

车门防撞杆对汽车侧面碰撞安全性的影响研究

王方 杨济匡

湖南大学 汽车先进车身设计制造国家重点实验室

摘要: 按照我国汽车侧面碰撞标准《汽车侧面碰撞的乘员保护》(GB20071-2006)的要求,建立了轿车侧面碰撞有限元模型,与ES-2侧面碰撞假人耦合,并验证了其有效性,在此基础上在车前门内部加装防撞杆并优化其配置,对比各种情况下乘员损伤值,同时辅以胸部安全气囊的使用,从理论上证明了防撞杆各种方案及安全气囊对乘员侧碰撞保护的积极影响和有效性。

关键词: 侧面碰撞, 模型, 防撞杆, 安全气囊

A Research on Influence of Side Impact Beam on Vehicle Side Impact Safety

WANG Fang YANG Ji-kuang

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body
Hunan University, Changsha, 410082, China

Abstract: According to the requirements of side impact regulation 《The protection of the occupants in the event of lateral collision》(GB20071-2006) in China, the side impact finite element model was built, and it was coupled with ES-2 side impact dummy and validated. Side impact beams and different optimized schemes were applied, then the paper also introduced the thorax airbag. With the comparison of the occupant injury values in different schemes above, the positive influence of the side impact beam on occupant protection in side impact and their validity were identified theoretically.

Keywords: Side impact, Model, Impact beam, Airbag

1 前言

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。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。与汽车正面碰撞相比,汽车侧面吸能构件较少,乘员与门内板之间仅存在20-30mm的空间[2],一旦受到来自侧面的撞击,乘员将受到强烈贯入的冲击载荷作用,严重时危及生命。因此,汽车侧面碰撞安全性的研究是汽车被动安全性研究的一项重要内容,并为世界各国汽车厂商和汽车研究机构所关注。

本文依据我国汽车侧面碰撞标准《汽车侧面碰撞的乘员保护》(GB20071-2006),以国外某车型的有限元模型为研究对象,建立了整车侧面碰撞模型,采用Hypermesh和LS-DYNA作为前后处理软件和求解器进行汽车侧面碰撞的数值模拟,并应用多刚体动力学软件MADYMO中的规定结构运动(PSM-Prescribed Structure Motion)的方法将有限元碰撞模型和多刚体ES-2假人模型进行耦合,得到在一定碰撞条件下的假人各部位损伤参数,同时作者从对驾驶员侧前车门增加防撞杆并改变防撞杆的配置出发,并辅以胸部安全气囊的使用,详细地分析了各种情况对侧面碰撞中乘员损伤参数的影响,并得出最佳方案,以期达到有效减少乘员损伤的目的,并为提高汽车侧面耐撞性能提供借鉴作用。

2 整车侧面碰撞有限元模型的建立和验证

2.1 整车有限元模型的建立

整车有限元模型的建立参考美国某量产车型Dodge-Neon,原模型已经过美国联邦机动车交通安全管理局国家碰撞分析中心进行正面碰撞的试验验证[3],车身零件大部分采用壳单元,发动机总成部分采用实体单元,零件与零件之间采用焊点单元进行连接,螺栓连接处采用刚性

连接, 其它对车辆整体刚性和抗撞性能影响细微的部件则用质量单元代替。因欲将模型应用于侧面碰撞仿真分析, 所以按照标准的要求主要对车体的重要侧面结构如车门内外板、B 柱、门槛梁等进行网格的细化和调整, 并在驾驶员侧前门加上车门内饰板, 内饰板材料同样定义为分段线性塑性材料, 最终得到整车有限元模型单元总数为 286301, 其中焊点单元总数为 4208 个。

作者按标准要求也建立了移动变形壁障, 其中使用了刚性材料、分段线性塑性材料、蜂窝铝材料等多种材料模型。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, 总质量为 949.9kg。并根据 MDB 验证试验要求[4], 将移动壁障以 35Km/h 的速度撞击一个刚性墙, 在距离移动变形壁障模型前表面 10mm 处定义六面刚性墙, 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。

2.2 整车有限元模型的验证

上文建立的整车侧面碰撞有限元模型如图 2-1 所示, 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, 并与文献[5]和[6]中记载的同类型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 2-2 和 2-3 所示。

