

应用 LS-DYNA 进行汽车正面碰撞模拟分析

包宇波¹ 胡斌
(1. 同济大学汽车学院 上海 200092; 2. 中国矿业大学(北京)机电学院材料系 北京 100083)

摘要: 应用 LS-DYNA 实现不带约束系统的整车的正面碰撞模拟, 佐证了计算机模拟技术在现代汽车产品开发中的应用及其发挥的巨大作用。

关键词: LS-DYNA 汽车碰撞 车身耐撞性分析 计算机模拟

中图分类号: TP3 文献标识码: A 文章编号: 1674-098X(2008)03(a)-0173-02

LS-DYNA 是世界上最著名的通用显式动力分析程序, 能够模拟真实世界的各种复杂问题, 特别适合求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等非线性动力冲击问题, 同时可以求解传热、流体及流固耦合问题。在工程应用领域被广泛认可为最佳的分析软件包。与实验的无数次对比证实了其计算的可靠性。

由 J. O. Hallquist 主持开发完成的 DYNA 程序系列被公认为是显式有限元程序的鼻祖和理论先导, 是目前所有显式求解程序(包括显式板成型程序)的基础代码。1988年 J. O. Hallquist 创建 LST 公司, 推出 LS-DYNA 程序系列, 并于 1997 年将 LS-DYNA2D、LS-DYNA3D、LS-TOPAZ2D、LS-TOPAZ3D 等程序合成一个软件包, 称为 LS-DYNA。LS-DYNA 的最新版本 2004 年 8 月推出的 970 版。

LS-DYNA 的发展与汽车碰撞仿真密不可分, 在汽车行业中, CAE 仿真分析快速增长的需求和机遇主要是受碰撞法规的驱动, 如在 1985-2002 年之间, 法规实验的要求增加了差不多 2 倍。其次是从 1980 年以来计算机硬件、软件的迅速发展和汽车厂商对计算机资源的广泛应用。还有就是汽车厂商由于市场竞争优势的需要, 要求缩短设计周期, 而物理样机价格昂贵、试验能力有限以及 CPU 时间的降低, 也使得汽车行业 CAE 仿真分析快速增长。现在汽车碰撞模型已经发展到上百万个单元规模, 三维模型越来越精确。计算机广泛采用 Cluster 并行处理技术, 大大降低了 CPU 的运算时间, 现在 LS-DYNA 对 5000 单元规模的汽车历时 120 的碰撞过程分析如果采用 MPP 技术, 运算时间可在 12 内完成。

在汽车工业中, LS-DYNA 被广泛地应用于汽车设计领域。LS-DYNA 能够准确地预

表 1 网格质量控制标准

长宽比 (Aspect ratio)	<5
四边形单元最大角 (Quad maximum angle)	<135
四边形单元最小角 (Quad minimum angle)	>35
三角单元最大角 (Tri maximum angle)	<120
三角单元最小角 (Tri minimum angle)	>30
壳翘 (Warpage)	<15
Skew	45
Jakobian	0.6

测出汽车的碰撞特性, 以及汽车碰撞对乘客的影响。通过使用 LS-DYNA, 汽车公司和他们的配件公司不需要做模型车就能够检测汽车的设计。这样能够节省大量的金钱和时间。

1 车身模型的建立

采用 Altair Hypermesh 软件在车身零件的 CAD 模型上进行有限元划分。以 10mm 为

最小单元尺寸不能小于 3mm, 其他如翘曲度、长宽比、梯度、雅可比等参照下表 1。按照以

上规则建立的车体有限元模型大约有 60 万单

2 关键字文件

LS-DYNA 的记录文件为 k 文件, 这一文件被称为关键字文件, 它是 LS-DYNA 计算程序的输入数据文件。该文件是一个 ASCII 格式的文本文件, 其中包含所要分析问题的全部信息, 如节点、单元信息、材料与状态方程信息以及接触、初、边值条件和载荷信息等。这些信息都是以 LS-DYNA 的关键字命令 (KEYWORD) 的格式表达的。

支持 LS-DYNA 求解程序的前处理软件还有很多, 比如 ANSYS/LS-DYNA、FEMAP、HYPERMESH、PATRAN 等。虽然各种前处理程序的建模操作方法各不相同, 但是在建模完成后, 都将输出一个格式统一的关键字文件以递交 LS-DYNA 求解器开始显式动力分析。也就是说, 无论以何种途径建模和分析, 最终都是在分析之前形成一个计算程序的输入信息文件, 即关键字文件。本文使用 Hypermesh 软件对计算模型进行前处理设置, 以下各个初值信息都在该软件中进行定义。

