

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250326001

国产高性能离散元软件 MatDEM 的研发与应用

刘春, 杨泽荣, 刘辉

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023)

摘要: 离散元法 (DEM) 能够有效模拟岩土体的非连续性与大变形破坏过程, 在工程领域具有广泛的应用前景。然而, 离散元法在工程应用中面临三大核心挑战: 精确建模难度大、多场耦合理论不完善以及计算效率低下。针对这些问题, 国产高性能离散元软件 MatDEM 实现了以下创新突破: 基于岩土体跨尺度建模方法与离散元宏微观转换公式, 开发了离散元材料自动训练技术, 显著降低了精确建模的复杂度; 提出了离散元孔隙密度流法, 实现了多场、流固耦合与溶质运移一体化数值模拟; 采用原创的矩阵离散元算法, 高效处理数百万颗粒的大规模数值模拟。目前, MatDEM 已集成前处理、求解、后处理及扩展模块等核心功能, 形成了完善的软件生态系统。经过十余年的持续研发与优化, 软件已成功应用于地质灾害、岩土工程、矿业工程及油气开采等领域。未来, 将通过持续深化软件的工程场景适配能力, 为我国防灾减灾与工程设计提供强有力的技术支撑。

关键词: MatDEM; 离散元法; 数值模拟; 多场耦合; 工程应用

中图分类号: P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-0997-08

Development and Application of Domestic High-performance Discrete Element Software MatDEM

LIU Chun, YANG Zerong, LIU Hui

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The discrete element method (DEM) can effectively simulate the discontinuity and large-deformation failure processes in geotechnical materials, holding broad application prospects in the engineering field. However, the DEM faces three major challenges in engineering applications: great difficulty in accurate modeling, incomplete multi-field coupling theory, and low computational efficiency. To address these issues, the domestically developed high-performance discrete element software, MatDEM, has achieved the following innovative breakthroughs. Based on cross-scale modeling methods and DEM macro-micro conversion formulas for geotechnical materials, an automatic training technology for discrete element materials is developed, significantly reducing the complexity of accurate modeling. A discrete element pore density flow method is proposed, enabling integrated numerical simulations of multi-field, fluid-solid coupling, and solute transport. By adopting an original matrix-based discrete element algorithm, it efficiently handles large-scale numerical simulations involving millions of particles. Currently, MatDEM integrates core functions such as pre-processing, solving, post-processing, and extension modules, forming a complete software ecosystem. After more

* 收稿日期: 2025-03-26; 修回日期: 2025-04-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3707900)、国家自然科学基金项目(42222707, 42477211)资助

作者简介: 刘春(1984—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事计算工程地质方面的研究。E-mail: chunliu@nju.edu.cn

than a decade of continuous development and optimization, the software has been successfully applied in fields such as geological disasters, geotechnical engineering, mining engineering, and oil and gas extraction. In the future, by further enhancing the adaptability of the software to engineering scenarios, MatDEM will provide strong technical support for disaster prevention, mitigation, and engineering design in China.

Keywords: MatDEM; discrete element method; numerical simulation; multi-field coupling; engineering application

0 引言

随着“深地探测”“川藏铁路”“双碳”等国家重大战略的推进,工程活动中面临的岩土体大变形破坏和复杂多场耦合(如高地应力、高地温、高渗压)问题越来越突出。深地工程、极端灾害导致传统方法失效,发展非连续介质高精度计算范式迫在眉睫。其中,颗粒离散元法^[1]通过堆积和胶结颗粒来构建模型,能够天然模拟颗粒材料的非连续性、不均匀性及其力学行为,在岩土工程、矿冶工程、农业生产等众多领域得到广泛应用。例如,滑坡等地质灾害过程,矿冶领域中的矿石粉碎过程,工业生产中的散体混合过程等。

在目前的颗粒离散元数值分析商业软件领域中,EDEM、PFC以及Rocky DEM等国外软件占据着主要地位。EDEM由Altair公司开发,广泛应用于矿业、农业与制药业等领域;PFC由Itasca公司推出,在采矿、岩土和地球科学领域发挥重要作用;Rocky DEM由ESSS公司开发,擅长模拟颗粒运动、破碎及磨损。

