

# Crashworthiness Design of Mini Electric Vehicle for Side Crash Structure

Yuqing ZHENG<sup>1</sup>, Xicha ZHU<sup>2</sup>, Honghao LING<sup>1</sup>, Xueqin DONG<sup>2</sup>, Zhixiong Ma<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai, China, 201804;

<sup>2</sup> Elec-joy Vehicle Technology (Shanghai) Co., Ltd, Shanghai, China, 201806;

<sup>3</sup> Hubei Province Key Laboratory of Modern Automotive Technology, Wuhan, China, 430070

Email: 812york@tongji.edu.cn

**Abstract:** Mini electric vehicles become increasingly popular in the market because of their competitive prices, small space and convenience. However, Most of them have simple configurations, resulting in little crashworthiness. They can't protect occupant safety in crash and need better crashworthiness design of vehicle body. In order to satisfy the mandatory requirements of GB 20071-2006 regulation, it analyzed the features of body structure of one mass-produced mini electric vehicle, then used two methods of numerical simulation and crash test to complete the crashworthiness and optimization design for its side crash structure. Finally, an optimized side protective structure was built, consisting of small square tubes and thin-walled steel plates. It can protect the critical area of the upper part of occupant body during side crash. 50km/h side crash simulation and test results show that new side protective structure deforms a little in side crash, which can resist the intrusion of moving deformable barrier well. And all injury values of dummy in test meet requirements of corresponding regulation well with the combined contribution of the interior trim panel made of foam aluminum.

**Keywords:** mini electric vehicle, side structure, crashworthiness, numerical simulation, side crash test

## 微型电动汽车侧碰结构耐撞性设计

郑玉卿<sup>1</sup>, 朱西产<sup>1</sup>, 凌宏浩<sup>1</sup>, 董学勤<sup>2</sup>, 马志雄<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> 同济大学汽车学院, 上海, 国家, 201804

<sup>2</sup> 易觉汽车科技(上海)有限公司, 上海, 中国, 201806

<sup>3</sup> 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉, 中国, 430070

Email: 812york@tongji.edu.cn

**摘要:** 微型电动汽车因价格低、体积小、便捷性, 越来越受到消费者青睐, 但普遍存在配置简单, 乘员碰撞安全性能无法保证的问题, 亟需更好的耐撞性结构设计。为满足 GB 20071-2006 的强制性要求, 分析了一款量产微型电动汽车的车身结构特点, 采用数值仿真和碰撞试验两种方法进行了侧碰结构耐撞性优化设计。最后设计了一款新型的侧面防护结构由方管和钢板构成, 能有效保护乘员上半身关键部位。50km/h 侧碰仿真和试验结果表明: 新侧面防护结构在侧面碰撞过程中塑性变形较小, 能较好地抵抗移动变形壁障的侵入, 且在蜂窝铝内饰板的联合作用下, 假人伤害值均达到国标规定要求。

**关键词:** 微型电动汽车, 侧面结构, 耐撞性, 数值仿真, 侧碰试验

### 1 引言

中国面临越来越大的环境破坏以及石油进口压力问题, 其中一个应对策略就是鼓励发展电动汽车, 同时发展电

动汽车也符合我国产业结构调整和产业发展的需要<sup>[1]</sup>。

目前, 电动汽车大体出现了两个不同发展方向, 一是发展大功率电动汽车, 主要是中级乘用车, 具有功率大续航里程长等特点, 但因为其价格较高, 消费者接受程度不高, 即便在有高额补贴的情况下市场销售情况仍不理想。二是发展微小型车, 它具有结构紧凑、价格便宜、便捷灵活的优点。它的驾驶速度为 40~80 公里/小时, 续驶里程可达一百多公里, 总的使用成本远低于内燃机汽车, 拥有巨大的市场发展潜力<sup>[2]</sup>。

微型电动汽车廉价实用, 在城乡市场大受欢迎, 从 2010 年销量不足 2 万辆到 2014 年产销量接近 20 万辆, 发展非常迅猛。它的优点主要体现在以下几个方面: 1) 使用电池数量少、质量轻、价格低; 2) 结构紧凑, 便捷灵活, 同时一定的续驶里程可以满足城镇居民的使用要求; 3) 可直接使用家用 220V 电源进行充电, 对充电设施要求低, 不必设置专门的充电装置; 4) 夜晚的低价谷电可以供其充电, 可以节省开支。

