

# A Study on Side Impact Simulation Test Method Based on Accelerator Sled

Peng ZHANG<sup>1</sup>, Huowang WAN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>China Automotive Engineering Research Institute Co.,Ltd., Chongqing, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Technology, Chongqing, China

Email: zhangpeng01@caeri.com.cn

**Abstract:** Side impact test plays an important role in vehicle safety evaluation, but it has high cost and long cycle, which brings inconvenience to rapid optimization and design of related parameters of the constraint system. So this paper proposes a side impact simulation test method based on accelerator sled. This method uses the relative motion of the sled and the honeycomb to simulate the speed curve of the door and the vehicle respectively. At the same time, it solves the engineering problem that cannot be simulated by the equipment caused by the excessive acceleration of the door. The test results show that the accuracy of this method is controllable and highly consistent with the vehicle test, and the method has simple structure, low cost and convenient maintenance, and can quickly conduct the verification and optimization of side impact test, providing strong support for the optimization design of side impact restrict system.

**Keywords:** Sled; Side impact; Honeycomb; Restraint system

# 一种基于加速台车的侧面碰撞模拟试验方法研究

张 鹏<sup>1</sup>, 万火旺<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆, 中国, 401122

<sup>2</sup>汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室, 重庆, 中国, 401122

Email: wanhuowang@caeri.com.cn

**摘要:** 侧面碰撞试验在汽车安全评价中占据重要地位, 但整车侧面碰撞成本高, 周期长, 对于快速优化和设计约束系统相关参数带来不便。因此本文提出了一种基于加速台车的侧面碰撞模拟试验方法。该方法利用台车和蜂窝铝的相对运动, 分别模拟出车门和车辆的速度曲线, 同时通过波形等效解决了因车门加速度过大导致的设备无法模拟的工程问题, 设计了车门工装, 并进行了试验验证。试验结果表明, 该方法精度可控, 与整车试验符合性较高, 且该方法结构简单, 成本低廉, 维护便捷, 可快速进行侧面碰撞试验的验证、优化等工作, 为侧面碰撞约束系统的优化设计提供有力支撑。

**关键词:** 台车, 侧面碰撞, 蜂窝铝, 约束系统

## 1 引言

侧面碰撞试验在汽车安全评价中占据重要地位, 在 C-NCAP、E-NCAP、C-IASI 等国内外试验标准中均要进行侧面碰撞试验, 可见侧面碰撞试验对汽车安全起着至关重要的作用<sup>[1-4]</sup>。但对于整车侧面碰撞, 其试验成本高, 周期长, 对于快速优化和设计约束系统相关参数带来不便。为解决该问题, 利用台车模拟整车侧面碰撞试验一直是研究者们追求的目标, 国内外也进行了广泛研究。当前常见的台车侧面碰撞测试有: 减速台车方法、车门预变形方法、sled to sled 方法, on sled 方法、off sled 方法等等<sup>[5-8]</sup>。而在以上方法中, 减速台车精度较高, 但周期长, 成本高, 且依赖测试人员的经验程度较高, 行业使用较少; 车门预变形和 sled to sled 方法准备周期长、过程复杂, 一致性也不够高, 目前也较少采用; off sled 和 on sled 方法均可借助现有台车进行试验, 周期短、效率高, 目前行业较多采用这两种方式进行试验。但基于这两类方法衍生的试验方法也存在多种模式且特点不

一，因此如何实现基于加速台车的侧面碰撞试验，且将精度、效率、成本融合统一，是十分有必要讨论和解决的问题。

## 2 侧面碰撞试验的关键因素及方案设计

在整车侧面碰撞过程中，影响假人伤害的主要因素有：门的屈服性、入侵侧结构的形状和座椅的相互作用、门与假人的接触速度以及从假人接触开始后门的速度分布<sup>[7]</sup>。对于台车侧面碰撞，通过合理设计工装夹具可还原整车的乘员空间状态，使得门的屈服性以及零部件的结构形状可得到有效保证。因此，难点在于如何保证门与假人的接触速度以及假人的速度分布，即如何模拟车门的入侵速度和车辆的速度。

对于车门入侵速度的模拟通常分为两类，一类是单一速度模拟，另一类是多速度模拟。对于车门的入侵速度，其不同位置（胸部、腹部、骨盆、膝部）的速度分布并不相同，理论上要想获得更加精准的假人伤害响应，应对车门不同位置的速度进行全面模拟。多速度模拟虽能更好的模拟整车侧面碰撞，但需多个冲击器共同作用，完成多个速度的模拟，其结构和控制系统均较为复杂，设备、使用和维护成本较高<sup>[8-12]</sup>。而单一速度模拟，虽无法达到多速度模拟的精度，但其结构简单，维护成本和试验成本低<sup>[1-16]</sup>。因此，本文选择单一速度模拟进行台车侧面碰撞试验。

