

A Study on Safety Performance of a Passenger Car in Side Collision

Yajun Wu¹ Jikuang Yang²

(1State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, China 410082)

2 Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg Sweden 41296)

Abstract: The objective of this study is to improve the safety performance of a passenger car to meet the need of the requirement of occupant protection in side impact. Based on the principles for side structural design, the improvement was conducted by changing the structure of B-pillar, floor, doorsill. The finite element model of the car was developed and validated. The FEM simulation and passenger injury analysis based on the PSM method were performed to demonstrate the effectiveness of the improved structures. The simulation results showed that the intrusion of the door and the passenger injury parameters were decreased significantly, and then the results can be helpful in new car design for improvement of side impact safety.

Key words: Side impact; Crashworthiness; Computer simulation; Passenger injury

汽车侧面碰撞安全性的结构改进研究

吴亚军¹, 杨济匡^{1, 2}

(1 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082 2 查尔摩斯科技大学, 应用力学系, 瑞典)

摘 要: 针对我国某一款车型侧面碰撞安全不符合《汽车侧面碰撞的乘员保护》标准要求的问题, 通过深入分析该车型侧面碰撞安全存在的问题, 结合轿车侧面结构安全设计普遍原则及与同类车型侧面碰撞变形结果的对比分析, 提出了改进 B 柱、地板、车门门槛台等措施并应用了泡沫填充材料。为了验证改进方案的有效性, 建立并验证了该车型的侧面碰撞有限元模型, 采用了有限元计算和基于 PSM 方法的 ES-2 侧面碰撞假人损伤分析。仿真结果表明改进方案能减少车门侵入量和明显降低假人损伤值, 从而提高轿车的侧面碰撞安全性。

关键词: 侧面碰撞; 抗撞性; 计算机仿真; 乘员损伤

1. 引言

随着汽车工业的发展以及汽车保有量的增加, 交通事故也呈上升趋势, 交通事故伤亡已经成为威胁人类自身安全的世界第一大公害, 而从我国道路交通事故统计年报看^[1], 2005 年我国发生的交通事故中, 正面碰撞占 26.43%, 而侧面碰撞占据 39.50%, 因侧面碰撞造成的人员伤亡占 37.36%, 同样高于正碰的 27.73%, 统计显示侧面碰撞是发生频率最高和造成人员伤亡最多的事故形态。对于侧面碰撞设计最大的困难就是在车体和乘员之间有限的变形吸能空间^[2], 一旦发生侧撞时, 轿车侧面往往会发生较大的变形, 车门和侧围结构会突入车内并对乘员造成严重的伤害。在侧面碰撞中, 头部、胸部、骨盆、颈部、脊椎、腹部及下肢是乘员受到伤害的普遍部位^[3]。

国外对侧面碰撞的研究已经较成熟, 也较广泛, 比如深入研究汽车吸能材料^[4]、损伤生物力学^[5-6]和保护儿童或孕妇的乘员约束系统等^[7-8]。国外从事侧面碰撞试验的研究机构有很多, 主要包括有美国高速公路安全保障协会 (IIHS)、欧洲新车评价规程 (EURO NCAP)、荷兰国际应用科学研究组织 (TNO) 等。国内关于侧面碰撞安全方面的研究工作起步较晚, 到上世纪九十年代末才开始开展这方面的研究工作, 主要集中在轿车侧面碰撞被动安全技术和设备的开发及应用, 比如提高侧围及车门刚性、合理选择内饰结构及材料、采用侧碰安全气囊或气帘、合理设计乘员仓结构以达到好的传力效果等^[9-10]。

本文提出计算机仿真分析结构改进方法, 主要设计原则是使侧面结构尽可能多的吸收能量和减少 B 柱的侵入速度及侧面的侵入量, 从而减少对乘员的损伤, 针对该车型在侧面碰撞时存在的不足, 研究了改进其侧面碰撞安全性能的有效措施。

