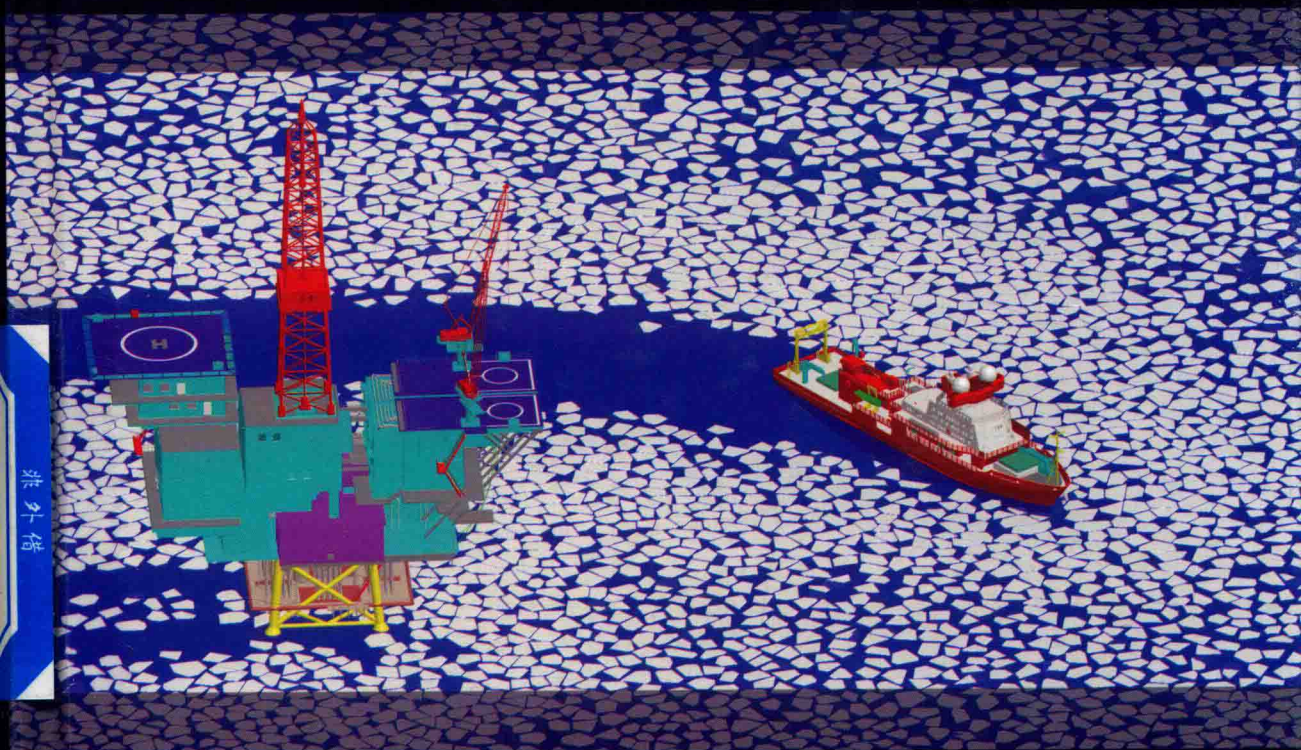


计算颗粒力学 及工程应用

Computational Granular Mechanics and
Its Engineering Applications

季顺迎 著



非外借



科学出版社

计算颗粒力学及工程应用

Computational Granular Mechanics and
Its Engineering Applications

季顺迎 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

计算颗粒力学是以颗粒材料为研究对象,在经典力学的基础上进一步结合颗粒物理、计算力学、软件工程等诸多学科的一个新兴的交叉学科。考虑颗粒材料与流体介质、工程结构的耦合作用,对其共同组成的复杂颗粒系统进行高性能数值分析是一种可行的研究途径。为此,本书首先讨论当前计算颗粒力学的发展现状,然后系统地阐述颗粒形态构造、接触模型、宏细观分析、流固耦合、多尺度计算和相关计算软件开发等计算颗粒力学的基本方法,最后相对详细地介绍计算颗粒力学在极地海洋工程、有砟铁路道床动力特性和航空着陆器缓冲特性等方面的工程应用。

本书可作为力学、物理、水利、土木、化工、农业、岩土等领域从事颗粒材料力学及其工程应用的科研人员,以及高等院校相关专业的高年级本科生和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

