

离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用

于建群¹, 付宏², 李红¹, 申燕芳¹

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学计算机科学与技术学院, 长春 130012)

摘要: 提出由农业机械工作部件的 CAD 模型建立其离散元法分析模型, 在此基础上实现 CAD 软件与离散元法性能分析软件的集成, 从而构建一种与散粒物料相互接触作用的农业机械工作部件的通用数字化设计方法和集成分析设计软件的思想。介绍了该数字化设计方法和集成分析设计软件的体系结构和主要功能, 概述了在建立该方法和软件方面存在的问题及研究工作进展情况。

关键词: 数字化设计; 离散元法; 散粒物料; 农业机械; 工作部件

中图分类号: S126

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)05-0001-06

于建群, 付宏, 李红, 等. 离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 1-6

Yu Jianqun, Fu Hong, Li Hong, et al. Application of discrete element method to research and design of working parts of agricultural machines[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 1-6 (in Chinese with English abstract)

0 引言

农业机械工作时, 大量存在着散粒物料的流动过程, 如播种机播种时, 存在着种子、肥料、土壤的流动; 耕翻农田时, 存在着土壤的流动; 农产品收获、输送、分级、加工和包装等, 也存在着相关散粒物料的流动。

散粒物料的流动除与本身力学性质有关外, 还与相关农机工作部件的结构形式、尺寸参数有关。一个好的农业机械设计, 应使散粒物料按照预想的程式流动, 如播种时种子的流动, 减少流动过程中的损伤, 节省动力消耗, 如开沟和耕翻土壤时牵引动力消耗, 此时必须考虑工作部件与散粒物料的相互作用及其动力学问题。

散粒物料的性质介于固体与流体之间, 虽然颗粒结构简单, 却具有复杂的力学特性。采用连续介质力学方法, 研究散粒物料与农机工作部件的相互作用, 只能把散粒群体作为一个整体来考虑, 无法分析散粒群体中每个颗粒的运动过程、相互作用, 因而不能很好地解决这个问题。目前进行有关农机工作部件的设计时, 大都依靠经验或试验方法, 既费时费力又得不到理想的设计效果, 据估计仅由散粒物料输送所造成的相关设备利用损失就达 40%^[1]。

20 世纪 70 年代, Cundall 等^[2]提出离散元法, 其基本思想是把散粒群体简化成具有一定形状和质量颗粒的集合, 赋予接触颗粒间及颗粒与接触边界间某种接触力学模型和模型中的参数, 以考虑散粒之间及散粒与边界间的接触作用和散粒体与边界的不同物理机械性质。离散元法采用动态松弛法、牛顿第二定律和时步迭代求解每个颗粒的运动和位移, 特别适合于求解非线性问题。由于其离散的特点, 在分析高度复杂系统时, 无论是散粒体还是边界均不需作大的简化; 当赋予接触颗粒间

以粘聚力或连结力学模型时, 还可以分析散粒结块或整体材料的破坏过程(如粉碎、切断等)。离散元法已成为研究散粒体动力学问题的一种通用方法, 并在岩土工程与风沙流动, 散粒物料的输送、混合、分级, 颗粒的结块与碰撞, 土壤与机械的相互作用, 化工和矿山装备等研究领域得到广泛应用^[3]。

20 世纪 90 年代以后, 一些学者开始应用该方法研究散粒物料与农机工作部件的相互作用问题。如 Lu 等^[4]采用离散元和有限元耦合的方法, 分析了筒仓中大豆的进出料过程及仓壁应力; Zhang 等^[5]采用离散元法分析了大豆在斜槽中的流动过程; Tanaka 等^[6]采用离散元法分析了金属棒插入土壤时, 土壤阻力及变形情况; Sakaguchi 等^[7]采用离散元法分析了糙米的筛分过程; Momozu 等^[8]采用离散元法分析了摆式铲的切土过程。但到目前为止, 对于复杂结构的农机工作部件, 如排种器、排肥器、开沟器、耕翻犁等研究尚未见报道。

采用离散元法研究散粒物料与农机工作部件之间的相互作用和散粒物料的流动过程, 可以分析评价农机工作部件的工作性能。把 CAD 软件与离散元法性能分析软件集成, 则可望建立一种集设计与性能分析评价为一体的与散粒物料相互接触作用的农机工作部件的通用数字化设计方法和集成分析设计软件, 其体系结构见图 1 所示。

