

离散元素法在工业过程分析与 产品设计中的应用初探^{*}

胡国明, 郭 胜, 陈金鑫, 胡 励, 简 斌
(武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:离散元素法(DEM)是求解与分析离散系统的运动规律与力学特性的一种新型数值方法。目前,DEM 已初步拓展至工业过程分析与工业产品设计领域。针对 DEM 仿真的特点,尝试性分析了 DEM 在工业过程分析与产品设计中应用的特征,探讨了 DEM 在工业过程分析与产品设计仿真应用的分类,讨论了 DEM 工业应用中面临的问题及挑战。

关键词:离散元素法;工业应用;仿真

中图分类号:TH122;TB44;TD453;TQ029

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)08-0001-05

Applications of DEM in industrial process analysis and product design

HU Guo-ming, GUO Sheng, CHEN Jin-xin, HU Li, JIAN Bin
(Department of Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Discrete element method (DEM) is currently being applied in the industries that involve the operation and process of particles. Aiming at the application of DEM in the industrial process analysis and product design, the characteristics of the DEM simulation were analyzed, the fields and its classification of industrial applications of DEM were introduced, and the problems and challenges that face the DEM application were discussed.

Key words: discrete element method (DEM); industrial application; simulation

0 引 言

离散元素法(Discrete Element Method, DEM)是继有限元法(FEM)、计算流体动力学(CFD)之后,用于分析复杂机械系统中物理现象,特别是运动规律与动力学参数的一种强有力的数值计算方法^[1-2]。它与求解复杂连续系统的有限元法及边界元法具有类似的物理涵义和平行的数学概念,但具有不同的模型与处理手段。从岩土力学、地质力学等力学行为的研究,到地球物理、矿物工程、土木工程和化学工程等领域的工程应用,DEM 已经被众多学者和工程师应用于涉及固体颗粒操作和处理过程的工业部门^[3-4]。特别是近十几年来,DEM 的应用已从小规模的二维模拟发展到大规模复杂工业对象的仿真^[5]。DEM 已经在工业过程分析与产品设计中发挥重要作用。

本研究初步探讨了离散元素法在工业过程分析与

产品设计中的应用。

1 DEM 工业应用的特征

工业过程分析与产品设计的 DEM 仿真可以提供不同设计和处理环节中的相关重要信息与参数。DEM 仿真产生了大量的中间信息,通过对这些数据信息的进一步分析,可以提取出分析工业对象所必需的数据和参数。其中有些数据参数可以在物理系统中通过测量得到,而有些数据参数则只能从 DEM 的仿真分析中获得。这些仅能从 DEM 的仿真分析中获得的的数据或参数突出显示了 DEM 仿真在设计分析背景中的价值。它提供了物理实验不能提供的洞察设计或生产过程信息的手段。

DEM 应用于工业过程分析与产品设计领域时能够很好地解决大变形和多个物体的接触问题。与其他的用于分析连续体性能的方法相比,DEM 是一种分析

仿真粒子间接触行为的数值方法。例如很多典型的工程问题可以采用 FEM 解决。FEM 在分析小弹性变形问题、结构振动的模态识别方面占据主导地位。而对于求解破坏、断裂、大变形和多个物体的碰撞问题,离散元素法则显示出了其功能优势和灵活性。

工业过程与产品的 DEM 仿真有如下特点:①准确并高效地发现颗粒单元之间的接触与分离;②适应接触力、加速度、速度、位移的迅速变化,特别是这些参数的方向也在不断变化;③颗粒单元处于离心力及 Coriolis 惯性力等复杂受力环境中,接触时间短,时间步长要求小,计算量大;④颗粒单元接触边界的复杂,非对称碰撞大量存在,切向接触力对颗粒运动的影响至关重要;⑤颗粒滚动的存在及摩擦系数影响静摩擦极限滑动条件和颗粒滚动。

