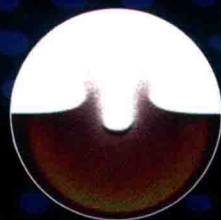
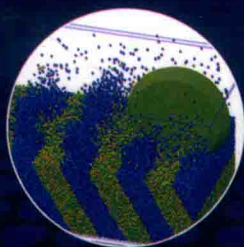


地质与岩土工程 矩阵离散元分析

◎ 刘春 著



科学出版社

地质与岩土工程矩阵离散元分析

Matrix Discrete Element Analysis of Geology
and Geotechnical Engineering

刘 春 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

离散元法能有效地模拟岩土体的非连续性、不均匀性和大变形破坏,在科研和生产实践中具有广泛的应用价值。基于原创的矩阵离散元计算方法,作者从零开始研发了高性能离散元软件 MatDEM,实现了数百万单元的离散元数值模拟。本书在介绍离散元法基本原理和算法的基础上,详细介绍了 MatDEM 软件的基本结构、建模方法、数值计算过程、后处理和系统函数;以及在地质和岩土工程领域的应用示例,包括基本岩土工程问题、离散元试验、三维滑坡、动力作用和多场耦合作用等。本书配有相应的教学视频,软件和教学视频可由以下网站获取: <http://matdem.com>。

本书可供地质、岩土、水利、土木、矿山、物理等领域的科研和工程技术人员,以及高等院校高年级本科生和研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

地质与岩土工程矩阵离散元分析 / 刘春著. —北京: 科学出版社, 2019.6
ISBN 978-7-03-061566-4

I. ①地… II. ①刘… III. ①矩阵法分析—应用—工程地质—高等学校—教学参考资料 ②矩阵法分析—应用—岩土工程—高等学校—教学参考资料 IV. ①P642 ②TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 112088 号

责任编辑: 周 丹 高慧元 / 责任校对: 杨聪敏
责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春园印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张: 16 1/4

字数: 326 000

定价: 199.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

由刘春博士撰写的《地质与岩土工程矩阵离散元分析》一书，即将付梓，作为他的研究生导师，一方面为他在毕业后如此短的时间内完成了这样一部专著表示祝贺；另一方面，更为他在地质与岩土工程矩阵离散元理论研究和系统开发方面取得的成果感到骄傲。

刘春博士 2002 年进入南京大学地球科学与工程学院地质工程专业学习。在本科期间，他就在计算机编程和应用方面显示出很强的才能。2007 年他进入研究生阶段学习和毕业留校工作后，我们根据他的特长，结合国家自然科学基金项目等，在选题、出国深造和研究条件等方面，支持他开展离散元法的理论研究、系统研发和工程应用。经过十年的努力，终于在 2018 年 5 月，由中国岩石力学与工程学会和南京大学共同主办的离散元学术会议上，他正式发布了高性能离散元软件 MatDEM。一年以来，该软件已有来自 30 多个国家和地区数千次的下载，并在地质、岩土、水利、农业和物理等领域得到了越来越多的应用，受到同行的高度认可，发展前景十分广阔。

MatDEM 的核心技术是高性能的矩阵离散元法和离散元材料自动训练方法。该软件基于作者原创的矩阵离散元法，突破性地实现了数百万单元的模拟，将离散元数值模拟由试样尺度推进到工程应用；通过材料自动训练，极大地降低了离散元建模的难度，促进了软件的迅速推广应用。该软件包括前处理、求解计算、后处理和二次开发，可快速构建各类数值模型，并模拟复杂的大变形破坏和多场耦合作用过程。

该书系统介绍了离散元的基本原理、计算方法和 MatDEM 软件的建模过程及其在地质和岩土工程领域的应用示例，包括滑坡、地面沉降、桩土作用和隧道开挖等。该书的出版为地质和岩土工程领域重要问题的离散元建模和数值模拟，提供了理论、方法和实践基础，具有重要的科学价值和工程意义。

目前，国内的工程数值模拟软件市场绝大部分被国外商业软件占领，国家每年耗费大量的资金购买和使用这些软件，缺乏“卡脖子”技术的核心竞争力。MatDEM 软件的成功研发和应用显著提高了我国在离散元软件方面的核心竞争力！

我衷心地期待，刘春博士能够再接再厉，持之以恒，不断完善软件的功能和提高软件的质量，形成具有完全自主知识产权和国际竞争力的高性能离散元软件，服务于国家重大需求和全人类的科学技术进步！