国外在 20 世纪末已对部分电动汽车碰撞安全性进行了相关结构耐撞性仿真设计和试验研究<sup>[3,4]</sup>。目前我国法规尚未将微型电动汽车纳入交通体系, 没有对其进行严格规范。因缺少相应法规进行产品质量约束, 这类微型电动汽车普遍存在产品品质低、安全性能差、续驶里程短的问题, 所以一直广受诟病。为减少生产成本, 它配置简单、空间狭小、制作工艺粗糙, 很多车未配置乘员保护系统, 也没有从安全角度出发进行车身结构设计, 一旦发生车辆碰撞, 无法对乘员进行有效保护, 即使在低速行驶下也可能造成生命危险。此外, 微型电动汽车结构跟一般的电动汽车结构存在不小差别, 不能参照传统电动汽车去设计<sup>[5]</sup>。因此对于微型电动汽车结构的碰撞安全研究, 将有助于提高这类产品的安全性能, 有助于降低碰撞事故中的乘员伤害, 进一步助推电动汽车的市场应用。本文拟对微型电动汽车的侧面碰撞安全结构进行耐撞性设计, 目标是在侧碰过程中能抵抗移动变形壁障(MDB, moving deformable barrier)的过量侵入驾驶室, 降低对乘员的伤害, 结合刚度匹配的内饰板, 使假人伤害值满足 GB 20071-2006 的要求<sup>[2]</sup>。

## 2 电动汽车侧面结构

### 2.1 原始结构

本文选取的微型电动汽车侧围结构配置简单, 无任何加强措施在侧面碰撞中进行防护, 如图 1 所示, 导致侧面碰撞保护结构的设计具有不小的挑战。图中钢梁是车门安装主支撑件, 其高度大于 MDB 高度, 起不到任何保护效果。同时该汽车为了节约成本, 车门采用了全塑料件, 强度薄弱, 无法搭接车门防撞梁进行侧面碰撞保护。

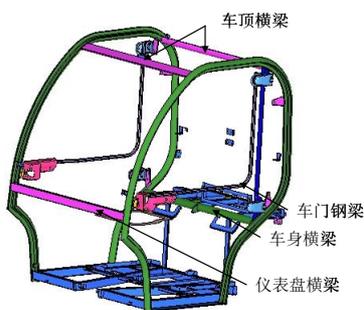


Figure 1. Original side structure  
图 1. 原始侧面结构

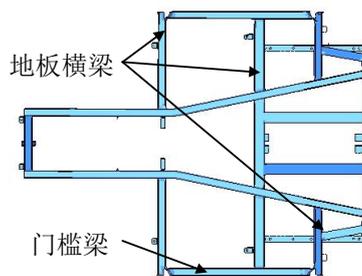


Figure 2. Floor structure of vehicle body  
图 2. 车身地板结构

当然, 该微型电动汽车也存在一些有利于侧面防撞结构设计的特别之处。车身骨架最前端至最后端的距离为 1232 mm, 而 MDB 上蜂窝铝的宽度为 1500 mm, 可以完全覆盖整个车身骨架。车身骨架具有比较大的整体刚度, 碰撞力可以经车身骨架向上传递到车顶横梁, 中部可以向仪表板横梁和中部横梁传递, 下部通过图 2 中的门槛梁和地板横梁向 A、B 柱传递, 形成了完整的载荷传递路径。

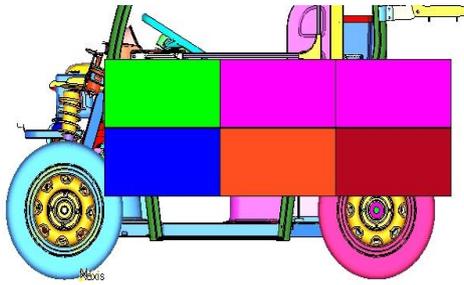


Figure 3. Relative position between barrier and wheel  
图 3 壁障与车轮间相对位置

另外，该微型电动汽车轴距为 945 mm，发生侧面碰撞时 MDB 首先与两个车轮同时发生接触，可以依靠两车轮吸收部分能量，而不会造成其中一端侵入过大，见图 3 所示 MDB 与车轮之间相对碰撞位置关系。