由图 1 可知, 该数字化设计方法和集成分析设计软件的特点是: 能根据设计要求和推理机制自动生成农机工作部件的结构方案, 并可对该方案进行修改; 能在设计阶段通过修改其 CAD 模型, 对不同结构和尺寸参数的工作部件进行性能分析和评价, 如工作阻力、磨损状况分析, 开沟深度、宽度、土壤流动情况分析, 播种的单粒率、空穴率、碎种率分析等, 以实现结构方案和尺寸参数的优化, 或设计决策; 能进行工作过程的动态仿真, 分析工作机理并发明新原理的工作部件。

该软件的建立, 对于提高农业机械的研究和设计水平, 减少试验环节, 缩短开发周期, 提高农机产品的性能和使用寿命, 节省能源, 促进中国农业生产装备的研究

收稿日期: 2004-07-29 修订日期: 2004-10-21

作者简介: 于建群(1958-), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 数字化设计与制造和基于 MEMS 技术的微全分析系统(μ -TAS)。长春市 吉林大学生物与农业工程学院, 130022。

Email: yujianqun@jlu.edu.cn

和设计向数字化、智能化、自动化、网络化方向发展。

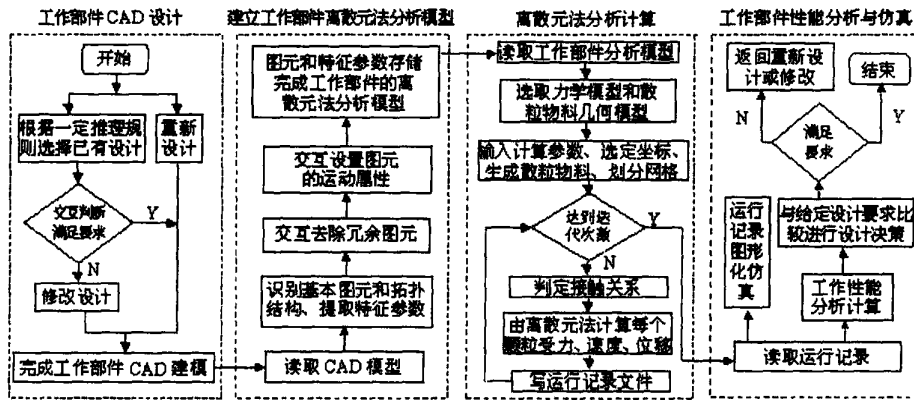


图1 一种农业机械工作部件的通用数字化设计方法和集成分析设计软件的体系结构
 Fig 1 Framework of a method of digital designing and an integrated software for designing and analyzing working parts of agricultural machinery

1 研究现状及存在的问题

1.1 散粒物料的数字模型

在采用离散元法分析散粒物料流动过程时, 如何把散粒物料颗粒建立其数字化模型, 直接影响到分析精度和计算效率。在已有的研究中, 土壤颗粒简化成圆形^[6,8], 大豆简化成圆形^[4]和近似椭球的组合球(见图2)^[5], 糙米简化为圆形^[7]和椭圆形^[9], 其它散粒农业物料如玉米、小麦等尚未见研究报道。



图2 模拟大豆的组合球几何模型

Fig 2 Geometric model of combined spheres for the simulation of a soybean

圆和球几何模型简单, 接触检查易于实现, 因而被大多数研究者采用, 但在多数情况下与实际散粒物料差别较大。椭圆、超圆^[10]和椭球、超球^[11]与大多数散粒物料更近似, 但接触检查算法复杂。而一种由圆弧组合形成的几何模型(见图3)^[12], 接触检查易于实现, 可构成椭圆和几乎所有多边形。Cleary等^[13,14]还研究了同一种散粒物料, 当选取不同几何模型时对流动过程的影响。