计算颗粒力学及工程应用/季顺迎著. —北京:科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-057864-8

I. ①计… II. ①季… III. ①颗粒-材料力学-计算力学-研究 IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 126424 号

责任编辑:刘信力/责任校对:邹慧卿

责任印制:肖 兴/封面设计:无极书装

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>

北京画中画印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张:21 3/4

字数:423 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

作为一种广泛地存在于自然环境、工业生产、日常生活和生命科学中的物质,颗粒材料在运动演化,乃至静止状态下的奇特力学现象一直吸引着人们的极大关注。然而,将其作为一个从不同尺度和视角进行系统研究的科学问题,则是近几十年的事;从力学机制上探寻解决诸如滑坡泥石流、沙漠化、矿山开采、爆炸冲击、农业播种、制药工艺、3D 打印等研究领域中的颗粒力学问题,则又是近十几年的工作。颗粒材料的研究范畴可大至地球物理乃至天体星球,小到粉尘乃至分子,当然目前更多的则是集中于工程结构尺度。在不同尺度下探寻和建立颗粒材料运动规律、力学特性的基本力学和数学模型,是颗粒力学的研究任务。采用数值方法开展颗粒材料基本力学特性的研究则是计算机科学与技术,特别是大规模高性能并行计算技术的迅速发展所导致的必然结果,并由此逐渐形成了计算颗粒力学的研究方向。然而,计算颗粒力学所涉及的数值方法非常广泛,但其最具有代表性的则是离散元方法。该方法在研究对象由散体材料向连续体材料扩展、研究尺度由单一工程尺度向宏微观多尺度延伸、研究材料由单一介质向多介质和多物理场发展的过程中,并在解决不同领域颗粒力学问题的同时,也面临着诸多的挑战。

20 世纪 70 年代初,Cundall 和 Strack 初步建立了离散元方法,其于 1979 年发表在 *Geotechnique* 上的论文已成为离散元方法发展的里程碑。该方法由最初面向岩土力学问题逐渐扩展到目前的化学工程、机械加工、交通运输、建筑施工、矿业开采、自然灾害等领域。在这个发展过程中,也由二维圆盘向三维球体和非规则单元发展,由于颗粒向流固耦合和多尺度计算方向扩展,其在单元构造、接触模型、计算规模等方面均发生了巨大的变化。与此同时,有关离散元方法的英文专著也相继出版。1984 年 Johnson 出版的 *Contact Mechanics* 是离散元接触计算的经典著作;特别是近几年,有关颗粒材料力学及离散元方法的专著不断涌现,并与相应的工程应用密切结合。然而,全面系统地介绍计算颗粒力学或离散元方法的著作却鲜有出版。这在一定程度上也反映出计算颗粒力学作为一个新兴的学科还在不断发展完善之中,虽然在近些年已趋于成熟。

我国对颗粒力学的研究始于 20 世纪 80 年代,并源于岩土力学的工程需求。最早介绍离散元方法的著作是东北大学王泳嘉和邢纪波于 1991 年出版的《离散单元法及其在岩土力学中的应用》,侧重采用二维块体单元解决边坡稳定、隧道支护等岩土力学问题;魏群也于 1991 年出版了《散体单元法的基本原理数值方法及程序》,则侧重于采用二维块体单元和圆盘单元探求解决边坡稳定、锚杆支护等岩土

力学问题,并提供了相应的计算程序。清华大学孙其诚和王光谦于2009年出版的《颗粒物质力学导论》是国内第一部系统介绍颗粒材料力学及相关计算方法的著作,为从事颗粒力学学习的研究生和技术人员提供了详细的参考。近年来,离散元方法的大规模高效计算成为解决相关颗粒工程问题的有效途径。中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室基于其开展的颗粒材料 GPU 并行计算工作,于2009年出版了《基于 GPU 的多尺度离散模拟并行计算》,系统地介绍了颗粒系统的 GPU 高性能算法的 CUDA 实现。

最近几年,随着计算颗粒力学方法在岩土力学、道路工程、隧道工程、筒仓物料、切割加工、燃烧过程等不同工程领域中的应用,一些相应领域的专业学术著作也相继出版。此外,随着我国学者对 PFC、DEC 和 EDEM 等离散元计算分析商业软件的探索应用,一些相关软件应用的工具性书籍也相继问世。这均有力地促进了计算颗粒力学在工程应用中的进一步发展。然而,我们也注意到,对于刚刚接触离散元方法的研究生和工程技术人员,需要系统地学习计算颗粒力学的基本理论、数值计算方法,并从一些工程应用中得到一些启发。为此,本书对计算颗粒力学中的基本原理和数值算法进行了详细介绍,并对作者所从事的有关工程应用也进行了相应阐述。