车门入侵速度的模拟通常有两种方式，一是通过简化的避障，以规定的速度去撞击车门，从而自然形成车门的速度分布，该方法需单独设计侧面碰撞撞击用的避障，且不易保证车门的入侵速度曲线与整车一致；二是通过加速台车直接生成车门的速度分布，由于加速台车为伺服控制系统，容易得到精确的速度曲线<sup>[17]</sup>。因此本文选择加速台车直接生成车门入侵的速度曲线，则可与整车侧面碰撞的工况更加吻合。

对于车辆的速度模拟，通常采用蜂窝铝的方式进行，利用蜂窝铝材料的线性属性，选择不同面积的蜂窝铝，可快速模拟出侧面碰撞时的车辆速度<sup>[13]</sup>。

## 3 测试方法

### 3.1 基本原理



1.加速冲击杆; 2.车门装配工装; 3.车门; 4.蜂窝铝; 5.座椅及假人; 6.座椅固定工装; 7.二级滑台; 8.滑轨; 9.阻尼器; 10.滑台; 11.伺服制动装置; 12.地面

Figure 1. Schematic diagram of the sled side impact system

图 1 台车侧面碰撞系统原理图

本测试系统的基本原理如图 1 所示。首先，输入车门入侵的加速度波形给加速台车，冲击杆 1 通过气压装置冲击滑台 10，滑台 10 在伺服制动装置 11 的作用下，按给定的加速度曲线向前运动，并带动车门内板一并向前运动（车门内板 3 固定在车门装配工装 2 上，车门装配工装与滑台 10 固接）。理论上车门工装 2 与滑台 10 固接，为减小车门工装的局部变形及振动导致的运动误差，车门工装的强度刚度设计需预留较大的安全系数，因此若忽略工装导致的误差，可认为滑台的速度等效为车门内板的速度，从而实现车门按给定的速度入侵座椅及假人。其次，蜂窝铝 4 放置于滑台平面之上，二级滑台 7 之前且二者高度相当；座椅 5 通过座椅固定工装 6 固定在二级滑台 7 上，滑轨 8 固定在滑台上，二级滑台可在滑轨上左右滑动，阻尼器 9 固定在滑轨尾部，可防止二级滑台冲出滑轨，保护设备。试验时，将假人放置在座椅上，蜂窝铝随滑台一并向前运动，二级滑台在受到蜂窝铝撞击后带动座椅及假人在滑轨上向前运动，从而模拟整车侧面碰撞后车辆的速度。同时蜂窝铝面积可调，其与二级滑台之间的距离可调，以实现二级滑台在不同时间受到不同推力的作用，进而根据需要动态调整车辆速度。

## 3.2 车门波形等效

理论上，只需将车门加速度波形输入，便可自动得到车门的速度曲线。实际上，整车波形加速度过大，台车无法模拟。如图 2-a 所示为某车型侧面碰撞时的车门胸部加速度曲线，若按实际曲线输入，则需要滑台从 0-13ms 内加速到正向加速度峰值约 162g，紧接着又在约 9ms 的时间内从正向的 162g 变为负向的 70g，加速度绝对值为  $162+70=232\text{g}$ ，加速度过大，远远超过设备的最大能力（小于 90g），因此需要进行波形等效，且等效后的波形不能影响试验结果。

在侧面碰撞实验过程中，引起假人伤害的主要因素是车门和 B 柱的入侵量，而入侵量又由入侵速度（加速度积分，如图 2-b）直接决定，因此将优化加速度曲线渐而转化为优化速度曲线。