2. 侧面碰撞有限元模型的建立

2.1 整车有限元模型的建立

整车有限元模型的建立参考国内市场上保有量较大的某款车型, 按国标的要求对模型进行了单元质量、控制文件以及联接关系的确认以满足侧面碰撞仿真需要。整车有限元模型, 单元总数为 336783, 其中焊点单元总数为 4863 个。其中, 白车

身、车身覆盖件以及座椅骨架等用壳单元网格模拟,采用分段线性塑性材料;车门内饰板,内饰板材料同样定义为分段线性塑性材料;悬架系统、车门铰链和轮胎等按其运动关系做了与实际车辆相同的定义,主要包括:球铰(JOINT_SPHERICAL)、旋转铰(JOINT_REVOLUTE)、柱铰(JOINT_CYLINDRICAL)以及弹簧阻尼单元的定义;部件之间的联接关系也参考真实车身制造工艺,焊接之处采用CONSTRAINED_SPOTWELD点焊单元,螺栓联接之处定义CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY刚性联接;动力总成部分简化为刚体,其余对侧面碰撞影响不大的整车线束、管路、密封条等部件由质量单元代替或省略不计。模型总质量为1207kg,质心距地611mm,距前轴1118mm,与参考车辆情况保持一致。尤其对侧围结构的材料以及联接关系进行了细致的校核。

2.2 移动壁障有限元模型的建立

通过IGES图形数据交换格式将CAD模型转入有限元分析前处理软件Hypermesh中,对所建立的移动变形壁障模型进行了网格划分和定义各个部件的材料、属性,及各部件间的联接关系,最后对模型施加载荷、约束或边界条件。模型如下图1所示,移动变形壁障的有限元模型分为两个部分:移动台车模型和变形吸能块模型;单元类型主要有两种:一种是实体单元,如吸能块、通风装置;另一种为壳单元,如车架、吸能块衬板、车轮、配重等。整个台车模型为一个刚性整体,除吸能块和吸能块衬板外的所有部件通过刚性约束与车架连接;吸能块模型分为上下两层,上下每层又分为5层,上层中的每一层分为30块,下层中的每一层分为36块,前后两块之间用BEAM连接及后表面有吸能块衬板。其形状和尺寸如图1所示。整个模型以车架为基体,其他所有部件(除吸能块)通过刚性约束与车架连接,使整个台车模型成为一个刚性的整体,前部吸能块用来模拟侧面碰撞时车辆车头刚度性能,整个模型共有70238个单元,37554个节点。移动变形壁障模型质量950.056kg。并根据MDB验证试验要求^[11],将移动壁障以35Km/h的速度撞击一个刚性墙,在移动变形壁障模型第一排体单元间定义六块截面,来模拟测力墙,从六面刚性墙上输出变形吸能块六部分各自的力-变形曲线并与要求对比从而对MDB的有效性进行验证。

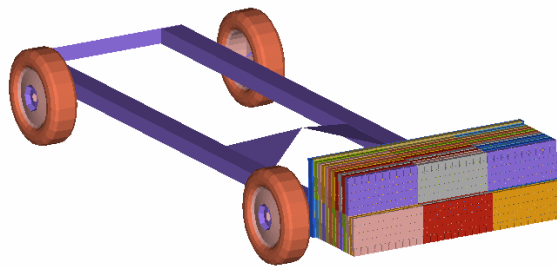


图1 移动变形壁障有限元模型图

3. 侧面碰撞有限元模型的验证

为了验证上面建立的整车侧碰撞有限元模型如图2所示,本文进行了与试验条件一致的侧面碰撞仿真,用动力学仿真软件LS-DYNA模拟移动变形壁障以50km/h的速度与整车模型垂直碰撞,中垂线通过碰撞侧前排座椅R点,碰撞时间设定为0.12秒。运算完毕后,输出移动变形壁障质心的减速度曲线和B柱与门槛梁处铰链的加速度曲线,并与实车碰撞试验所测得的曲线相比较,以验证本文中建立的侧面碰撞有限元模型的有效性,比较如图3和图4所示。

