

# 颗粒离散元法的微机可视化程序设计

杨全文 左树春 徐 泳

(中国农业大学工程基础科学部)

**摘 要** 以 VC++ 6.0 为开发工具, 将 UNIX 环境下的离散元程序进行了移植和改造, 研制出在微机 WINDOW S 环境下的离散元仿真程序。程序的计算和控制部分采用混合编程、动态链接及多线程编程技术, 在可视化图形程序设计中成功地引进了 OpenGL 图形库, 实现了图像资料直接打印和保存。使用上述程序模拟了急刹车情况下车载散体与车厢的相互作用, 表明新程序的操作和图形显示界面友好, 效率很高。

**关键词** 离散元法; 模拟; 可视化; 图形

**中图分类号** O 347. 7; TP 311. 54

## Visualized Programming for Discrete Element Simulation With PC Computers

Yang Quanwen, Zuo Shuchun, Xu Yong

(College of Applied Engineering Sciences, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** The code of Discrete Element Method used for simulation of particulate materials with a UNIX platform was recoded and transplanted to PC computers with WINDOW S platform. During programming, several advanced techniques, such as mixed-language programming, multithreading, dynamical link libraries and database were utilized. OpenGL graphics library was introduced to draw graphics, which can be saved or printed out conveniently. Test was done for the response of granular materials filled within a truck container during a sudden breaking. The result showed that the new program has a friendly control interface and a high graphing performance with high computational efficiency.

**Key words** Discrete Element Method; simulation; visualization; graphics

离散元法 (DEM) 是分析散体力学行为的新的数值方法<sup>[1]</sup>。与有限元法和计算流体力学类似, 图形程序设计同样是 DEM 编程的重要内容。DEM 模拟对散体在运动全过程的力学行为要随时监控, 并用图形输出。为显示颗粒运动形态要画出数以万计的球颗粒并作消隐计算。

国外多数离散元法模拟在 UNIX 环境下的工作站进行, 稳定性和图形功能虽好, 但硬件和配套软件价格昂贵, 在我国难以普及, 计算结果的统计分析还要借助微机完成。与其形成鲜明对照的是微机软硬件技术的快速发展, 包括计算速度的迅速提高、内外存容量的扩大以及图形加速技术的发展等, 这一切为在微机上完成较大规模的科学计算和图形处理开辟了广阔前景。日新月异的微机系统和应用软件的发展, 使运算操作的管理和三维图形的绘制更为便捷,

收稿日期: 2002-05-07

国家自然科学基金资助项目 (19972075)

杨全文, 北京中关村 中国科学院力学研究所, 100080

特别是 VC++、V-FORTRAN 等集成开发环境的不断改进完善,使得在微机上开发高性能离散元法仿真软件包成为可能。

## 1 软件设计方法与编程技巧

### 1.1 采用混合编程

目前 DEM 程序多数仍使用 FORTRAN 语言执行计算,根据硬件和系统软件调用不同图形库,如在 SGI 系列工作站上用 C 语言调用 OpenGL 图形库。我国东北大学王泳嘉等<sup>[2,3]</sup>研制的离散元软件使用的是 WINDOWS 环境下的 VC++ 语言。

中国农业大学的离散元程序是从英国 Aston 大学引进的,计算部分用 FORTRAN 语言编写。作者采用混合语言编程技术<sup>[4,5]</sup>,利用 VC++ 优良的可视化开发环境<sup>[6-8]</sup>和 FORTRAN 强大的计算功能,即采用在 WINDOWS 系统下适用的 FORTRAN 编译器 (PowerStation 4.0 或 Visual FORTRAN) 将离散元 FORTRAN 源程序制作成动态链接库,在 VC++ 中调用其子过程完成离散元计算,而用 VC++ 界面进行操作。

在具体编程中 FORTRAN 采用缺省的调用约定,VC++ 采用 STDCALL 调用约定。使用 extern "C" 说明符使 VC++ 放弃对标识符的修饰,协调两种编译环境的调用关系。实际编程要求显式给出过程接口,用预编译伪指令 !MS \$ ATTRIBUTES 声明过程和标识符属性,其他过程尽可能显式写出调用约定、参数传递方式和过程标识符。为减少内存的消耗,采用动态链接库,使用微软扩展属性 DLL EXPORT 和 DLL IMPORT 为动态链接库定义接口,其形式为:

```
!MS $ ATTRIBUTES DLL EXPORT SUB_NAME.
```