3 连接模拟

焊点的连接在 Hypermesh 的 shd 菜单下

表 2 焊点属性定义

伸张力	8324N
扭断力	6319N
标准失效时间	100ms

完成, 可以对具有不同焊点失效特性的焊点采用 New Group 的方式放在不同的组里, 也可以根据不同零件位置把焊点放在不同的组里, 便于以后的管理和查错。焊点的属性在 *Section 关键字中进行定义。焊点的属性定义如表 2。其中定义了焊点的失效条件, 即当伸张力或扭断力达到这两个数值的时候, 焊点就会失效。

在整车碰撞模拟中通常十分重视对焊点的模拟, 焊点的处理正确与否, 将直接影响到碰撞模拟的精度。由于在碰撞模拟中, 各零部件的变形量和位移量都很大, 远远大于焊点自身的变形量, 因此碰撞分析与静态分析不同, 对分析结果影响更大的是焊点的强度, 而不是刚度, 所以在碰撞模拟中, 通常采用可断裂刚体约束来处理焊点。

4 材料模拟

材料参数对于碰撞模拟的精度具有极其重要的意义。根据材料的拉伸曲线定义各种材料的弹性模量、泊松比、切向模量、破坏极限、应变率参数等, 材料厚度按各零件的实际厚度定义, 材料密度按各零件实测的重量来调整定义, 以保证整车有限元模型的重心与实车重心的一致。表 3 中为定义的材料参数:

对于各部件的材料定义, 遵循与实物尽量一致的原则。根据要求, 钣金件通常使用钢材, 车身板厚为 0.8-1.2mm 加强件板厚为 1.5mm。框式底架、梁的材料也是用钢材, 板厚为 2-3mm。

5 碰撞接触的定义

在碰撞过程中, 车与刚性墙、车身的主要部件之间均会发生接触, 有些零件变形后会碰到其它零件, 有些零件变形后自身各部

表 3 材料定义参数

密度	7.8*10 ⁶ Kg/mm ³
杨氏弹性模量	210 GPa
泊松比	0.3
厚度	1.2mm
屈服应力	0.37 GPa

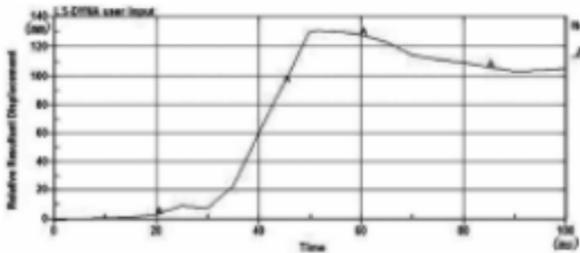


图 1 前围板入侵曲线

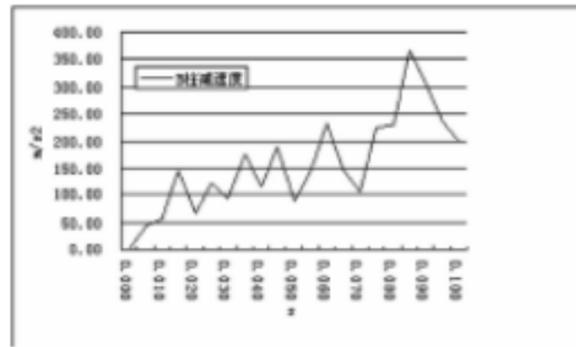


图 2 B柱减速度曲线

分相互挤压在一块。这些相互挤压部分之间会有力的作用，在有限元分析中通过接触来模拟它们之间的作用力关系。尽可能将整车模型定义为 AUTOMATIC 接触类型，AUTOMATIC 类型的接触是比较新的接触方式，由于在汽车碰撞的过程中，很难人工判断壳单元发生接触的方向，而 AUTOMATIC 接触方式主要是针对壳单元的方向问题（体单元以接触面外法线为接触方向，所以总可以产生接触），接触则在壳单元两侧都发生，所以适合各种复杂的接触行为。对于汽车碰撞分析，一般设置一个总体单面接触（Single Surface）用于所有汽车部件可能发生的接触检测（包括部件自身的接触行为），然而总体接触有时在一些局部区域发生实效，所以需要对一些特殊局部的接触设置局部的接触类型（如安全带与假人的接触等）在 Single Surface 接触类型中常用的两种总体接触方式为：

- *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 文件可以查看系统的总体能量及沙漏能的控制问题，
- *CONTACT_AUTOMATIC_GENERAL 文件可以查看每个 PART 的能量变化和沙漏能控制问题，
- *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 文件中可以查看每个接触界面接触力的大小和方向。

接触类型通过系列版本的改进，成为一种非常稳定和精确的接触类型，其中一个优点就是对网格划分中的尖角接触处理更好和对三角形及四面体网格的接触更稳定，推荐应用于汽车总体接触定义中。