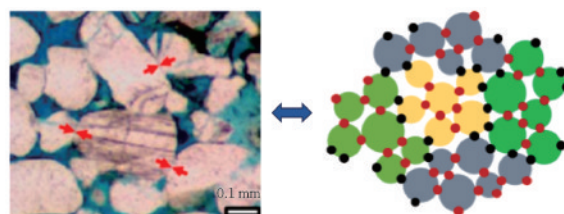
离散元法在我国的发展起步较晚,但经过十余年的探索,国内已成功研发出多款优秀的离散元数值模拟软件,包括GDEM、SDEM和DEMSLab等。GDEM由中国科学院非连续介质力学与工程灾害联合实验室与北京极道成然科技有限公司联合研发,其核心算法为连续介质力学的离散元方法(CDEM),创新性地将有限元与离散元耦合,精准模拟材料从连续到非连续的渐进破坏过程;SDEM由大连理工大学计算颗粒力学团队与缔造科技(大连)有限公司共同开发,具备多颗粒形态、多介质、多尺度仿真功能,支持GPU大规模并行计算,显著提升了模拟效率与精度;DEMSLab由浙江大学赵永志教授自主研发,专注于颗粒材料系统的模拟分析,尤其在振动分选设备的颗粒分离过程模拟中表现出色。

面向地质与岩土工程领域的重大需求,本团队自主研发了高性能通用离散元仿真软件MatDEM。该软件基于原创的矩阵离散元算法(Matrix-based DEM)及高效三维接触算法,实现了数百万颗粒的高性能数值模拟,并支持复杂颗粒体系的多场耦合与流固耦合分析。本文将从MatDEM的基本原理与理论创新、功能特性与研发历程、多领域工程应用以及未来发展方向四个方面展开系统阐述,全面展示其在数值模拟领域的突破性贡献与工程实践价值。

1 软件的基本原理和自主创新

1.1 离散元法的基本原理

岩土体在宏观上表现为相对连续,而在微观上则是由一系列的颗粒、孔隙和裂隙等组成的结构系统。图1展示了岩石微观结构的离散元堆积模型,通过颗粒堆积模拟岩体的非连续特性。



(a) 岩石微观结构: 岩石颗粒+胶结 (b) 离散元堆积模型: 颗粒单元+黏结

图1 岩石微观结构与离散元堆积模型

Fig.1 Rock microstructure and discrete element packing model

如图2所示,在其最基本的线弹性模型中,假定颗粒之间通过弹簧来相互接触和产生力的作用。基于经典的牛顿力学理论,通过时间步迭代算法来计算颗粒的加速度、速度和位移,通过反复迭代实现离散元法的动态模拟。进而实现宏观岩土体的变形和破坏过程模拟。

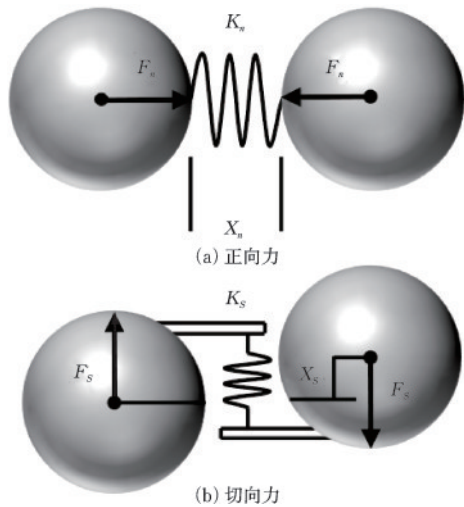


图2 线弹性接触模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of linear elastic contact model
注: K_n 表示法向刚度, F_n 表示法向力, X_n 表示法向相对位移, K_s 表示切向刚度, F_s 表示剪应力, X_s 表示切向相对位移

1.2 MatDEM 软件的理论和技术创新

离散元法能够直接模拟岩土体中颗粒、孔隙和裂隙等微观结构,进而有效模拟岩土体的大变形破坏过程。同时,可以与其他数值方法结合,实现岩土体在多物理场耦合条件下的力学行为模拟。但是,离散元法在工程应用中还面临着精确建模难、多场耦合理论缺和计算速度慢三大关键问题^[2],限制了其在现代工程中的大规模应用。

基于离散元法的基本原理,MatDEM在理论与技术上实现了以下创新:(1)提出了岩土体跨尺度建模方法和离散元宏微观转换公式^[3-4],结合软件的数值测试和自动调整,实现了离散元材料的自动训练,能够建立具有特定力学性质的离散元模型,极大地降低了离散元法精确建模的难度。(2)为实现多场和流固耦合的数值模拟,综合LBM密度流体的思想与孔隙网络模型,提出离散元孔隙密度流法^[2]。该方法通过颗粒堆积来构建流体网格单元,由流体密度和温度获得流体单元(即孔隙)的压力,在流体单元间利用差分法思路计算渗流。基于该方法,软件已实现了多场、流固耦合、溶质运移一体化数值模拟。(3)提出原创的矩阵离散元算法和三维接触算法^[3],该方法以单元间连接为对象,通过完全矩阵操作计算所有单元的受力和运动,从而有效地提升了离散元计算的效率,实现了百万级颗粒的离散元数值模拟。