## 2.2 侧面结构设计方案

电动汽车的碰撞力可以经车身框架进行传递，同时因为轴距较小，移动壁障可以同时与前后车轮进行接触，车轮可以吸收一部分碰撞能量。最大问题就是无法安装车门防撞梁，不能抵抗移动壁障对驾驶舱的侵入，因此必须设计有别于一般汽车的新型侧面防护结构来保护乘员。

电动汽车的车门是朝前开的，因此可在座椅附近处安装新型结构，并与刚度充分的车身框架连接，以此来抵御侧面侵入。该新型结构需要覆盖人体关键部位，包括胸部、腹部、骨盆，同时考虑人体工学，不能影响乘员驾驶操作和进出乘员舱。此外，考虑到不能过多地增加生产工艺成本，要尽可能地不改动原有结构和车身造型，只在原结构基础上进行局部改动<sup>[7]</sup>。

基于上述多方面考虑，团队首次设计了一种依靠方管构成的框架式侧面结构，将其焊接在车身骨架上进行侧面防护，如图 4 所示。

该结构使用的方管规格均为 30mm×12mm×1.8mm，由多根方管组成的侧面框架结构具有较大的抗弯强度。同时，在原车身骨架基础上，利用方管对侧面框架结构的中部进行支撑，可以进一步减小它的弯曲变形。支撑结构和侧面框架之间采取了螺栓连接方式。各方管之间，焊接了几块厚度为 1.5 mm 的钢板，一方面是为了美观考虑，另一方面也是为了防止蜂窝铝发生变形后挤入乘员舱而对乘员造成二次伤害。这种结构，不需要在原车结构上作较大改动，同时工艺简单，可以满足微型电动汽车厂商的实际需要。

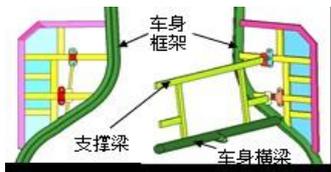


Figure 4. Side crash structure  
图 4. 侧面碰撞结构

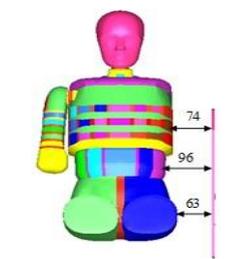


Figure 5. Distance between side structure and dummy  
图 5. 侧面结构与假人之间距离

侧面结构距离假人胸部、腹部、髋部这三个关键部位的距离分别为 74 mm，96 mm，63 mm，如图 5 所示。侧面结构与假人距离很小，所以要求侧面结构的侵入量必须足够小。同时，受驾驶舱的空间限制，安装在侧面结构上的内饰板厚度不能过大，以免影响乘员的乘坐舒适性，在后续内饰板刚度匹配过程必须考虑这个问题。

### 3 侧面碰撞仿真

对上述侧面结构设计方案进行有限元建模后，按照 GB 20071-2006 的试验工况，导入 MDB 模型并建立与车体的面面接触对，将初速度设定成 13.889 m/s，即 50km/h，建立了完整的侧面碰撞有限元模型，见图 6。因为车门塑料件无法在侧面碰撞中提供保护效果，所以在仿真中去掉了车门，以免对碰撞仿真结果造成不必要的动态干扰<sup>[8]</sup>。