6 模型求解

通过 LS-DYNA 求解器计算碰撞前 100 ms 的过程，基本上在 100 ms 碰撞已经结束，碰撞车辆开始回弹。由于单元数量比较多，使得计算需要比较长的时间。

7 LS-DYNA 的输出文件系统

LS-DYNA 的文件系统可分为输入文件和输出文件。输入文件包含关键字文件、应力初始化文件、重启文件、界面段文件、时间历程文件、VDA 几何文件和 CAL3D 输入文件等。

输出文件包括模型信息文件、计算信息文件、ASCII 文件、图形输出文件、时间历程文件、接触界面力文件、重启文件等。

输出文件一般分两类：二进制文件和 ASCII 文件。二进制文件由关键字 *DATABASE_BINARY_OPTION 控制输出，其中使用较多的有 D3PLOT 和 D3DUMP 两个二进制文件，D3PLOT 文件的关键字名称为 *DATABASE_BINARY_D3PLOT，D3PLOT 文件主要是用来记录应力、应变、变形的情况，可以输出各种云图和动画。D3DUMP 文件用来进行重启分析，在每一定义的时间间隔后程序自动生成系列该类型的文件：D3DUMP01, D3DUMP02, D3DUMP03.....，用户可以从任何地方进行重启分析。

ASCII 文件由关键字 *DATABASE_OPTION 控制输出，可输出的文件主要包括 GLSTAT (总体统计和能量)、MATSUM (材料能量)、RCFORC (接触面反作用力) 等。

8 结果分析

乘员的伤害指标是评价整车碰撞性能的重要因素，但是，它却不是唯一的因素。研究机构将乘员舱结构的整体性或者说乘员舱的刚性作为汽车整车碰撞性能的另一个重要因素。对于这一方面的性能，采用了特定的乘员舱的侵入量测量值作为评价指标，即前围板侵入量。从前围板入侵曲线图（如图 1 所示）可以看出，在 50 ms 时侵入值达到了最大，达到 130 mm。

在进行碰撞模拟的认证过程中，从车身的耐撞性来分析乘员的伤害程度，常用的指标是 B 柱减速度和时间的历程曲线。原因是由于在碰撞过程中，车身至 B 柱以后的部分变形量较小，在 B 柱处获得的减速度曲线较稳定，而减速度曲线能比较综合的反映出车辆在整个碰撞过程中受到的碰撞力的变化过程，便于了解碰撞过程中一些内部的结构因素。同时，在无假人和乘员约束系统的车身耐撞性模拟分析中，也常将这一减速度作为乘员头部所承受

的减速度，间接地评价对乘员的伤害程度。

从 B 柱的减速度曲线可以看出（如图 2 所示），当 $t = 15 - 20$ ms 时，汽车保险杠横梁撞上副车架前端，使汽车的减速度迅速增加到第一个峰值，当 t 约 = 35 ms 时，车辆减速度达到第二个峰值，当 t 约 = 60 ms 时，车辆减速度达到又一个高峰，此外，值得注意的是，在大约 $t = 85$ ms 时刻，B 柱减速度碰撞模拟曲线又出现一个波峰，达到了 365.7 m/s^2 。

从汽车安全性设计理念的角度出发，理想的 B 柱减速度曲线应呈矩形波状，即减速度变化应尽可能平稳。如果减速度变化非常大，说明车身后部的吸能设计不良，乘员头部所承受的最大减速度很大，并且有可能不仅产生二次碰撞，甚至发生三次碰撞，造成乘员在车内多次剧烈碰撞而伤亡程度加重。

9 结语

有限元分析已是汽车产品开发设计链中的常规流程，没有有限元分析的设计不能进入下一个技术流程。使用 LS-DYNA 软件在设计初期对产品的安全性能进行验证，及时发现新产品的问题，这为设计工程师提供了更大的创造空间，使设计质量大幅度提高。对企业来说，有限元分析法的应用，使产品的开发周期缩短，节省了开发费用；避免了因产品投放市场初期常常出现质量问题而影响新产品声誉的问题；而且还可以使研究人员集中力量进行汽车的环保、节能和舒适性等现代汽车设计主题研究。

参考文献

- [1] 黄世霖, 张金换, 王晓冬, 等. 汽车碰撞与安全. 清华大学出版社, 2000.
- [2] 张维刚, 钟志华, 等. 计算机仿真技术在汽车正碰安全性能改进中的应用研究. 机械工程学报, 2002, 3.
- [3] 钟志华, 汽车耐撞性分析的有限元法. 汽车工程, 1994, 1.
- [4] LS-DYNA 理论手册.
- [5] LS-DYNA Theory Manual, 2