2 MatDEM 软件功能和发展历程

2.1 软件的功能和特色

经过十余年的理论研究和系统研发,作者从零开始研发了通用高性能离散元软件 MatDEM(矩阵离散元),突破了关键技术瓶颈,形成了自主知识产权与核心技术,取得了广泛应用。软件具有以下功能和特色:

(1) 先进的前后处理。前处理器支持多格式文件的读写,提供丰富的几何建模函数。用户可轻松导入多格式数据,并利用内置建模函数构建复杂几何模型。可根据宏观力学参数和颗粒级配要求来快速建立离散元堆积体。后处理器支持多种图片和 GIF 动画绘制,可以直观地呈现各类仿真结果。图 3 展示了 MatDEM 的主程序界面,涵盖了前处理、求解和后处理的核心功能模块。

(2) 高效计算和强扩展性。支持 CPU/GPU 并行计算,可高效处理数百万三维单元,适用于工程尺度的离散元分析。允许用户自助添加新的属性、函数和窗口应用,支持自定义离散元接触模型和深度二次开发(如实现磁场等多物理场耦合仿真)。MatDEM 的实时控制功能支持用户随时中止计算、查看参数并继续运行,便于仿真过程的监控与管理。

(3) 广泛的应用领域。支持动力作用、多场耦合(水热力化)模拟、孔隙-裂隙流固耦合模拟、溶质运移分析,多体动力学联合仿真等。涵盖三维滑坡、水热耦合、地面沉降、水力压裂、滚刀破岩、构造模拟、电池仿真等 40 余个案例,以及多个 App 源代码,适应不同行业的需求。



图3 MatDEM 的主程序页面

Fig.3 Main interface of MatDEM

2.2 软件的发展历程

MatDEM 软件发展总体可以分为以下 5 个阶段:

(1) 初始测试阶段(2011~2013)。初始程序在实现离散元法求解的基础上,对软件基本功能进行了系统测试,为仿真软件的工程化开发提供技术验证基础。

(2) 程序算法和数据结构完善阶段(2014~2016)。通过完善算法体系与数据结构,采用模块化处理方法提升代码质量,并构建符合商用软件标准的后处理模块。将矩阵离散元算法与 GPU 并行计算结合,实现了单台计算机百万单元级动态模拟与大规模离散元热量和能量守恒计算。

(3) 通用化阶段(2017~2018)。通过系统调研用户需求,归纳出多领域共性功能框架。在技术层面构建了标准化数据接口,以实现多元化应用场景的模拟。经过一系列的研发和优化工作,MatDEM 软件于 2018 年 5 月正式发布了 1.0 版本,并在软件官网(<http://matdem.com>)共享软件和相关资料。

(4) 商业化完善阶段(2019~2020)。在算法层面上,实现了离散元法的完全矩阵求解,突破传统计算效率瓶颈。同步建立了完善的软件许可证管理体系,形成了商业化运营的基本框架。在软件生态建设方面,建立教学资源库与多维用户交互平台,形成“技术研发-用户反馈-功能更新”的软件优化机制。

(5) 软件应用阶段(2021 年至今)。MatDEM 软件自 2021 年起进入规模化应用阶段。软件已应用

于国内外百余家院校单位的科研和工程设计中,如中国石化、中国航天、华为公司、宁德时代、清华大学、同济大学和上海交通大学等。至 2024 年底,注册用户已达 3 000 余人(含高校、企业及科研院所)。据“MatDEM”关键词检索,基于 MatDEM 分析结果,2024 年共有 39 篇学术论文发表,其中 15 篇为 JCR 一区论文。

通过上述 5 个阶段的持续发展,MatDEM 已成为一款功能完善、应用广泛的高性能离散元软件,如图 4 所示。

3 MatDEM 软件的应用

基于 MatDEM 丰富的案例库和灵活的二次开发功能,用户能够深入分析岩土体在复杂条件下的力学行为。软件已广泛应用于岩土工程、地质灾害、矿业工程、油气开采、工业制造等领域,并拓展至行星科学与人工智能等前沿领域,充分展现了其强大的数值模拟能力和显著的工程应用价值。