本书围绕计算颗粒力学及工程应用问题共10章,其中第1章为绪论,主要介绍计算颗粒力学的基本方法、工程应用和计算分析软件的发展现状;第2章~第7章针对计算颗粒力学的基本理论,从颗粒单元构造、接触模型、宏微观分析、流固耦合、多尺度计算和计算分析软件等方面系统地介绍当前计算颗粒力学的基本方法;第8章~第10章主要介绍作者近年来在极地海洋工程、有砟铁路道床、颗粒缓冲和减振特性等方面的离散元方法工程应用情况,从而为相关研究人员解决不同领域的实际工程问题提供借鉴和参考。

本书内容主要是大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室近年来在离散元方法及工程应用研究工作中不断开展和积累的,书中也引用了国内外相关的大量研究成果,以更加全面系统地反映当前国内外在计算颗粒力学及工程应用方面的研究成果。本书的完成还得益于大连交通大学严颖副教授、东北大学李健教授和张浩副教授、北京航空航天大学高政国副教授、清华大学孙其诚研究员、武汉大学楚锡华教授、华侨大学谭援强教授和大连理工大学王宇新副教授的有益讨论和合作交流。李健教授撰写了本书的3.3节和10.3节,高政国副教授和张浩副教授分别撰写了3.4节和6.3节,内蒙古大学邵帅博士撰写了第4章并由武汉大学楚锡华教授修改和指导。本书的完成也凝聚了以上学者及国内外其他专家的诸多研究成果。

作者特别感谢美国 Clarkson 大学的 Hayley Shen 教授和 Hung Tao Shen 教授。作者于2002年在 Clarkson 大学访问期间在两位教授的指引下开始关注颗粒材料

力学问题,并侧重于采用离散元方法进行计算分析;作者于2010年12月随 Hayley Shen 教授访问休斯敦的美国船级社 (ABS) 并开始极地船舶和海洋工程冰荷载的离散元软件开发。作者在这里要特别感谢美国船级社的刘社文、Han Yu、刘建成、刘翔、陈营营、夏契、谷海等专家的指导和帮助以及在离散元软件开发过程中的深入讨论;还要感谢大连理工大学程耿东院士、李锡夔教授、岳前进教授对离散元方法研究的鼓励和指导。

本书的研究内容得益于中国科学院力学研究所李世海研究员负责的973项目“重大工程地质灾害的预测理论及数值分析方法研究(2010CB731500)”、西南交通大学翟婉明院士负责的国家自然科学基金重点项目“高速铁路散体道床力学行为、劣化机制及变形规律研究(U1234209)”和哈尔滨工程大学韩端锋教授负责的国家自然科学基金重点项目“冰—水—船耦合运动学特性研究(51639004)”的大力支持。国家海洋局国家海洋环境预报中心、中国极地研究中心、北海分局和国家海洋环境监测中心等研究单位为离散元方法在极地海洋科学和工程中的应用提供了不同方式的合作和帮助;本书研究成果得到国家重点研发计划重点专项(2016YCF1401505、2016YFC1402705)、国家自然科学基金面上项目(11772085、11672072、41576179、11572067、11372067)、国家海洋公益性项目(201105016、201205007、201505019)的资助,也得到大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室的大力支持。

本书研究内容也得益于美国船级社、中国船级社、中海油信息科技有限公司、中国船舶工业集团公司、中国船舶重工集团公司、中国国际海运集装箱(集团)股份有限公司、辽宁红沿河核电有限公司、齐齐哈尔轨道交通装备有限责任公司等单位的大力支持,为离散元方法的计算软件研发和工程应用提供了有力的实践条件,也为计算颗粒力学对实际工程问题的解决提出了极大的挑战。

作者还要特别感谢大连理工大学计算颗粒力学研究团队毕业的博士王安良、狄少丞、孙珊珊、邵帅的研究工作,以及在读博士生刘璐、王帅霖、李勇俊、王嗣强、龙雪、梁绍敏、翟必垚等对本书编写工作的协助;作者与缔造科技(大连)有限公司对离散元计算分析软件 SDEM 的合作研发也丰富了本书的研究内容,相关研究成果可登录网站 www.S-DEM.com 查看。