为更好地解决工业应用中的实际问题,可将 DEM 同其他数值计算方法合并使用,即 DEM 同其他软件与工具相耦合。目前 DEM 与 CFD 耦合的原则已经建立,并被广泛用于流化床、气力输送、旋风分离、高炉等的设计分析。在颗粒与结构相交叉的领域,DEM 与结构分析及动力学的耦合将具有巨大的应用和发展前景。一个正在发展的 DEM 应用领域是颗粒-电磁耦合。除了颗粒之间的静电力之外,许多过程包含颗粒、电场和磁场的交互作用。例如在印刷过程使用了荷电和磁性颗粒,随着颗粒的尺寸减小,电磁交互作用的影响便变得更为重要,对此 DEM 提供了一个很好的解决方案。因此,DEM 与其他连续数值分析方法的耦合使用是非常有发展前景的。

2 DEM 工业应用的分类

2.1 DEM 在工业过程分析与产品设计的独立应用

在离散元素法的思想提出近二十年后,1990 年 Rajamani 和 Mishra^[6]尝试将 DEM 应用于球磨机研磨介质的运动仿真。球磨机等粉体制备与散体处理装置的参数分析是 DEM 仿真应用较多的领域,DEM 对球磨机等粉体制备与散体处理装置中介质运动的仿真分析发挥了重要作用。Inoue^[7]、Whiten^[8]、Moys^[9]、Shimizu^[10]等研究者都在这方面做了大量的工作。Cleary 等对 DEM 的工业应用进行了一系列的研究,其范围覆盖若干工业过程与工业产品。

2000 年后,DEM 在工业产品研发、过程分析与优化方面的应用逐步成熟,并取得了重要成果,显示出了较强的功能,且应用范围不断扩大。特别是在粉体制备与散体处理装置等工业产品中,DEM 已成为设计、

计算、分析与仿真不可或缺的工具。

笔者完成的 DEM 仿真截图如图 1 ~ 图 3 所示。

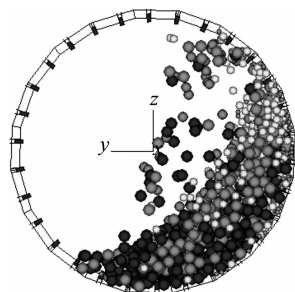


图 1 球磨机研磨介质运动的 DEM 仿真

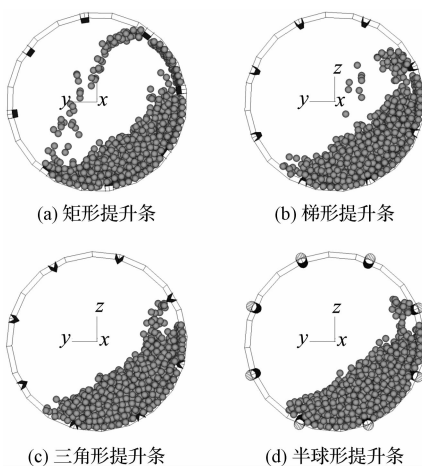


图 2 使用 DEM 仿真对球磨机进行优化分析

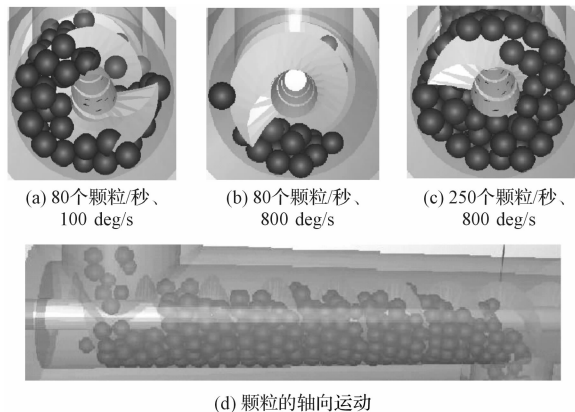


图 3 螺旋绞刀颗粒输送的 DEM 仿真

2.2 DEM 在颗粒-结构相互作用场合的应用

DEM 已成功应用于处理颗粒-结构相互作用 (Particle Structure Interaction, PSI) 问题。如计算输送装置^[11]、挖掘机铲斗^[12]、漏斗^[13]等结构或装置中颗粒材料施加在机械结构上的载荷。结合 CAD 技术可以开发更加复杂的 DEM 模型。

