不同机理, 建立了静电喷粉沉积过程中荷电颗粒随机位移的概率分布函数所满足的 Fokker - Planck 方程, 构建了静电喷粉沉积速度场理论^[21], 并通过风洞试验准确测量了荷电颗粒在绕流物上的沉积量, 运用改进的静电喷粉装置对比分析了静电喷粉和常规喷粉的沉积效果^[22]。吕晓兰等使用激光衍射粒度仪 (PDPA) 对植保机械标准扇形雾喷头的雾化场进行了研究, 对雾化场的雾滴特征参数、雾滴尺寸空间和雾滴运动进行了分析^[14]。闫大壮等分别选用清水和不同含沙浓度的浑水为介质进行了流量-压力关系试验, 研究了滴头流道内含沙水流的流动特征, 分析了悬浮颗粒浓度对滴头水力性能的影响, 并采用 CFD 模拟技术对迷宫式滴头流道内不同质量浓度的悬浮颗粒运动情况进行了数值模拟^[23-24]。吴中华等利用 CFD 模型对脉动气流喷雾干燥过程进行了数值模拟, 得到了干燥气流场和颗粒运动轨迹, 并分析了颗粒不同初始直径的干燥过程^[25]。喻黎明等采用 PIV 技术对通过仿真所

得迷宫流道内固体颗粒的运动规律进行了验证^[26]。张睿等在设计并试验一种链条输送式变量施肥抛撒机时, 通过分析肥料颗粒在撒肥盘上的运动和受力, 建立并分析了肥料颗粒在脱离撒肥机圆盘过程中的运动微分方程, 为圆盘转速控制和撒肥部件的设计提供了依据^[27]。

2.3 收获机械领域

收获机械领域的颗粒运动研究主要集中在针对清选环节的农业物料筛分过程研究, 理论分析、数值模拟和实测实验等研究手段在该领域都有应用, 其研究现状大体如下:

李耀明等在引入抛射强度对筛面油菜物料运动状态进行分析与试验时, 以颗粒碰撞理论为基础, 在建立单个颗粒筛面运动模型后进行颗粒运动分析, 并先后应用图像跟踪技术和计算流体力学和颗粒离散元耦合的方法分别对联合收获机筛面物料颗粒的运动轨迹和联合收获机清选筛上的物料 (颗粒群) 模拟运动过程进行研究^[12, 28-29], 王成军等为研究颗粒群在多自由度条件下的筛分运动响应特性, 还以全解耦型多维主体激振机构为核心, 采用大功率直线电机为直线往复振动动力源, 研制出了基于并联机构的多维振动筛分试验台^[30]。蒋恩臣等基于湍流模型和离散相模型对具有气流吸运系统联合收获机惯性分离室的气固两相流进行了数值模拟, 利用双向耦合拉格朗日法对颗粒运动轨迹进行跟踪, 得到了其沉降和分离过程^[31]。赵如芬等在对 CJZ - 0.1 型重力式清选机 (一种风筛式清选机) 进行研究设计时, 对筛面单颗粒体的运动过程进行了理论分析^[32]。王泽南等为获得农业物料球形颗粒的临界速度动力特性, 在 SIMULINK 集成环境下依据临界速度动力特性的基本理论对农业物料球形颗粒在流体中运动过程进行了仿真分析^[8]。

2.4 耕作与种植机械领域

耕作与种植机械领域所涉及的散体颗粒大都是土壤颗粒和种子颗粒, 该领域的研究手段也包含了理论分析、数值模拟和实测试验 3 类, 其研究现状如下:

张锐等采用离散元模拟技术研究了推土板表面形态和切土角对土壤动态行为的影响, 并通过引入并行约束表征土壤颗粒间液桥的粘性作用, 建立了土壤颗粒接触非线性力学模型, 并使用离散元法从宏观和细观两个方面模拟分析了部件复杂表面对土壤产生的扰动行为^[2, 33-34]。郑红波等分别研发了基于粒子系统的土壤颗粒群体运动可视化仿真软件, 用于研究土壤颗粒结构及其凝聚动力学过程^[10-11]。刘国敏等应用离散元软件 PFC2D 建立了