### 1.2 利用多线程技术实现不间断计算

为增强程序的处理功能,采用了多线程编程技术<sup>[9-11]</sup>。

1) 前台主线程负责数据输入、控制计算的过程、图形显示和打印,以及数据处理;后台辅助工作线程负责具体计算。用以下方法创建一个辅助线程:

```
CW intread * AfxBeginThread (AFX_ THREADPROC pfnThreadProc LPVOID  
pParam, int nPriority = THREAD_ PR D R I T Y_ N O R M A L, U N I T nStackSize = 0,  
LPSEOUR I T Y_ A T T R B U T E S | pSecurityA ttrs= NULL);
```

2) 两线程通过信号机制互相通讯,主线程控制工作线程计算函数的暂停与继续:

```
W aitForSingleObject (pM odel- > m_ hEventD rawBall, 0) = W A I T_ O B J E C T_ 0;
```

该函数可接受并响应主线程所设置的信号并进行相关的处理:

```
SendM essage (pM odel- > m_ hw ndtest, WM_ U S E R+ 175, 0, 0);
```

该函数可向主线程发送消息,使之通过消息映像表调用相应的函数。

3) 在完成数据文件的处理后,主线程发出计算信号至工作线程,使其进行计算任务或使之停止计算,以便修改数据文件。

4) 计算结束后,计算线程发出绘图信息至主线程,主线程根据数据文件的绘图命令绘制图形,然后发送计算结束信息至主线程,主线程便可进行绘图选择,存取计算数据。

5) 主线程的图形绘制、计算结果的处理和工作线程的计算可以同时进行,互不干涉。

本软件提供了 2 种计算方式: 单步计算和多步重复计算。

单步计算也用到多线程技术,但调用的工作线程函数只执行1次计算便终止工作线程,该进程只剩下主线程。数据文件在计算前给出,而在下次单次计算时重新编写数据文件。

多步重复计算通过多线程技术实现,实质上是在工作线程的线程函数里重复调用计算模块,在2次计算间隙接受主线程所发出的信号,决定是否退出计算,或根据计算结果向主线程发出信号,让主线程调用相应的函数。

DEM 计算是根据宏指令数据文件执行的。宏指令文件由一个初始文件(以Start打头)和若干个后续文件(以Restart打头)组成。初始文件给定所模拟的球和壁的基本数据并生成颗粒和壁,并将结果以文件形式输出。下次计算时,后续文件读入前次保存的结果文件继续计算。作者的设计思路是初始数据文件的处理采用单线程,后续文件的计算处理采用多线程。

### 1.3 数据处理

离散元模拟中产生大量的结果数据,如颗粒位置坐标、速度分量、接触力分量等,这些结果主要通过图形显示出来。程序使用DoModel类来接受结果数据,并在文档类中建立一个DoModel类的对象,获取的结果数据传递给视图类,由视图类来完成绘图功能。处理流程图见图1。

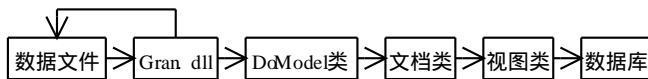


图1 数据流程图

程序使用Access数据库存取计算过程中的数据,这比用数据文件更便于统计分析。首先需建立Access数据库<sup>[12]</sup>,其中域名的数据类型要与所保存的数据的数据结构相对应,然后利用ODBC驱动器建立数据源,使用CRecordset类来完成对数据库的引入、删除等操作。

## 2 用户界面

### 2.1 用户主界面视窗

作者设计的用户界面窗口参看图4(a)和(b),主要包括主框架、菜单、对话框、视图区、数据输入输出、结果查看、工具、壁控制和图形缩放等。

程序采用拆分窗口,将视窗分为2个区:框架视区和绘图区。框架视区的用户接口基于一个对话框模板,作为视窗口的无模式(modeless)子窗口来创建。必须确保对话框无边界无标题,还要保证视图使用的对话框模板的资源ID能够被传递给视窗的构造函数——它将接受资源ID或字符串名。该对话框含有数据选择按钮、绘图控制按钮、图形大小控制滑动条等。

视图类所处理的数据来自文档类,并使用绘图或文字输出的方式,通过视图区显示数据。视图类不但可以用来向用户提供数据,还可用来处理由用户输入的数据,例如接受输入数据来改变计算循环次数,改变图形颜色或选择绘图空间范围等。

### 2.2 用户交互操作界面

此程序提供2种输入方式:交互式(手工)数据输入(图2)和文件读取输入方式。结果的输出有多种方式,可以生成相关的文本文档,也可以将数据写入数据库。在应用中作者发现,数据量较大时将数据写入数据库更方便数据的处理,在程序的设计中使用ODBC数据源将颗粒的各个数据写入数据库,大大方便了对数据的提取和处理。

