

铁路客车结构大变形碰撞特性的仿真研究

房加志¹ 刘金朝² 焦群英¹ 王成国²

(1. 中国农业大学理学院,北京 100083; 2. 中国铁道科学研究院,北京 100081)

摘要 应用动态大变形非线性有限元法对铁路客车整车的大变形正面碰撞过程进行了计算机模拟。在合理简化的基础上建立了整车有限元模型;运用 PAM-CRASH 软件的并行算法,通过计算机模拟,预测了某铁路客车在正面碰撞过程中的变形位置和变形形式,得到了车体碰撞过程的位移、速度、作用力、以及能量与时间的关系曲线。模拟结果表明,碰撞时间为 0.15 s,变形集中在车辆前部 1/10 内,车辆主体几乎不变形。采用多个 CPU 进行并行计算,结果表明,对于客车的正面碰撞问题采用并行计算非常必要。

关键词 车辆碰撞;有限元;并行计算

中图分类号 U 292.914

文章编号 1007-4333(2004)04-0076-03

文献标识码 A

Simulation of collision characteristics of train vehicle with large deformation

Fang Jiazhi¹, Liu Jinzhao², Jiao Qunying¹, Wang Chengguo²

(1. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract In order to get the best energy absorbing characteristics and improve safety, a study on the dynamic characteristics of collision for railway passenger vehicle in existence was made by using dynamic nonlinear lager deformation finite element methods. The model was simplified according to design drawing and the simulation was carried out through the software of PAM/crash parallel computing. The displacements, force, velocity, energy absorbing curves were obtained. The safety evaluation was thus made from analyses of the curves and structure of train was easy improved through observing the dynamic deformation.

Key words vehicles collision; finite element; parallel computing

在汽车工业领域中,大变形碰撞是一项倍受重视的被动安全性研究,研究人员不仅用实车实物在专用的实验车间里不惜代价地进行破坏性实验,同时还广泛采用计算机数值仿真手段对结构破坏过程进行高速碰撞模拟^[1~4],从而对设计的安全性做出评价。在铁道车辆领域,国外极其重视这项工作,如 AAR 的运输中心(TTC)^[5],英国 BRR 的 ORE 等^[6],均开展了上述两方面的研究。近年来,我国的大连铁道学院和中南大学铁道校区也开始了车辆大变形碰撞的模拟仿真工作^[2,3],分别对薄壁构件及简单车体模型的碰撞进行了模拟计算。笔者利用 MSC/partran 建立了铁路客车车体的整车有限元模型,利用 PAM-CRASH 软件,采用并行机,对整车与刚性墙的正面碰撞进行了模拟计算。

1 碰撞分析的有限元基本方程

在时刻 t^N 变形体运动微分方程的离散形式^[4]为

$$M\ddot{q}^N = F^N - P^N \quad (1)$$

式中: M 为凝聚质量矩阵; \ddot{q}^N 为 N 时刻加速度矢量; F^N 为总体载荷矢量; P^N 为单元应力场的总体等效节点矢量。在显式算法中为了提高运算速度,通常采用缩减积分算法,并采用适当的沙漏控制方法消除单点高斯积分的四边形和六面体单元计算中产生的沙漏模式。以沙漏黏性阻尼为例,加入阻尼后的方程为

$$M\ddot{q}^N = F^N - P^N + H^N \quad (2)$$

式中 H^N 为结构沙漏阻尼力矢量。当结构存在接触力 F_C 时。方程为

收稿日期: 2003-12-28

基金项目: 铁道科学研究院研发中心基金项目(2002 YF16)资助

作者简介: 房加志,博士研究生;焦群英,教授,博士生导师,主要从事生物材料力学分析研究, E-mail: jiaoqy@cau.edu.cn

$$M\dot{q}^N = F^N - P^N + F_C + H^N \quad (3)$$

时间积分采用显式中心差分

$$\begin{aligned} \dot{q}^{N+\frac{1}{2}} &= \dot{q}^{N-\frac{1}{2}} + t^N \ddot{q}^N \\ q^{N+1} &= q^N + t^{N+\frac{1}{2}} \dot{q}^{N+\frac{1}{2}} \\ t^N &= \frac{t^{N-\frac{1}{2}} + t^{N+\frac{1}{2}}}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中： $\dot{q}^{N-\frac{1}{2}}$ 和 $\dot{q}^{N+\frac{1}{2}}$ 分别为 $N-\frac{1}{2}$ 和 $N+\frac{1}{2}$ 时刻的节点速度矢量； q^N 和 q^{N+1} 分别为 N 和 $N+1$ 时刻的节点位移矢量。