由于散粒农业物料种类繁多、形状复杂, 在实际分析时, 把散粒农业物料简化成何种几何模型, 是一个需要深入研究的问题。

1.2 边界的离散元法分析模型

在建立上述通用数字化设计方法和集成分析设计软件时, 如何建立不同结构和运动方式农机工作部件(边界)的离散元法分析模型, 是一个需要研究解决的主要问题。

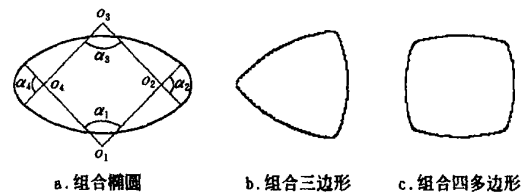


图3 模拟散粒物料的组合几何模型

Fig 3 Combined geometric model for the simulation of granular materials

迄今建立固定边界的离散元法分析模型——边界的几何模型已研究较多, 如由直线和折线形成的料仓^[4]、斜槽^[5], 由多段折线和圆弧形成的复杂固定边界等, 但对于运动边界还研究较少。在建立运动边界的离散元法分析模型时, 要包括边界的几何模型和运动学模型, 已有的研究基本是圆形、圆筒形转动边界, 如球磨机^[15]、摆式铲^[8]等, 或直线运动边界, 如金属棒^[6]等, 而如何建立复杂结构和运动方式边界的离散元法分析模型还需进一步研究。

Oger等^[16]提出由一系列圆形几何模型排列形成边界的方法, 其优点是在进行离散元法分析计算时, 边界可与散体颗粒一样处理不需区别。Kremmer等^[17]还提出一种有限壁的方法, 用以建立三维平动和转动边界的离散元法分析模型。

离散元法发展至今, 大部分研究仅从分析单一边界与散粒物料的相互作用着手, 尚未从建立一种通用的边界分析设计方法的高度来考虑。而已报道的离散元法程序^[18], 虽然大都带有边界建模模块, 但该方法没有把边界设计与其性能分析结合起来, 因而不能满足复杂结构和运动方式机械部件的设计、性能分析、设计修改、再分析的要求。

为此, 本文提出由边界的CAD模型建立其离散元法分析模型的思想, 并建立了一种基于读取和处理边界

CAD 模型中基本图形元素(图元)的建模方法(见图 1)。

1.3 接触力学模型及模型中参数的确定

在离散元法分析中, 颗粒与颗粒之间、颗粒与边界之间的接触作用力, 一般分为法向和切向两个方向, 并分别采用不同的接触力学模型来计算。由于要分析计算的颗粒数量较多, 采用较完备的接触力学理论来建立模型并由此计算接触力, 不仅计算复杂, 而且计算量较大, 因此, 通常都采用简化模型, 对于无粘干颗粒, 常用的接触力学模型有以下几种。

1.3.1 法向接触力学模型

对于法向接触力学模型, 常用的线性粘弹性模型为^[19]

$$F_n = k_n \delta_n + c_n v_n \quad (1)$$

式中 F_n ——接触两体间的法向作用力; k_n ——接触的法向刚度系数, 当颗粒与边界接触时 k_n 取颗粒的接触刚度系数, 当两颗粒接触时 $k_n = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$, k_1 、 k_2 ——分别为两颗粒的接触刚度系数; δ_n ——接触两体的法向叠合量; c_n 为法向粘性阻尼系数, 当颗粒与边界接触时 c_n 取颗粒的法向粘性阻尼系数, 当两颗粒接触时 $c_n = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2}$, c_1 、 c_2 ——分别为两颗粒的法向粘性

阻尼系数; 或 $c_n = -\frac{2 \ln e \sqrt{m_1 m_2}}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 e}}$, $m_0 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$, m_1 、 m_2 ——分别为两颗粒的质量, e ——碰撞恢复系数^[19];

v_n ——两体接触处的法向相对速度。

其它还有非线性粘弹性模型^[21]、半锁弹簧模型^[22]、弹塑性模型^[19]等。其中线性粘弹性模型已应用于金属棒插入土壤时土壤阻力及变形情况^[6]、糙米的筛分过程^[7]和筒仓中大豆的进出料过程的分析^[4]; 半锁弹簧模型已应用于大豆在斜槽中流动过程的分析^[5], LoCurto 等^[23]研究还表明, 在模拟大豆流动过程时, 半锁弹簧模型比非线性粘弹性模型更合适。

1.3.2 切向接触力学模型

由于切向力的大小与加载历史有关, 因而通常切向接触力的计算都采用增量形式, 其粘弹性力学模型为^[19]

$$F_s(t) = F_s(t - \Delta t) + k_s v_s \Delta t + c_s v_s \quad (2)$$

式中 $F_s(t)$ —— t 时刻接触两体间的切向作用力; Δt ——计算时间步长; k_s ——接触的切向刚度系数, 可由经验或试验确定, 也可由下式计算: $k_s = \lambda k_n$, $\lambda = 2/3 \sim 1$ ^[21]; 或 $k_s = k_n/2(1 + \nu)$, ν ——泊松比; 或 $k_s = \frac{8r}{2 - \nu_1 + \frac{2 - \nu_2}{G_2}}$, $r = \sqrt{\frac{3F_n R_1 R_2 (\theta_1 + \theta_2)}{8(R_1 + R_2)}}$, $G_i = E_i/2(1 + \nu_i)$, $\theta = 2(1 - \nu_i)/E_i$, R_1 、 R_2 ——分别为接触两体接触处的曲率半径; E ——接触两体的弹性模量; $i = 1, 2$ 为接触两体的编号; v_s ——接触处的切向相对速度; c_s ——切向粘性阻尼系数, 可由 $c_s =$