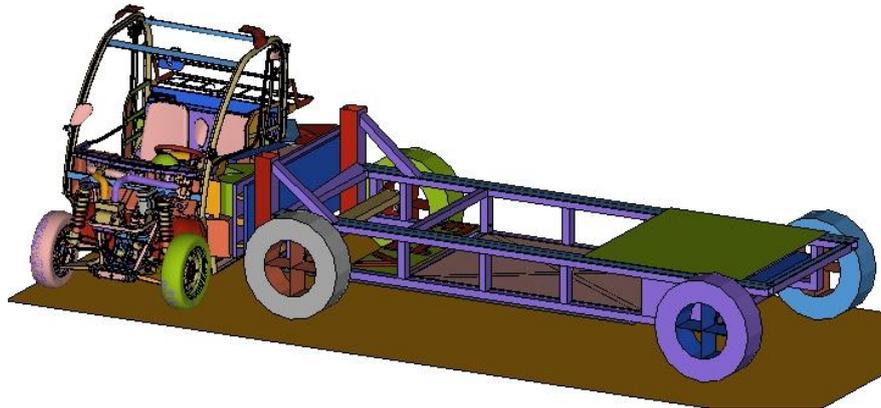


Figure 6. Finite element model of side crash  
图 6. 侧面碰撞有限元模型

仿真动画显示，移动壁障最先与车轮发生接触，之后与车身框架碰撞，最后与侧面结构接触。在侧面结构的保护下，后部的蜂窝铝未能侵入驾驶舱，而部分前部的蜂窝铝挤入驾驶舱。除了汽车后轮有较大变形进行吸能外，其他部件，包括车身骨架，仪表板横梁，车顶横梁，地板横梁等，刚度较大，产生的变形均较小，如图 7 所示。



Figure 7. Plastic deformation of vehicle body at 60ms  
图 7. 60 ms 时车身塑性变形



Figure 8. Deformation comparison of side structure before and after side crash  
图 8. 侧碰前后侧面结构变形对比

从 MDB 对乘员舱的侵入量来看，设计的侧面安全结构体现了较好的防护效果。侧面结构在 MDB 的推动下产生了少了向里的塑性弯曲变形，但其整体比较稳定，没有被 MDB 挤入，可以保护假人上半身的关键部位，如图 8 所示。

分别选取了侧面结构的上、中、下三个点，分别与假人的胸部、腹部、髋部高度相一致，获得侵入速度曲线，如图 9 所示，三个测量点的侵入速度最大值大约为 9.6 m/s。这是由于电动汽车的质量较小，导致整车的碰撞速度较大，所以侧面结构在整车运动的带动下，侵入速度也较大。

三个测量点侵入量见图 10，分别为 61.5 mm，58.8 mm，48.1 mm。

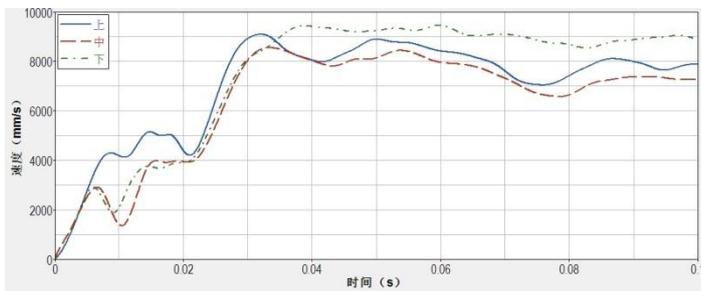


Figure 9. Intrusion velocities of 3 gauging points at side structure  
图 9. 侧面结构 3 个测量点侵入速度

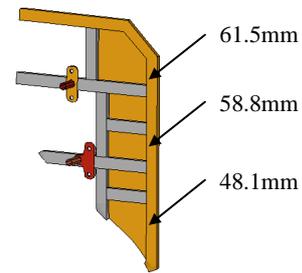


Figure 10. Intrusion of 3 gauging points at side structure  
图 10. 侧面结构 3 个测量点侵入量

#### 4 实车侧碰试验

在该微型电动汽车样车上安装了上述侧面结构,按照 GB 20071-2006 的要求,在驾驶员位置放置了一个 ES-2 假人, 并按照国标的假人定位要求对假人各部位的位置进行了调整,调整好位置如图 11 所示。



Figure 11. Dummy position adjusting  
图 11. 假人位置调整



Figure 12. Deformable barrier  
图 12. 可变形壁障

试验采用了移动可变形壁障,它主要包括碰撞块和移动车两部分,质量应为  $950 \text{ kg} \pm 20 \text{ kg}$ , 如图 12 所示。碰撞块由连接在一起的 6 个蜂窝铝块构成,分成上、下两个组,下部一组的高度是 250 mm,厚度是 500 mm,比上部多 50 mm。碰撞块的前面板宽  $1500 \pm 1 \text{ mm}$ ,高  $250 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ,试验前要进行预压紧处理。