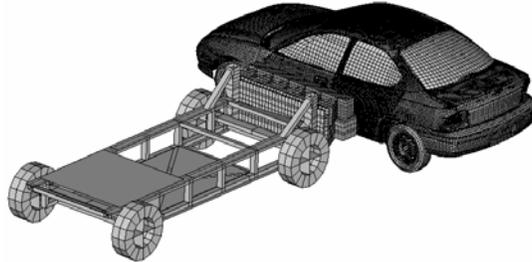


图 2-1 侧面碰撞有限元模型示意图

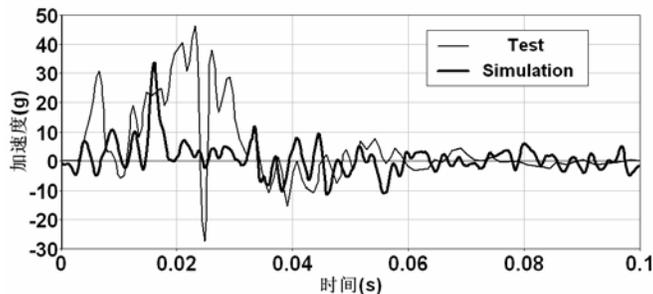


图 2-2 试验与仿真结果对比: B 柱 Y 向加速度

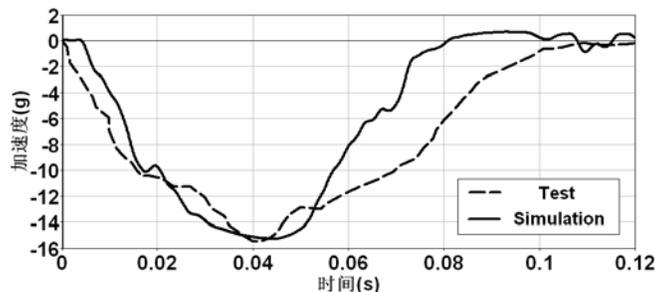


图 2-3 试验与仿真结果对比: 移动变形壁障 Y 向加速度

从图中可以看出，在碰撞过程中，仿真所得到的 B 柱加速度虽与试验所得曲线有一定的差异，但总的变化趋势大致相同，尤其在碰撞过程的初期和从 30ms 起到最后碰撞完成的过程，两者吻合得很好。而移动变形壁障的 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 15.5g，发生在 42ms 时，两者在峰值及其出现的时间上能较好地吻合，同时两曲线的变化趋势也基本保持一致，故整车有限元模型的有效性得到验证。

3 仿真参数分析与结构优化

上文已对侧面碰撞有限元模型进行验证，本部分按照 GB20071-2006《汽车侧面碰撞的乘员保护》的要求，将 ES-2 侧撞假人安放到车辆模型的驾驶座，由于本文采用多刚体动力学仿真软件 MADYMO 中自带的 ES-2 多刚体假人模型，故需使用 MADYMO 子结构模型设计中的规定结构运动(PSM: Prescribed Structure Motion)方法耦合人一车模型。

PSM 方法通过 xml 输入文件中的关键字 MOTION.STRUCT_DISP 定义子结构模型中部件的运动，而这些运动可以由组成部件的节点位移与时间历程的关系来描述，包括车辆刚体运动和结构的变形两方面[7]。本文中，将有限元模型中对假人的损伤有影响作用的主要部件导入 xml 文件，再将其中与移动变形壁障有接触的部件：前后车门外板，车身侧围板、顶盖纵梁和座椅的运动用前面所述关键字定义，其余部件通过焊点连接，最后导入 ES-2 假人，定位，定义车体的部件与部件之间、部件与假人之间的接触，递交给 MADYMO 求解器进行运算，最终得到假人各部位损伤值。

从运算结果看，假人头部与玻璃碰撞，未发生硬接触，所以不考虑头部损伤，图 3-1 a、b、c 分别为假人上、中、下三根肋骨的位移—时间曲线，图 3-2、图 3-3 分别为假人腹部合力—时间曲线、耻骨合力—时间曲线。