蚯蚓波纹体表与界面土壤颗粒之间的动态行为仿真模型,并对不同形态接触界面上的接触力场和接触颗粒数量进行了对比分析,指出了土壤颗粒对运动非光滑表面起降阻作用的条件^[6]。

付宏等采用超圆方程建立了复杂形状颗粒的二维离散元模型,并引入牛顿下山法建立了基于超圆方程的颗粒二维离散元计算方法,对一种精密排种器的排种工作过程进行了可靠的离散元仿真和分析^[7]。于建群等采用离散元法和自主研发的三维分析软件对型孔轮式排种器的工作过程进行了仿真,分析了大豆种子的运动轨迹^[9]。李中华等和刘贵林等在建立气流分配式排种器三维模型的基础上选择标准 $k-\epsilon$ 模型和 DPM 模型分别对排种器内部的气相和固相进行了数值模拟,得到了排种器内气流场分布图和颗粒群的运动轨迹图,且与实际试验所得结果相一致^[35]。赵立新等为提高气吸式播种机的吸种性能,在种盘振动近似为单频振动的情况下,通过理论分析指出了使种子颗粒产生向上抛掷运动的条件,并用试验对理论分析所得结果进行了验证^[36]。

2.5 农业水土领域

农业水土领域的颗粒运动研究大都侧重于农业水利工程方面,研究多以理论推导和试验分析为主。

万兆惠通过试验研究了高含沙水流中粗颗粒泥沙的运动情况,得出了浑水水流中粗颗粒泥沙运动不同于清水流的一些特点^[37]。胡春宏等利用高速摄像技术,测量了不同容重、不同粒径的颗粒在不同水流条件下的运动轨迹,再通过理论推导的方式得到了颗粒的理论运动轨迹并与实测轨迹进行对比^[38]。时钟等引入声学技术,采用声散射器对河口近底细颗粒悬沙的运动进行了声散射观测^[39]。王殿常等使用改进过的颗粒示踪测速技术研究了明槽水流中的颗粒运动特性,得到了大量的颗粒运动轨迹并进行了分析^[40]。黄远东等在建立双向耦合液固两相流旋涡动力学模型的基础上,采用离散元方法计算了非定常不稳定水流场,并采用 Lagrange 方法对颗粒运动进行了模拟^[41]。白玉川等根据泥沙颗粒运动过程的受力分析,在忽略颗粒旋转和紊动影像的条件下建立了泥沙颗粒跃移运动模型,并经数值求解分析了颗粒的运动机理^[42]。

2.6 农业工程领域其他方面

赵杰文等运用概率的方法对农业物料流化床中颗粒之间的碰撞作用进行了描述,以此为基础建立了床中颗粒沿铅垂方向偏析运动的随机微分方程^[3]。刘传平等以小麦颗粒为例,基于“拟流体”思想,根据非牛顿流体理论求得颗粒流粘性的本构关

系,并通过分析小麦颗粒在斜槽中流动稳定后的静态图像验证了理论分析所得的颗粒流本构关系方程的正确性^[1]。王娜娜等采用 PIV 技术在微负压条件下对玉米桔粉和陶瓷球混合颗粒在竖管内的运动规律进行了研究^[43]。吴培龙等基于单颗粒物料圆周运动和抛射运动分析推导出了物料颗粒在滚筒式干燥机内的停留时间^[44]。李春阳通过理论推导和 CFD 数值模拟手段研究分析了饲草旋风分离器中偏移速度对饲草颗粒运动轨迹的影响^[45]。

3 国外农业工程领域颗粒运动研究概况

文献检索表明,近年来国外学术界有关颗粒运动的研究工作比较活跃,相关报道较多,但多数涉及的是物料输运、化工制药和矿物加工等领域^[46-50],而涉及农业工程领域的研究报道却不多见。因此,本文不加细分地将近年来国外在本领域颗粒运动的研究情况进行概述。