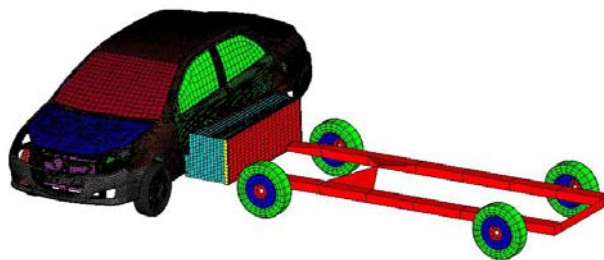


图2 侧面碰撞有限元模型示意图

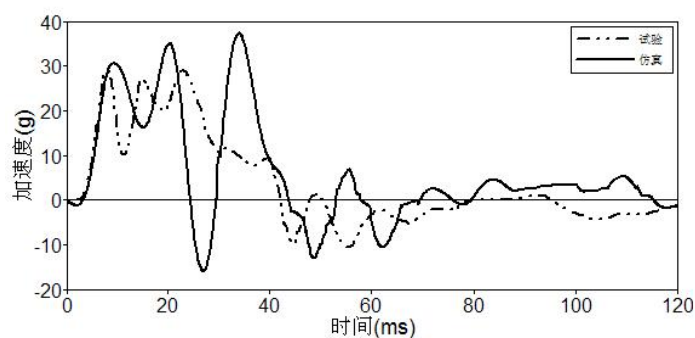


图3 试验与仿真结果对比: B柱Y向加速度

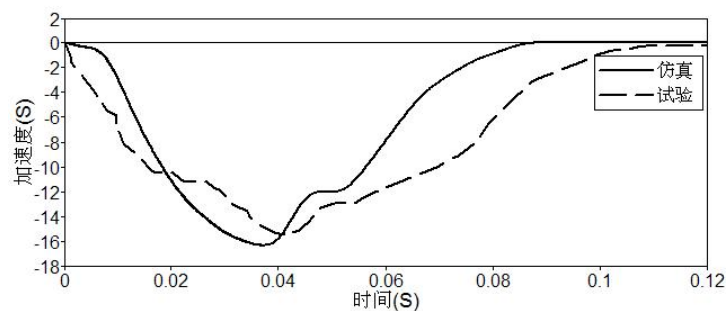


图4 试验与仿真结果对比: 移动变形壁障Y向加速度

从图3、图4可以看出,在碰撞过程中,仿真所得到的B柱加速度虽然与试验所得曲线有一定的差别,但总的变化趋势相同,尤其在碰撞过程的初期吻合得很好。移动变形壁障的Y向加速度-时间曲线显示,45ms时,负向加速度达到最大,约为15.2g;而仿真得到的最大负向加速度约为16.3g,发生在37ms时,两者在峰值及出现时间上能较好的吻合,同时两曲线的变化趋势也基本保持一致,股整车有限元模型的有效性得到验证。

4. 侧面碰撞结果分析与结构改进

本文研究的轿车侧面碰撞仿真最终变形结果如图5所示,车体发生较大内陷有如下几个原因:

1) B柱的刚度不够,尤其是B柱跟车门槛台阶处的连接强度不够。B柱对应门槛梁、中部及上部三处的横向侵入量如图5所示。最大的侵入量发生在B柱门槛梁处,为331.47mm,因为该处有一个很大的开孔;B柱的中部及上部侵入量分别为268.43mm和125.43mm。参考同类车,B柱中部及门槛梁处横向侵入量偏大。