3.1 地质灾害领域

地质灾害的发生往往造成大量人员伤亡、严重的经济财产损失以及对生态环境的破坏。MatDEM 可模拟滑坡、崩塌等多种地质灾害的发生过程(图 5),为灾害机理研究、灾害效应分析和灾害预警提供支撑。例如:

Q.Y. Lai 等^[5]利用 MatDEM 模拟了察达岩崩的运动过程,并将其分为四个阶段:启动阶段、裹挟阶段、快速流动阶段和堆积阶段。同时结合地质调查、航空测量及工程地质钻探成果,系统分析了岩崩的裹挟特征与地貌形态。

K.P. Jin 等^[6]基于软件对甌子岩崩塌动力特征与破碎规律进行了研究,通过对碎石判定标准的二次开发,重现了落石过程中的破碎现象,并得到碎石的尺寸分布信息,为岩石崩塌灾害管理提供了有效的指导。

Z.Q. Li 等^[7]基于岩石力学理论、离散元法与现场试验,对青海某隧道坍塌的破坏特征及机理展开分析。采用软件模拟了围岩的破坏过程,并观察到了塌落拱的形成。根据模拟结果对隧道坍塌段采取了诸如注浆、加强初期支护等处理措施,为类似隧道工程提供了宝贵经验。

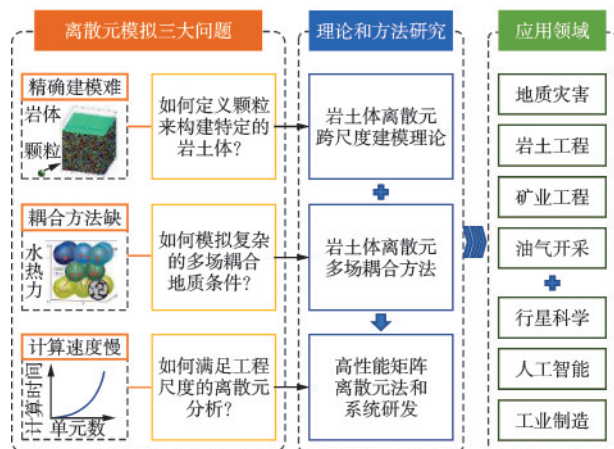
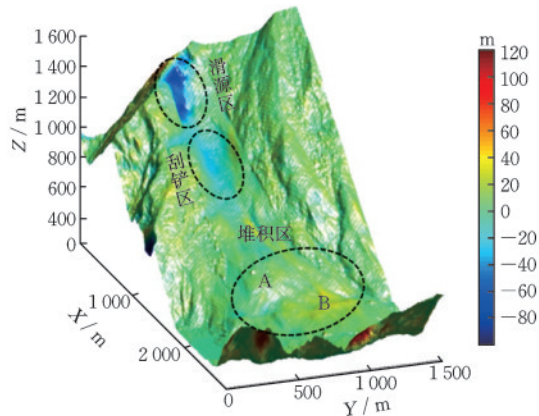
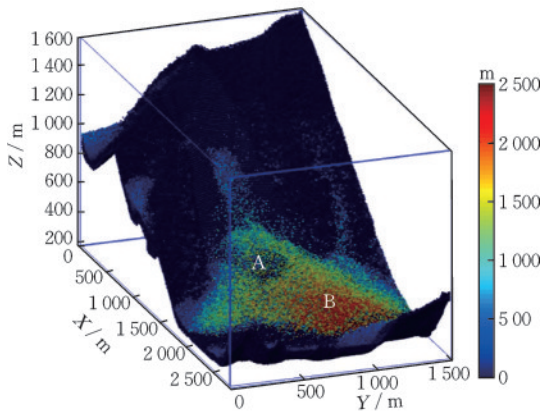


图 4 MatDEM 的理论技术创新和应用领域

Fig.4 Theoretical and technical innovations and application fields of MatDEM



(a) 茂县新磨村滑坡的实际堆积分布



(b) 离散元数值模拟结果(位移场)

图5 滑坡灾害离散元数值模拟

Fig.5 Discrete element numerical simulation of landslide disaster

E.L. Ma 等^[8]通过 MatDEM 模拟了西安地铁 3 号线裂缝区隧道塌方过程,基于离散元法在 MatDEM 中对塌方过程进行数值模拟,模拟结果与分析结果一致,研究结果有利于预防和处理地裂缝附近地下隧道施工引起的塌陷。