是为序！

施 斌

2019年4月于南京

前 言

地质与岩土工程领域的很多问题都涉及大变形破坏，应力、水分和温度等多场耦合作用，如滑坡灾害、地面沉降、隧道开挖和页岩气水力压裂等。实验和现场研究能很好地认识这些问题，但具有花费大、周期长和实现难的特点。计算机数值模拟技术是分析和认识这些问题的一种高效和可重复的手段。其中，离散元法（DEM）通过堆积和胶结颗粒来构建模型，能有效地模拟岩土体的非连续性、不均匀性和大变形破坏，在地质、岩土工程和能源开采等领域具有非常广泛的应用价值。

自1979年离散元法的第一篇论文(Cundall and Strack, 1979)发表于 *Geotechnique* 以来，其已被引1万余次，为目前岩土领域被引次数最高的论文之一。近年来，随着大规模复杂工程建设的增加和计算机技术的提高，离散元法在工程领域得到越来越多的关注。但是，离散元法应用于工程实践还面临着三大问题：①离散元法计算量巨大，计算单元数通常在10万单元以内，极大地限制了其工程应用；②离散元法定量建模困难，堆积模型的宏观力学性质与单元力学参数间的关系不明确，难以直接获得特定弹性模量和强度的模型；③离散元法的多场耦合理论尚未完善，缺乏相应的数值软件。

在前人研究的基础上，作者从零开始研发了高性能的离散元软件 MatDEM (Matrix DEM, 即矩阵离散元)，围绕着这些问题，以大规模化、通用化和工程应用为目标，开展了一系列工作：①针对计算量巨大的问题，采用原创的矩阵离散元算法，软件实现了数百万单元的离散元数值模拟，将逐步完善由试样尺度到工程尺度的应用；②针对定量建模困难的问题，推导了离散元模型的宏微观转换公式，在软件中实现了离散元材料自动训练，可自动获得指定力学性质的离散元堆积模型，极大地降低了离散元法建模的难度；③针对多场耦合问题，在软件中实现了摩擦生热和能量守恒数值模拟；基于有限差分思想，实现了热传导和热力耦合数值模拟；提出了离散元孔隙密度流方法，实现了流固耦合数值模拟。这些方法为进一步的复杂工程应用提供了良好的理论基础。

基于常用的 MATLAB 语言，MatDEM 提供了强大的二次开发功能，可以方便地构建适用于各类问题的数值模型。通过与专家学者的合作开发，不断地促进软件的通用化和专业化。目前，软件可以模拟大多数的地质和岩土工程问题。在各领域专家的帮助和支持下，作者制作了20余个应用示例，包括离散元试验、动

力作用、边坡与滑坡、岩土工程、多场耦合等，取得了良好的初步应用。为了更好地提供支持服务，我们建立了 MatDEM 网站 <http://matdem.com>。基于网站访问数据，软件已提供六种语言支持。在专家的建议和支持下，作者撰写了这本中英文教材《地质与岩土工程矩阵离散元分析》，中文版由科学出版社出版，英文版将由 Springer 出版社出版。本书配有相应的教学视频，软件和教学视频均可从 MatDEM 网站获取。

本书分为两个部分，第一部分为基础篇。第 1 章简要介绍离散元法的基本原理、计算方法和工程应用前景。关于离散元法的系统理论和计算方法，可参阅《颗粒物质力学导论》（清华大学孙其诚和王光谦著）以及《计算颗粒力学及工程应用》（大连理工大学季顺迎著）等专业书籍；关于离散元的连续-非连续理论、接触模型和宏微观理论，可参考中国科学院力学研究所李世海研究员、同济大学蒋明镜等专家的相关论文和专著。第 2~5 章主要介绍 MatDEM 的基本结构和功能，以及建模过程和后处理功能。软件中的数据以面向对象的方式来组织，所有计算数据均可在软件中查看、编辑和保存，导入和继续计算。在基础篇中，详细地介绍了矩阵离散元算法的基本过程、数据组织形式和意义，以及单元、连接、组、材料和荷载的概念和使用方法。特别地，MatDEM 提供了商业软件标准的后处理模块，可以方便地生成数十种图件，以及生成模拟过程的 GIF 动画。通过阅读这些内容，可以很快地掌握离散元法的基本原理和软件的使用方法。