1.3.2 切向接触力学模型

由于切向力的大小与加载历史有关, 因而通常切向接触力的计算都采用增量形式, 其粘弹性力学模型为^[19]

$$F_s(t) = F_s(t - \Delta t) + k_s v_s \Delta t + c_s v_s \quad (2)$$

式中 $F_s(t)$ —— t 时刻接触两体间的切向作用力; Δt ——计算时间步长; k_s ——接触的切向刚度系数, 可由经验或试验确定, 也可由下式计算: $k_s = \lambda k_n$, $\lambda = 2/3 \sim 1$ ^[21]; 或 $k_s = k_n/2(1 + \nu)$, ν ——泊松比; 或 $k_s = \frac{8r}{2 - \nu_1 + \frac{2 - \nu_2}{G_2}}$, $r = \sqrt{\frac{3F_n R_1 R_2 (\theta_1 + \theta_2)}{8(R_1 + R_2)}}$, $G_i = E_i/2(1 + \nu_i)$, $\theta = 2(1 - \nu_i)/E_i$, R_1 、 R_2 ——分别为接触两体接触处的曲率半径; E ——接触两体的弹性模量; $i = 1, 2$ 为接触两体的编号; v_s ——接触处的切向相对速度; c_s ——切向粘性阻尼系数, 可由 $c_s =$

其它还有非线性粘弹性模型^[21]、半锁弹簧模型^[22]、弹塑性模型^[19]等。其中线性粘弹性模型已应用于金属棒插入土壤时土壤阻力及变形情况^[6]、糙米的筛分过程^[7]和筒仓中大豆的进出料过程的分析^[4]; 半锁弹簧模型已应用于大豆在斜槽中流动过程的分析^[5], LoCurto 等^[23]研究还表明, 在模拟大豆流动过程时, 半锁弹簧模型比非线性粘弹性模型更合适。

1.3.2 切向接触力学模型

由于切向力的大小与加载历史有关, 因而通常切向接触力的计算都采用增量形式, 其粘弹性力学模型为^[19]

$$- \frac{2 \ln e \sqrt{m_1 m_2}}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 e}} \text{ 计算}^{[24]}。$$

同法向接触力学模型一样, 切向粘弹性模型也存在着确定 c_s 较难等缺点。为此, 一些研究人员又根据 Mindlin 的弹性摩擦接触理论, 由不同简化得到几种不同的力学模型, 如 Walton^[22] 和 Vu-Quoc 模型^[25] 等。Venuri 等^[26] 还提出一种直接计算总切向力的模型, 以代替上述增量模型。

在上述切向力学模型中, 一般来说, 当法向力选取弹塑性模型时, 切向力也应选取弹塑性模型, 这样可能更合理一些^[27]。

除上述介绍的无粘干颗粒模型外, 还有其它一些接触力学模型。如考虑颗粒具有表面粘附作用的粘聚力力学模型^[28]; 考虑颗粒与液体耦合的湿颗粒液桥模型^[29]; 考虑颗粒与气体耦合时的气固耦合模型^[30]; 考虑整体材料局部破坏的连结模型^[31] 等。在实际分析散粒农业物料流动过程时, 选用哪种力学模型更合适, 也是一个需要深入研究的问题。

1.3.3 力学模型中参数的确定

散粒农业物料和农机工作部件的物理机械性质不同, 力学模型中参数, 如刚度系数、弹性模量、泊松比、碰撞恢复系数、摩擦系数等也不同, 这些参数的变化也将影响分析精度。

对于线性粘弹性模型中的法向刚度系数 k_n 和法向阻尼系数 c_n , 可由试验测取。Negi 等^[32] 通过振动试验, 测取了大豆的自振频率及在此频率下的振动响应, 并通过计算得到大豆的 k_n 和 c_n 。Klinker 等^[20] 通过测取颗粒作用力和变形的关系, 并用最小二乘法拟合成直线, 从而得到 k_n 的值。对于半锁弹簧模型中的刚度系数 k_1 , 则应取力和变形曲线接近屈服点处的斜率^[26]。