Figure 13. Deformation of vehicle body after test

图 13. 试验后车身变形

标准规定在撞上车辆的一瞬间，MDB 速度应为  $50 \pm 1$  km/h，本次试验 MDB 的实际速度为 49.49 km/h。碰撞过程中，车身骨架变形很小，保持非常好的完整性，碰撞结束后的车身变形效果如图 13 所示。

侧面结构的弯曲变形很小，只有前端向内弯曲了一点，和仿真结果比较吻合，见图 14。

仿真和试验的蜂窝铝变形对比如图 15 所示，两者总体也比较接近。由于在整车碰撞仿真中未放置假人，仿真中蜂窝铝变形较小，而试验中蜂窝铝撞击假人的腿部，产生了较大的塑性变形。

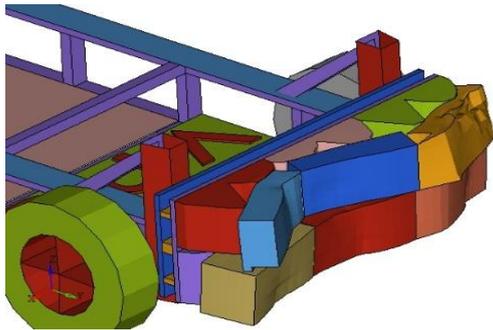


Figure 14. Deformation of side structure

图 14. 侧面结构变形



Figure 15. Barrier deformation comparison between simulation and test

图 15. 仿真和试验壁障变形对比

试验中，在仿真模型中侧面结构的相同位置上布置了三个加速度传感器，测得各点侵入速度历程曲线如图 16 所示，略高于仿真结果，最大值为 9.96 m/s。

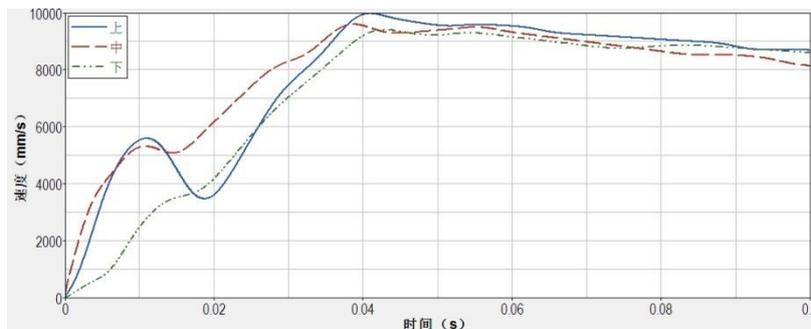


Figure 16. Intrusion velocities of 3 gauging points in test

图 16. 3 个测量点试验侵入速度

上、中、下 3 个测量点侵入量对比见表 1，误差在 10% 以内，在工程允许误差范围之内，说明建立的整车侧面碰撞仿真模型能够用于侧面结构的防护效果评价和后续结构改进评估。

Tab.1 Intrusion comparisons between simulation and test

表 1. 仿真和试验侵入量对比

位置	仿真侵入量 (mm)	试验侵入量 (mm)	误差
上	61.5	64.2	4.4%
中	58.8	63.4	7.8%
下	48.1	52.6	9.4%

总体而言，车身骨架、侧面结构在仿真和试验中的变形模式一致性较好，侵入速度曲线也比较接近，侵入量误差控制在 10% 以内。由于仿真没有加入假人，蜂窝铝上局位置的侵入量比实车试验中的略大，但不影响对侧面结构的强度分析。侧面结构的强度设计满足预期要求，抵抗 MDB 进入驾驶舱效果还不错。

## 5 侧碰结构优化

### 5.1 优化设计方案

侧面结构初步设计方案的刚度充足，基本符合要求，试验过程中但仍然存在一些问题：1) 假人胸部肋骨变形量超出国标规定值，需要进一步降低侧面结构的侵入量，匹配门内饰板的刚度设计来改善假人伤害值；2) 侧面结构涉及制作的零部件较多，而且不容易安装定位，稍有偏差则容易和原结构发生干涉；3) 为了避免干涉需破坏侧面结构中方管合理分布，对假人关键部位覆盖防护范围不足。

