

高等学校教材

颗粒系统的 离散元素法 分析仿真

Analysis and Simulation of Granular System by Discrete Element Method Using EDEM

——离散元素法的工业应用与 EDEM 软件

胡国明 等/编著



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

颗粒系统的离散元素法分析仿真

——离散元素法的工业应用与 EDEM 软件简介

胡国明 等编著

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

内 容 提 要

本书根据作者多年来在离散元素法、颗粒制备与散体处理系统及其相关基础理论的研究成果,对离散元素法理论及其应用作了系统全面的阐述。全书共分12章,内容主要包括离散元素法的起源与发展现状、离散元素法的基本原理、力学模型与参量选择、相关算法及其计算机求解实现;颗粒离散元素法软件 EDEM 的基础知识、软件构架和操作方法,工业产品和工业过程的颗粒离散元素法建模、运行与分析,并以实例的形式进行了 EDEM 的演示与说明;离散元素法在粉体制备装置、散体处理装置、土方机械、颗粒与流体、颗粒与结构等产品或领域方面的应用。

本书综述与分析了大量国内外 DEM 相关文献,探讨了离散元素法及其工业应用的问题,介绍了 EDEM 软件的使用,本书可以作为研究颗粒离散元素法的参考书,也可作为 EDEM 软件的应用教程,还可供已具备一定科研基础的工程技术人员、相关专业的研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

颗粒系统的离散元素法分析仿真——离散元素法的工业应用与 EDEM 软件简介./胡国明等编著. —武汉:武汉理工大学出版社,2010.7

ISBN 978-7-5629-3169-0

I. 颗…

II. 胡…

III. ①工程计算

IV. TB115

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 109102 号

出 版:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070)

发 行:武汉理工大学出版社发行部

印 刷:武汉理工大印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:20

字 数:512 千字

版 次:2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~1000 册

定 价:42.00 元

(本书如有印装质量问题,请向承印厂调换)

序

离散元素法(Discrete Element Method, DEM)是分析与求解复杂离散系统的动力学问题的一种新型数值方法,它与求解复杂连续系统的有限元法具有类似的物理含义、平行的数学概念,但是两者使用不同的数值模型与处理手段。该方法是继有限元法、计算流体动力学(CFD)之后,用于分析物质系统动力学问题的又一种强有力的数值计算方法。离散元素法认为系统是由离散的个体组成,个体之间存在接触与脱离,存在相互运动、接触力与能量的联系,这些联系为微细观力学,特别是散体力学问题的数值求解提供了方法。

离散元素法由英国皇家工程院院士、美国工程院院士 Peter Cundall 于 1971 年首次提出并应用于岩土力学的研究。从岩土力学、地质力学的研究起步,经过近 40 年来的不断深入研究与发展,DEM 已经被地球物理、矿物工程、土木工程和化学工程等领域的学者和工程师用于模拟颗粒系统和粉体中的粒子流动,分析颗粒的剪切效果和颗粒的填充等特性。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的复杂工业对象的仿真。离散元素法正在被越来越广泛地应用于涉及固体颗粒的操作和处理等问题的工业部门。

离散元素法通过建立固体颗粒系统的参数化模型,进行颗粒行为模拟和分析,为解决众多涉及颗粒、结构、流体与电磁及其耦合等综合复杂问题提供了一个平台,已成为过程分析、设计优化和产品研发的一种强有力的工具。目前 DEM 在工业领域的应用逐步成熟,并已从散体力学的研究、岩土工程与地质工程等工程应用拓展至工业过程与工业产品的设计分析与研发的领域。在诸多工业领域取得了重要成果,显示了较强的仿真分析功能,且应用范围不断扩大。

随着离散元素法在工程应用中的日益成熟,相关的应用软件相继出现。EDEM 是 Favier 博士创立的英国 Dem-Solutions 公司的主导产品。它是全球首个多用途的颗粒离散元素法软件,主要用于工业颗粒处理及制造设备的工业模拟和分析。

