

# 汽车碰撞过程并行有限元仿真技术\*

曹银锋 李光耀 钟志华

(湖南大学现代车身技术教育部重点实验室 长沙 410082)

摘要：根据显式有限元的计算特点和神威超级计算机的体系结构，设计了基于消息传递和区域分割的动态显式有限元的并行算法，给出了基于汽车结构和材料特征的并行化分区算法，提出的算法应用在自行开发的 GEFEP-P 汽车碰撞的并行化有限元分析软件，并成功移植到神威 I 超级计算机。算例计算结果表明：采用并行有限元计算，可以大大提高汽车碰撞过程的仿真计算效率。

关键词：有限元法 并行化计算 汽车碰撞 分区

中图分类号：O344 U461

## 0 前言

汽车碰撞是一个十分复杂的过程，涉及的核心内容包括：壳体结构的大位移、大转动和大变形。

材料的塑性流动与硬化。边界的接触摩擦作用。对汽车碰撞安全性设计与改进来说，了解这类过程是至关重要的。由于这类过程包含很强的非线性特征，传统的分析计算方法很难对它有一个足够精确的定量分析，因此人们只好通过大量的试验来设计和优化这类过程，然而靠试验、修改和再试验的方法来使汽车碰撞过程达到设计要求不仅费用高，周期长，还往往难以满足产品质量要求。

随着计算机仿真技术的发展，人们越来越多地借助计算机来分析和设计汽车碰撞过程，并取得了很好的应用效果。计算机仿真技术的一个特点是仿真模型越详细、精确，仿真结果也通常越精确。在人们对产品质量要求越来越高的今天，汽车碰撞的仿真模型也日趋完善和复杂，因而导致仿真计算工作量是呈几何级数增长。通常碰撞仿真模型包含大约 50 000 ~ 100 000 个单元，计算的迭代步一般要超过 100 000 步，如果再加上空气袋和乘员系统等模型，单元数目将会成倍增加。尽管计算机的计算速度总在快速提高，但由于受元器件的物理特性和制造工艺水平的限制，串行计算机的计算速度仍满足不了工业应用的要求，于是并行计算机技术就应运而生并快速发展。

将自行开发的汽车碰撞过程的有限元仿真系统在上海超级计算中心的神威 I 巨型机上进行并行化移植，开发了基于消息传递的汽车碰撞过程有限元

仿真的并行化系统，大大提高了仿真的计算速度。

## 1 神威 I 巨型机及 MPI 语言

一个好的并行算法既要考虑并行计算机硬件体系结构的特点又要考虑所研究的具体问题的类型。并行算法的设计对于并行程序的执行效率有很大的影响，不同的算法可能会有几倍、几十倍甚至上百倍的性能差异。并行算法的设计并没有一个统一的标准，要设计一个好的并行程序通常需要设计者对并行机的特征有着充分的了解，这其中包括并行机的体系结构、内存大小和通信带宽等。并行算法基本上是随着并行计算机的发展而发展的。

此次工作是在上海超级计算中心的巨型机 - 神威 I 机上进行的，神威 I 计算机是一个可缩放的大规模并行处理机 MPP，采用同构、分布共享主存储器、平面格栅网体系结构，共有 96 个运算结点，每个运算结点由 4 个直接参加计算的单元处理器 PE(Processor element)加 1 个负责联络的消息处理器构成，每一个节点有自己的处理器和存储器，结点之间以采用高通信带宽和低延迟的互连网络相连接。

目前主要的并行编程模型有数据并行和消息并行两种。数据并行仅适用于数据并行问题，编程简单，级别较高，但对于其他非数据并行类问题往往并行效率很低，同时其程序的移植性也不高。消息传递即各个部分之间通过传递消息来交换信息，一组进程所执行的程序是用标准串行语言书写的代码加上用于消息接收和发送的库函数调用，编程级别低，但功能强大，且有很大的灵活性。

基于消息传递的并行编程可以采用消息传递库 MPI(Message passing interface)和并行虚拟机 PVP

\* 国家自然科学基金(13072029)和跨世纪优秀人才培养计划基金资助项目。20040104 收到初稿，20040624 收到修改稿

(Parallel virtual machine)两种。其中 MPI 实际上是一个消息传递函数库的标准说明,吸取了众多消息传递系统的特点,是目前国际上最流行的并行编程环境之一。MPI 具有很多优点:具有可移植性和易用性、有完备的异步通信以及精确和详细的正式定义。因此本课题采用基于 MPI 消息传递的并行编程,从而为课题开发的汽车碰撞过程并行有限元仿真程序可以任意在各类大规模并行处理机 MPP 和机群(PC-cluster)上进行运行提供了保证。