由于作者水平有限,书中疏漏和不足之处在所难免,敬请各位专家学者批评指正。

季顺迎

2018年2月2日于大连

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 颗粒力学的工程需求	1
1.2 颗粒材料的基本物理力学特性	6
1.2.1 摩擦定律对颗粒材料力学发展的启蒙	7
1.2.2 粮仓效应对颗粒材料力学发展的推动作用	7
1.2.3 颗粒材料的挤压及剪切膨胀	8
1.2.4 颗粒材料的流动状态	9
1.3 计算颗粒力学的计算分析软件	12
参考文献	13

第一部分 计算颗粒力学的基本理论

第 2 章 非规则颗粒单元的构造	19
2.1 基于球体单元的粘结与镶嵌颗粒单元	19
2.1.1 基于球体单元的粘结模型	20
2.1.2 镶嵌颗粒模型	21
2.2 超二次曲面颗粒单元	25
2.2.1 超二次曲面颗粒单元	26
2.2.2 基于超二次曲面的椭球体颗粒单元	29
2.3 多面体及扩展多面体单元	30
2.3.1 多面体单元	30
2.3.2 基于 Minkowski Sum 的扩展多面体	32
2.4 新型非规则颗粒单元	34
2.4.1 随机星形颗粒模型	34
2.4.2 B 样条函数模型	35
2.4.3 组合几何单元法	36
2.4.4 势能颗粒单元	37
2.5 小结	38
参考文献	39

第 3 章 颗粒材料的细观接触模型	43
3.1 球形颗粒的粘弹性接触模型	44
3.1.1 线性接触模型	45
3.1.2 非线性接触模型	46
3.2 球形颗粒的弹塑性接触模型	49
3.2.1 法向弹塑性接触模型	49
3.2.2 切向弹塑性接触模型	51
3.3 球形颗粒的滚动摩擦模型	52
3.3.1 滚动摩擦定律	53
3.3.2 球体单元的滚动摩擦模型	54
3.4 球形颗粒的粘接-破碎模型	56
3.5 非球形颗粒的接触模型	60
3.5.1 超二次曲面单元间的接触模型	60
3.5.2 扩展多面体的接触模型	62
3.6 颗粒间的非接触物理作用	65
3.6.1 球形颗粒的粘连接触力	65
3.6.2 湿颗粒间的液桥力	68
3.6.3 颗粒间的热传导	71
3.7 小结	78
参考文献	79
第 4 章 颗粒材料的宏细观分析	84
4.1 基于平均场理论的颗粒材料计算均匀化方法	84
4.1.1 摩擦接触问题的变分表述	85
4.1.2 宏、细观两尺度上的边值问题	87
4.1.3 基于均匀场理论的颗粒材料宏、细观尺度求解过程	90
4.2 颗粒材料应力场的细观分析	92
4.2.1 颗粒材料微观拓扑结构的平均应力描述	93
4.2.2 颗粒集合体的应力表征	97
4.2.3 基于虚功原理颗粒材料的宏观应力描述	99
4.2.4 Cosserat 连续体内颗粒集合体表征元的平均应力	104
4.3 颗粒材料应变场的细观分析	107
4.3.1 Bagi 的应变定义	107
4.3.2 Krut-Rothenburg 的应变定义	108
4.3.3 Kuhn 的应变定义	109
4.3.4 Cundall 的最优拟合应变定义	110