H. Luo 等^[9]以中国西南部贵州省纳雍县的岩崩灾害为背景,结合地震信号反演得到动力学参数,并采用软件分析离散元模型解析岩崩的运动特性。模型模拟的动力学过程与地震信号反演参数高度吻合,有助于更精确地解释类似岩崩的动力学过程,对喀斯特地区的灾害预测具有重大意义。

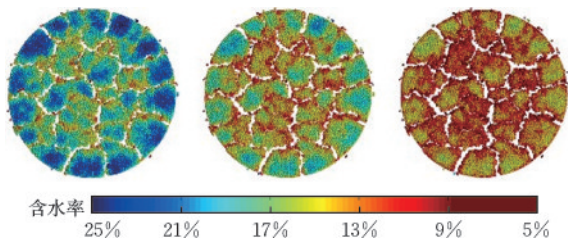


图6 土体失水开裂数值模拟^[10]

Fig.6 Numerical simulation of desiccation cracking in soil^[10]

3.2 岩土工程领域

MatDEM 已广泛应用于试验和试样尺度上的岩土体变形破坏模拟,以探究岩土体宏观变形破坏的微观机制和力学成因。同时,通过对施工过程的数值模拟,进一步优化施工工艺,提高岩土工程建设的工作效率。例如:

S.F. Wang 等^[11]基于 MatDEM 建立了二维离散元模型,以模拟采用圆锥形镐对岩石进行直线切削的过程,为预测和优化不同应力条件下的岩石切削过程提供了宝贵的参考。

Y.D. Xue 等^[12]基于 CSM (Colorado School of Mines) 模型,提出一种全新的岩石切削力预测模型,该模型考虑安装半径、协同效应和盘形刀具的安装位置,通过开展实验室线性切削试验以及利用软件进行大规模回转切削模拟,研究这些因素所产生的影响。

C. Liu 等^[13]利用软件模拟负孔隙水压力作用下土层的变形,并将模拟结果与室内模型箱试验结果进行对比验证。分析表明在抽灌水循环中,弱透水层中会产生负孔隙水压力,其增强了弱透水层的压缩变形,并加剧了地面沉降。

H. T. Yu 等^[14]利用 MatDEM 软件对二维无侧限软岩浸水试验进行数值模拟,通过破裂力和残余强度系数来表征软岩的崩解耐久性,并设置几组对照样本模型,探讨了裂隙、黏土矿物含量以及初始含水量对岩样软化过程的影响。

T.C. Le 等^[10]基于软件提出了一种黏性土的多场耦合离散元模型,该模型将湿度场与应力场进行耦合,实现了水分的不均匀分布与转移。通过对薄黏土层干缩开裂的离散元模拟,成功再现了裂隙网络的发展过程,为探究多场耦合作用下黏性土干缩开裂的机理提供了一种新方法。

3.3 矿业工程领域

在矿业工程的开发过程中可能遇到诸如岩爆、地面塌陷、瓦斯爆炸等地质灾害,严重影响工程进度和施工人员的生命安全。利用 MatDEM 软件模拟矿石开采过程中的岩体以及周边边坡的变形,能够优化采矿的开采顺序与方法,提高资源开采率。同时,在深地探测和工程灾害中取得应用,有效解决了复杂地质条件下的数值模拟难题。例如:

F. Wang 等^[15]基于 MatDEM 模拟了某尾矿坝

的静力液化破坏过程,综合运用现场调查、室内试验以及流固耦合的离散元数值模拟,明确尾矿排放速率、细粒夹层和排水设施对尾矿坝静力液化破坏的影响,为尾矿坝的安全运行提供了理论依据。

D.Q. Song等^[16]以某露天煤矿滑坡为例,基于详细的现场调查、遥感图像解译和现场钻孔数据,利用软件建立起二维离散元模型,系统地研究了滑坡的变形行为和动力特性,为露天矿滑坡的演化及防治研究提供参考。

J.B. Geng等^[17]通过离散元数值模拟,对比研究了不同季节间赣州市大余县的一处特定尾矿边坡入渗分布及失稳演化情况的变化,对不同降雨季节下的安全距离进行了分析,分析结果为保障边坡下游建筑物及居民的安全提供了理论依据。

卢靖雯等^[18]总结了岩浆侵位的数值模拟原理和常用模拟方法,使用离散元软件 MatDEM 建立了二维的双层围岩模型和均质围岩模型,用孔隙密度流法模拟花岗质岩浆侵位和冷却过程中岩浆与围岩之间的流-固-热-力耦合过程,为重建岩浆侵位过程中的变质-变形-成矿作用提供了新方法。