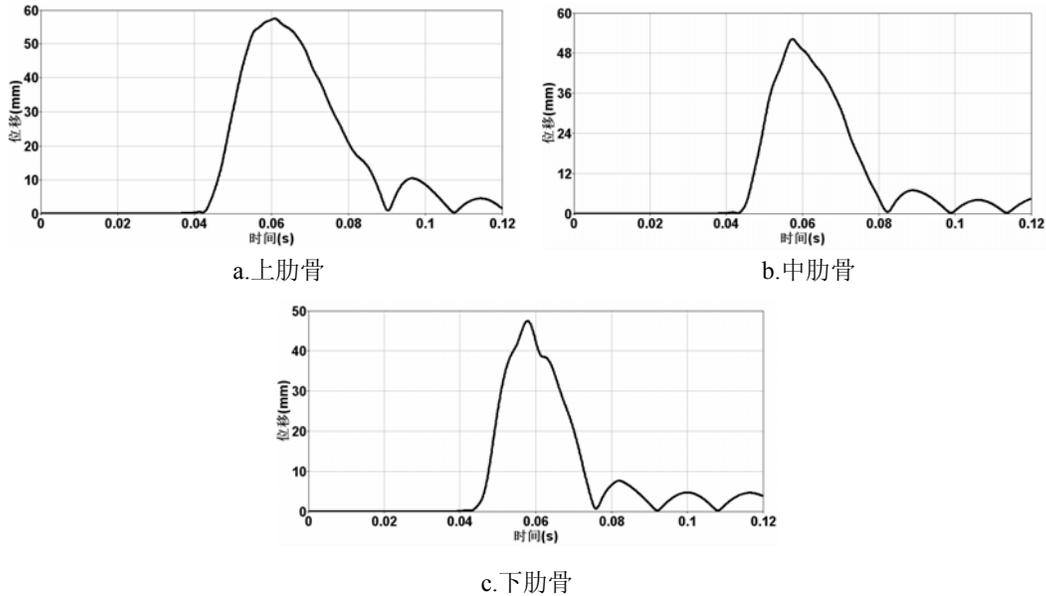


图 3-1 假人肋骨位移曲线

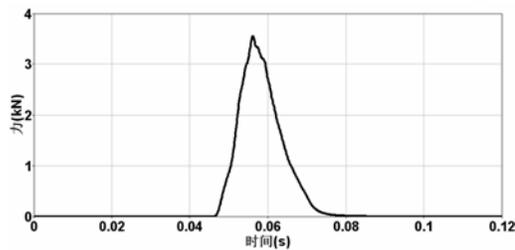


图 3-2 假人腹部合力曲线

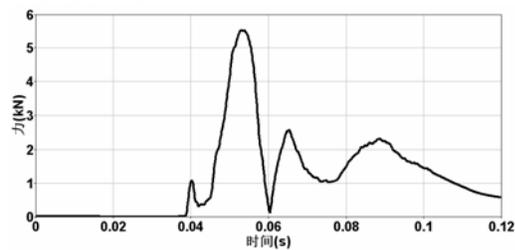


图 3-3 假人耻骨合力曲线

结果表明, 胸部位移和腹部合力均不同程度超出标准要求的极限值, 首先由于撞击结束后, 假人有振动, 导致变形曲线和耻骨合力曲线出现震荡现象。在虚拟试验中, 车身材料基本上选取刚性和塑性模型, 同时整车模型中忽略了车门的填充材料和防撞杆等部件, 从而导致仿真结果数值偏大。同时上文提到的模型缺陷也是下文中需要改进和优化的地方。

在对整车碰撞有限元模型和乘员损伤参数的有效性进行验证后, 按照标准对车辆、可移动变形壁障和假人三者定位, 进行侧面碰撞仿真试验后得到的乘员头部、胸部、腹部和骨盆的损伤值如下表 3-1 所示:

表 3-1

类别		损伤值	
头部	HIC	无接触	
胸部	肋骨变形指标 RDC (mm)	上	57.396
		中	52.126
		下	47.437
	黏性指标 VC (m/s)	上	1.4798
		中	1.2694
		下	1.0817
腹部	腹部力峰值 APF (kN)	3.5518	
骨盆	耻骨合力峰值 PSPF (kN)	5.5225	