《颗粒系统的离散元素法分析仿真》一书的作者胡国明教授多年从事离散元素法、颗粒制备与处理系统及其相关基础理论的研究。该书在分析、综述国内外相关文献的基础上,介绍了离散元素法的起源与发展现状,阐述了离散元素法的基本原理、力学模型与参量、相关算法及其求解实现。在此基础上介绍了颗粒离散元素法软件 EDEM 的基础知识和软件构架,并以实例的形式,通过对工业产品和工业过程的颗粒离散元素法建模、运行与分析进行了演示与说明,介绍了离散元素法在粉体制备装置、散体处理装置、土方机械、颗粒与流体、颗粒与结构等产品或领域方面的应用。该书的出版,对于促进我国广大学者对颗粒离散元素法的研究,对于促进颗粒离散元素法在我国工业过程与工业产品的设计分析与研发中的应用,具有重要价值,为广大工程技术人员,相关专业的研究生,提供了一本有益的参考书。



中国工程院 院士
浙江大学 教授
谭建荣 博士

2010 年 3 月 6 日

前 言

任何力学问题的解答都是以某种介质媒体为基础展开分析,从这个意义上讲,处理介质力学的数值方法可以分为两大类:一类是连续介质力学数值方法,另一类是非连续介质力学数值方法。从思想方法上来看,连续介质力学数值方法,如有限元和边界元方法等,可以认为是一种数学方法,因为它们都要求研究的问题具有数学上的连续性。同时,这些方法基于连续体的假定,必须满足应力平衡和位移协调条件,这将极大地限制它们在诸如滑坡体的变形破坏、颗粒系统和粉体中的粒子流动等离散体系统的动力学方面的运用。

离散元素法是求解与分析复杂离散系统的运动规律与力学特性的一种新型非连续介质力学数值方法,它与连续介质力学数值方法具有类似的物理含义和平行的数学概念,但具有不同的模型与处理手段。离散单元法不要求数学上的连续性,用到的仅仅是基本的牛顿运动定律,还有简单的接触本构关系,所以可以认为它是一种物理方法。近些年来随着对离散元素法研究的日益成熟,有关专家认为,离散元素法将是继有限元法、计算流体动力学之后,用于分析复杂机械系统中的物理现象,特别是运动规律与动力学参数的另一种主要的数值计算方法。

本书中所介绍的离散元素法,主要集中于讨论颗粒离散元素法。其主要思想是把整个介质看做由一系列离散的独立运动的颗粒(单元)所组成,单元本身具有一定的几何(形状、大小、排列等)和物理、化学特征。其运动受经典运动方程控制,整个介质的变形和演化由各单元的运动和位置来描述。通过对每个单元的微观运动进行跟踪计算,即可得到整个研究对象的宏观运动规律。

编者考虑到对于大多数工程技术人员而言,分析、计算和研究具体的离散颗粒系统的产品与过程,掌握这些分析过程的方法将比深入研究散体力学以及完全掌握离散元素法的求解过程更具有实际意义。目前离散元素法商业计算软件非常少,其中 EDEM™ 是世界上第一个用现代化离散元模型模拟和分析颗粒系统处理和生产操作的通用 CAE 软件。它界面清新、使用简单、计算准确,与其他普及的 CAE 软件的耦合能力强,用户能使用 EDEM 软件快速而有效地创建离散元素法仿真模型,以一种更加准确的方式对颗粒处理及其生产操作进行研究。

本书可作为相关专业人员学习离散元素法的参考用书,也可作为广大工程技术研究人员利用 EDEM 软件进行离散颗粒系统的数值分析模拟的指导用书。在内容安排上,本书第 1 章为离散元素法的基础理论部分,主要介绍了离散元素法的力学模型及其力学参量,并阐述了它的计算机实现原理;2~3 章为一个简明的 EDEM 分析仿真教程,包括 EDEM 软件的安装与激活和 EDEM 快速入门,旨在让读者在短时间内掌握 EDEM 的基本功能模块的操作方法;4~7 章为 EDEM 运用的基础内容,详细说明了该软件的三个主要功能模块——模型创建、仿真计算和数据处理;8~10 章为 EDEM 的高级运用部分,具体说明了 EDEM-CFD 耦合和 EDEM-动力学耦合的内容,以及自定义模型及其编程技术;11~12 章为离散元素法的分析仿真的运用实例,该部分除了给出 EDEM 的仿真实例外,还着重介绍工业产品和工业过程的颗粒离散元素法仿真分析,所列实例广泛而翔实。