对于 PSI 问题,DEM 可以同其他 CAE 工具耦合使用,并以 CAE 工具提供应用的载荷。PSI 的 DEM 模型可以分为:①单向耦合;②双向耦合;③完全耦合。最

简单的 PSI 模型为单向耦合,其中 DEM 求解为结构分析提供载荷。单向耦合是一种 DEM 与 FEA 耦合进行结构分析的有效手段,它要求结构的变形不能很大,可以进行磨损与冲击能量的计算。

研究实践表明 DEM 是分析筛分问题、处理物料混合运动、模拟物料装载过程等的一种有效工具。因此 DEM 在土方机械^[14]、筛分机械^[15]、混合机^[16]、回转窑^[17]等工程装备中得到逐步深入的应用。

在喷丸强化工艺过程的分析中,通过与 FEA 方法的耦合,DEM 可以模拟和分析各种工艺参数对喷丸强化效果的影响^[18]。如图 4 所示,使用 DEM 与 FEA 耦合的方法,对喷丸强化工艺进行模拟,分析在喷丸强化工艺中,工件表面形成的残余应力分布。

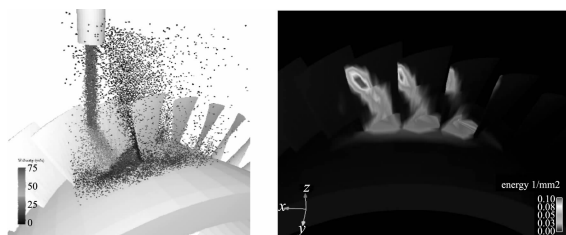
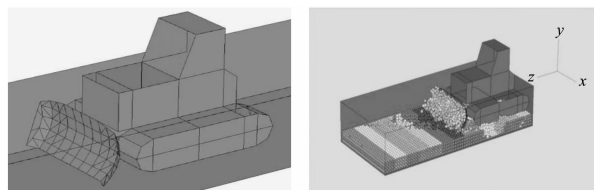


图 4 DEM 模拟喷丸强化工艺

2.3 DEM 与多体动力学的耦合应用

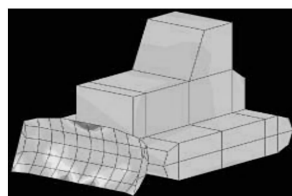
将 DEM 与多体动力学的仿真与控制方法进行耦合,可为颗粒与机械动力学的联合求解提供一个整体方法。这是 CAE 的一个相对新的区域并具有较大潜能。例如,DEM-Solutions 公司开发的 DEM 软件 EDEM 能与多个 CAE 软件耦合。在 EDEM 同 MSC. Easy5 的耦合中,MSC. Easy5 用于模拟液压、机械和电器控制系统对外部载荷的响应。而 MSC. Easy5 还可以同多刚体动力学模拟工具 MSC. ADAMS 耦合。这样构成了一个 EDEM-Easy5-ADAMS 求解器,能够实现颗粒系统、机械动力学和液压控制的仿真。

如图 5 所示,日本小松制作所^[19]使用 DEM 与多体动力学耦合的方法来模拟推土机工作,并分析工作过程中铲斗的应力分布。使用 DEM 进行金属切削过程的模拟如图 6 所示。在制造加工的过程中,使用 DEM 进行金属切削过程的模拟,可以观察加工工艺参数对材料塑性和断裂的影响。