3.4 油气开采领域

油气开采涉及到复杂的孔隙-裂隙双重介质流固耦合过程,采用离散元孔隙密度流法与 MatDEM 软件,可以为水力压裂等过程分析提供全新的思路,保障作业效率与资源可持续发展。例如:

Y. Zhu等^[19]采用离散元孔隙密度流来研究含单条裂缝的花岗岩块体中的水力压裂过程,通过 MatDEM 数值模拟描述微观孔隙尺度上的水力压裂过程,为页岩气开采和地热资源开发提供了全新的思路。

Z.Z Zhang等^[20]通过研究含瓦斯煤在荷载作用下的变形、裂纹演化及能量转化的细观机理,考虑瓦斯压力和吸附膨胀,通过二次开发实现了气固耦合计算,对不同瓦斯压力下的含瓦斯煤三轴压缩过程进行了数值模拟。

冯国瑞等^[21]为深入探究水力裂缝扩展规律,针对实验室常用的类岩石试件,利用 MatDEM 建立了二维水力压裂数值模型,开展了不同注液压力增量的水力压裂试验。试验研究了注液压力增量对水力裂缝扩展的影响,从细观尺度分析了裂隙生成及裂缝扩展规律,并对水力裂缝扩展特性进行了讨论。

3.5 行星科学领域

离散元数值模拟突破了天体工程研究中实地探索成本高、难度大的限制,为未来天体探测、开发和行星防御提供了技术依据。例如:

C.F. Feng等^[22]提出一种新的系统动力学方法,运用 MatDEM 软件建立离散元模型,以描述碎石堆型流星体的初始结构和形状。引入空气动力学轨迹模型、热烧蚀模型,以及空中爆炸模型相结合的方式模拟流星体进入大气层的过程。

B.W. Jiang等^[23]利用软件对立方体漫游车进行建模,从而模拟其漫游过程,并利用低重力试验台,研究在刚性环境和月壤环境中对立方体漫游车的速度阈值与旋转角度之间的关系。

耿焕等^[24]基于软件建立小行星微重力撞击采样模型,探索初始撞击速度和弹体形状对撞击后风化层内部特征和溅射颗粒的影响,研究结果有助于理解撞击过程内部机理,为深空探测中的撞击采样方案设计提供参考。

张宸玮等^[25]基于软件进行二次开发,实现了单元的万有引力计算,探究了碎石堆结构的小行星的演化机制,建立起直径为 1.2 km 的“碎石堆”小行星数值模型,并通过数值模拟分析了不同黏附强度和体积密度下,球形聚集体的旋转重塑和破坏过程。

3.6 人工智能领域

人工智能作为近年来快速发展的前沿领域,与离散元法数值模拟的深度融合,能够有效解决传统工程领域的诸多难题,显著提升预测精度与效率,同时为工程设计和方案决策提供科学、可靠的理论支撑。例如:

T.W. Zhang等^[26]提出了一种结合离散元数值模拟和机器学习算法的新方法,利用软件建立离散元模型,结合三维卷积神经网络模型,得到侧限模量与土组构之间的关系,实现基于颗粒土的随机微观结构高效预测其力学参数。

W. Jiang等^[27]以 MatDEM 为例,提出了一种基于 BP 神经网络的微观参数校准方法及能量准则,从而提高离散元法在三维边坡稳定性分析中的适用性。该方法通过颗粒微观参数的校准,精准刻画了强度参数的持续弱化过程,同时基于动能准则提出的安全系数,全面反映了滑坡的整体稳定性状态。

3.7 工业制造领域

离散元数值模拟已广泛应用于工业制造领域,为工业智能制造过程中的材料性能提升、设备可靠性验证及工艺创新提供量化参考,推动工业制造向数字化、精细化方向转型升级。例如:

研究团队基于 MatDEM 模拟了工业搅拌工艺过程,分别构建了搅拌装置料锅和搅拌桨的离散元模型并实现组合集成。在此基础上,通过生成表征药浆的试样颗粒,模拟了其在搅拌设备中的运动与混合过程,仿真结果与理论预期高度吻合。该研究为工业设备设计与工艺优化提供了坚实的理论支撑。