第二部分为实践篇。第 6 章主要结合桩土作用、隧道建模和盾构滚刀破岩三个示例，详细地介绍 MatDEM 的建模和数值模拟的常规步骤，建议在阅读完此章节后，再阅读实践篇的其他章节。第 7 章以直剪、扭剪试验和真三轴试验为例，重点介绍通过函数来构建部件，并拼合整体模型，以及如何建立三维复杂裂隙和节理。第 8 章以三维滑坡建模为例，介绍如何利用数字高程数据构建复杂的三维模型。第 9 章介绍动力作用数值模拟，包括陨石撞击地面、矿山斜坡爆破和地震动力作用。第 10 章介绍高级的自定义参数和二次开发功能，实现了地面沉降、微波辅助破岩、能源桩热力耦合等复杂的多场耦合过程数值模拟。第 6~10 章由简单到复杂，共介绍了 13 个应用示例。通过修改和综合应用这些示例，可开展各类地质和工程问题的数值模拟，并辅助分析和解决各类科研与工程问题。

离散元法理论研究、系统研发和应用是一条非常漫长和艰辛的道路。在 MatDEM 软件的开发和本书的撰写过程中，得到了很多专家学者的帮助和指导。作者特别感谢导师南京大学的施斌教授，以及美国斯坦福大学的 David D. Pollard 教授。作者于 2007 年攻读南京大学研究生期间开始学习离散元法和开发离散元测试软件。于 2010~2011 年访美期间，在 David D. Pollard 教授建议下开展离散元的基本理论研究。回国后，在导师施斌教授的指导和大力支持下，

开始 MatDEM 软件的研发及工程地质问题数值模拟研究,并逐步发展为通用离散元软件。作者在这里还要特别感谢南京大学王宝军教授、尹宏伟教授、唐朝生教授、朱鸿鹄教授、张巍副教授、张丹副教授和顾凯副教授等专家的指导和帮助。

本书理论部分的撰写得益于同济大学张丰收教授和黄昕副教授、中国科学院力学研究所冯春副研究员、四川大学赵涛副研究员、武汉大学张晓平教授和华中科技大学周博副教授的有益讨论,软件的功能和通用性方面也得到了非常多的宝贵建议。本书应用部分的完成得益于成都理工大学许强教授和范宣梅教授、西南交通大学程谦恭教授、浙江大学吕庆教授、同济大学薛亚东副教授、中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院邓尚博士、兰州大学张帆宇副教授、中国地质大学李长冬教授、中国海洋大学刘晓磊副教授和重庆大学陈志雄副教授等专家的合作交流。感谢以上专家为 MatDEM 软件研发和工程应用提供了有力的理论支持和良好的实践条件。

作者特别感谢南京大学陈颀院士、中国科学院地球环境研究所安芷生院士和南京大学王汝成教授在软件研发和本书出版过程中给予的重要帮助。作者还要特别感谢东北大学冯夏庭教授、长安大学彭建兵教授、中国海洋大学贾永刚教授、中国科学院力学研究所李世海研究员、同济大学蒋明镜教授、中国水利水电科学研究院彭校初教授、日本九州大学陈光齐教授、法国里尔科技大学邵建富教授、河海大学高玉峰教授和西南交通大学张建经教授等专家对软件的发展提出的非常宝贵的建议。

本书的研究内容得益于南京大学施斌教授负责的国家自然科学基金重点项目“基于分布式感测的多场作用下土体结构系统变形响应和灾变机理研究”(41230636),以及国家自然科学基金中德合作项目(41761134089)、国家自然科学基金青年项目(41302216)、中国科协青年人才托举工程(2016QNRC001)、江苏省自然科学基金项目(BK20170393, BK20130377)、青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金项目(QNLM2016ORP0110)、苏州市科技计划项目(SYG201614)等项目的资助。本书研究工作得到南京大学地球科学与工程学院、南京大学地球环境计算工程研究所和南京大学大地探测与感知研究院的大力支持。作者还要特别感谢中国岩石力学与工程学会在软件培训和推广应用上的大力支持。

在读研究生张晓宇、秦岩、黄靛欢和乐天呈参与了部分示例的开发和测试,以及本书部分内容的编写。其中,秦岩参与了第 3 章、第 5 章、6.2 节、9.1 节和 10.2 节的编写;张晓宇参与了第 2 章、第 5 章和第 8 章的编写;乐天呈参与了第 2 章、6.1 节和第 7 章的编写;黄靛欢参与了 9.3 节的编写,并校订了大部分章节。在本书的撰写过程中,研究生汤强、朱晨光、梁立唯、朱遥、刘辉和杨晓蔚也参与了部分资料整理和校订工作,并维护了软件网站和微信公众号(矩