散粒农业物料的物理机械性质通常与含水率有关, LoCurto 等^[23] 研究了不同含水率的大豆种子, 以不同速度碰撞塑料和金属板时, 碰撞恢复系数 e 的变化规律。Yang 等^[33] 研究了大豆、小麦当其形状、尺寸、含水率、碰撞速度、碰撞角度不同时的碰撞特性。Zhang 等^[27] 还提出求解大豆的弹性模量、泊松比和屈服应力的方法等等。

1.4 邻居搜索与接触判断

在采用离散元法分析计算时, 通过求解每个颗粒与其它颗粒或边界的接触作用力, 由牛顿第二定律来计算该颗粒的运动速度和位移, 而在计算该颗粒与其它颗粒的接触作用力前, 首先应确定与该颗粒接触的颗粒或边界, 该过程称接触检查。为了减小接触检查的计算量, 一般分成两个步骤, 第一步称邻居搜索, 即采用某种方法确定与该颗粒较为接近的颗粒或边界(称邻居元), 第二步称接触判断, 即采用某种方法判定该颗粒与邻居颗粒或边界是否真正接触。在离散元法分析中, 常用 3 种邻居搜索方法^[26], 即邻居列表法(Neighbor List)、网格法(Lattice or Boxing)和边界盒法(Bounding Box)。分析可知, 网格法更适合于运动边界和边界结构较复杂(如

有内凹情况)的通用分析软件开发。

对于颗粒间的接触判断方法,一般来说与颗粒的几何模型有关。对于圆形或球形几何模型颗粒,只须简单判断两颗粒的中心距与它们半径之和的差。对于椭圆形几何模型颗粒,接触判断常用3种方法。一种是求两椭圆交点的方法,并把两交点中点作为接触点,第二种称几何势方法(Geometric Potential Algorithms),第三种是公法线法(Common Normal Algorithms)。对于由四段圆弧组成的椭圆和凸多边形(见图3),Potapov等^[12]提出通过计算两椭圆中心距矢量与圆弧中心点连线矢量的数性积来判断是否接触。对于更复杂的二维几何模型,当模型尺寸不均一时,Schinner^[34]还提出了一种改进的边界盒方法。对于其它复杂的三维几何模型,目前只能采用公共面法判断接触状况,而如何简单地判断其接触,及如何简单地计算接触时的叠合量等,还需要深入研究。

离散元法发展到今天,已有大量的应用软件出现。如ITASCA咨询公司开发的著名UDEC和3DEC及PFC-2D和PFC-3D软件,Thornton研究组开发的著名GRANULE软件及其它研究组开发的软件^[18,24,35]等,某些软件还可以通过英特网下载可执行代码^[24]。国内也出现了2D-Block、TRUDEC、SUPER-DEM^[36]等软件。这些离散元法软件通常都有边界建模模块,用以建立边界的离散元法分析模型,而由边界的CAD模型建立其离散元法分析模型,并在此基础上实现CAD软件与离散元法性能分析软件的集成尚未见报道。

2 集成分析设计软件的开发及应用

在对AutoCAD2000进行二次开发的基础上,实现了由边界的CAD模型建立其离散元法分析模型,并在此基础上进一步实现了AutoCAD软件与自主研制的离散元法性能分析软件的有机集成,从而开发出一种集成分析设计软件系统(见图4)。由于该系统可自动生成多种几何模型的散粒物料,及可采用多种接触力学模型进行接触力的计算,再加上采用了由CAD模型(CAD设计图)建立工作部件的离散元法分析模型,因而该软件能够适合于多种农机工作部件的分析和设计,但这还有赖于大量的试验验证。

图5为使用该软件由其CAD模型(见图4)建立的一种组合内窝孔精密排种器^[37]的离散元法分析模型,图6图7图8图9为通过修改CAD模型和离散元计算参数,对该排种器进行的工作仿真过程分析,图10为由KodakPS-220高速视频摄像系统拍摄的与图9相同工作条件下,组合内窝孔精密排种器的实际工作状况,图11为通过修改CAD模型得到的另外二种型孔轮式排种器的工作过程仿真分析。比较图9和图10可知,组合内窝孔精密排种器内种子的整体运动趋势较相近,由此证明了该软件的可行性及优点,有关该软件的详细内容将另文撰述。