Harral 等对使用引导洗涤器 (boot scrubber) 后的空气介质颗粒浓度和沉降数目进行了测试,并将测试结果与采用两种预测模型进行的数值模拟结果进行了对比,对比结果吻合良好^[51]。Alhamdan 等基于流体介质的能量平衡原理和球形空间中热传导的解析方法提出了一种用于测试保持管 (a holding tube) 中大量颗粒流的平均体积热交换系数测试方法,并以颗粒浓度、颗粒流速率和初始温度为考察条件进行了测试与分析^[52]。Deepa 等采用改进的颗粒群优化算法对一个线性时不变多变量离散系统进行了建模与分析,该算法被有效地构造一个低阶系统用于反映高阶系统的本质特性^[53]。Depypere 等在实验室环境下采用发射电子颗粒跟踪技术 (PEPT) 对锥形流化床内颗粒的运动过程进行了可视化研究和量化分析,证明了该技术能成功地用于锥形流化床中颗粒运动特性的研究^[54]。

4 研究趋势概述

通过上述对农业工程领域颗粒运动研究现状的分类归纳与综述可见,随着各细分领域相关研究的逐步深入和学科交叉以及相关技术手段的不断进步,农业工程领域内的颗粒运动研究将会得到更充分的发展,其具体的研究趋势包括:①颗粒运动数值模拟技术将更多地从二维模拟发展到三维模拟,更多的专用模拟软件将得到开发和应用。②相对于单颗粒体的运动研究而言,有关颗粒群运动的理论分析将得到更多的重视和发展。③农业工程领域的颗粒运动研究将更多地从逼近真实情况的角度进行考量,并将更加重视颗粒之间的微观接触关系和颗粒

群的宏观运动表现。

5 结束语

农业工程领域的颗粒运动研究涉及到流体机械、植保机械、收获机械、耕作与种植机械以及农业水土等多个子领域,研究的基础理论涉及到经典力

学、基础数学、随机过程理论和非线性系统动力学等多个学术领域。研究对象的特殊性和各子领域研究工作的多样性制约了农业工程领域颗粒运动研究的发展。在整体趋势上,本领域的颗粒运动研究将朝着模拟更加真实、理论更加深入和分析更加实际的方向发展。