4.3.5	Liao 等的最优拟合应变定义	112
4.3.6	Cambou 等的最优拟合应变定义	112
4.3.7	李锡夔等的体积应变定义	113
4.4	小结	115
	参考文献	116
第 5 章	颗粒材料的离散元-有限元耦合分析	119
5.1	连续体向离散材料转化的 DEM-FEM 耦合方法	119
5.1.1	接触算法	120
5.1.2	单元的变形	123
5.1.3	材料的破坏模型	125
5.2	连续体与离散材料连接的 DEM-FEM 耦合方法	131
5.2.1	耦合区间控制方程的弱形式	131
5.2.2	耦合界面力的求解	133
5.2.3	耦合点搜索	136
5.3	连续体与离散材料相互作用的 DEM-FEM 耦合方法	137
5.3.1	颗粒与结构物接触的全局搜索判断	138
5.3.2	颗粒与结构物的局部搜索判断	142
5.3.3	接触力的传递	145
5.4	小结	148
	参考文献	149
第 6 章	颗粒材料的流固耦合分析	153
6.1	颗粒材料与流体耦合的 DEM-CFD 方法	153
6.1.1	颗粒离散项基本控制方程	153
6.1.2	CFD-DEM 耦合的求解方法	154
6.1.3	流体域控制方程	154
6.1.4	流体与固体颗粒之间的动量交换	154
6.1.5	流体体积分数	156
6.1.6	对流传热项	156
6.2	颗粒材料与流体耦合的 DEM-SPH 方法	159
6.2.1	SPH 的函数和粒子近似	159
6.2.2	Navier-Stokes 的 SPH 形式	160
6.2.3	不可压缩流体的 PCISPH 方法	163
6.2.4	DEM-SPH 耦合模型	165
6.3	颗粒材料与流体耦合的 DEM-LBM 方法	170
6.3.1	格子 Boltzmann 法	171

6.3.2 DEM-LBM 耦合的浸没边界法	175
6.3.3 DEM-LBM 耦合方法的应用	177
6.4 小结	180
参考文献	181
第 7 章 基于 GPU 并行的离散元高性能算法及计算分析软件	187
7.1 离散元计算分析软件的发展现状	187
7.1.1 GPU 并行技术	187
7.1.2 离散元计算分析软件的发展现状	188
7.2 基于 CUDA 编程的离散元数值算法	193
7.2.1 CUDA 的并行软硬件架构	194
7.2.2 多机/多 GPU 环境的离散元算法	196
7.3 基于 GPU 的颗粒接触高效搜索方法	198
7.3.1 网格和颗粒的关系	198
7.3.2 接触对邻居列表的建立	201
7.3.3 颗粒接触力序列的计算	202
7.4 基于 GPU 并行算法的离散元计算分析软件	204
7.5 小结	206
参考文献	206

第二部分 计算颗粒力学的工程应用

第 8 章 海洋平台及船舶结构冰荷载的离散元分析	211
8.1 海冰材料的离散元方法及计算参数的确定	211
8.1.1 海冰材料的离散单元构造	211
8.1.2 海冰压缩和弯曲强度的离散元分析	216
8.1.3 海冰离散元模拟的主要计算参数	220
8.1.4 粘结海冰单元间的失效准则	221
8.1.5 颗粒尺寸影响下的海冰强度离散元模拟	224
8.2 海冰与固定式海洋平台结构相互作用的离散元分析	225
8.2.1 直立腿结构冰荷载的离散元分析	225
8.2.2 锥体海洋平台结构冰荷载的离散元分析	228
8.2.3 多桩腿锥体导管架平台结构的冰荷载遮蔽效应	231
8.2.4 自升式海洋平台结构冰荷载的离散元分析	236
8.3 海冰与浮式平台及船舶结构相互作用的离散元分析	238
8.3.1 浮式海洋平台的冰荷载分析	238

8.3.2 船舶在冰区航行的 DEM 模拟	241
8.4 冰激海洋平台结构振动的 DEM-FEM 耦合分析	243
8.4.1 冰激导管架平台 DEM-FEM 耦合方法	243
8.4.2 基于 DEM-FEM 方法的冰激导管架平台振动分析	246
8.5 海洋结构冰载荷的扩展离散单元模拟	250
8.5.1 碎冰与海洋平台桩腿、船体结构的相互作用	251
8.5.2 平整冰与船体结构的相互作用	254
8.6 核电站取水口海冰堆积特性的离散元分析	256
8.6.1 取水口海冰堆积的数值模拟	256
8.6.2 海冰堆积特性的影响因素分析	258
8.7 海冰动力学的粗粒化离散元模型	260
8.7.1 海冰粗粒化离散元模型	261
8.7.2 规则区域内海冰动力过程的数值模拟	263
8.7.3 渤海海冰动力过程的数值模拟	268
8.8 小结	271
参考文献	271
第 9 章 有砟铁路道床动力特性的离散元分析	275
9.1 道砟颗粒压碎特性的离散元模拟	275
9.1.1 单道砟颗粒破碎的离散元模拟	275
9.1.2 单道砟颗粒破碎试验验证	278
9.2 有砟铁路道床动力沉降特性的离散元分析	281
9.2.1 非规则形态道砟颗粒的构造	282
9.2.2 道砟箱的离散元构造	282
9.2.3 往复荷载下道砟材料的累积沉降量和形变模量	283
9.3 沙石混合体剪切强度的离散元分析	286
9.3.1 道砟材料直剪试验的离散元数值模拟	286
9.3.2 道砟含量对抗剪切强度的影响及力链分析	289
9.4 有砟-无砟过渡段动力特性的 DEM-FEM 耦合分析	291
9.4.1 有砟铁路道床 DEM 和 FEM 间的耦合算法	291
9.4.2 有砟-无砟过渡段的 DEM-FEM 数值模型	296
9.4.3 有砟-无砟过渡段的沉降分析	299
9.4.4 考虑道砟颗粒嵌入无砟道床的 DEM-FEM 耦合分析	300
9.5 有砟铁路道床动力特性的扩展多面体单元模拟	302
9.5.1 道砟箱试验的扩展多面体单元模拟	302
9.5.2 不同加载频率下道床的沉降	305