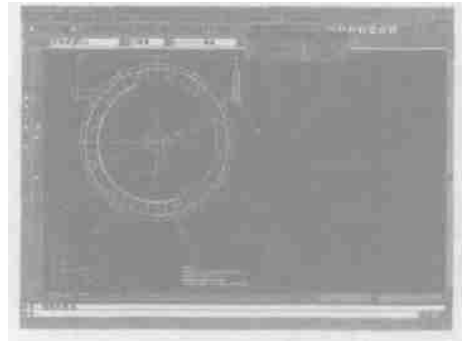


图4 农业机械工作部件的集成分析设计系统主界面
Fig 4 Main interface of the integrated software for designing and analyzing working parts of agricultural machinery

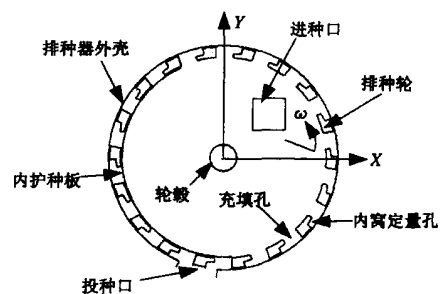


图5 组合内窝孔精密排种器的离散元法分析模型
Fig 5 Analysis model of the precision seed meter with combined inner-cell by discrete element method

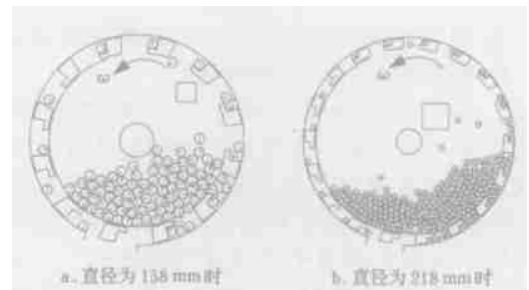


图6 改变CAD模型中排种轮直径时组合内窝孔精密排种器的工作过程仿真
Fig 6 Simulation of working process for the precision seed meter with combined inner-cell through changing the diameter of the cell wheel

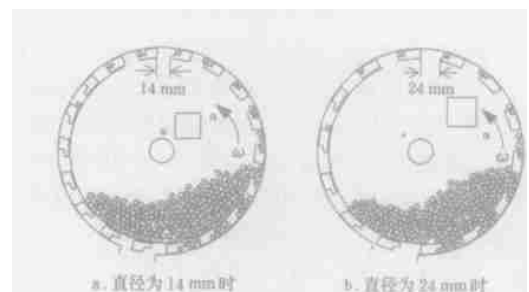


图7 改变CAD模型中充填孔直径时组合内窝孔精密排种器的工作过程仿真
Fig 7 Simulation of working process for the precision seed meter with combined inner-cell through changing the diameter of the filling hole

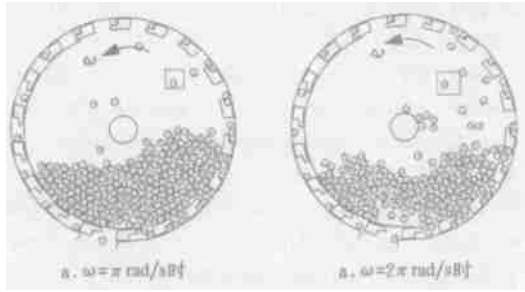


图 8 改变输入计算参数(排种轮角速度 ω) 时组合内窝孔精密排种器的工作过程仿真

Fig 8 Simulation of working process for the precision seed meter with combined inner-cell through changing the angular speed ω of the cell wheel

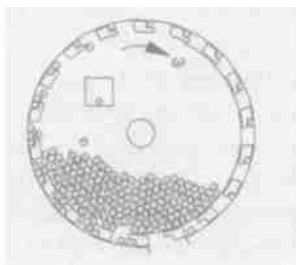


图 9 组合内窝孔精密排种器工作过程仿真

Fig 9 Simulation of working process for the precision seed meter with combined inner-cell



图 10 组合内窝孔精密排种器工作过程实验

Fig 10 Working process of the precision seed meter with combined inner-cell in the experiment