本书由胡国明教授课题组与 Favier 博士的 Dem-Solutions 公司研发团队共同编著。全书由胡国明总纂, Dem-Solutions 授权 EDEM 的文献与技术审定,黄伟森博士整理提供 EDEM 的技术文献与校正以及附录 CD 的工作。本书第 1 章、第 12 章由胡国明编写,第 2 章由张文凤编写,第 3 章由陈金鑫编写,第 4 章由简斌编写,第 5 章由方娜编写,第 6 章由刘牧群编写,第 7 章由万卉编写,

第8章由郭胜编写,第9章由胡励编写,第10章由刘丽萍编写,第11章由胡震禹编写,附录由刘宇编写。本书在国家高技术研究发展计划(863),课题编号2007AA04Z128的专项经费资助下编写完成。在本书的编写过程中,得到了北京海基科技发展有限公司技术经理魏随利、中国农业大学徐泳教授与徐春晖博士的热心指导和大力协助,在此一并致谢。

鉴于编著者水平有限,书中难免存在缺点和错误,恳请广大读者给予批评指正。

编 者
2010年3月

目 录

1 离散元素法的基本原理	(1)
1.1 离散元素法的起源	(1)
1.1.1 颗粒材料与离散元素法	(1)
1.1.2 离散元素法的产生	(1)
1.1.3 离散元素法求解问题的基本思想	(1)
1.1.4 二维离散元素法	(2)
1.1.5 三维离散元素法	(2)
1.1.6 可变形块体离散元素法	(2)
1.2 离散元素法国内外的发展状况	(3)
1.2.1 离散元素法的发展演变	(3)
1.2.2 接触模型研究进展	(4)
1.2.3 颗粒形状模型的研究进展	(5)
1.2.4 接触判断的研究进展	(6)
1.2.5 离散元素法与其他数值方法耦合研究的进展	(7)
1.3 离散元素法的基本原理与力学模型	(7)
1.3.1 离散元素法的基本原理	(7)
1.3.2 离散元素法的颗粒模型	(8)
1.3.3 颗粒模型运动方程	(10)
1.4 离散元素法的力学参量	(11)
1.4.1 离散元素法颗粒模型的接触刚度	(11)
1.4.2 离散元素法颗粒模型的接触阻尼	(13)
1.5 离散元素法的接触判断算法	(15)
1.5.1 接触判断算法的意义	(15)
1.5.2 网格单元法的原理	(16)
1.5.3 颗粒接触的网格单元法的检索过程	(16)
1.6 离散元素法的求解实现	(18)
1.6.1 离散元素法求解的组成部分	(18)
1.6.2 离散元素法的求解过程与方法	(18)
1.6.3 离散元素法的接触力与位移的计算	(18)
1.6.4 离散元素法的迭代的时间步长	(20)
1.6.5 离散元素法的求解程序流程	(20)
2 EDEM 预备知识	(34)
2.1 EDEM 概述	(34)
2.2 EDEM 的安装与启动	(35)

2.2.1	获取 EDEM	(35)
2.2.2	安装 EDEM 及其授权软件	(37)
2.2.3	激活 EDEM 许可证	(39)
2.2.4	启动 EDEM	(40)
2.2.5	疑难解答	(40)
2.3	EDEM 的文件类型	(41)
2.3.1	EDEM 工作文件类型	(41)
2.3.2	EDEM 的导入/导出文件类型	(42)
3	EDEM 快速入门	(44)
3.1	EDEM 的主功能界面	(44)
3.1.1	选项卡面板	(45)
3.1.2	模型显示器	(45)
3.1.3	显示器控制面板	(45)
3.1.4	数据浏览窗口	(45)
3.1.5	整理用户界面	(46)
3.2	模型创建	(46)
3.2.1	设置参数、物理和材料属性	(47)
3.2.2	定义原型颗粒	(48)
3.2.3	定义几何体	(50)
3.2.4	设定仿真区域	(51)
3.2.5	创建颗粒工厂	(52)
3.3	仿真计算	(52)
3.3.1	设定时间步长和仿真时间	(52)
3.3.2	定义网格尺寸	(53)
3.3.3	仿真运行	(53)
3.4	数据分析	(54)
3.4.1	观察仿真过程	(54)
3.4.2	设置显示方式	(54)
3.4.3	颜色标识	(55)
3.4.4	网格单元组	(56)
3.4.5	截断分析	(57)
3.4.6	选择组集	(58)
3.4.7	其他工具	(58)
3.4.8	绘制图表	(58)
3.4.9	分析导出数据	(60)
3.4.10	生成截图	(61)
3.4.11	制作视频	(62)
4	模型创建	(64)
4.1	EDEM 模型创建界面	(64)