9.6 小结	306
参考文献	307
第 10 章 颗粒材料减振及缓冲性能的离散元分析	310
10.1 颗粒材料减振特性的试验测试及离散元模拟	310
10.1.1 颗粒阻尼器的试验研究	311
10.1.2 颗粒阻尼器的数值模拟	313
10.2 颗粒材料缓冲特性的离散元分析	316
10.2.1 颗粒缓冲特性的试验研究	316
10.2.2 颗粒缓冲特性的数值模拟	319
10.3 着陆器缓冲过程的离散元分析	325
10.3.1 着陆缓冲系统及月壤的离散元模型	327
10.3.2 着陆过程的离散元分析和冲击力特性	329
10.4 小结	334
参考文献	334

第1章 绪 论

颗粒材料一般具有非规则的几何形态并与周围流体介质、结构物共同组成复杂的颗粒系统,同时呈现出多尺度、多介质的复杂力学特性。对复杂颗粒系统力学特性的深入研究需要综合采用理论分析、数值计算和力学实验等多种途径。其中,采用数值方法对颗粒材料力学特性的研究可以追溯到20世纪70年代离散元方法的建立,并由最初面向岩土力学问题逐渐扩展到目前的化学工程、机械加工、交通运输、建筑施工、矿业开采、自然灾害等多个领域(Cundall and Strack, 1979; Cleary, 2009; 戚华彪等, 2015)。目前,离散元方法已成为解决不同工程领域颗粒材料问题的有力工具,然而其在真实颗粒形态的构造、颗粒流动特性、多介质和多尺度问题,以及高性能大规模计算方面,仍面临着诸多亟待解决的问题。此外,离散元方法的发展及其工程应用的过程一直伴随着相关计算分析软件的研发。美国Itasca公司的PFC^{2D}和PFC^{3D}、英国DEM Solutions公司的EDEM软件已成功地实现商业化(Itasca Consulting Group, 2004; DEM Solutions Ltd., 2008)。近年来,一些开源离散元软件也得到快速发展,并因其独特的计算性能而得到一定程度的应用(Abe et al., 2011; Goniva et al., 2012; Kozicki and Donze, 2009)。我国从20世纪80年代开始离散元软件的研发,并于近年来取得了很大的进展。为解决颗粒材料数值计算中的计算效率和计算规模问题,离散元的大规模并行计算在近年来得到了迅速的发展,计算规模已达到 10^7 (千万级)单元(Cleary, 2009; 戚华彪等, 2015)。尽管如此,受颗粒形态、接触模型、颗粒与流体、颗粒与工程结构的耦合模型和计算规模等因素的影响,离散元方法及相关计算软件在面向工程应用时,其在计算精度、计算效率等方面仍面临很大的挑战。由此可见,计算颗粒力学所涉及的离散元方法在工程应用中,无论在多介质、多尺度的基本理论方法,还是在高性能计算分析软件方面,还需要不断发展以更好地解决工程实践中不同类型的颗粒力学问题。本章将对颗粒材料计算力学在工程应用中的基本需求、颗粒材料的基本物理力学特性,以及颗粒材料计算分析软件发展状况进行简要介绍。

1.1 颗粒力学的工程需求

颗粒材料广泛存在于自然环境、工业生产和日常生活等诸多领域,其一般具有非规则的几何形态并与周围流体介质、工程结构组成复杂的颗粒系统。目前已初步形成了以颗粒接触力学为基础,流体力学和结构力学为载体,颗粒工程技术为应用