MPI 中最基本的通信类型是点对点通信和集合通信。点对点通信是指两个指定 PE 之间的通信,如 MPI\_Send 和 MPI\_Recv,而集合通信是一组 PE 内部的通信,如 MPI\_Allgather 和 MPI\_Allreduce 等。

## 2 接触碰撞并行有限元算法设计

### 2.1 接触碰撞有限元串行解

汽车接触碰撞过程的计算机仿真可以归结为求解如下的接触碰撞问题<sup>[6]</sup>

$$\int_{t_0} \delta e \cdot s_t dO - \int_{t_0} \delta u \cdot f_t dO - \int_{A_{t_0}} \delta u \cdot q_{\rho} dA - \int_{O_0} \delta u \cdot ?_0 \cdot a_t dO - \int_{A_{ct}} F_{ct} \cdot \delta \Delta \kappa dA = 0 \quad (1)$$

式中  $O$ ——仿真模型所有零部件所占的全部空间

$s_t$ ——柯西应力

$\delta e$ ——虚应变变量

$\delta u$ ——虚位移变量

$f_t$ ——体积力

$A_{t_0}$ ——受外载荷的面积

$q_{\rho}$ ——作用在  $A_t$  的外载荷矢量

$A_{ct}$ ——零部件或与刚性墙的接触面积

$F_{ct}$ ——作用在  $A_{ct}$  上的接触力

$\delta \Delta \kappa$ ——与  $F_t$  对应的两接触点的相对虚位移

$r$ ——质量密度

$a_t$ ——加速度矢量

$t$ ——下标,  $t$  时刻

需要说明的是这里接触力  $A_{ct}$  包括零部件自身的接触、零部件之间的接触以及零部件与刚性墙之间的接触所产生的接触力。

对式(1)进行有限元离散后可得如下的矩阵形式

$$m \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_c - \mathbf{F}_i \quad (2)$$

式中  $m$ ——质量矩阵

$\ddot{\mathbf{x}}$ ——加速度矢量

$\mathbf{F}_e$ ——外力矢量

$\mathbf{F}_c$ ——接触力矢量

$\mathbf{F}_i$ ——内力矢量

### 2.2 接触碰撞有限元并行算法

在迭代求解式(2)的显式有限元的求解过程中,最主要的时间消耗是在接触搜寻和内力的计算,因此如何设计并行算法,以提高接触搜寻和内力计算的并行效率是设计接触碰撞有限元并行算法的关键。节点内力的计算由于分别是在每个单元内部进行,只须对相邻单元的共享节点的内力进行累加,且由于相互的关系在计算过程中是保持不变的,这样采用点对点通信即可,并行化比较容易实现。而对于接触搜寻问题,由于接触对和接触力都是事先未知的,且在计算过程中随时发生变化,因此需要不断的进行接触搜寻和接触力的计算。此时如果采用简单的分区,按某种规则将单元以及相应的节点分配至各个 PE,则在计算过程中将难以判断 PE 间存在的接触情况,因此接触搜寻并行化要复杂的多。

基于以上分析,这里提出一种新的并行策略,将单元内力计算和接触搜寻及接触力的计算分别进行并行化。考虑到接触碰撞动态显式有限元绝大多数计算均是针对于每个单元进行的,尤其是内力计算可以方便的进行基于单元的区域分割方法实现粗粒度的并行计算,同时结合神威 I 巨型机的体系结构,设计了基于消息传递的单元区域分割的静态分区算法。而对于接触搜寻的并行则采用动态分配的方式,以各个 PE 内的单元节点为基础,在一定的时间间隔内,根据碰撞过程中实际几何空间位置的变化,将与各个 PE 临近的节点进行动态的分配,从而减少内存的消耗和 PE 之间的通信量。