2 计算模型

用 PAM/crash 软件对我国通用的某型客车进行大变形碰撞数值仿真应用研究。根据设计图纸用 UG 软件建立了整车模型，将几何模型导入 MSC/patran 中划分有限元网格。网格划分中考虑如下问

题：1) 抽取中面，全部采用板壳元计算；2) 在划分网格之前协调各边，实现网格划分的一致性；3) 在不影响计算要求和精度的前提下，尽可能减少模型的单元数，比如在主要变形区网格大小一般取 20 mm，基本不变形区取 20~40 mm，非撞击区大于 50 mm。

本模型以四节点四边形板壳元为主，辅以三节点三角形单元划分有限元网格，该车模型共 268 119 个单元。

材料为钢材^[7]，密度 $\rho = 7\ 850\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，杨氏模量 $E = 210\ \text{GPa}$ ，屈服应力 $\sigma_0 = 285\ \text{MPa}$ ，泊松比 $\nu = 0.33$ ，屈服后的应力-应变关系见表 1，由于考虑应变率的影响，采用 Cowper-symonds 应变率强化模型，应变率参数分别取 $D = 16\ 640\ \text{s}^{-1}$ ， $q = 3.53$ 。

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_y} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/q} \quad (5)$$

其中： σ_d 为动态应力， σ_y 为静态屈服应力， $\dot{\epsilon}$ 为等效应变率。

表 1 钢材屈服后的应力(σ)-应变(ϵ)关系

Table 1 Stress-strain relationship of the steel

ϵ	0.000 0	0.023 7	0.047 7	0.071 1	0.094 1	0.138 0	0.190 0
$\sigma/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	285	339	378	405	428	461	491

将刚性墙的所有自由度都约束住，整车以 $3 \times 10^4\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的初速度撞击刚性墙，碰撞过程中定义车体自接触以及与刚性墙主从面接触，最后，生成 PAM/crash 所需要的输入文件。

3 并行算法

根据本模型的规模和精度，在单机上运行存在 2 个问题：一是在单机上很难运行，二是运算时间太长，不利于研究与开发。因此，采用并行机非常必要。

大部分商业 CAE 软件使用基于域分解方法的分布式内存并行(DMP)方案。该方法根据所需的计算工作把整个问题域分成许多大致相等的分区。分区内部和在分区之间传输的信息，在一个独立的处理器中进行处理。为保持整个问题的一致性，分区之间的信息通过 MPI(消息传递接口)传输。

PAM-CRASH 的机群并行版也使用基于域分解方法进行并行处理，并通过 MPI 传递消息。通过这种办法，可将计算域(网格)分成一个个分区，分区的计算任务各自被分配给很多个并发的进程中的一个。消息传递机制被用来协调多个分区任务的执行。值得注意的是，如果把程序的输入输出阶段及变量初始化阶段去掉，剩下的是完全并行的代码。

网格的分区是在进行模拟之前完成的，目的是在多个进程间均匀分配计算负载并最小化进程间的通信开销，这一点对于机群并行计算尤其重要：如果通信开销较大，则整个机群的计算效率会下降，其加速度比会降低，因为很多时间消耗在处理通信任务上。这种优化是基于一种开销模型，开销模型假设：计算开销在网格内是可变的(为不同的单元分配不同的权重)，但是在整个仿真计算过程中是不变的，而通信开销发生在分区子域之间。

4 计算结果及分析

本次碰撞模拟共历时 0.15 s，模拟计算碰撞得到的变形序列见图 1。图 2 为车体碰撞过程中头部的位移、速度、作用力及能量随时间的变化曲线。

由图 1 可知，碰撞端结构依次发生叠缩变形，变形集中在车辆前部，车辆主体几乎不变形，其变形过程和美国实车碰撞实验中的变形趋势基本一致。由图 2 可知，当碰撞发生时间为 0.04 s 时，结构所吸收的能量已达到 $4.8 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{mm}$ ，端部结构纵向压缩量约 1 000 mm；0.13 s 时，车辆速度减到 0，变形最大，能量几乎全部被车体的塑性变形所吸收。