4.1.1	选项卡面板	(64)
4.1.2	模型显示器	(64)
4.1.3	显示器控制面板	(65)
4.1.4	数据浏览窗口	(66)
4.1.5	工具栏	(67)
4.1.6	菜单栏	(67)
4.2	设置全局变量	(70)
4.2.1	仿真模型注册	(71)
4.2.2	接触模型	(71)
4.2.3	重力设置	(72)
4.2.4	材料设置	(72)
4.3	定义原型颗粒	(73)
4.3.1	创建(或导入)新的颗粒	(73)
4.3.2	定义颗粒几何特性	(73)
4.3.3	定义颗粒材料特性和物理特性	(74)
4.3.4	颗粒限定	(74)
4.3.5	导出颗粒	(74)
4.3.6	自定义颗粒属性	(74)
4.3.7	创建自定义颗粒属性	(75)
4.4	定义几何模型	(75)
4.4.1	创建一个几何元素	(75)
4.4.2	导入一个几何模型	(76)
4.4.3	合并几何元素	(77)
4.4.4	定义几何体属性	(77)
4.4.5	定义几何体运动特性	(77)
4.4.6	将一个几何体设定为颗粒工厂	(79)
4.5	设定仿真区域	(79)
4.5.1	仿真区域	(79)
4.5.2	周期性边界(Periodic Bondaries)	(79)
4.6	颗粒工厂	(79)
4.6.1	定义静态/动态颗粒工厂	(79)
4.6.2	设定初始条件	(80)
5	仿真计算	(83)
5.1	仿真计算界面	(83)
5.1.1	选项卡面板	(83)
5.1.2	模型显示器	(83)
5.1.3	显示器控制面板	(84)
5.1.4	仿真求解报告	(85)
5.1.5	工具栏	(86)

5.1.6	菜单栏	(86)
5.2	仿真计算过程	(87)
5.2.1	设置时间步长和仿真时间	(87)
5.2.2	设定网格尺寸	(87)
5.2.3	运行仿真	(87)
5.3	仿真计算设置	(87)
5.3.1	时间步长设置	(87)
5.3.2	网格设置	(88)
5.3.3	碰撞判断	(89)
5.3.4	存储碰撞数据	(89)
5.3.5	运算处理器设置	(89)
5.3.6	开始和停止仿真模拟	(90)
5.4	仿真时间预测的相关说明	(90)
5.4.1	时间步长	(90)
5.4.2	Hertz 接触模型	(90)
5.4.3	弹性碰撞	(91)
5.5	缩减仿真时间	(91)
5.5.1	仿真参数	(91)
5.5.2	数据浏览器	(91)
5.5.3	自动更新选项	(92)
5.5.4	网格尺寸	(92)
5.5.5	区域尺寸	(92)
5.5.6	硬件与驱动更新	(92)
6	数据分析	(93)
6.1	数据分析界面	(93)
6.1.1	选项卡面板	(93)
6.1.2	模型显示器	(94)
6.1.3	显示器控制面板	(94)
6.1.4	数据浏览窗口	(94)
6.1.5	工具栏	(94)
6.1.6	菜单栏	(95)
6.2	模型显示设置	(96)
6.2.1	几何体显示	(96)
6.2.2	颗粒显示	(96)
6.2.3	接触显示	(97)
6.2.4	粘结显示	(98)
6.3	颜色标识	(99)
6.3.1	静态着色	(99)
6.3.2	属性着色	(99)