GB20071-2006《汽车侧面碰撞的乘员保护》中规定[4]:

头部性能指标 (HPC) ≤ 1000 ; 当没有发生头部接触时, 则不必测量或计算 HPC 值, 只记录“无头部接触”;

胸部性能指标: 肋骨变形指数 (RDC) $\leq 42\text{mm}$, 黏性指标 (VC) 应小于或等于 1.0m/s ;

骨盆性能指标: 耻骨结合点力峰值 (PSPF) $\leq 6\text{kN}$;

腹部性能指标: 腹部力峰值 (APF) $\leq 2.5\text{kN}$ 内力。

显然, 在仿真所得的损伤值中, 假人的上、中、下肋骨 VC 值和 RDC 值均不同程度地高于标准中极限值, 同时腹部力峰值也超标, 假人的胸部和腹部受到较大伤害。

从模型仿真结果看, 假人胸腹部伤害主要来自于车门外板变形带动内板及内饰板后与胸腹部的直接接触, 在车内选取一个未变形点 A, 在内饰板与假人接触的区域选取另外一点 B, 输出两点在 Y 方向上的距离随时间的变化曲线, 如图 3-1, 在碰撞发生后大约 50ms 时, 两点间距离达到最小, 此时胸腹部侵入量达到最大, 这是导致假人胸腹部伤害的原因。因此, 针对此特定车型, 作者提出在车辆的碰撞形态和其他结构一定的情况下, 在驾驶员侧前车门内部增加防撞杆, 并提出多种方案以找出最佳方案。

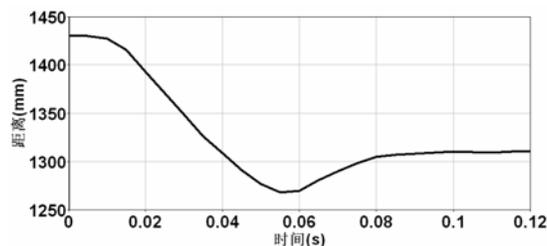


图 3-1 某两点间 Y 向距离—时间图

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，这就要从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入手。侧门防撞杆的防撞作用是：当侧门受到撞击时，坚固的防撞杆能吸收部分能量，减轻侧门的变形程度，从而能减少汽车撞击对车内乘员的伤害。侧门防撞杆由防撞梁、前侧支架、后侧支架组成，使用高强度钢材制造，采用壳单元建立其有限元模型，定义为分段线性塑性材料，密度为 7890 kg/m³，杨氏模量为 210 GPa，泊松比 0.3，屈服极限 300 MPa。由三点静态弯曲试验可知，规则方形截面的高强度钢防撞杆能承受巨大的外部载荷，同时研究表明防撞梁的截面形状对防撞杆的吸能效果影响很小[8]，所以本文中采用了截面形状为正八边形的防撞梁，结构如图 3-2 所示。同时作者在此基础上提出了如图 3-3 所示的三种防撞杆布置方案。