不同 CPU 对本模型的计算结果见表 2。可见

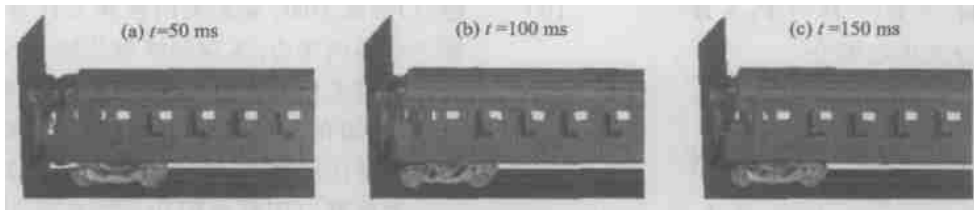


图1 车体头部在不同时刻的变形图

Fig. 1 The deformation of the vehicle on different times

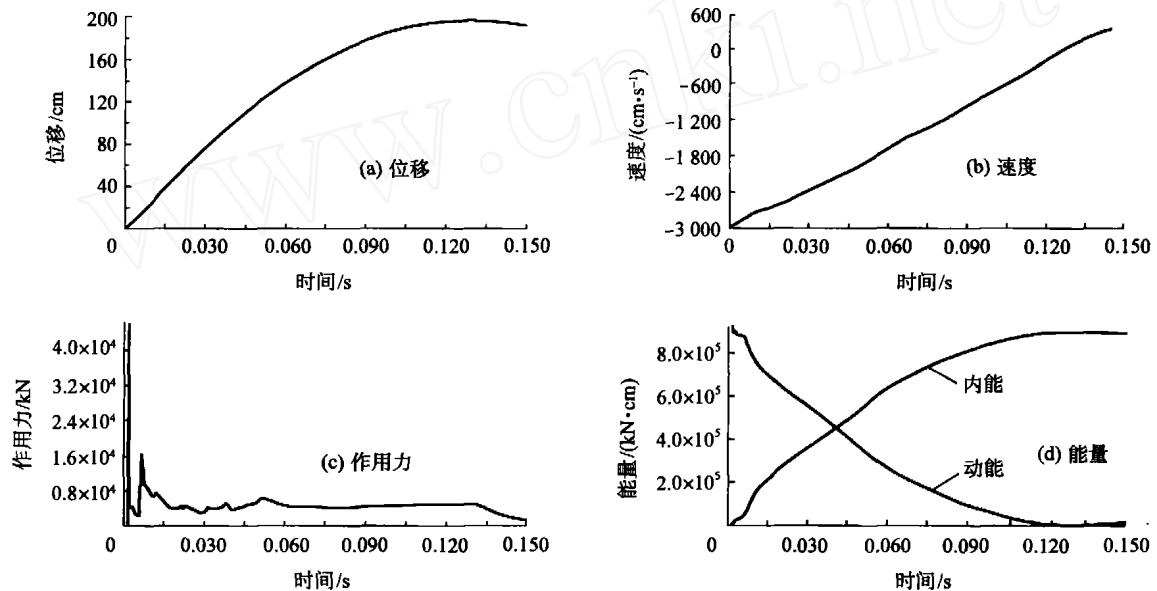


图2 车体碰撞过程中位移、速度、作用力和能量与时间的关系

Fig. 2 The relationship between the displacement, velocity, force, and energy vs. time

单机计算是不现实的,采用并行计算是解决该问题的有效途径。

重要作用。评价和改进现有吸能装置对于提高车体安全性具有重要意义。

表2 并行运算时间对比

Table 2 The comparison of the time by the parallel calculation

CPU 数目	1	2	4
计算时间/h	> 70	36.4	20.3

5 结论

1) 碰撞时间极其短暂,变形集中在车辆前部 1/10 内,车辆主体几乎不变形;

2) 高速碰撞为复杂的非线性问题,涉及几何非线性、材料非线性和接触非线性等,在碰撞中绝大部分动能被车体前端的一小部分结构所吸收;

3) 从并行计算结果的比较来看,对于大型的非线性碰撞问题采用并行算法是必然趋势;

4) 车体前端的吸能装置吸收了绝大部分动能,因此,吸能装置的吸能特性对于车辆的安全性起着

参考文献

- [1] 蒋晓光,刘星荣.小型客车碰撞特性研究[J].江苏理工大学学报,1999,20(3):36~39
- [2] 谢素明,兆文忠,闫学冬.高速车辆大变形碰撞仿真基本原理及应用研究[J].铁道车辆,2001,39(8):1~43
- [3] 姚松,田红旗.车辆吸能部件的薄壁结构碰撞研究[J].中国铁道科学,2001,22(2):55~60
- [4] 贾宏波,黄金陵,谷安涛,等.汽车车身碰撞建模影响因素的研究[J].汽车技术,1998(1):12~15
- [5] Martin S. Train crashworthiness validating analysis tools [J]. Rail International,1999(6):2~6
- [6] Scholes A. Development of crashworthiness for railway vehicle structures[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 1993(207):1~16
- [7] Yamazaki L, Han J. Maximization of the crushing energy absorption of cylindrical shells[J]. Advances in Engineering Software,2000(31):425~434