6.3.3	颜色图标	(101)
6.4	网格单元组	(101)
6.4.1	为网格单元组添加元素	(101)
6.4.2	设置网格单元组覆盖区域	(101)
6.4.3	网格单元组属性卡	(101)
6.4.4	网格单元组的颜色标识	(104)
6.5	截断分析	(105)
6.5.1	平面截断	(106)
6.5.2	切片截断	(106)
6.5.3	区域边界截断	(107)
6.6	其他工具	(107)
6.6.1	指定选择组集	(107)
6.6.2	标尺	(108)
6.6.3	量角器	(109)
6.6.4	网格比例尺	(109)
6.7	制作视频	(110)
6.7.1	预备设置	(110)
6.7.2	视频设置	(110)
6.7.3	录制视频	(111)
6.8	导出数据	(112)
6.8.1	导出配置设置	(112)
6.8.2	常规设置	(113)
6.8.3	属性卡设置	(113)
6.8.4	结果截短	(117)
7	仿真结果的图表绘制与生成	(119)
7.1	绘制直方图	(119)
7.1.1	Select Element 区域	(120)
7.1.2	设定 X 轴属性	(120)
7.1.3	设定 Y 轴属性	(122)
7.1.4	直方图设置	(123)
7.1.5	生成图表	(124)
7.2	绘制折线图	(125)
7.2.1	图表元素的选择	(125)
7.2.2	设定 X 轴属性	(125)
7.2.3	设定 Y 轴属性	(125)
7.2.4	折线图设置	(127)
7.2.5	创建图表	(127)
7.3	绘制散点图	(127)
7.3.1	图表元素的选择	(127)

7.3.2	设定 X 轴属性	(127)
7.3.3	设定 Y 轴属性	(129)
7.3.4	散点图设置	(131)
7.3.5	散点图的生成	(131)
7.4	绘制饼状图	(132)
7.4.1	图表元素选择	(132)
7.4.2	定义属性	(133)
7.4.3	饼状图设置	(135)
7.4.4	饼状图的生成	(135)
7.4.5	网格单元组的饼状图示例	(135)
7.5	生成截图	(137)
7.5.1	保存单个图像	(137)
7.5.2	保存多个图像	(137)
8	EDEM-CFD 耦合	(139)
8.1	EDEM 与 FLUENT 的耦合模块	(139)
8.1.1	启动 FLUENT 中的 EDEM 方案配置设置面板	(139)
8.1.2	EDEM 方案配置面板的设置	(140)
8.1.3	EDEM 输入文件	(141)
8.1.4	手动设置 FLUENT	(142)
8.1.5	FLUENT 的耦合模型	(142)
8.2	EDEM-CFD 耦合理论	(144)
8.2.1	EDEM-CFD 阻力模型	(144)
8.2.2	EDEM-CFD 升力模型	(145)
8.2.3	EDEM-CFD 热传递模型	(146)
8.3	时间匹配	(147)
8.4	EDEM-CFD 耦合应用	(147)
9	EDEM 动力学耦合	(151)
9.1	EDEM 与 Easy5 的动力学耦合的一般步骤	(151)
9.1.1	在 EDEM 中设置 Easy5 耦合	(151)
9.1.2	在 Easy5 中设置 EDEM 耦合	(151)
9.1.3	在 EDEM 中设置同步耦合	(152)
9.1.4	设置 EDEM 的输入输出	(152)
9.2	EDEM 动力学耦合简单实例	(154)
9.2.1	创建一个 EDEM 模型	(154)
9.2.2	创建一个 Easy5 模型	(158)
9.2.3	Easy5 仿真模型与 EDEM 模型之间的耦合	(161)
9.2.4	EDEM 动力学耦合的仿真计算	(162)
9.2.5	EDEM 动力学耦合的数据分析	(163)