## 3 静态分区算法

并行计算执行时间  $t_p$  计算方法,在不考虑内存开销对计算时间的影响时,其计算公式如下

$$t_p = r_s t_s + t_{pe} + t_c \quad (3)$$

式中  $t_s$ ——在一个 PE 上的执行时间

$r_s$ ——用一个 PE 执行时不可并行化部分所耗时间占  $t_s$  的百分比

$t_{pe}$ ——并行部分的执行时间,通常  $t_{pe}$  为各个 PE 执行并行化部分消耗时间最大值

$t_c$ ——通信所耗费的时间

而加速比  $S_p$  和单位 PE 的性能发挥比  $h$  的计算公式分别定义如下

$$S_p = \frac{r_s}{t_p} = \frac{r_s}{r_s t_s + t_{pe} + t_c} \quad (4)$$

$$h = \frac{S_p}{N} \quad (5)$$

由于在采用区域分割的并行计算中，需要预先给每个 PE 分配相应的计算任务，分析式(4)可知，通常分子和分母的第一部分  $r_s t_s$  是固定的，此时要提高并行计算效率提高加速比就要设法减小并行部分的执行时间  $t_{pe}$  和通信时间  $t_c$ ，这就为如何分区提出了如下三个原则。

(1) 各个分区的计算任务大致平衡，以减少并行部分的执行时间  $t_{pe}$ 。

(2) 最大相邻 PE 数尽可能小，以减少通信次数。

(3) 分区之间的边界节点数量尽可能小，以减少单次通讯量。

目前采用较多的并行化分区算法主要有三种，即 Greedy 算法、RCB(Recursive coordinate bisection)算法和 RSB(Recursive spectral bisection)算法。这三种常用分区算法的比较如表 1。

表 1 三种常用分区算法比较

算 法	速 度	内存需求	分区效果
Greedy	快	小	通信量大
RCB	快	小	任务不均衡
RSB	慢	大	效果好

一般来说，Greedy 算法和 RCB 算法简单易实现，速度快，需要的内存也不大，但前者易产生边界较长的区域，导致 CPU 之间的通信量很大，后者不考虑单元之间的拓扑关系，其搜索方法具有一定盲目性，有可能导致单元数量的平衡性和通信量不理想。RSB 算法的通信量与 Greedy 算法和 RCB 算法相比是最小的，它有着严格的图形学基础，但是 RSB 算法所形成的 Lagrangian 矩阵大小与总的单元数量成平方关系，这就消耗了大量内存，同时 RSB 算法需要求解 Fiedler 特征矢量这需要大量的计算时间。

本课题组充分考虑汽车碰撞过程中有限元模型和计算的特点，基于汽车结构和材料特征，自行研制了适合于汽车碰撞过程并行仿真计算特点的有限元网格并行化分区算法，下面以二维问题为例说明算法设计的相关概念。

(1)分区边界的确定。分区边界是以汽车有限元模型的边界为基础扩大一个容限  $E_p$  得到，即有

$$\max\_x_i = \{ \min(x_j) \mid x_j - x_i + d_i \} \quad (6)$$

$$\min\_x_i = \{ \max(x_j) \mid x_j - x_i - d_i \} \quad (7)$$

式中  $x$ ——坐标

$i$ ——三个坐标轴， $i=1, 2, 3$

$$j=1, N_m$$

$N_m$ ——总的节点数目

(2) 据边界的边长比来确定划分数。以沿  $x$  轴和  $z$  轴方向进行划分为例，首先确定其边长  $L_i$

$$L_i = \max\_x_i - \min\_x_i \quad (8)$$

设总 PE 数为  $n$ ，沿  $x$  轴方向的划分数为  $n_1$ ，沿  $y$  轴方向的划分数为  $n_2$ ，沿  $z$  轴方向的划分数为  $n_3$ ，则  $n_1, n_2$  和  $n_3$  的确定则按式(7)进行求解

$$\min \left( \sum_{i=1}^3 \left( \frac{n_i}{n_{i+1}} - \frac{L_i}{L_{i+1}} \right)^2 \right)$$

s.t.  $n_1 n_2 n_3 = n$  (9)

$n_1, n_2, n_3 \in \text{int}$

(3) 根据单元的类型和材料模型确定划分权重。

(4) 依据单元形心位置和划分权重进行单元划分。

## 4 并行仿真计算算例

### 4.1 方形吸能梁和可变形墙

吸能梁和墙体的有限元模型及其 16 个 PE 分区结果如图 1 所示。其中单元总数目为 7 430，节点数目为 7 585。采用给定位移的加载方式，在方形梁左端从 0 到 100 s 逐步均匀加载到 100 mm。