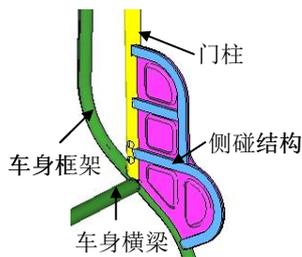


Figure 17. Optimization design of side structure

图 17. 侧面结构优化设计



Figure 18. Deformation comparison of side optimized structure before and after side crash

图 18. 侧面优化结构侧碰前后变形对比

针对上述不足之处，本文提炼了侧面结构的优化设计要求：1) 采取结构加强措施，更多地减少侵入量；2) 尽量精简结构，减少零件数量，而且要安装方便；3) 增大对假人的覆盖面积，确保不与原车结构发生干涉、不会对乘员进出驾驶舱造成影响。最终，提出了侧面结构的优化设计方案，仍旧以  $30\text{mm} \times 12\text{mm} \times 1.8\text{mm}$  的方管作为主体，如图 17 所示。

### 5.2 优化结构特点

相比第一次设计方案，优化结构的特色点主要体现在：1) 用一根厚度为 2.0 mm 的圆管代替原来的钢板梁结构，并将其作为侧面结构的安装固定位置，这样不会影响原车部件的安装，既降低了框架结构受到的弯矩，又去掉座椅后背的中部支撑梁，简化了结构设计、制造和安装；2) 取消了侧面结构分块钢板组拼方式，采用一块整体的钢板，厚度为 1.5 mm，其防止 MDB 蜂窝铝侵入的效果更好；3) 结构下部增加了圆弧轮廓，增大了对假人上半身的覆盖面积而不会干扰乘员的进出，可以更好地对假人髋部进行保护。

### 5.3 侧面碰撞仿真

对侧面结构优化方案建立相应的有限元模型，经仿真运算和结果后处理，可见侧面优化结构的塑性变形比较稳定，见图 18。

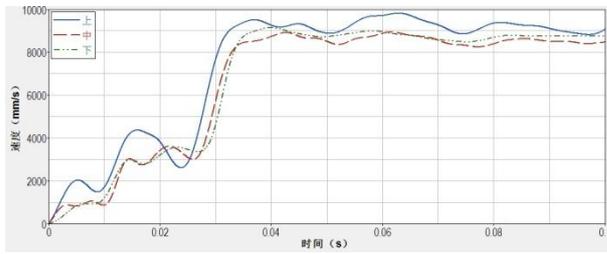


Figure 19. Intrusion velocities of 3 gauging points at side optimized structure in simulation  
图 19. 侧面优化结构三个测量点仿真侵入速度

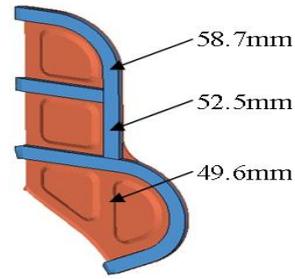


Figure 20. Intrusion of 3 gauging points at side optimized structure in simulation  
图 20. 侧面优化结构三个测量点仿真侵入量

同样在侧面优化结构上选取了上、中、下 3 个测量点，对应于假人胸部、腹部、髋部位置，测量侧面结构不同位置的侵入速度，如图 19 所示，3 个测量点侵入速度最大值大约为 9.6 m/s。3 个测量点的侵入量如图 20 所示，分别为 56.7 mm，52.5 mm，49.6 mm。

#### 5.4 内饰板

基于内饰板多目标优化和冲击试验验证结果，对内饰板的参数也进行了重新调整，胸部内饰板厚度改成了 42 mm，刚度调整为原来的 60%，骨盆内饰板的厚度改为 55 mm，刚度调整为原来的 110%，并将内饰板材料由吸能泡沫改为某个型号蜂窝铝。蜂窝铝是一种新型轻质夹层结构，在航空航天、现代交通等行业中得到广泛运用<sup>[9]</sup>。蜂窝铝质量小，吸能能力强，波形的平台区比较稳定<sup>[10]</sup>，且制造工艺简单、成本不高，对于微型电动汽车而言，具有不错的应用前景。相比起吸能泡沫，它的可压缩变形的距离更大，如此蜂窝铝内饰板厚度的利用率更充分。调整好蜂窝铝内饰板的参数之后，将其安装到样车的侧面结构上实施实车侧面碰撞试验。