2) 车门槛台阶的强度不够,使得车门槛发生明显的变形,导致车门下沿较容易脱离与车门槛台阶的接触,侵入驾驶室。

3) 地板变形较大,特别是座椅后横梁部位,导致座椅变形,以至整个侧面变形较大。

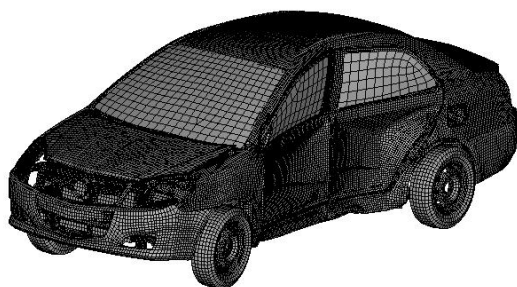


图5 侧面变形图

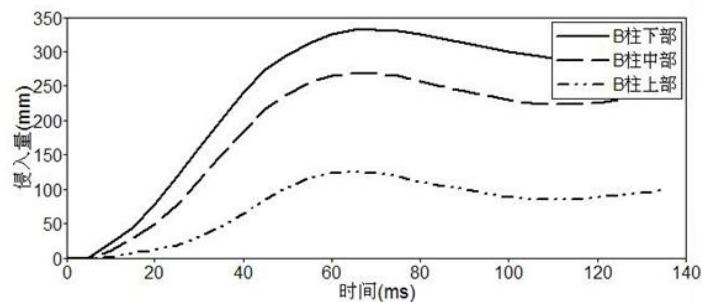


图6 B柱侵入量曲线

对于正面或追尾碰撞，车身都被设计了很大的缓冲空间，而车身的侧面却只有很小的缓冲空间，这给提高轿车抗侧面碰撞能力增加了难度，同时，由于侧围结构与乘员的直接碰撞接触，从而导致了侧面结构将来自于碰撞的动能直接转移到乘员身上，要避免或减轻这种损伤，就应该阻止或减缓这种能量的转移，使直接传递到乘员身上的能量尽可能少，要提高该车侧面安全性，这就要求尽可能地减少侧面碰撞过程中车门的侵入量和降低侵入速度，需要从整体上提高侧面的刚度，所以作者的出发点就是减少地板和门槛的侵入量，本文建议对这款轿车侧面结构作以下改进：

1) B柱的加强，在B柱下端接近门槛连接处的内外板之间增加U形加强板，且加强板采用B340/590DP号材料，其屈服极限由原始的185Mpa增加为379.5Mpa；

2) 提高门槛梁抗弯刚度，门槛的内外板都采用B340/590DP号材料，屈服极限都变为379.5Mpa，厚度由1.2mm增加到1.5mm；

3) 为了减少地板的变形量，本文增加一根座椅后横梁，并在左右后横梁的中间及中通道位置增加U型加强板如图7，并定义为分段线性塑性材料B180H1。密度为7890 kg/m³，杨氏模量为210GPa，泊松比0.3，屈服极限239.3MPa。从而消除车体的总体和局部屈曲变形，提高其抗碰撞性能。

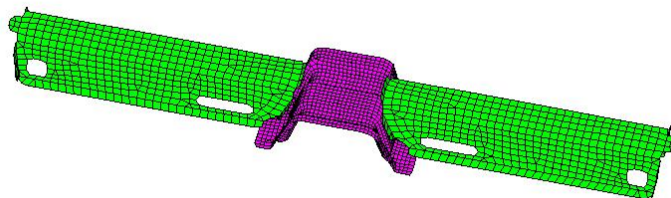


图7 座椅后横梁及中通道处U形加强板

根据我国《汽车侧面碰撞的乘员保护》，在前述建立的有限元整车模型及台车模型的基础上，对改进后进行了侧面碰撞仿真计算，得出的变形情况与基础模型对比如图8所示。由此图可知模型在改进后，由于提高了侧面刚度，能显著地减小侵入量，特别是车门下部与车门门槛台阶连接处；同时B柱、车门槛等部件的变形也适中。