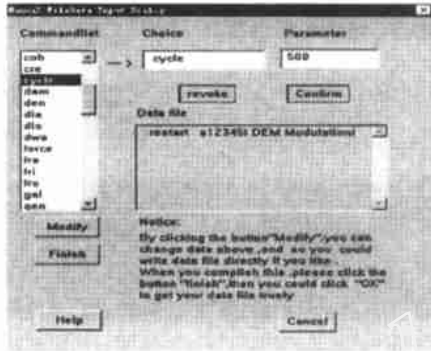


图 2 交互式数据输入对话框

### 3 图形绘制与图形操作

离散元模拟规模大的颗粒群时,其计算结果包括所有颗粒的位置、速度、力等的大量数据结果,如颗粒数为 10 万时,文件长度将达 70M bit 以上。这些结果信息必须通过逼真的三维图形来表现,还需要将图形保存为图形文件或直接打印以备日后分析。

#### 3.1 OpenGL 图形库

OpenGL (Open Graphic Library) 是一个开放性的图形库,适于多种硬件和操作平台,可以制作经过消隐的高质量三维图像和动画,已成为新一代三维图形工业标准<sup>[13-15]</sup>。Microsoft Visual Studio 6.0 也支持 OpenGL,作者在可视化程序开发时采用了这项先进的图形绘制技术,用 VC++ 调用 OpenGL 图形库完成绘图。

#### 3.2 绘制图形的种类及特点

作者研制的图形软件模块,在进行离散元模拟时所需要输出的图形的一般种类及特点如下:

- 1) 球-壁形态图 绘出某一视角的球-壁位置与形态;
- 2) 结块破碎图 颗粒群凝聚成的结块碰撞后会破碎成子结块,为区分不同的子结块,需检查颗粒的接触情况,用不同颜色显示出来;
- 3) 颗粒联系图 用形心连线连接相接触的颗粒来描述团块破碎或系统脱离情形;
- 4) 接触力线图 根据颗粒间的接触力大小和方向绘制,力的大小用不同线粗标定,其作用点以接触点为起点表示,拉力和压力用不同颜色表示;
- 5) 速度矢量图 速度矢量绘制根据空间坐标变换完成,按照适当规则显示速度方向和大小。

绘制上述图形时,作者根据离散元模拟的要求,运用了下述技巧:

1) 隐藏与透明处理 当前面的壁挡住球颗粒或力线、速度线时,可隐藏前壁或将其绘成透明壁,以便更清晰地观察后面景物与壁的相对位置。图 3 示出使用 OpenGL 绘制的透明壁里的球颗粒图形。

2) 分层/块涂色显示 为显示颗粒流动形态,在颗粒床形成后,按形心位置对颗粒分层涂色。在迭代中令各球

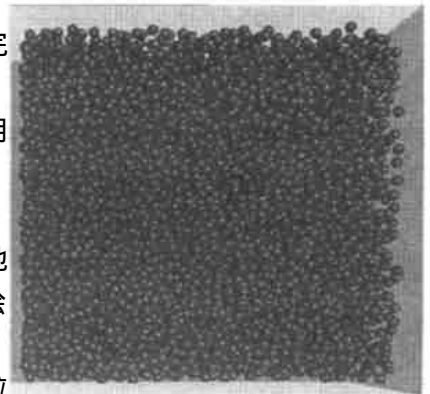


图 3 OpenGL 绘制的三维图形

保持原颜色属性,原来同层次的球流动后的断面即可显示出来,此技巧同样适合颗粒混合过程的显示。

3) 局部物理因素的绘制 对于球心共面的颗粒群,用力线图可清晰地显示其细观状态,而对于三维颗粒群,力线图前后重叠如乱麻,无法分析。这时也可分层显示,即通过对话框输入要查看的球的位置区间,仅绘制一薄层的物理因素,如球、力线或速度等。

4) 单球跟踪 根据需要全程跟踪记录典型球的运动位置或速度,只要给定该球编号,即可输出或绘制该球的位置或速度的变化情况。

5) 图形的缩放、旋转与移动 在程序运行中,可通过拖动鼠标实现图形旋转,操作滑动条左右移动实现图形缩放,选择菜单项实现图形的上下、前后、左右的移动。

### 3.3 信息反馈、图形打印与保存

信息显示是交互式计算的重要内容。每完成一次循环,均显示出系统时间、循环次数、模拟累计时间。绘制球时,显示总颗粒数;绘制速度矢量时,显示球速的最大、最小值和均值;绘制力线时,显示接触力的最大、最小值和均值以及力线条数。上述信息均可在视图区内显示或用主框架的菜单命令隐藏起来。