#### 5.5 实车侧面碰撞试验

在实车上按照优化设计方案试制并安装了侧面优化结构，进行了第二轮的侧面碰撞试验，测得 MDB 碰撞速度为 49.72 km/h，同时结果后处理得到侧面优化结构上 3 个测量点侵入速度曲线，如图 21 所示，相比同位置的仿真侵入速度略增加了一点。

侧面优化结构上三个测量点的试验侵入量如表 2 所示，分别为 57.8 mm，53.7 mm，54.2 mm，与第一次侧面结构试验结果相比，除了最下边点略微增加，总体上略有降低。

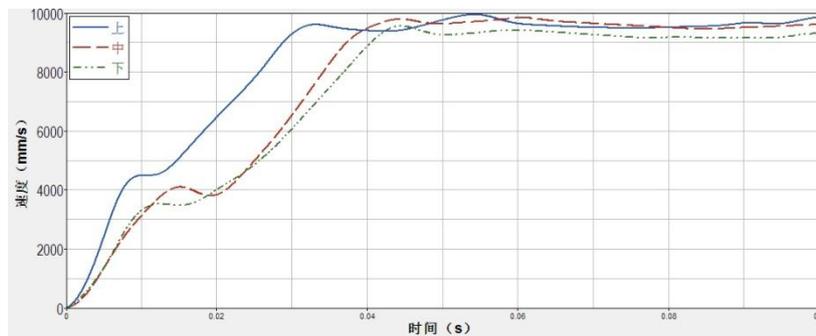


Figure 21. Intrusion velocities of 3 gauging points at side optimized structure in test  
图 21. 侧面优化结构三个测量点试验侵入速度

**Tab.2 Intrusion comparison of optimized structure and original structure in test**  
**表 2. 优化结构和原结构试验侵入量对比**

位置	第一次结构侵入量 (mm)	优化结构侵入量 (mm)	改善效果
上	64.2	57.8	+10.0%
中	63.4	53.7	+15.3%
下	52.6	54.2	-3.0%

与此同时，侧面碰撞试验过程中假人各部位伤害指标实测结果见图 22，所有伤害值均满足 GB20071- 2006 的技术要求。

Protection Criteria	Unit	High PL	Low PL	Actual Value	Criteria passed		
					H	L	
<b>Head:</b>							
A3ms-Value head (cumulativ)	[g]	< 64	< 80	56.16	---	yes	yes
HIC36 Value	[1]	1000		228	50.0-65.0 [ms] CFC1000, dt=15.0 [ms]	yes	
<b>Chest:</b>							
UP : Rib Deflection (RDC)	[mm]	42		39.6	53.5 [ms] CFC180	yes	
MI : Rib Deflection (RDC)	[mm]	42		36.2	51.5 [ms] CFC180	yes	
LO : Rib Deflection (RDC)	[mm]	42		33.8	49.0 [ms] CFC180	yes	
UP : VC-Value Chest Rib	[m/s]	1		0.4450	43.5 [ms] Dummy type: ES-2; CFC180	yes	
MI : VC-Value Chest Rib	[m/s]	1		0.3562	44.1 [ms] Dummy type: ES-2; CFC180	yes	
LO : VC-Value Chest Rib	[m/s]	1		0.2950	54.9 [ms] Dummy type: ES-2; CFC180	yes	
<b>Abdomen:</b>							
Sum of Abdominal Forces (APF)	[kN]	2.5		1.124	40.9 [ms] CFC600	yes	
<b>Pelvis:</b>							
Pubic Symphysis Force (PSPF)	[kN]	6		3.218	43.0 [ms] CFC600	yes	