阵离散元 MatDEM)。软件公开下载一年以来，数百名专家学者和研究生参与了软件的测试和应用，不断地提高了软件的通用性、易用性和专业度。在此表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏之处，敬请各位专家学者批评指正。

刘 春

2019年2月18日于南京

目 录

序
前言

第一部分 基础篇

第 1 章 离散元法的原理和实现	3
1.1 离散元法应用领域与数值计算软件	3
1.2 离散元法的基本原理	4
1.2.1 单元的接触模型	5
1.2.2 两个不同单元的连接	6
1.2.3 时间步迭代算法	6
1.3 单元的阻尼简谐振动	7
1.3.1 单元的阻尼力	7
1.3.2 阻尼简谐振动方程	8
1.3.3 单元振动周期与半径的关系	8
1.3.4 单元运动过程的微分	9
1.3.5 阻尼作用和最优阻尼系数	9
1.4 离散元系统的能量转换与能量守恒	11
1.4.1 系统的机械能	11
1.4.2 热量的计算	12
1.4.3 能量守恒与外力做功	14
1.5 离散元法的计算尺度和工程应用可行性	14
1.6 离散元法三大问题的认识和解决	15
1.6.1 矩阵离散元和高性能矩阵计算	16
1.6.2 离散元法的量化建模问题	17
1.6.3 基于离散元法的多场耦合方法	19
1.7 矩阵离散元的发展和展望	20
第 2 章 MatDEM 的基本结构	22
2.1 软件基础	22
2.1.1 运行环境和软件安装	22

2.1.2	MatDEM 窗口程序	23
2.1.3	软件运行和中止	27
2.1.4	软件应用示例简介	29
2.1.5	帮助文件简介	31
2.2	MatDEM 程序结构	32
2.2.1	MatDEM 软件文件夹	32
2.2.2	MatDEM 的层次结构	32
2.2.3	MatDEM 中主要的类	34
2.3	MatDEM 中的单元类型	35
2.3.1	活动单元、固定单元、虚单元	35
2.3.2	锁定单元自由度	36
2.3.3	单元编号的规则	37
2.4	MatDEM 的数据结构	37
2.4.1	单元属性数组	37
2.4.2	邻居矩阵和连接信息矩阵	38
2.4.3	组的数据结构和操作	40
2.5	单元的接触模型	42
2.5.1	线弹性模型	42
2.5.2	赫兹接触模型	43
2.6	弹性 clump 团簇	44
2.6.1	弹性 clump 的原理	44
2.6.2	弹性 clump 的使用	45
第 3 章	几何建模和材料设置	48
3.1	建立数值模拟箱	48
3.1.1	建立堆积模型	48
3.1.2	生成空箱子	51
3.2	模块化建模基础	52
3.2.1	利用结构体建模	52
3.2.2	单元过滤器和单元筛选	57
3.2.3	Tool_Cut 和数字高程建模	59
3.3	基于数字图像建模	60
3.3.1	导入黑白图像切割模型	60
3.3.2	导入彩色图像分块建模	62
3.4	材料设置	66
3.4.1	材料设置概述	66

3.4.2	直接输入材料性质	66
3.4.3	自动训练材料	67
3.5	平衡模型	70
3.5.1	迭代计算函数和标准平衡	70
3.5.2	强胶结平衡	71
3.5.3	邻居单元检索和零时平衡	72
3.5.4	模型平衡状态判断标准	73
3.6	裂隙和节理的设置	74
3.6.1	通过组来设置软弱层和裂隙	75
3.6.2	利用三角面来设置裂隙和节理	76
3.6.3	使用 Tool_Cut 来设置裂隙和节理	76
3.6.4	连接过滤器的定义和使用	76
第 4 章	荷载设置和数值计算	78
4.1	数值计算初始化和设置	78
4.1.1	模型参数初始化	78
4.1.2	计算相关参数设置	78
4.2	边界和荷载	79
4.2.1	边界条件	79
4.2.2	应力荷载	80
4.2.3	位移荷载	82
4.2.4	振动荷载	82
4.2.5	其他荷载	84
4.3	迭代计算时间和设置	85
4.3.1	迭代计算的运行时间	85
4.3.2	单元半径和计算耗时	86
4.3.3	动态问题的设置	88
4.3.4	准静态问题的设置和模拟精度	88
4.4	模拟参数的定义和修改	90
4.4.1	自定义参数的创建	90
4.4.2	组单元属性的修改	91
4.4.3	时间步、单元半径和刚度的设定	93
4.5	文件的压缩、保存和读取	94
4.5.1	文件的压缩	94
4.5.2	文件的保存和读取	95