10 EDEM API	(164)
10.1 EDEM API 概要	(164)
10.1.1 EDEM 插件的创建过程	(164)
10.1.2 EDEM 的仿真过程	(164)
10.2 自定义接触模型插件	(165)
10.2.1 自定义接触模型插件概要	(165)
10.2.2 创建自定义接触模型插件	(166)
10.2.3 创建和编译新的接触模型	(167)
10.2.4 使用新的接触模型插件	(168)
10.2.5 使用 EDEM 数据分析模块验证新的接触模型	(168)
10.2.6 接触模型 API v1.1.0	(171)
10.2.7 自定义接触模型插件范例	(182)
10.3 自定义颗粒体力插件	(184)
10.3.1 自定义颗粒体力插件概要	(184)
10.3.2 创建自定义颗粒体力插件	(184)
10.3.3 颗粒体力 API v1.1.0	(189)
10.3.4 自定义颗粒体力插件范例	(194)
10.4 自定义颗粒工厂插件	(197)
10.4.1 自定义颗粒工厂插件概要	(197)
10.4.2 颗粒工厂 API v1.0.0	(197)
10.4.3 自定义颗粒工厂插件范例	(202)
10.5 自定义阻力模型插件	(203)
10.5.1 自定义阻力模型插件概要	(203)
10.5.2 阻力模型 API	(203)
10.6 EDEM 扩展 API	(205)
10.6.1 EDEM 扩展 API	(205)
10.6.2 自定义颗粒属性	(205)
11 EDEM 应用实例	(210)
11.1 螺旋喂料机	(210)
11.1.1 创建模型	(210)
11.1.2 运行仿真	(215)
11.1.3 分析结果	(216)
11.2 半自磨机	(220)
11.2.1 创建模型	(220)
11.2.2 运行仿真	(223)
11.2.3 分析结果	(223)
11.3 输送带	(225)
11.3.1 创建模型	(225)
11.3.2 运行仿真	(229)

11.3.3	分析结果	(230)
12	离散元素法的工业应用	(233)
12.1	离散元素法的工业应用概况	(233)
12.1.1	DEM 应用领域的拓展	(233)
12.1.2	DEM 工业应用的特征	(233)
12.1.3	DEM 工业应用的问题及挑战	(234)
12.1.4	DEM 工业应用的分类	(235)
12.2	球磨机的离散元素法仿真分析	(237)
12.2.1	球磨机的结构原理与工作参数	(237)
12.2.2	球磨机 DEM 仿真模型	(238)
12.2.3	球磨机仿真结果分析	(239)
12.2.4	球磨机的 DEM 模型仿真总结	(241)
12.3	离散元素法在行星磨机仿真分析方面的应用	(241)
12.3.1	行星磨机的工作原理和结构	(241)
12.3.2	离散单元法在行星磨机设计分析中的应用	(243)
12.3.3	行星磨机仿真模型	(243)
12.3.4	行星磨机仿真结果及分析	(243)
12.4	离散元素法在螺旋输送机仿真分析方面的应用	(244)
12.4.1	螺旋输送机的结构、工作原理及其设计分析	(244)
12.4.2	螺旋输送机仿真模型的建立	(245)
12.4.3	离散元素法仿真结果	(247)
12.5	离散元素法在装载机仿真分析方面的应用	(249)
12.5.1	装载机的结构和工作原理	(249)
12.5.2	离散元素法在装载机设计分析中的应用	(250)
12.5.3	装载机仿真模型	(251)
12.5.4	前卸式装载机仿真结果与分析	(252)
12.6	离散元素法在拉铲挖掘机仿真分析方面的应用	(253)
12.6.1	拉铲挖掘机的结构和工作原理	(253)
12.6.2	离散单元法在拉铲挖掘机设计分析中的应用	(253)
12.6.3	拉铲挖掘机仿真模型的建立	(254)
12.6.4	拉铲挖掘机仿真结果及分析	(256)
12.7	离散元素法在气力输送仿真分析方面的应用	(257)
12.7.1	气力输送的工作原理、组成和分类	(257)
12.7.2	离散元素法在气力输送仿真分析中的应用	(258)
12.7.3	气力输送仿真模型	(258)
12.7.4	气力输送系统仿真结果及分析	(259)
12.8	离散元素法在振动筛分仿真分析方面的应用	(261)
12.8.1	振动筛的功能、工作原理和特点	(261)
12.8.2	离散元素法在振动筛仿真分析中的应用	(261)