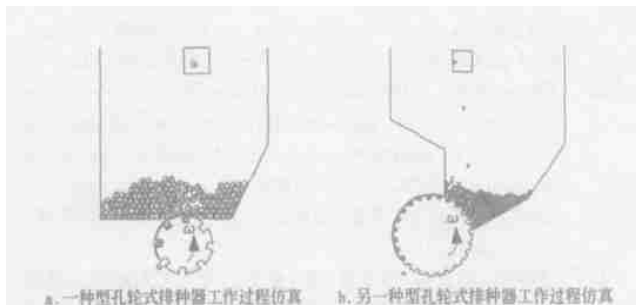


图 11 改变 CAD 模型时另二种型孔轮式排种器的工作过程仿真

Fig 11 Simulation of working process for the other two seed meters through changing the CAD model

3 结 语

1) 该软件能在设计阶段通过修改农机工作部件的 CAD 模型(CAD 设计图), 对不同结构和尺寸的农机工作部件进行性能分析和评价。

2) 能通过农机工作部件的 CAD 模型进行农机工作部件工作过程的动态仿真, 由此分析其工作原理、工作过程、结构及尺寸参数和运动参数对其性能的影响。

3) 可通过改变散粒物料的数字化模型、边界的离散元法分析模型及接触力学模型和参数, 来分析不同散粒物料与不同工作部件的接触作用, 因而该软件能够适

合于多种农机工作部件的分析和设计, 但这还有赖于大量的试验验证。

4) 目前在进一步完善该二维分析设计软件的同时, 已着手三维软件的开发工作。三维软件除具上述优点外, 还可进一步与其它软件集成, 也可由三维 CAD 软件的机构运动分析模块对构件进行运动学和动力学分析, 或由有限元分析模块分析构件的应力, 或由装配模块进行部件的装配检查, 或由 CAM 模块输出数控机床加工程序等, 以实现农机工作部件的数字化设计与制造或无纸化设计, 其应用前景是非常光明的。

[参 考 文 献]

- [1] Jaeger H M, Nagle S R, Behringer R P. The physics of granular materials[J]. Physics Today, 1996, 49(2): 32-38
- [2] Cundall P A, Strack O L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65
- [3] 徐泳, 孙其诚, 张凌, 等. 颗粒离散元法研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(2): 251-260
- [4] Lu Z, Negi S C, Jofriet J C. A numerical model for flow of granular materials in silos Part I: model development[J]. J Agric Engng Res, 1997, 68: 223-229
- [5] Zhang X, Vu-Quoc L. Simulation of chute flow of soybeans using an improved tangential force displacement model[J]. Mechanics of Materials, 2000, 32: 115-129
- [6] Tanaka H, Momozu M, Oida A, et al. Simulation of soil deformation and resistance at bar penetration by the distinct element method[J]. Journal of Terramechanics, 2000, 37: 41-56
- [7] Sakaguchi E, Suzuki M, Favier J F, et al. Numerical simulation of the shaking separation of paddy and brown rice using the discrete element method[J]. J Agric Engng Res, 2001, 79(3): 307-315
- [8] Momozu M, Oida A, Yamazaki M, et al. Simulation of a soil loosening process by means of the modified distinct element method[J]. Journal of Terramechanics, 2003, 39: 207-220
- [9] 铃木基胜, 阪口荣一郎, 川上昭太郎. 籼の玄米の揺動選別の离散要素 simulation[J]. 农业机械学会志, 2002, 64(3): 91-100
- [10] Williams J R, Rege N. The development of circulation cell structures in granular materials undergoing compression[J]. Powder Technology, 1997, 90: 187-194
- [11] Dziugys A, Peters B. A new approach to detect the contact of two dimensional elliptical particles[J]. Int J Numer Anal Meth Geomech, 2001, 25: 1487-1500
- [12] Potapov A V, Campbell C S. A fast model for the simulation of non-round particles[J]. Granular Matter, 1998, 1: 9-14
- [13] Cleary P W, Sawley M L. DEM modeling of industrial granular flow: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge[J]. Applied Mathematical Modelling, 2002, 26: 89-111
- [14] Nouguié-Lehon C, Cambou B, Vincens E. Influence of particle shape and angularity on the behavior of granular