前述侧面碰撞安全设计总的原则是在侧碰发生时尽量降低碰撞侧B柱的侵入量及侵入速度。图9是改进前后的轿车模型在侧面碰撞中得到的碰撞侧B柱速度曲线，从图9可知，原模型得到的碰撞侧B柱最大相对速度超到12m/s(40ms左右)，这说明该轿车侧面碰撞安全性能较差，也导致了在试验中胸部损伤值不符合我国侧面碰撞安全要求；在改进后，仿真得到的碰撞侧B柱速度已降低到8.4m/s(44ms)，从而能够显著提高侧面安全性。

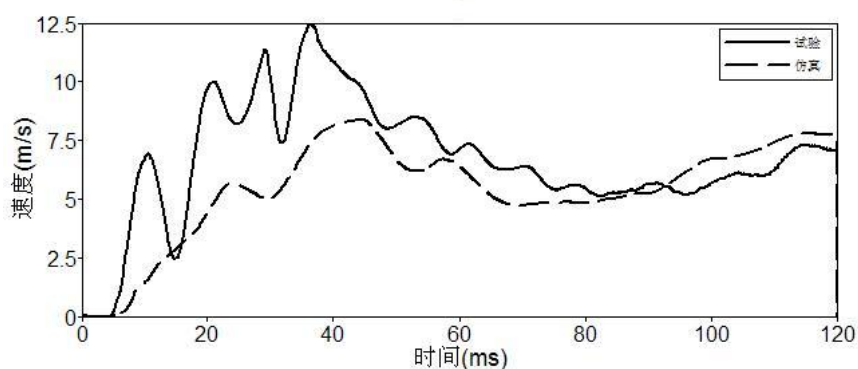
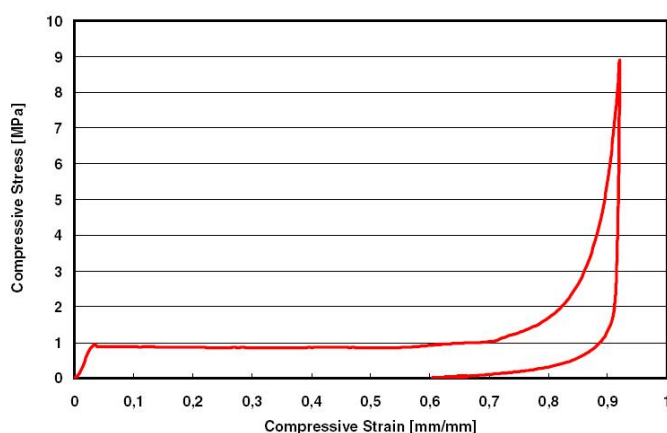


图8 改进前后B柱速度曲线

由于加了座椅后横梁,地板的变形量明显减少,同样增大了门槛的屈服应力,从而减少了B柱的侵入量,B柱最大的侵入量由原始模型的331.55mm减少到108.87mm。

通过上述的有限元仿真结果得知,通过侧面结构的改进,可以减少车门侵入量。然而,评价轿车侧面碰撞安全性能优劣的可靠和直接方法还得依据其在侧面碰撞过程中的假人损伤值。所以,为了验证改变连接特性方法能有效地降低假人损伤,本文采用了多刚体软件MADYMO中的PSM子结构方法建立侧面碰撞模型。假人胸部变形量和黏性指标值得到了较大的改善,但骨盆力和腹部力仍不理想,为使车辆的侧面碰撞安全行达到更高层次评估标准(如C-NCAP)的要求,作者针对上述损伤中的薄弱环节,提出在对应位置采用泡沫材料的构想,以期产生更好的保护效果。泡沫材料的形状及应力应变曲线如下:

图9 泡沫吸能材料应力-应变曲线^[12]