**Figure 22. Injury value of dummy in side crash**

**图 22. 侧碰试验中假人伤害值**

微型电动汽车生产厂家若以满足国家标准作为设计目标，针对类似的骨架式车身，可借鉴或采用本文的优化设计方案进行结构改进设计，这对于微型电动汽车的生产工艺成本上升是可控的，而对于汽车侧面碰撞安全品质的提升是非常可观的。

## 6 总结

本文针对某款微型电动汽车的侧面结构特点，简要介绍了微型电动汽车碰撞安全结构现状，结合数值仿真计算和侧碰试验验证，巧妙设计了侧面碰撞防护结构，可为乘员提供有效的侧面碰撞保护。两轮 50km/h 侧碰仿真计算和侧碰试验结果分析，不管是否进行优化设计，汽车车身整体框架和侧面防护结构在侧碰过程中变形均较小，这得益于微型电动汽车轴距短，移动变形壁障正好撞到前后两个轮子，将微型电动汽车整体推开，但侧面安全结构最大作用在于它能够较好地抵抗移动可变形壁障侵入驾驶室造成乘员伤害，为侧面结构内饰板的刚度匹配设计提供了空间。

侧面结构优化设计既简化了侧面机械结构，降低了试验假人伤害值，而且减少了驾驶室的壁障侵入量。该侧面优化结构设计的提出，有助于解决类似结构的微型电动汽车侧面碰撞安全薄弱问题，工艺可实施性强，只要匹配好侧面防护结构的内饰件刚度，即可满足侧面碰撞的国标要求，有效提升侧面碰撞安全性。

## 参考文献(References)

- [1] TIAN M.E. *Necessity and trend of developing electric vehicle in China*. Journal of Xi an Shiyou University (Natural Science Edition), 2010, 25(5): 89-91.  
田美娥. 我国发展电动汽车的必要性与趋势. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2010, 25(5): 89-91.
- [2] YANG J. *The research on the safety of electric vehicle*. Changsha: Hunan University, 2005.  
杨剑. 电动汽车的安全性分析. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [3] Whirley R G, Engelmann B E. *Electric and hybrid vehicle crashworthiness simulation*. International Journal of Vehicle Design, 1997, 18(5): 413-432.
- [4] Lim J M, Kim G H. *Crash protection of hybrid electrical vehicles for amending the KMVSS No.91*. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(6): 825-830.
- [5] ZHU X. C. *Crashworthiness and safety design of electric vehicle*. World Auto, 1998(4): 9-11.  
朱西产. 电动汽车的碰撞性能和安全性设计. 世界汽车, 1998(4): 9-11.
- [6] Standardization Administration of the People's Republic of China. *GB 20071-2006, The protection of the occupants in the event of a lateral collision*. National Standards of P. R.C., 2006: 1-67.  
中国国家标准化管理委员会. *GB 20071-2006 汽车侧面碰撞的乘员保护*. 中华人民共和国国家标准, 2006: 1-67.
- [7] SHEN H.D., ZHU D. Y., and JIANG J. L. *A study on car side structure design aimed at occupant protection in side impact*. Automotive Engineering, 2009, 31(8): 765-768.  
沈海东, 朱大勇, 姜峻岭. 旨在侧面碰撞乘员保护的轿车侧面结构设计研究. 汽车工程, 2009, 31(8): 765-768.
- [8] WANG D. Z., YU C. Y. *Frontal crashworthiness structure design of mini electric passenger cars*. Journal of Automotive Safety and Energy, 2010, 1(1): 49-52.  
王大志, 于成祥. 微型电动汽车正面碰撞结构耐撞性设计. 汽车安全与节能学报, 2010, 01(1): 49-52.
- [9] CAI M., GAO Q., and ZONG Z. J. *Energy absorption properties of honeycomb structured aluminum under axial compression*. Journal of Material Science and Engineering, 2015, 33(5): 675-679. 蔡茂, 高群, 宗志坚. 铝合金蜂窝结构轴向压缩吸能特性. 材料科学与工程学报, 2015, 33(5): 675-679.
- [10] WANG Z. G. LU Z. J. *Experimental assessment on energy absorption property of aluminum honeycomb under out-of-plane compression*. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(3): 1246-1251.  
王中钢, 鲁寨军. 铝蜂窝异面压缩吸能特性实验评估. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(3): 1246-1