(a) 铲斗 CAD 模型进行网格分析

(b) 离散元素法仿真



(c) 工作过程中铲斗应力分布

图 5 推土机的 DEM 仿真

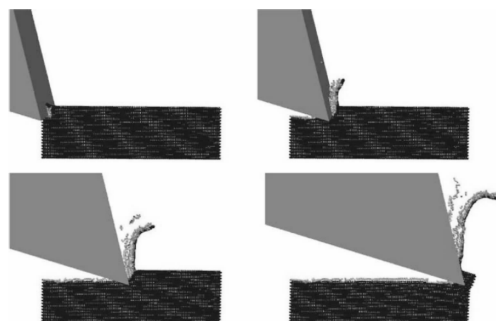


图 6 金属切削的 DEM 仿真

2.4 DEM 在颗粒-流体相互作用场合的应用

颗粒-流体相互作用 (Particle Fluid Interaction, PFI) 的仿真是 DEM 工业应用领域的一个重要组成部分。在颗粒-流体系统中,当固体颗粒所占比重很少 (低于 10%),且雷诺数不是很大时,可单独使用 DEM 对系统进行仿真分析,只需要增加流体拖曳力来表征流体对颗粒运动的影响,此拖曳力是由外加的流场计算得出的。当流体和固体颗粒之间的动量交换足够大而影响流体流动状态时,则需要使用 DEM-CFD 耦合方案。

DEM-CFD 耦合方案在流固耦合问题的求解中,如流化床^[20]与沸腾床^[21]的仿真分析,特别是气力输送应用领域,已经得到了很好的应用。Tsuji^[22]将 DEM 应用于非粘性颗粒的水平管道输送的仿真。Mikio Sakai^[23]研究了气相运输中的 DEM 建模。管道气相运输颗粒运动的 DEM 仿真如图 7 所示。

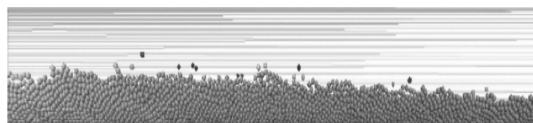


图 7 管道气相运输颗粒运动的 DEM 仿真

颗粒尺度的 PFI 仿真克服了传统的仅仅使用 CFD 连续模型仿真的诸多缺陷。商业 DEM 工具与 CFD 软件耦合技术,例如 EDEM 和 FLUENT 的耦合,延伸了这项技术的应用范围,使其可以适用于分析研究更为复杂的几何模型及必须使用无规则网格的处理条件。

另一种 PFI 模型是求解高压流体和多孔或粘结

介质的耦合作用问题。例如,石油/天然气的钻探过程(高压钻井泥浆严重地影响了钻井效率),并筒周围岩石断裂的产生,高压混凝土储存容器,管道和阀门的腐蚀。这类系统的仿真是极具挑战性的,需要 DEM 和其他技术相互配合。

2.5 DEM 在颗粒-电磁相互作用场合的应用

带电颗粒或磁性颗粒的相互作用及这些颗粒与电磁场的相互作用(Particle Electromagnetic Interaction, PEMI)是一些工业应用的重要特点,例如磁分离、打印、电子照相、除尘与减污、冶金及制药等工业部门。这些应用场合的仿真包括了模拟短程或长程的颗粒与颗粒之间、颗粒与表面之间和颗粒与场之间的相互作用。

月球表面土壤的颗粒也是带静电的,它们能够吸附在设备、太空服和传感器的表面。美国国家航空航天局探索宇宙任务执行委员会(NASA's Exploration Systems Mission Directorate)正在研发用来应对月球环境下的带电颗粒的技术和设备。美、日、中等国的宇航部门启动了一些开发太空粒子静电力动力学仿真模型的项目^[24]。