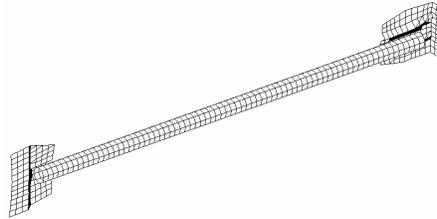


图 3-2 防撞杆结构示意图

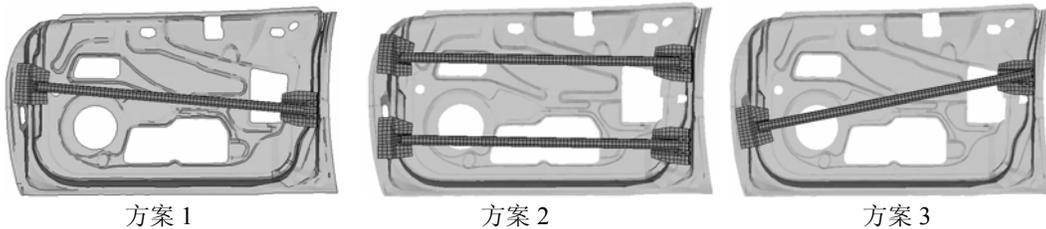


图 3-3 防撞杆布置方案图

显然，由于不同的防撞杆位置在受到移动变形壁障撞击时结构变形不同，会导致假人损伤值的不同，如表 3-2 所示。

表 3-2 三种防撞杆布置方案与无防撞杆假人各损伤值对比列表

方案 编号	头部	胸部						骨盆	腹部
	HIC	RDC (mm)			VC (m/s)			PSPF (kN)	APF (kN)
		上肋骨	中肋骨	下肋骨	上肋骨	中肋骨	下肋骨		
1	无接触	46.111	43.628	41.784	1.1867	1.1859	1.0200	4.8870	1.5931
2	无接触	42.786	40.804	36.423	1.1211	0.99621	0.87654	3.3029	1.2325
3	无接触	47.780	43.478	39.855	1.2281	1.4110	1.1524	4.5669	1.6528
无	无接触	57.396	52.126	47.437	1.4798	1.2694	1.0871	5.5225	3.5518

在三种方案中，分别选取与上文中相同的 A、B 两点，输出三种方案中两点之间距离的变化曲线并与无防撞杆的情况进行对比，如图 3-4 所示，从图中可以看出，发生碰撞后，加了防撞杆的前门变形量比加之前均有不同程度的减小，乘员舱的空间相对增大，有利于减轻侧面变形结构与假人的接触，这直接反应在三种方案中假人的腹部力峰值和耻骨合力峰值均有不同程度减少，而且腹部力指标均达到标准要求。同时方案 2 中侧门变形最小，因此相应地表 3-2 方案 2 中假人的胸部变形量最小，且腹部力和耻骨合力峰值最小。

图 3-5 所示为三种方案中防撞梁吸能效果的比较图，显然在第 2 种方案中的防撞杆吸收了相对最多的能量，这是导致方案 2 中各项指标普遍优于其它方案的一个直接因素。图 3-6 为移动变形壁障质心的 Y 向加速度对比示意图，由于在各个方案仿真中车体的运动几乎完全一致，而三种方案中方案 2 的加速度曲线峰值较大，即其移动变形壁障的速度降低得最快，这说明方案 2 中移动变形壁障的动能最大限度地传递给了车辆刚性运动的动能，而传递给侧面结构的变

形能为三种方案中最小。所以防撞杆优化配置后再一定程度上增加了车辆的耐撞性能，提高了乘员的安全性。

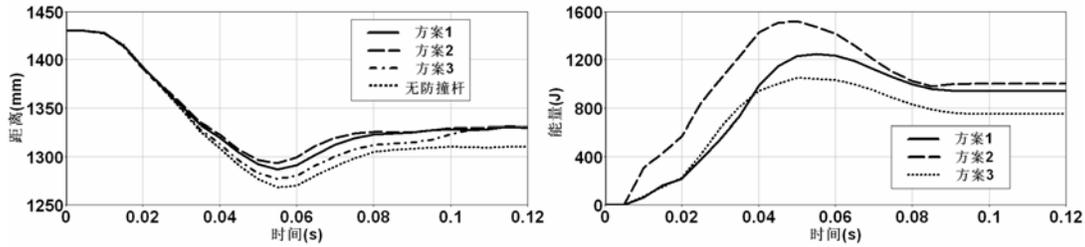


图 3-4 AB 之间 Y 向距离—时间曲线对比图

3-5 防撞梁吸能效果对比图

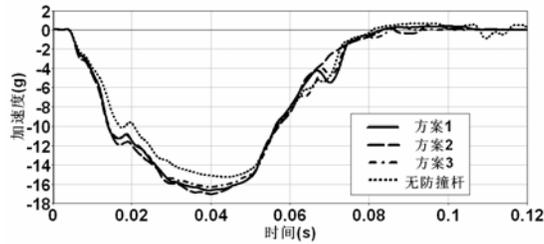


图 3-6 移动变形壁障 Y 向加速度对比图

从上文中所采取的措施看，在对车辆前门防撞杆进行优化后，乘员损伤值虽然得到了较大改善，但仍不十分理想，为使车辆的侧碰撞安全性达到更高层次评估标准（如 NCAP）的要求，作者针对上文乘员损伤中的薄弱环节，提出安装胸部侧碰撞气囊的构想，以期产生更好的保护效果。