参 考 文 献

- 刘传平,王立,岳献芳,等. 颗粒流本构关系的实验研究[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(2):256~260.
Liu Chuanping, Wang Li, Yue Xianfang, et al. Experimental study on the constitutive relation of granular flow[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(2):256~260. (in Chinese)
- 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.
Zhang Rui, Li Jianqiao, Zhou Changhai, et al. Simulation of dynamic behavior of soil ahead of the bulldozing plates with different surface configurations by discrete element method [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9):13~19. (in Chinese)
- 赵杰文,李光久,吴守一,等. 农业物料流化床中颗粒偏析运动的随机微分方程[J]. 江苏工学院学报, 1989,10(1):1~9.
Zhao Jiewen, Li Guangjiu, Wu Shouyi, et al. Stochastic differential equation for partial deviation motion in agricultural material fluidized bed[J]. Journal of Jiangsu Institute of Technology, 1989, 10(1):1~9. (in Chinese)
- Cundall P A, Strack O D L. A discrete model for granular assemblies [J]. Geotechnique, 1979, 29(1):47~65.
- 田瑞霞,焦红光,白璟宇. 离散元法在矿物加工工程中的应用现状[J]. 选煤技术, 2012(1):72~76.
Tian Ruixia, Jiao Hongguang, Bai Jingyu. An introduction of distinct element method and its application in mineral processing engineering[J]. Coal Preparation Technology, 2012(1):72~76. (in Chinese)
- 刘国敏,邹猛,李建桥. 蚯蚓体表与土壤接触界面动态行为仿真[J]. 吉林大学学报:工学版, 2010,40(6):1609~1613.
Liu Guomin, Zou Meng, Li Jianqiao. Interfacial dynamics simulation between soil and earthworm surface [J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition, 2010,40(6):1609~1613. (in Chinese)
- 付宏,贾慧敏,张晓旭,等. 基于超圆颗粒模型的二维离散元法计算方法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008, 38(6):1383~1388.
Fu Hong, Jia Huimin, Zhang Xiaoxu, et al. 2D DEM calculation methods based on super quadratics particles modeling [J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition, 2008,38(6):1383~1388. (in Chinese)
- 王泽南,张鹏. 农业物料球形颗粒临界速度动力特性的仿真[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4):14~17.
Wang Ze'nan, Zhang Peng. Simulation of the critical velocity dynamical characteristics of spherical grain of agricultural material [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(4):14~17. (in Chinese)
- 于建群,王刚,心男,等. 型孔轮式排种器工作过程与性能仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12):83~87,101.
Yu Jianqun, Wang Gang, Xin Nan, et al. Simulation analysis of working process and performance of cell wheel metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12):83~87,101. (in Chinese)
- 郑红波,吴健平,丁维龙. 基于粒子系统的土壤胶粒快速凝聚的三维可视化仿真[J]. 农业工程学报, 2011,27(6):219~224.
- 王功明,郭新宇,赵春江,等. 基于粒子系统的土壤可视化仿真研究[J]. 农业工程学报, 2008,24(2):152~158.
Wang Gongming, Guo Xinyu, Zhao Chunjiang, et al. Soil visual simulation study based on particle system [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2):152~158. (in Chinese)
- 李耀明,赵湛,张文斌,等. 基于 Meanshift 的筛面物料颗粒目标运动轨迹跟踪[J]. 农业工程学报, 2009,25(5):119~122.
Li Yaoming, Zhao Zhan, Zhang Wenbin, et al. Trajectory tracking of particle material motion on sieve surface based on Meanshift algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5):119~122. (in Chinese)
- 易维明,王娜娜,张波涛,等. 水平携带床气固两相流动的实验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1):11~14.
Yi Weiming, Wang Nana, Zhang Botao, et al. Experimental study on gas-solid two-phase flow in a horizontal entrained bed [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1):11~14. (in Chinese)
- 吕晓兰,何雄奎,宋坚利,等. 标准扇形雾喷头雾化过程测试分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9):95~100.
Lü Xiaolan, He Xiongkui, Song Jianli, et al. Analysis of spray process produced by agriculture flat-fan nozzles [J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(9):95~100. (in Chinese)
- 刘栋,杨敏官,高波,离心泵叶轮内部伴有盐析流场的 PIV 试验[J]. 农业机械学报, 2008,39(11):55~58,63.
Liu Dong, Yang Minguan, Gao Bo. PIV measurement of flow with salt-out in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(11):55~58,63. (in Chinese)
- 刘建瑞,徐永刚,王董梅,等. 离心泵叶轮固液两相流动及泵外特性数值分析[J]. 农业机械学报, 2010,41(3):86~90.
Liu Jianrui, Xu Yonggang, Wang Dongmei, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in impeller channel and pump characteristics analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(3):86~90. (in Chinese)