应用 DEM 可以建立印刷过程中墨粉荷电行为的模型,分析激光打印机等打印、复印、印刷过程的非接触作用过程^[25],久保田等^[26]使用 DEM 仿真探讨了静电照相印刷机转印过程的工艺特点和转印过程对墨粉粘结力的要求,DEM 对墨粉转移过程的仿真需要考虑墨粉的碰撞、摩擦、静电、粘结力,建立墨粉与光鼓表面边界的作用模型。墨粉的转移过程的仿真截图如图 8 所示。

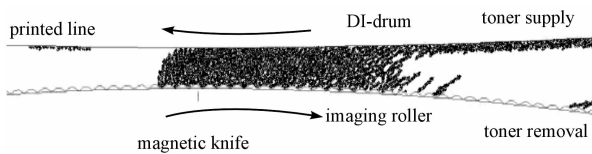


图 8 墨粉的转移过程的仿真截图

3 DEM 工业应用的问题与挑战

DEM 在工业中的应用还存在两个关键问题:① DEM“材料模型”的确定,也就是接触模型与非接触力关系的建立及相关参数的选取;②由问题对象关联的颗粒个数与规模的限制。

DEM 材料模型要求能对散体行为进行最优近似。如何确保创建的材料模型是最佳形式,并能够准确地描述实际处理的问题及条件(准静态过程或动态过程)仍存在许多有待解决的问题。对于选定的散体颗粒材料,如何通过实验室测量的试验数据确定最佳的材料模型,还需要在方法学上做大量的研究。已经有

一些通过实验得到的广为认可的材料模型可供选择,但是它们大多是建立在对单个颗粒特性的直接测量的基础上。尽管这些单个颗粒的内在特性是需要的,但是单个颗粒的特性参数并不符合工业应用场合中的颗粒系统的材料特性。

在 DEM 仿真中,随着仿真系统中颗粒数目的增多,计算机的运算量呈几何倍数的增加,这是制约 DEM 应用的关键因素。并行处理技术是目前 DEM 仿真的常用手段,它将增大 DEM 求解问题的颗粒数的规模。随着计算机性能的飞速提高,DEM 仿真的计算规模在不断增大的同时,针对应用领域的求解问题的规模及所需信息量与信息种类,它还采用了一些简化技术,例如颗粒尺寸的划分、颗粒细小碎片的截止、颗粒形状的近似等。

随着 IT 技术的迅猛发展,计算机的性价比不断提高,今天高性能的 PC 机已使 DEM 的运算时间在用户可接受的范围内,这使得 DEM 成为一个应用广泛的工业产品研发、过程设计与优化的有效工具。

4 结束语

本研究初步探讨了离散元素法在工业过程分析与产品设计中的应用。离散元素法是继有限元法、计算流体动力学之后用于分析机械系统中的物理现象的另一种有力的数值计算方法,具有良好的应用前景。随着离散元理论的不完善和计算机技术的快速发展,离散元素法将更被更广泛深入地应用于工程实际,为工业过程分析和产品设计提供更灵活有效的解决方案。

致谢:感谢 Dem-Solutions 公司 J. Favier 博士、S. Arumugam 博士及研发团队提供的技术文献与讨论。

参考文献(References):

- [1] CUNDALL P A. A Discontinuous Future for Numerical Modelling in Geomechanics[J]. *Geotech. Eng.*, 2000, 149(1): 41-47.
- [2] STEIN E, BORST R D, HUGHES T J R. Encyclopedia of computational mechanics, Volume 1: Fundamentals [M]. John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [3] FAVIER J. Industrial application of DEM: Opportunities and Challenges [C]//International Conference on Discrete Element Methods '07. Brisbane, Australia: [s. n.], 2007: [s. n.].
- [4] FLEISSNER F, GAUGELE T, EBERHARD P. Applications of the discrete element method in mechanical engineering [J]. *Multibody Syst. Dyn.*, 2007(18): 81-94.