软件具有选择图形输出功能,用户可通过界面或数据文件同时给出多个绘图命令,程序可将它们自动排序,有选择地逐个绘制。计算的启动和终止、图形移动和数据处理等均可通过菜单命令实现。

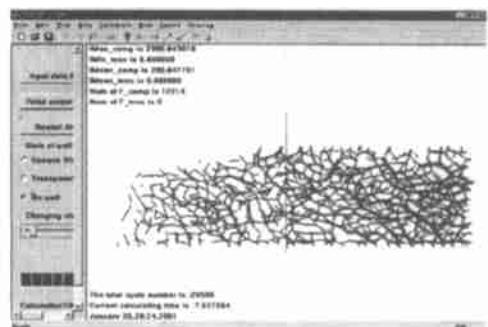
由于OpenGL与操作系统无关,且未提供打印函数,许多打印机驱动程序不支持setpixelformat()函数的回调,因此难以用MFC方法处理打印,而用抓图软件抓拍又较麻烦。作者参考有关资料,使用了一个CCaptureimage类,采用对绘图区图形像素拷贝的方法来保存和打印OpenGL场景。CCaptureimage类是通过使用设备场景(DC)来捕捉指定矩形域内的图形来获取图形信息的,因而本程序具有在计算过程中随时打印和保存图形的能力,利用普通打印机便可达到优质的彩色或黑白图形效果。

### 3.4 应用实例

笔者使用上述微机DEM软件模拟了在急刹车情况下,车辆装载的散体的力学响应及其对车厢的作用。模拟的颗粒数为6000个,粒径0.115m,密度 $1200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,刹车初速度 $72\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,刹车时间0.8s。图4(a)和(b)分别示出模拟过程中的颗粒图和某一层的力线图。限于篇幅其他图形不一列出。



(a) 颗粒图



(b) 力线图

图4 刹车模拟中的三维图形输出结果

## 4 结束语

笔者研制的DEM 可视化程序是基于国情进行颗粒离散元研究的技术准备。使用实践证明,这种基于微机WINDOWS 平台的界面具有功能较完善和易于操作的优点。多线程的应用成功地防止了计算过程中的阻塞,先进的OpenGL 绘图技术使得三维图形的显示和操作快捷,图像逼真。根据在DELL (P4/1.8 G)微机上的计算实践,其计算速度高于比它贵 8 倍的SGIO 2 工作站。同时,本软件的研制成功也为其他数值仿真的图形界面设计提供了可以借鉴的范例。

本研究得到叶海建教授的热情指导和帮助,谨致谢意。

## 参 考 文 献

- 1 Cundall P A , Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies Geotechnique, 1979, 29 (1): 47~ 65
- 2 王泳嘉,刘连峰 三维离散单元法软件系统 TRUDEC 的研制 岩石力学与工程学报,1996,15(3): 201~ 210
- 3 王泳嘉,宋文洲,赵艳娟 离散单元法软件系统 2D-Block 的现代化特点 岩石力学与工程学报,2000,19 (增): 1057~ 1060
- 4 陈启秀,黄 彻 为计算机常用语言混合编程 南京:南京大学出版社,1994 3~ 21
- 5 马瑞民,衣治安 FORTRAN 90 程序设计 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998
- 6 Holzner S Visual C++ 6 轻松进阶 王岚波等译 北京:电子工业出版社,1999 154~ 218
- 7 薛 松,杨 斌,赵栋伟 Visual C++ 6.0 编程实例 北京:人民邮电出版社,1998
- 8 康师友 C++ 面向对象程序设计简明教程 北京:西安电子科技大学出版社,1998
- 9 Bennett D. Visual C++ 5 开发人员指南 徐 军等译 北京:机械工业出版社,1997. 93~ 159
- 10 Kruglinski D J, Wingo S, Sepherd G Visual C++ 6.0 技术内幕 第 5 版(修订版). 希望图书创作室译 北京:北京希望电子出版社,842~ 920
- 11 Leinecker R C Visual C++ 5 开发人员参考手册 金帆翻译组译 北京:机械工业出版社,1998 121~ 198
- 12 李博轩 Visual C++ 6.0 数据库开发指南 北京:清华大学出版社,2000
- 13 贾志刚 精通OpenGL. 北京:电子工业出版社,1998 23~ 38
- 14 彭晓明,王 坚 OpenGL 深入编程与实例揭秘 北京:人民邮电出版社,1999 47~ 57
- 15 李 微,徐国标 OpenGL 3D 入门与提高 成都:西南交通大学出版社,1998 98~ 120