第 5 章 后处理和系统函数	96
5.1 后处理窗口界面	96
5.1.1 后处理的主窗口	96
5.1.2 后处理图件的保存	98
5.1.3 GIF 动画制作窗口	99
5.2 后处理绘图函数	101
5.2.1 d.show 通用绘图函数	101
5.2.2 切片显示和过滤显示	106
5.2.3 单元位置和受力显示	108
5.3 数据处理和曲线绘制	108
5.3.1 利用保存的数据绘制曲线	108
5.3.2 利用自动记录数据绘制曲线	109
5.3.3 在 MATLAB 里处理数据和绘图	111
5.4 系统函数与功能	112
5.4.1 GPU 计算设置和状态查看	112
5.4.2 函数的定义和运行	114
5.4.3 代码文件的批处理	115
5.4.4 随机种子和随机模型	116
5.4.5 计时函数	116
5.5 利用系统底层函数来建模	116
5.5.1 两球碰撞过程的底层建模	117
5.5.2 利用曲线图来分析碰撞过程	119

第二部分 实 践 篇

第 6 章 岩土工程基础应用	123
6.1 桩土作用	123
6.1.1 堆积地层模型	123
6.1.2 建立桩土作用模型	125
6.1.3 拔桩过程的数值模拟	129
6.2 隧道建模	132
6.2.1 堆积地层模型	132
6.2.2 建立隧道模型	133
6.2.3 施加荷载和数值模拟	136
6.3 盾构滚刀破岩	138
6.3.1 堆积地层模型	139

6.3.2	建立滚刀破岩模型	139
6.3.3	滚刀破岩数值模拟过程	143
6.3.4	提高滚刀破岩计算的速度	146
第 7 章	岩土体离散元试验	147
7.1	直剪和扭剪试验	147
7.1.1	定义试验参数和堆积试样	147
7.1.2	制作剪切盒和切割试样	149
7.1.3	将试样放入剪切盒	152
7.1.4	材料设置和数值模拟	155
7.2	真三轴试验和节理建模	158
7.2.1	构建真三轴试验箱	158
7.2.2	利用三角面和多边形定义裂隙面	159
7.2.3	利用 Tool_Cut 定义复杂的节理面	161
7.2.4	施加真三轴应力	165
第 8 章	复杂三维模型的建模	167
8.1	用数字高程定义三维层面	167
8.1.1	利用离散点获得数字高程	167
8.1.2	层面的数字高程数据处理	169
8.2	创建薄壳模型	174
8.2.1	建立几何模型	174
8.2.2	切割和堆积模型	176
8.3	建立三维边坡模型	179
8.3.1	导入材料	180
8.3.2	设置地层的材料	180
8.4	滑坡运动过程数值模拟	182
8.4.1	数值模拟参数设置	183
8.4.2	迭代计算和模拟结果	183
第 9 章	动力作用数值模拟	185
9.1	陨石撞击地面	185
9.1.1	堆积地层模型	185
9.1.2	建立陨石模型	186
9.1.3	陨石撞击过程模拟	189
9.2	矿山斜坡爆破	191
9.2.1	建立斜坡模型	191
9.2.2	设置爆破点和爆破能量	193

9.2.3 迭代计算和模拟结果	195
9.3 地震动力作用	196
9.3.1 建立地形和分层	197
9.3.2 地震波产生和传播过程	199
第 10 章 多场耦合数值模拟	203
10.1 滑坡滑带摩擦生热	203
10.2 微波辅助破岩	205
10.2.1 建立 clump 团簇堆积模型	205
10.2.2 辉石和长石的分组和材料设置	206
10.2.3 辉石受热膨胀数值模拟	209
10.3 能源桩热力耦合	211
10.3.1 建立能源桩-地层模型	212
10.3.2 热力耦合过程数值模拟	214
10.4 地面沉降和地裂缝	217
10.4.1 切割地层模型	217
10.4.2 水位下降过程数值模拟	219
参考文献	221
附录 属性、函数和常见问题	224
附录 A 类的属性	224
附录 B 主要函数	230
附录 C 常见问题解答	243

第一部分 基础篇