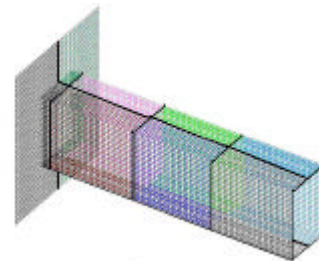


图 1 方形吸能梁算例的 16 个 PE 初始化分区

分别采用 1、2、4 和 8 个 PE 进行仿真计算，仿真计算结果如图 2。不同 PE 数的计算时间和加速比如表 2 和图 3，实际计算时间与理想计算时间的比较如图 4。



图 2 方形梁变形的有限元模拟结果

表2 方形梁变形模拟的并行效率分析

PE 数目 $N$ /个	计算耗时 $t$ /min	加速比 $S_p$	性能发挥比 $h$ /%
1	147.83	1.00	100.0
2	75.31	1.96	98.0
4	55.07	2.98	74.5
8	47.97	3.08	38.5

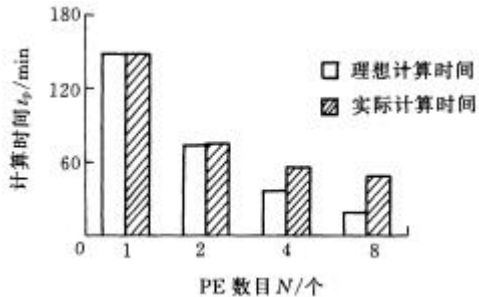


图3 理想计算时间和实际计算时间的比较

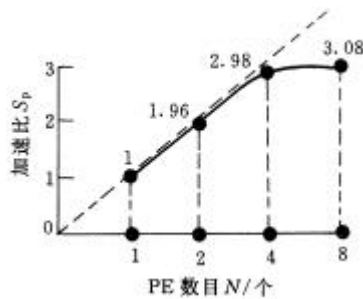


图4 加速比曲线

#### 4.2 整车和刚性墙

汽车初始有限元模型及其采用32个PE的分区结果如图5所示。其中单元总数目为65 177，节点总数目为69 625。

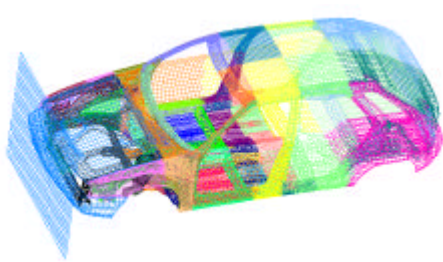


图5 整车正面碰撞算例32个PE初始化分区

碰撞总时间为0.01s，计算迭代总步数为108 478步，计算结果如图6所示。

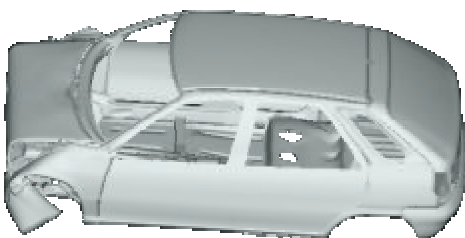


图6 整车碰撞有限元计算模拟结果

表3、图7和图8分别给出了在不同PE数目下的计算时间和相应的加速比，并与理想值进行了对比。由于受神威I机内存的限制，根据本算例的计算规模，至少需要8个PE来完成整个仿真过程，因此效率的分析以8个PE为基准。

表3 整车碰撞模拟的并行效率分析

PE 数目 $N$ /个	计算耗时 $t$ /h	加速比 $S_p$	性能发挥比 $h$ /%
8	33.637	1.00	100.0
16	18.659	1.80	85.0
32	10.012	3.36	84.0