- materials: a numerical analysis [J]. *Int J Numer Anal Meth Geomech*, 2003, 27: 1207- 1226
- [15] Cleary P W. DEM Simulation of industrial particle flows: case studies of dragline excavators, mixing in tumblers and centrifugal mills [J]. *Powder Technology*, 2000, 109: 83- 104
- [16] Oger L, Savage S B, Corriveau D, et al. Yield and deformation of an assembly of disks subjected to a deviatoric stress loading [J]. *Mechanics of Materials*, 1998, 27: 189- 210
- [17] Kremmer M, Favier J F. A method for representing boundaries in discrete element modelling—Part II Kinematics [J]. *Int J Numer Meth Engng*, 2001, 51: 1423 - 1436
- [18] Peters B, Dziugys A. Numerical simulation of the motion of granular material using object-oriented techniques [J]. *Comput Methods Appl Mech Engrg*, 2002, 191: 1983- 2007.
- [19] Mishra B K. A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method: Part I—contact mechanics [J]. *Int J Miner Process*, 2003, 71: 73 - 93
- [20] Klinker D H, Henderson J M. Flow model development for spherical discrete objects [J]. *Transactions of The ASAE*, 1992, 35(1): 225- 233
- [21] Mishra B K, Murty C V R. On the determination of contact parameters for realistic DEM simulation of ball mills [J]. *Powder Technol*, 2001, 115: 290- 297.
- [22] Walton O R, Braun R L. Viscosity, Granular-temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks [J]. *Journal of Rheology*, 1986, 30(5): 949- 980
- [23] LoCurto G J, Zhang X, Zakirov V, et al. Soybean impacts: Experiments and dynamic simulations [J]. *Transactions of the ASAE*, 1997, 40(3): 789- 794
- [24] Asmar B N, Langston P A, Matchett A J, et al. Validation tests on a distinct element model of vibrating cohesive particle systems [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2002, 26: 785- 802
- [25] Vu-Quoc L, Zhang X. An accurate and efficient tangential force-displacement model for elastic frictional contact in particle-flow simulations [J]. *Mechanics of Materials*, 1999, 31: 235- 269.
- [26] Vemuri B C, Chen I, Vu-Quoc L, et al. Efficient and accurate collision detection for granular flow simulation [J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1998, 60: 403- 422
- [27] Zhang X, Vu-Quoc L. A method to extract the mechanical properties of particles in collision based on a new elasto-plastic normal force-displacement model [J]. *Mechanics of Materials*, 2002, 34: 779- 794
- [28] Mishra B K, Thornton C, Bhinji D. A preliminary numerical investigation of agglomeration in a rotary drum [J]. *Minerals Engineering*, 2002, 15: 27- 33
- [29] Muguruma Y, Tanaka T, Tsuji Y. Numerical simulation of particulate flow with liquid bridge between particles (simulation of centrifugal tumbling granulator) [J]. *Powder Technology*, 2000, 109: 49- 57.
- [30] Kolaitis D, Founti M A. Modeling of the gas-particle flow in industrial classification chambers for design optimization [J]. *Powder Technology*, 2002, 125: 298- 305
- [32] Sawamoto Y, Tsuboto H, Kasai Y, et al. Analytical studies on local damage to reinforced concrete structures under impact loading by discrete element method [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1998, 179: 157- 177.
- [32] Negi S C, Lu Z, Jofriet J C. A numerical model for flow of granular materials in silos Part 2: model validation [J]. *J Agric Engng Res*, 1997, 68: 231- 236
- [33] Yang Y, Schrock M D. Analysis of grain kernel rebound motion [J]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(1): 27 - 31.
- [34] Schinner A. Fast algorithms for the simulation of polygonal particles [J]. *Granular Matter*, 1999, 2: 35- 43
- [35] Cleary P W, Metcalfe G, Liffman K. How well do discrete element granular flow models capture the essentials of mixing processes [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 1998, 22: 995- 1008
- [36] 刘凯欣, 高凌天. 离散元法研究的评述 [J]. *力学进展*, 2003, 33(4): 483- 490
- [37] 于建群, 马成林, 杨海宽, 等. 组合内窝孔玉米精密排种器型孔的研究 [J]. *吉林工业大学自然科学学报*, 2000, 30(1): 16- 20

Application of discrete element method to research and design of working parts of agricultural machines

Yu Jianqun¹, Fu Hong², Li Hong¹, Shen Yanfang¹

(1. School of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: This paper presents a novel method to establish the oneself analyzing model of the Discrete Element Method (DEM) based on the Computer Aided Design (CAD) model for the working parts of agricultural machine, then to implement the integration between CAD software and the DEM analyzing software for analyzing the performance of the working parts of agricultural machines which are contacted with granular material at working, and establish an universal method of digital design and an integrated software for designing and analyzing the working parts of agricultural machines. In this paper, the framework and the function of the method and the integrated software were introduced, the problem and development in the research were reviewed.

Key words: digital design; discrete element method; granular materials; agricultural machine; working parts