本文中采用 MADYMO 自带的 Gas Flow 模式胸部安全气囊，气囊为是单腔，使用线性各向同性材料(MATERIAL.ISOLIN)材料模型。将气囊置于 B 柱内假人胸部所在高度位置，定义气囊的自接触以及气囊与有限元车体结构和气囊与假人的接触，其中 FE 与 FE 之间的接触使用基于惩罚算法的接触模型(CONTACT_FORCE.PENALTY)，这样，最大接触力将依据时间步长及接触段的接触刚度进行计算，基于惩罚算法的接触模型会使穿透量保持较低的值。最后定义有限元气囊体积、气体流入和流出各参数。计算后气囊展开如图 3-7 所示。

在第二种方案的基础上加装胸部气囊后，仿真运算所得的假人损伤值如下表 3-3 所示。数据表明，假人胸部变形量和黏性指标值有较为明显的减小，并且全部达标；由于气囊起爆所产生的巨大压力对假人腹部的冲击，导致腹部力峰值有所增加，同时耻骨合力峰值也有小幅度的加大，但是变化很小，且都在标准所要求的范围之内，所以综合考虑，胸部气囊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行之有效的措施。

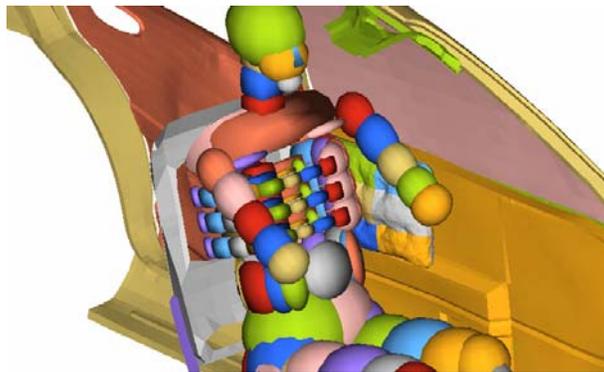


图 3-7 胸部气囊展开示意图

表 3-3 加装气囊仿真得到的假人损伤值

类别		损伤值	
头部	HIC	无接触	
胸部	肋骨变形指标 RDC (mm)	上	40.295
		中	38.805
		下	32.202
	黏性指标 VC (m/s)	上	0.9292
		中	0.8429
		下	0.4347
腹部	腹部力峰值 APF (kN)	1.5282	
骨盆	耻骨合力峰值 PSPF (kN)	3.5443	

4 结论

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。本文建立并验证了侧面碰撞有限元模型，结合 ES-2 侧碰撞假人进行方针分析，并提出了车辆结构的改进方案。

研究表明，在车门内加装防撞杆能行之有效地减小侧面结构的变形，降低乘员各部位尤其是胸腹部的损伤值，同时文中所提出的三种方案中，方案 2 的效果相对最好，而如果在此基础上再加装胸部安全气囊，则能响应达到更好的保护效果。由于仅从侧门与乘员的接触出发而没有考虑 B 柱及其它结构对乘员的影响，以上研究的范围和结果有一定的局限性，但是本文的研究结果对侧面碰撞乘员保护的研究提供了可借鉴之处。

Acknowledgements:

This study is sponsored by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program), No. 2006AA110101.

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] 张君媛,等.汽车侧面碰撞乘员约束系统得多目标优化.汽车技术,2005,11.
- [3] Finite Element Model of Dodge Neon, Test No.: 2320. National Crash Analysis Center, The George Washington University.
- [4] 《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.
- [5] 唐洪斌. 某轿车侧面碰撞车体结构性能研究[硕士论文],吉林大学, 2006.
- [6] Chenxiaodong, Linhaiyan, et al. The simulation of CHERY full-scale side impact test, SAE 2003 International. 04ANNUAL-454.
- [7] Side Impact Application, MADYMO Application Manual Version 6.2.1 December 2004.
- [8] Seong Sik Cheon,Dai Gil Lee & Kwang Seop Jeong. Composite side-door impact beams for passenger cars. Composite Structure, 1997, 38:229-239.