综合以上的改进方法后,仿真运算所得到的假人损伤值如下表1所示。数据表明,胸部黏性指数和腹部力有较为明显的减小,假人胸部变形量没有很大变化,但是达标;骨盆力有一定程度的减少,但是效果不是很明显,由于侧门直接冲击骨盆,导致骨盆力依然还比较大。所以综合考虑,泡沫材料的使用进一步达到了有效保护乘员的效果,对提高车辆侧面安全性是一个有效的措施。

表1 改进前后假人损伤值

类别		损伤值（改进前）		损伤值（改进后）		中国侧碰标准
头部	HIC	2228.9		320.12		≤1000
胸部	肋骨变形指标RDC（mm）	上	37.828	上	40.512	RDC≤42mm
		中	32.451	中	36.970	
		下	29.976	下	35.022	
	黏性指标VC（m/s）	上	1.0603	上	0.8846	VC≤1m/s
		中	1.2488	中	0.8701	
		下	1.1469	下	0.9202	
腹部	腹部力峰值APF（KN）	4.562 KN		1.643 KN		≤2.5KN
骨盆	耻骨合力峰值PSPF（KN）	8.743 KN		5.986 KN		≤6KN

5. 结语

在侧面碰撞中，由于乘员与车辆的侧边结构之间的空间相对狭小，对于乘员的保护和提高车辆的防撞性能难度较大。本文分析了我国某一款侧面安全不符合《汽车侧面碰撞的乘员保护》标准要求的车型的特点，针对该车型的侧面碰撞安全性改进需要，结合轿车侧面结构安全设计普遍原则，运用计算机仿真分析的结构改进方法，提出了相应改进措施，包括在B柱中增加U形加强板、座椅后横梁等。通过采用有限元计算和PSM子结构方法分析，结果表明改进方案能减少车门侵入量和明显降低假人损伤值，从而有效地提高轿车的侧面碰撞安全性。

Acknowledgement

This study was supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) No. 2006AA110101 and “111 program” No. 111-2-11.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国道路交通事故统计年报（2005年度）.2006,5
- [2] John Townsend, Michael Kaczmar. Modular door system for side impact safety of motor vehicles .
- [3] 台湾财团车辆研究测试中心.侧面碰撞乘员损伤分析技术之研究.车辆研测资讯, 2006-01.
- [4] Marcello Di Leo, Fiat Auto S.p. A Structure and Padding Optimisa for Side Impact Protection, ESV Paper Number 98-S8-W-32.
- [5] Jin, X.; Lee, J.B.; Zhang, L.; Yang, K.H. and King, A.I. (2006) “Biomechanical response of the bovine pia-arachnoid complex to tensile loading at varying strain-rates” to appear at the Stapp Car Crash Journal 50.
- [6] Richard Kent. Sled system requirements for the analysis of side impact thoracic injury criteria and occupant protection. SAE Paper. 2001-01-0721.
- [7] Yngve Haland, B.Pipkorn. A Parametric Study of a Side Airbag System to Meet Deflection Based Criteria in Car-to-Car Impacts. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy（1994），Department of Injury Prevention，Chalmers University of Technology，Goteborg，Sweden.
- [8] Nicholas Tamborra, George Bahouth. Child Side Impacts: Comparison of Vehicle Crush in Side Impacts From Field Investigations and U.S. Consumer Tests. SAE Paper 2005-01-0286.
- [9] 游国忠，陈晓东等．轿车B柱的优化及对侧面碰撞安全的影响．汽车工程，2006，第11期．
- [10] 万鑫铭.基于虚拟试验的汽车前碰撞安全气囊防护效率的研究：[湖南大学博士学位论文].长沙：湖南学汽车车身先进设计制造国家重点实验室，2006，22—44.
- [11] 汽车侧面碰撞的乘员保护（GB20071-2006），2006.中国汽车技术研究中心编。
- [12] Use of high efficient energy absorption foam in side impact padding. ESV paper 2007-0185