的多尺度、多介质计算颗粒力学交叉学科。对颗粒材料复杂力学特性的深入研究需要综合采用理论分析、数值计算和力学实验等多种途径。其中,采用数值方法对颗粒材料力学特性的研究可以追溯到 20 世纪 70 年代离散元方法的建立,并由最初面向岩土力学问题逐渐扩展到目前的化学工程、机械加工、交通运输、建筑施工、矿业开采、自然灾害等多个领域 (Cundall and Strack, 1979; Cleary, 2009; You and Buttlar, 2004; 张贵庆, 2011)。

我国颗粒材料力学的研究始于 20 世纪 80 年代,并于最近 10 年在基本理论、数值方法和试验验证等方面得到了迅速发展,并已成功地应用于多个工程领域中。通过离散元法可模拟花岗石磨削和锯切过程 (叶勇和李建平, 2015)、分析岩石隧道的动力特性 (陈寿根和邓稀肥, 2015)、计算卵石地下工程中土体大变形及破坏过程 (王明年等, 2010)。此外,在道路工程中,通过离散元单元可构造沥青混凝土模型以分析不同荷载下沥青路面的力学行为 (陈俊等, 2015);在岩土工程中,通过离散元-有限元耦合模型可分析土-结构物的相互作用 (史旦达等, 2016);对于滑坡、抛石机床、卸料等颗粒流动问题,更可以发挥离散元方法对散体材料的计算优势 (石崇和徐卫亚, 2015; 陶贺, 2015)。但离散单元法在工程应用中,还仍然面临着真实颗粒形态构造、多介质耦合以及大规模计算等亟待改进的问题。

在日常生活和工业生产中颗粒材料,一般均具有非规则的几何形态,如图 1.1



(a) 土豆



(b) 药片



(c) 碎石



(d) 人群

图 1.1 非规则颗粒形态

所示。离散元法最早一般采用二维圆盘或三维球体对非规则颗粒进行简化,并通过调整滑动或滚动摩擦系数等相关计算参数以描述非规则颗粒的复杂力学行为。但这种简化在处理颗粒的排列、互锁剪胀等力学性质时面临很大的限制。因此,这就需要发展更接近真实颗粒形态的离散单元。目前,已发展了粘结和镶嵌模型、超二次曲面模型、多面体以及扩展多面体等不同的构造方法以描述非规则颗粒形态 (Ma et al., 2016; Galindo-Torres et al., 2012)。然而,非规则颗粒的接触模型要比规则单元更加复杂,需要考虑在不同接触模式下的非线性力学行为,并考虑大规模计算中如何有效地提高非规则颗粒单元的接触搜索效率。为此,构造合理的非规则颗粒单元,发展非规则单元接触的快速搜索算法,建立颗粒单元间的合理接触模型是解决复杂颗粒材料工程问题的重要研究基础。

实际工程中存在大量的离散-连续介质相互作用的问题,需要构建相应的耦合模型进行模拟。例如,汽车挡风玻璃破碎的现象、铁路有砟道床的动力特性,以及沙地上轮胎行驶等问题。从 20 世纪 90 年代,相继发展了连续体向离散材料转换的离散元-有限元耦合方法、离散材料与连续体连接过渡的离散元-有限元耦合方法,以及离散材料与连续体相互作用的离散元-有限元耦合方法 (Munjiza et al., 2013; 张锐等, 2010; 赵春来等, 2015)。图 1.2 为汽车挡风玻璃的破碎现象,其中玻璃由连续体向非连续体转换的复杂力学过程可通过离散元-有限元耦合方法进行模拟。图 1.3 为有砟道床的结构状态,可以采用离散元-有限元耦合方法分别模拟路基与道砟的相互作用过程,从而确定道床的宏观沉降特性。在离散元-有限元耦合方法中,耦合界面参数的准确传递、时间步长的统一以及计算效率的提高都是需要解决的关键问题。