12.8.3	振动筛仿真模型·····	(262)
12.8.4	振动筛系统仿真结果及分析·····	(262)
12.9	离散元素法在混合机仿真分析方面的应用·····	(264)
12.9.1	混合机的工作原理和结构·····	(264)
12.9.2	离散元素法在混合机仿真分析中的应用·····	(265)
12.9.3	混合机的 DEM 仿真模型·····	(265)
12.9.4	混合机仿真结果及分析·····	(265)
12.9.5	混合机的 DEM 模型仿真小结·····	(267)
12.10	离散元素法在喷丸强化仿真分析方面的应用·····	(268)
12.10.1	喷丸强化工艺概况·····	(268)
12.10.2	离散元素法在喷丸强化工艺方面应用的发展·····	(268)
12.10.3	喷丸强化工艺过程的离散元模型·····	(269)
12.10.4	喷丸强化工艺过程仿真计算结果及分析·····	(270)
12.11	DEM 静电耦合的应用·····	(271)
12.11.1	静电效应的 DEM 仿真·····	(271)
12.11.2	静电照相复制技术与墨粉静电粘结·····	(272)
12.11.3	月球表面静电效应·····	(273)
12.12	DEM 的其他应用·····	(274)
12.12.1	立式辊磨与中速磨的离散元素法仿真·····	(274)
12.12.2	离散元素法在回转窑仿真分析中的应用·····	(276)
12.12.3	离散元素法在搅拌研磨装置仿真分析中的应用·····	(277)
12.12.4	离散元素法在冲击破碎/粉碎装置仿真分析中的应用·····	(279)
12.12.5	离散元素法在流化床气流粉碎装置仿真分析中的应用·····	(279)
12.12.6	离散元素法在推土机仿真分析中的应用·····	(280)
12.12.7	正交切削过程的仿真·····	(282)
12.12.8	弹性薄膜的仿真·····	(283)
附录 1	接触模型·····	(295)
附录 2	颗粒的体力·····	(299)
附录 3	材料属性数据库·····	(301)

1 离散元素法的基本原理

1.1 离散元素法的起源

1.1.1 颗粒材料与离散元素法

颗粒材料在自然界和工程中极普遍,一般分为粉体和散体。德国 Karlsruhe 大学的 Hans Rumpf 教授从物理学角度认为粉体与散体(Powder & Bulk)是相对于气体、固体、液体的另一种物质形态。粉体与散体是由大量颗粒组成,并且颗粒间有较强的相互作用,属于聚集态物质。颗粒材料的力学特征可概括为“散”和“动”,“散”指颗粒物性、粒度和形状的分散性,“动”指运动的瞬态、波动、碰撞、颗粒凝聚以及聚团的破裂、破碎。过去常用宏观的连续体力学理论分析散体过程,但上述“散”、“动”特征常与该理论均匀、连续等假定冲突,导致理论与实际的偏离。随着现代力学、数值方法与计算机技术的迅速发展,出现了求解散体力学领域问题的新的数值方法——离散元素法(Discrete Element Method)。

离散元素法是求解与分析复杂离散系统的运动规律与力学特性的一种新型数值方法,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含义和平行的数学概念,但具有不同的模型与处理手段。离散元素法认为系统是由离散的个体组成,个体之间存在接触与脱离,存在相互运动、接触力与能量的联系,它为微观力学、散体力学问题的数值求解提供了手段。有关学者认为,离散元素法是继有限元法、计算流体动力学之后,用于分析复杂机械系统中的物理现象,特别是运动规律与动力学参数的另一种强有力的数值计算方法。

1.1.2 离散元素法的产生

离散元素法的出现相对较晚,其思路源于分子动力学。它把整个介质看做由一系列离散的独立运动的颗粒(单元)所组成,单元本身具有一定的几何(形状、大小、排列等)、物理和化学特征。其运动符合经典运动方程,整个介质的变形和演化由各单元的运动和位置来描述。

离散元素法是由英国皇家工程院院士、美国工程院院士 Peter Cundall 博士 1971 年在伦敦大学帝国学院攻读博士学位时^[1,2,3]首次提出的。Cundall 提出的二维角-边(面)接触离散元素法模型最初用于准静力或者动力条件下岩石边坡的运动分析。该模型可以有效地描述岩体等非连续介质及其颗粒散体的运动,适用于研究在准静态或动力条件下的节理系统或块体集合的力学问题。它允许单元之间改变原有的接触关系,对分析大变形、大位移甚至发生接触面脱落的问题都很有效。