研究团队围绕多体动力学前沿趋势,针对工业动态仿真需求展开研究。以车辆沙地行进仿真为例,通过 Simscape 与 MatDEM 联合仿真,实现双向动态数据交互: Simscape 传输车轮位移与转动数据传至 MatDEM,然后计算车轮受力并反馈至 Simscape。通过联合仿真,模拟了车轮沙地行进过程(图7),直接获取位移云图、土体推力和阻力等结果。该技术已成功应用于低重力环境下星球车通过性能的仿真研究,为复杂工况下机械系统(如越野车)与颗粒介质(如沙地)相互作用的精细化分析提供了有效解决方案。

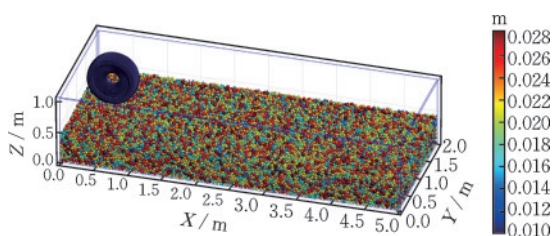


图7 轮壤作用 MatDEM-多体动力学联合仿真

Fig.7 Co-simulation of wheel-soil interaction using MatDEM and multibody dynamics

4 总结和展望

本文介绍了南京大学自主研发的国产高性能矩阵离散元软件 MatDEM。该软件在理论、技术和应用三个层面实现了创新突破,成功解决了离散元法工程应用中的三大核心难题:理论上的建模精度问题、技术上的计算效率瓶颈,以及应用中的多场耦合复杂性。经过十余年的持续研发与优化,MatDEM 已在地质灾害、岩土工程、矿业工程、油气开采等传统领域,以及行星科学、人工智能和工业制造等新兴领域得到广泛应用,为复杂工程问题的数值模拟提供了高效技术支持。

未来,MatDEM 的发展将紧密围绕前沿需求,针对多样化模拟场景和复杂物理过程,持续推进算法优化与功能升级。例如,在接触模型方面,除现有的线弹性模型和 Hertz-Mindlin 模型外,需深入研究 JKR 模型、平行黏结模型及滚动摩擦模型等常用接触模型,并建立相应的宏微观转换公式与快速建模方法;在流固耦合领域,需进一步探索非饱和状态及多相流体流动的耦合理论,开发适用于不同尺度和工况的离散元流固耦合方法,以精确模拟复杂流固相互作用;在多场耦合方面,重点针对热传导、污染物运移等过程,开展宏微观参数转换与自动训练研究,构建更高精度的离散元数值模型,以提升模拟的精细度和可靠性。

MatDEM 作为国产高性能离散元平台,兼具“精准建模—高效计算—多场耦合”三大优势。未来将持续深化工程场景适配能力,助力我国防灾减灾和工程设计领域实现“数值仿真—智能决策”技术跨越,为更多领域的科学研究和工程应用提供坚实的技术支持。

参考文献:

- [1] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1980, 30(3):331-336.
- [2] 刘春,乐天呈,施斌,等.颗粒离散元法工程应用的三大问题探讨[J].岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1142-1152.
Liu C, Le T C, Shi B, et al. Discussion on three major problems of engineering application of the particle discrete element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 1142-1152. (in Chinese)
- [3] Liu C, Pollard D D, Shi B. Analytical solutions and numerical tests of elastic and failure behaviors of close-packed lattice for brittle rocks and crystals[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013, 118(1): 71-82.
- [4] Liu C, Xu Q, Shi B, et al. Mechanical properties and energy conversion of 3D close-packed lattice model for brittle rocks[J]. Computers & Geosciences, 2017, 103: 12-20.
- [5] Lai Q Y, Zhao J J, Huang R Q, et al. Formation mechanism and evolution process of the Chada rock avalanche in Southeast Tibet, China[J]. Landslides, 2022, 19(2): 331-349.
- [6] Jin K P, Xing A G, Li B, et al. Dynamic fragmentation characteristics of columnar rockfall: insights from discrete element method[J]. Bulletin of Engineering Geol-