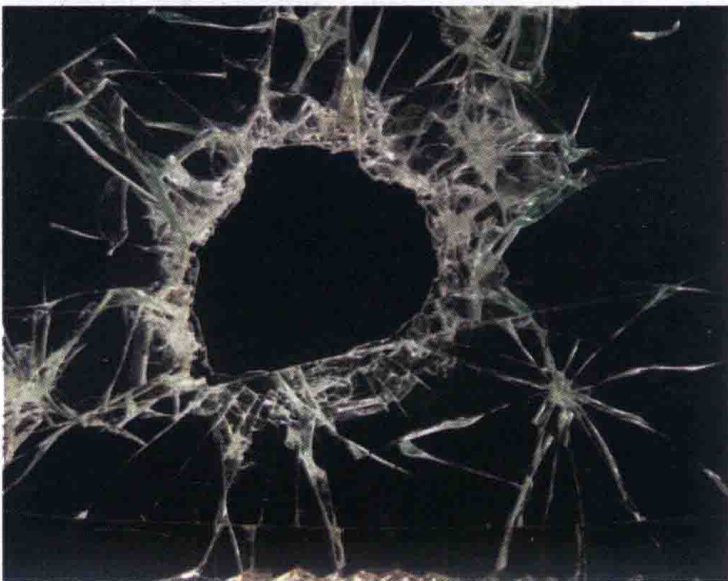


图 1.2 汽车挡风玻璃的破碎现象



图 1.3 铁路道床的道砟颗粒

颗粒材料的流固耦合现象广泛存在于自然界中,如泥石流、浮冰现象中存在着颗粒材料与流体相互作用的过程,如图 1.4 和图 1.5 所示。当颗粒材料处于流体动力学环境之中,在不同颗粒密集度下会呈现出不同的流固耦合特性。在高颗粒密集度下,流体动力学过程主要以流体在颗粒材料孔隙中的渗流为主;而在低颗粒密集度下,则以颗粒单元在流体中的漂移为主。颗粒材料的密集度在运动过程中不断变化,渗流与漂流现象会交替出现。这就需要发展适用于颗粒材料在不同密集度下的流固耦合模型。目前已发展了多种方法,包括了 DEM-SPH、DEM-LBM 以及 DEM-CFD 等 (Jonsén et al., 2014; Galindo-Torres, 2013; Washino et al., 2013)。这几种方法都有着其各自的优势和不足之处,均需结合实际情况选择适合的数值方法以正确模拟颗粒材料与流体介质的相互作用过程。



图 1.4 2010 年 6 月 28 日发生的贵州省关岭山体滑坡



图 1.5 海冰与船舶结构的相互作用

随着离散元方法在工程应用中的迅速发展，对离散元的计算规模以及计算效率也提出了更高的要求。图 1.6 和图 1.7 为粮仓卸料和风沙现象，对图中如此诸多的颗粒进行离散元计算在现阶段是不现实的。因此，计算规模和计算效率是当前该方法在工程应用中亟待解决的问题。为此，也提出了一些相应的解决方法，如粗粒化、多核 CPU 并行、GPU 并行等。粗粒化是将若干个颗粒体集合为一个计算单元，通过合理地建立计算单元间的接触模型和尺度效应分析，以提高颗粒系统的计算规模和计算效率 (Hilton and Cleary, 2014)。此外，离散元的 GPU 大规模并行计算在近年来取得了迅速的发展，计算规模已达到 10^7 (千万级) 单元。然而，工程尺度的颗粒力学一般要达 10^9 (十亿级) 单元规模，甚至更大。因此，目前受颗粒形态、接触模型、颗粒与流体、颗粒与工程结构耦合模型和计算规模等因素的影响，离散元方法在面向工程应用时，在计算规模和计算效率方面仍面临很大的挑战。

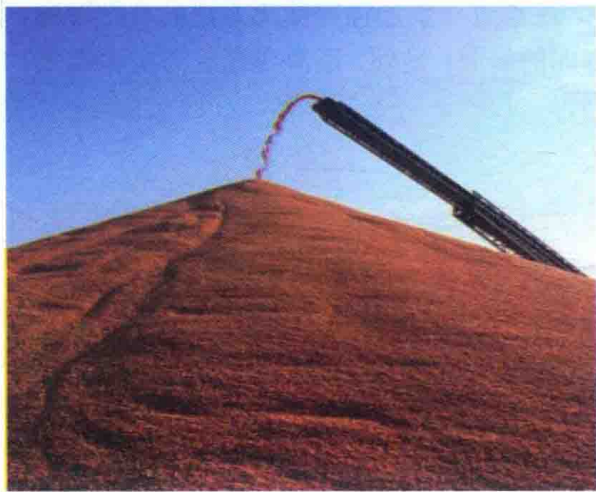


图 1.6 粮仓卸料