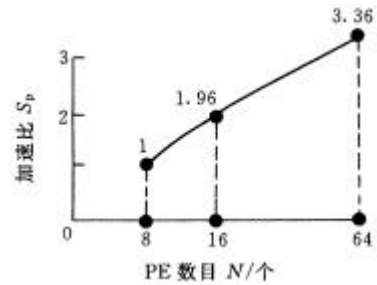


图7 整车碰撞并行仿真加速比曲线

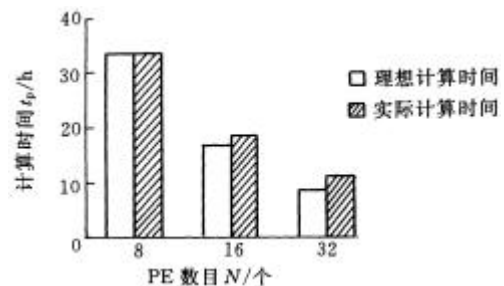


图8 理想计算时间和实际计算时间的比较

#### 4.3 结果分析

由上述两个算例可以看出，随着PE数目的增加，计算时间均逐渐减少。对于方形梁并行计算算例，由表2、图5和图6可知，当PE数为2时，仿真计算时间相比于单PE仿真计算时间有大幅度的减少，节约了近一半，性能发挥比为98%。但当PE数增加为4时，计算时间下降并不多，加速比仅为2.98，性能发挥比降为74.5%。而且由表2可知随着PE数的进一步的增加，计算时间下降幅度的越来越小。这是由于方形梁算例中计算的规模不大，单元数目相对较少，同时分区算法是根据汽车碰撞有限元模型和计算特定设计的，并没有完全考虑方形梁的特点，使得接触搜寻并行化带来的通信时间对于整个并行仿真计算时间有较大的影响，而且随着PE数目的增加而逐步加大，从而导致并行加速比显著下降。

对于整车碰撞的并行仿真算例，由表3、图7和图8可知，仿真计算时间随着PE数的增加有了大幅度的下降，可见根据汽车本身特征设计的分区

算法,通信量少,特别是减少了由于接触搜寻并行化带来的通信时间对于整个并行仿真计算时间的影响,从而提高了并行效率。

## 5 结论

根据显式有限元的计算主要是在单元中进行的特点,以及考虑所用的神威超级计算机的体系结构、内存大小、通信带宽等特点,设计了基于消息传递和区域分解的动态显式有限元的并行算法。根据汽车碰撞过程的有限元仿真计算特点设计了基于汽车结构和材料特征的并行化分区算法。由此开发了汽车碰撞并行有限元仿真软件,算例计算结果表明,采用并行化有限元仿真技术,可以大大提高汽车碰撞过程的有限元仿真的计算效率。

### 参 考 文 献

- 1 Message Passing Interface Forum. MPI : A Message Passing Interface Standard. University of Tennessee, 1995
- 2 曹银锋, 郑军, 李光耀, 等. 薄板冲压成形过程的并行有限元仿真技术. 机械工程学报, 2003, 39(7) : 79~83
- 3 Belytschko T, Edward J, Kennedy J M, et al. Finite element analysis on the connection machine. Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, 1990, 81 : 229~254
- 4 Krysl P, Bittnar Z. Parallel explicit finite element solid dynamics with domain decomposition and message passing : dual partitioning scalability. Computers & Structures, 2001, 79 : 345~360
- 5 Zhong Z H. Finite Element Procedures for Contact-Impact

Problems. Oxford : University Press, 1993

## PARALLEL EXPLICIT FINITE ELEMENT SIMULATION OF VEHICLE COLLISIONS

Cao Yinfeng Li Guangyao Zhong Zhihua  
(Key Laboratory of Advanced Technology of Vehicle  
Body Design and Manufactory M.O.E.,  
Hunan University, Changsha 410082)

**Abstract :** Explicit finite element analysis of contact-impact problems on parallel computers with distributed memory is concerned. Subject to the characteristics of finite element method and the structure of supercomputer, a parallel algorithm is designed for explicit finite element method based on message passing and domain decomposition. A new domain decomposition method based on the element type and material model is specially presented for parallelization of explicit finite element simulation of crashworthiness. The algorithms have been implemented in the GEFEP-P software, a self-developed program for simulation of crashworthiness, on the Shengwei supercomputer. Numerical example shows that parallel computation improve the efficiency of simulation rapidly.

**Key words :** Finite element method Parallel computation  
Crashworthiness Domain decomposition

作者简介:曹银锋,男,1976年出生,博士研究生。主要从事汽车碰撞和冲压成形等接触碰撞过程的计算机仿真及其并行化研究。

E-mail : yinfeng\_cao@163.com