- [5] CLEARY P W. Industrial particle flow modelling using discrete element method [J]. **Engineering Computations**, 2009, 26(6): 698 – 743.
- [6] MISHRA B K, RAJAMANI R K. Motion analysis in tumbling mills by the discrete element method [J]. **Kona**, 1990 (8): 92 – 98.
- [7] INOUE T, OKAYA K, OWADA S, et al. Development of a centrifugal mill—a chain of simulation, equipment design and model validation [J]. **Powder Technology**, 1999, 105(1–3): 342 – 350.
- [8] ZHANG D, WHITEN W J. Contact modelling for discrete element modelling of ball mills [J]. **Minerals Engineering**, 1998, 11(8): 689 – 698.
- [9] MOYS M H, VANNIEROP M A, SMIT I. Progress in measuring and modelling load behaviour in pilot and industrial mill [J]. **Minerals Engineering**, 1996, 9(12): 1201 – 1214.
- [10] SHIMIZU Y, CUNDALL P A. Three-dimensional DEM simulation of bulk handling screw conveyors [J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2001, 127(9): 864 – 872.
- [11] ZHANG X, VU-QUOC L. Simulation of chute flow of soybeans using an improved tangential force-displacement model [J]. **Mechanics of Materials**, 2000, 32(2): 115 – 29.
- [12] COETZEE C J, ELS D N J. Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling [J]. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2009, 65(2): 198 – 212.
- [13] WILLIAM R K, JENNIFER S C, CARL R W, et al. Predicting the flow mode from hoppers using the discrete element method [J]. **Powder Technology**, 2009, 195(1): 1 – 10.
- [14] EUGENIUSZ R, PRZEMYSAW M, JERZY C. Numerical and experimental analysis of a mine's loader boom crack [J]. **Automation in Construction**, 2008(17): 271 – 277.
- [15] CHEN Y H, TONG X. Application of the DEM to screening process: a 3D simulation [J]. **Mining Science and Technology**, 2009, 19(4): 493 – 497.
- [16] 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.
- [17] FINNIE G J, KRUYT N P, YE M, et al. Longitudinal and transverse mixing in rotary kilns: a discrete element method approach [J]. **Chemical Engineering Science**, 2005, 60(15): 4083 – 4091.
- [18] HONG T, OOI J Y, SHAW B. Numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses [J]. **Engineering Failure Analysis**, 2008(15): 1097 – 1110.
- [19] 加納伸也, 天野昌春, 寺坂裕二, 松本典久, 和田達夫, 個別要素法によるテラメカシミュレーション [J]. **Komatsu Technical Report**, 2003, 151(49): 13 – 19.
- [20] XU B H, YU A B. Numerical simulation of the gas-solid flow in a fluidized bed by combining discrete particle method with computational fluid dynamics [J]. **Chemical Engineering Science**, 1997, 52(16): 2785 – 2809.
- [21] ZHAO X L, LI S Q, LIU G Q, et al. DEM simulation of the particle dynamics in two-dimensional spouted beds [J]. **Powder Technology**, 2008, 184(2): 205 – 213.
- [22] TSUJI Y, TANAKA T, ISHIDA T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe [J]. **Powder Technology**, 1992, 71(3): 239 – 250.
- [23] SAKAI M, KOSHIZUKA S. Large-scale discrete element modeling in pneumatic conveying [J]. **Chemical Engineering Science**, 2009, 64(3): 533 – 539.
- [24] BUI H H, KOBAYASHI T, FUKAGAWA R, et al. Numerical and experimental studies of gravity effect on the mechanism of lunar excavations [J]. **Journal of Terramechanics**, 2009, 46(3): 115 – 124.
- [25] 後藤拓哉, 栗原一晃. 電子写真シミュレーション技術 [J]. 沖テクニカルレビュー, 2006, 73(4): 64 – 67.
- [26] 久保田哲行, 井上博之, 茂木正徳. 電子写真プリンタにおける現像剤挙動の数値解析 [J]. 富士通, 2000, 51(5): 280 – 285.

[编辑: 李 辉]