- 17 赵斌娟, 袁寿其, 刘厚林, 等. 基于 Mixture 多相流模型计算双流道泵全流道内固液两相湍流[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1):7~12.
Zhao Binjuan, Yuan Shouqi, Liu Houlin, et al. Simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in double-channel pump based on Mixture model [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1):7~12. (in Chinese)
- 18 刘娟, 许洪元, 唐澍, 等. 离心泵内固体颗粒运动规律与磨损的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6):54~59.
Liu Juan, Xu Hongyuan, Tang Shu, et al. Numerical simulation of erosion and particle motion trajectory in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6):54~59. (in Chinese)
- 19 王瑞红, 马安昌, 李德玉. 准直管磨料射流喷头内流的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2):250~254.
Wang Ruihong, Ma Anchang, Li Deyu. Numerical simulation of the nozzle inside-flow of collimated pipe abrasive water jet[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2):250~254. (in Chinese)
- 20 牛文全, 喻黎明, 吴普特, 等. 迷宫流道转角对灌水器抗堵塞性能的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9):51~55, 67.
Niu Wenquan, Yu Liming, Wu Pute, et al. Influence of angle of labyrinth channels on anti-clogging performance of emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9):51~55, 67. (in Chinese)
- 21 周浩生, 罗惕乾, 高良润. 静电喷粉沉积速度场理论研究[J]. 农业机械学报, 1998, 29(4):55~60.
Zhou Haosheng, Luo Tiqian, Gao Liangru. The theory of deposition velocity in electrostatic dusting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(4):55~60. (in Chinese)
- 22 周浩生, 罗惕乾, 高良润. 静电喷粉沉积性能实验研究[J]. 江苏理工大学学报, 1998, 19(2):1~5.
Zhou Haosheng, Luo Tiqian, Gao Liangru. Experimental research on the deposition of electrostatic dustin[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 1998, 19(2):1~5. (in Chinese)
- 23 闫大壮, 杨培岭, 赵桥. 滴头流道内部含沙水流流动特征的试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2):52~56.
Yan Dazhuang, Yang Peiling, Zhao Qiao. Experimental study on suspensions flow hydraulic characteristics in dripper emitter path [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2):52~56. (in Chinese)
- 24 闫大壮, 杨培岭, 任树梅. 滴头流道中颗粒物质运移动态分析与 CFD 模拟[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6):71~74, 81.
Yan Dazhuang, Yang Peiling, Ren Shumei. Study on dynamic analysis of particle movement in drip emitter based on CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6):71~74, 81. (in Chinese)
- 25 吴中华, 刘相东. 脉动气流喷雾干燥的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4):18~21.
Wu Zhonghua, Liu Xiangdong. Numerical simulation of spray drying of pulsating flow generated by a pulse combustor [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(4):18~21. (in Chinese)
- 26 喻黎明, 吴普特, 牛文全, 等. 迷宫流道内固体颗粒运动的 CFD 模拟及 PIV 验证[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5):45~51.
Yu Liming, Wu Pute, Niu Wenquan, et al. CFD numerical simulation and PIV verification about the movement of solid particles in labyrinth channel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5):41~55. (in Chinese)
- 27 张睿, 王秀, 赵春江, 等. 链条输送式变量施肥撒播机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6):20~25.
- 28 李耀明, 王智华, 徐立章, 等. 油菜脱出物振动筛分运动分析及试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9):111~114.
Li Yaoming, Wang Zhihua, Xu Lizhang, et al. Motion analysis and experimental research of rape extractions on vibration sieve [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9):111~114. (in Chinese)
- 29 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD-DEM 数值模拟[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2):79~84.
Li Hongchang, Li Yaoming, Tang Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD-DEM [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):79~84. (in Chinese)
- 30 王成军, 李耀明, 马履中. 基于并联机构的多维振动筛分试验台设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4):70~74, 112.
Wang Chengjun, Li Yaoming, Ma Lüzhong. Design of multi-dimensional vibration screening test bench based on parallel mechanism. [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4):70~74, 112. (in Chinese)
- 31 蒋恩臣, 王立军, 刘坤, 等. 联合收获机惯性分离室内气固两相流数值模拟[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2006, 27(3):193~196.
Jiang Enchen, Wang Lijun, Liu Kun, et al. Numerical simulation of gas-particle flow in inertia separation chamber of stripper combine harvester [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006, 27(3):193~196. (in Chinese)
- 32 赵如芬, 张元生, 李延云, 等. 重力式清选机运动状态分析及工作参数的选择[J]. 农业工程学报, 1986, 2(4):81~86.
Zhao Rufen, Zhang Yuansheng, Li Yanyun, et al. The analysis of the dynamic situation of the gravity type cleaner and the selection of its operating parameters[J]. Transactions of the CSAE, 1986, 2(4):81~86. (in Chinese)
- 33 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.
- 34 张锐, 李建桥, 李因武, 等. 部件复杂表面影响土壤扰动行为的离散元宏观分析[J]. 吉林大学学报:工学版, 2009, 39(5):1218~1223.
- 35 李中华, 王德成, 刘贵林, 等. 气流分配式排种器 CFD 模拟与改进[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3):64~68.
Li Zhonghua, Wang Decheng, Liu Guilin, et al. CFD Simulation and improvement of air-stream distributive metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):64~68. (in Chinese)