- ogy and the Environment, 2023, 82(8): 1-17.
- [7] Li Z Q, Lai J X, Wang M, et al. Collapse mechanism and treatments of a deep tunnel in the weathered granite fault zone[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 152: 105891.
- [8] Ma E L, Lai J X, Xu S S, et al. Failure analysis and treatments of a loess tunnel being constructed in ground fissure area[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 134: 106034.
- [9] Luo H, Xing A G, Jin K P, et al. Discrete element modeling of the nayong rock avalanche, Guizhou, China constrained by dynamic parameters from seismic signal inversion[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(4): 1629-1645.
- [10] Le T C, Liu C, Tang C S, et al. Numerical simulation of desiccation cracking in clayey soil using a multifield coupling discrete-element model[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, 148(2): 1-11.
- [11] Wang S F, Shi X L, Wu Y M. DEM-based 2D numerical simulation of the rock cutting process using a conical pick under confining stress[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 165: 105885.
- [12] Xue Y D, Shu L S, Zhao L, et al. MatDEM-based study of disc cutter force model in open TBM tunnels: Incorporating installation radius and synergistic effects [J]. Underground Space, 2025, 20: 293-310.
- [13] Liu C, Shi B, Gu K, et al. Negative pore water pressure in aquitard enhances land subsidence: field, laboratory, and numerical evidence[J]. Water Resources Research, 2022, 58(1): e2021WR030085.
- [14] Yu H T, Liu Z B, Zhang Y, et al. The disintegration mechanism analysis of soft rock due to water intrusion based on discrete element method [J]. Computers & Geosciences, 2023, 171: 105289.
- [15] Wang F, Li W, Yu P J, et al. Research on the static liquefaction failure of upstream tailings dams under continuous discharge conditions[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 176: 106785.
- [16] Song D Q, Du H. Numerical investigation of the evolution process of an open-pit mine landslide using discrete-element method[J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(6): 1-18.
- [17] Geng J B, Wang Z S, Lan X, et al. Numerical simulation and safety distance analysis of slope instability of ion-ic rare earth tailings in different rainy seasons[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2023, 14(1): 1-18.
- [18] 卢靖雯,王勤,刘春.花岗岩岩浆侵位对围岩裂隙发育和热结构影响的数值模拟[J].地质学报,2022,96(10):3619-3638.
- Lu J W, Wang Q, Liu C. Numerical simulation of the effect of granitic magma emplacement on fracture development and thermal structure of surrounding rock [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(10): 3619-3638. (in Chinese).
- [19] Zhu Y, Liu C, Zhang H Y, et al. Micro mechanism investigation of hydraulic fracturing process based a fluid-solid coupling discrete element model[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 174: 106640.
- [20] Zhang Z Z, Niu Y X, Shang X J, et al. Characteristics of stress, crack evolution, and energy conversion of gas-containing coal under different gas pressures[J]. Geofluids, 2021, 2021: 1-18.
- [21] 冯国瑞,樊一江,王朋飞,等.基于离散元法的类岩石材料水力压裂裂缝扩展规律[J].煤炭学报,2024,49(5):2231-2246.
- Feng G R, Fan Y J, Wang P F, et al. Fracture propagation law of hydraulic fracturing of rock-like materials based on discrete element method [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2231-2246. (in Chinese)
- [22] Feng C F, Zeng X Y, Li Z W, et al. Atmospheric entry and strewn fields estimation for rubble-pile meteoroids [J]. Advances in Space Research, 2024, 74(7): 3123-3136.
- [23] Jiang B W, Hussain M T, Zeng X Y. Attitude-adjusting dynamical behavior of cubic rover on low-gravity tested[J]. Astrodynamics, 2024(1): 149-159.
- [24] 耿焕,朱遥,刘春,等.基于离散元模拟的小行星微重力撞击采样研究[J].高校地质学报,2024,30(2):196-206.
- Geng H, Zhu Y, Liu C, et al. Asteroid microgravity impact sampling study based on discrete element method simulation[J]. Geological Journal of China Universities, 2024, 30(2): 196-206. (in Chinese)
- [25] 张宸玮,刘春,耿焕,等.碎石堆小行星自旋演化过程的离散元数值模拟[J].高校地质学报,2023,29(5):743-755.
- Zhang C W, Liu C, Geng H, et al. Discrete element numerical simulation of the spin evolution process of rubble pile asteroids[J]. Geological Journal of China Universities, 2023, 29(5): 743-755. (in Chinese)
- [26] Zhang T W, Li S, Yang H Z, et al. Prediction of constrained modulus for granular soil using 3D discrete element method and convolutional neural networks [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(11): 4769-4781.
- [27] Jiang W, Tan Y H, Yan J Z, et al. A BP neural network-based micro particle parameters calibration and an energy criterion for the application of strength reduction method in MatDEM to evaluate 3D slope stability [J]. Revista Internacional DE Metodos Numericos Para Calculo Y Diseno En Ingenieria ,2023, 39(1): 12-23.

(本文编辑:赵霞)