1.1.3 离散元素法求解问题的基本思想

离散元素法最初的研究对象主要是岩石等非连续介质的力学行为。其基本思想是将岩体看成是由断层、节理、裂隙等结构面切割而成的一个个刚性或者可变形块体。块体与块体之间

通过角、面或者边进行接触,块体可以平移、转动或者变形。节理面可以被压缩、分离或滑动,所有块体镶嵌排列。当给定块体一个外力或者边界位移约束时,各个块体在外界的干扰下就会产生力和力矩的作用,由牛顿第二定律可以得到各个块体的加速度,然后对时间进行积分,就可以依次求出块体的速度和位移,最后得到块体的变形量,块体的位移矢量的方向会相应被调整,这样又会产生新的力和力矩的作用,如此循环,直到所有块体达到一种平衡状态或者处于某种运动状态。

1.1.4 二维离散元素法

1974 年 Cundall 研究了离散元素法程序中交互式计算机输入/输出问题^[4],1976 年离散元素法程序已具有屏幕输出的交互会话功能^[5],二维的离散元素法程序趋于成熟,并应用在岩石边坡的离散元素法分析中^[6]。但由于受到计算机内存的限制,不少程序是用汇编语言编写的。1978 年离散元素法程序全部被翻译成 FORTRAN IV 的版本,它成为离散元素法的基本程序^[7, 8]。Cundall 和 Strack 共同提出了单体圆盘之间的速度、加速度、作用力传递的离散数值模型,用于研究岩土力学问题,同时两人还共同开发出用于研究颗粒介质的二维圆形单元计算程序 BALL。1979 年 Cundall 和 Strack 的成果在“Geotechnique”中发表^[9],引起学术界的普遍关注和高度重视,并正式使用“Discrete Element Method”这一学术术语。他们研究了颗粒介质的力学行为,证明了离散元素法是研究颗粒本构关系的有效工具,所得结果与 Drescher^[10]等人用光弹性技术的实验结果相一致,使 BALL 程序在研究颗粒介质的本构方程方面显示出强大的生命力。以文献“Discrete Numerical Model for Granular Assemblies”和程序 BALL 为标志,离散元素法的力学地位得到确立。

Cundall 将岩体断层、节理、裂隙等切割而成块体的非连续介质力学问题抽象成由二维刚性圆盘组成的离散颗粒集合体,开拓性地提出并建立了二维刚性颗粒离散元素法。在此基础上,Cundall 以岩土为研究对象,对材料的微观结构进行了分析^[11],探讨了其求解方法^[12, 13],完善了二维刚性块体离散元素法的研究^[14],并应用于隧道支撑的载荷分析、横梁结构的稳定性预测^[15]、核电站耐震轴承的动力学响应分析^[16]和岩土的本构关系分析^[17, 18]等方面。

1.1.5 三维离散元素法

Cundall 还开发了三维 TRUBAL 程序(后发展成商业软件 PFC-3D),与二维程序的基本原理相同,不同之处在于两者的数据结构。BALL 程序以圆盘作为颗粒的模型,TRUBAL 程序以球体作为颗粒的模型,两者分别用于模拟二维和三维状态下的散体系统的力学行为^[19, 20]。1983 年 Cundall^[21]对颗粒材料的微观机制模型进行了分析总结,讨论了颗粒的新模型和本构关系,展开了对二维、三维离散元素法的模型与程序开发广义化的研究^[22, 23]。

1.1.6 可变形块体离散元素法

1980 年 Cundall^[24, 25]在原有的刚体模型的基础上,研究块体在受力后的变形以及根据破坏准则允许对象断裂的块体单元模型,使刚性块体离散元素法向可变形块体离散元素法迈进了一步。他称这种程序为 Universal Distinct Element Code(UDEC)。1982 年 Cundall^[26]进行了颗粒材料的变形和破坏的颗粒聚集、测量及观察的数值实验研究,分析了适应密度尺度的时域确定性计算问题^[27]。