- 36 赵立新, 郑立允, 刘志民, 等. 气动振动器气吸播种机的种子振动性能研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7):65~68.
Zhao Lixin, Zheng Liyun, Liu Zhimin, et al. Seed vibration performance of vibrational air-sucking seeder with air-style vibrator [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7):65~68. (in Chinese)
- 37 万兆惠. 高含沙水流中的粗颗粒泥沙运动[J]. 水利学报, 1984, 15(8):1~14.
Wan Zhaohui. The bed material movement in hyperconcentrated flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 15(8):1~14. (in Chinese)
- 38 胡春宏, 惠遇甲. 水流中跃移颗粒的受力分析[J]. 水利学报, 1993, 24(1):11~20.
Hu Chunhong, Hui Yujia. Forces acting on saltation particles in flowing water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 24(1):11~20. (in Chinese)
- 39 时钟, 张叔英, Hamilton L J. 河口近底细颗粒悬沙运动的声散射观测[J]. 声学学报, 1998, 23(3):221~228.
Shi Zhong, Zhang Shuying, Hamilton L J. Acoustic backscatter measurements of estuarine near-bed fine suspended sediment transport[J]. Acta Acustica, 1998, 23(3):221~228. (in Chinese)
- 40 王殿常, 禹明忠, 王兴奎. 明槽水流中颗粒运动特性的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(3):301~309.
Wang Dianchang, Yu Mingzhong, Wang Xingkui. Experimental study on the particle motion in open channel flow[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2000, 8(3):301~309. (in Chinese)
- 41 黄远东, 吴文权, 张红武, 等. 非定常不稳定液固两相流动中旋涡对颗粒运动影响的数值研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(1):1~8.
Huang Yuandong, Wu Wenquan, Zhang Hongwu, et al. Numerical study on the effect of vortices upon particle motion in unsteady and unstable liquid-particle two-phase flow[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(1):1~8. (in Chinese)
- 42 白玉川, 陈有华, 韩其为. 泥沙颗粒跃移运动机理. [J]. 天津大学学报, 2012, 45(3):196~201.
Bai Yuchuan, Chen Youhua, Han Qiwei. Bed load saltation movement mechanism [J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(3):196~201. (in Chinese)
- 43 王娜娜, 易维明, 杨延强, 等. 垂直管内陶瓷球和玉米秸粉混合颗粒运动的 PIV 测量[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3):154~157.
- 44 吴培龙, 朱明. 物料颗粒在滚筒式干燥机内停留时间的确定[J]. 农业工程学报, 1988, 4(9):63~70.
Wu Peilong, Zhu Ming. The determination of the staying time of material particles in the drum dryer[J]. Transactions of the CSAE, 1988, 4(9):63~70. (in Chinese)
- 45 李春阳. 偏移速度对旋风分离器内饲草颗粒轨迹影响的模拟[J]. 黑龙江农业科学, 2011(9):136~138.
Li Chunyang. Simulation of influence of cyclone separator migration velocity on forage grass particle trajectory [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2011(9):136~138. (in Chinese)
- 46 Jayasundara C T, Yang R Y, Yu A B, et al. Effects of disc rotation speed and media loading on particle flow and grinding performance in a horizontal stirred mill [J]. International Journal of Mineral Processing, 2010, 96(1~4):27~35.
- 47 Hoon Lee, Heechan Cho, Jihoe Kwon. Using the discrete element method to analyze the breakage rate in a centrifugal/vibration mill [J]. Powder Technology, 2010, 198(3):364~372.
- 48 Lichter J, Lim K, Potapov A, et al. New developments in cone crusher performance optimization[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(7~8):613~617.
- 49 Cleary P W, Robinson G K. Evaluation of cross-stream sample cutters using three-dimensional discrete element modeling [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(11):2980~2993.
- 50 Feng Y Q, Yu A B. Effect of bed thickness on the segregation behavior of particle mixtures in a gas fluidized bed[J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2010, 49(7):3459~3468.
- 51 Herral B, Burfoot D. A comparison of two models for predicting the movements of airborne particles from cleaning operations[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 69(4):443~451.
- 52 Alhamdan A, Sastry S. Bulk average heat transfer coefficient of multiple particles flowing in a holding tube[J]. Food and Bioproducts Processing, 1998, 76(2):95~101.
- 53 Deepa S N, Sugumaran G. Model order formulation of a multivariable discrete system using a modified particle swarm optimization approach [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2011, 1(4):204~212.
- 54 Depypere F, Pieters J G B, Dewettinck K. PEPT visualization of particle motion in a tapered fluidized bed coater [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(3):324~336.