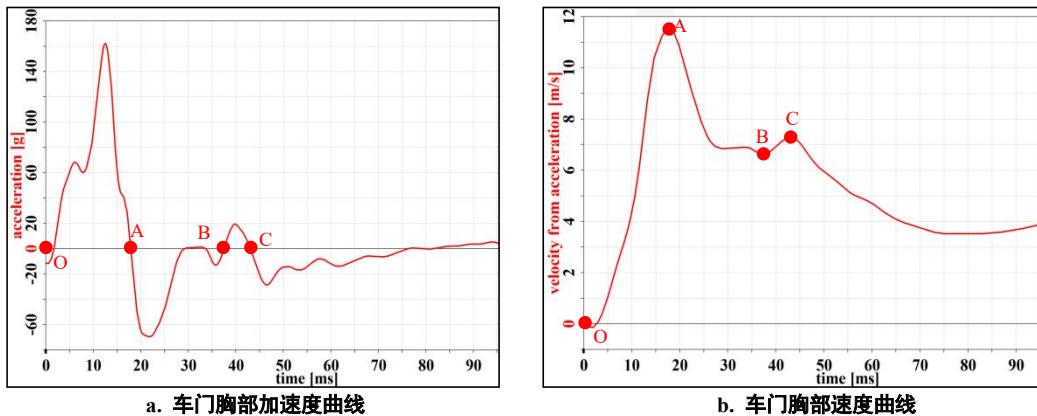


Figure 2. Vehicle side impact door chest acceleration curve and speed curve

图 2 整车侧面碰撞车门胸部加速度曲线和速度曲线

### 3.2.1 OA 段波形等效

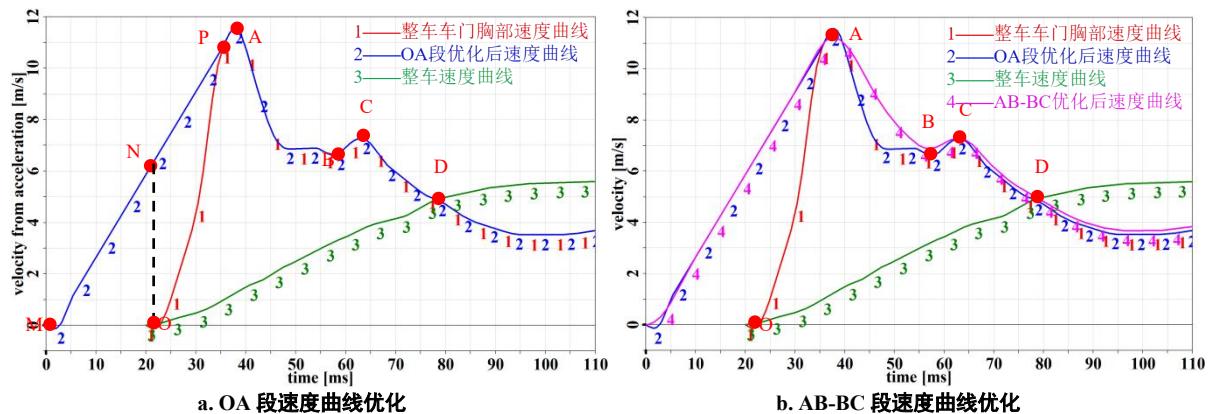


Figure 3. Door chest speed optimization curve

图 3 车门胸部速度优化曲线

车门与假人的接触出现在 A 点之前，优化 OA 段的速度不会对假人伤害造成影响<sup>[18]</sup>。OA 段是引起加速度峰值的主要因素。但是，OA 段的时间历程太短，而速度峰值是影响入侵量的关键因素不能降低，因此理论上 OA 段的加速度无法降低。但是，从文献可知，可对 OA 段的时间历程进行延长，使台车以更长的时间加速到峰值，从而降低加速度峰值。但延长后的加速度峰值会导致车门的入侵位移增加，因此需增加车门与座椅之间的距离，从而抵消增加的入侵位移，即让车门经历一段空行程，保证入侵量不变。

如图 3-a 所示，车门与座椅的入侵量为二者速度曲线积分的位移差，即 O-A-B-C-D 围成的面积 S。同理可知，O-M-N 围成的面积为新增的入侵位移 S1，O-M-P 围成的面积为蜂窝铝与二级滑台的距离 S2，O-P-N 围成的面积为门板与座椅增加的距离 S3，显然， $S_2+S_3=S_1$ 。由此，通过增加车门空行程的方式即保证了入侵量不会改变，同时又极大的降低了加速度曲线的正向峰值。

### 3.2.2 AB-BC 段波形等效

AB 段和 BC 段速度的细微变化，对假人的伤害也影响不大<sup>[18]</sup>，因此，对这一段速度曲线进行优化，可通过台车控制软件手动调整，如图 3-b 所示，紫色为调整后的速度曲线，与实际速度曲线相差甚小，在保证实验结果的情况下，进一步降低加速度曲线的负向峰值。

从图 4-a 可以看到，优化的加速度曲线正向峰值由 162g 降低到 38g 左右，而负向峰值由最大的 70g 降低到 -37g 左右，正负峰值均大大降低，设备台车可模拟，大大降低台车的模拟难度，在保护设备的同时，速度曲线和位移曲线均可保证，从而有效保证实验的顺利开展。

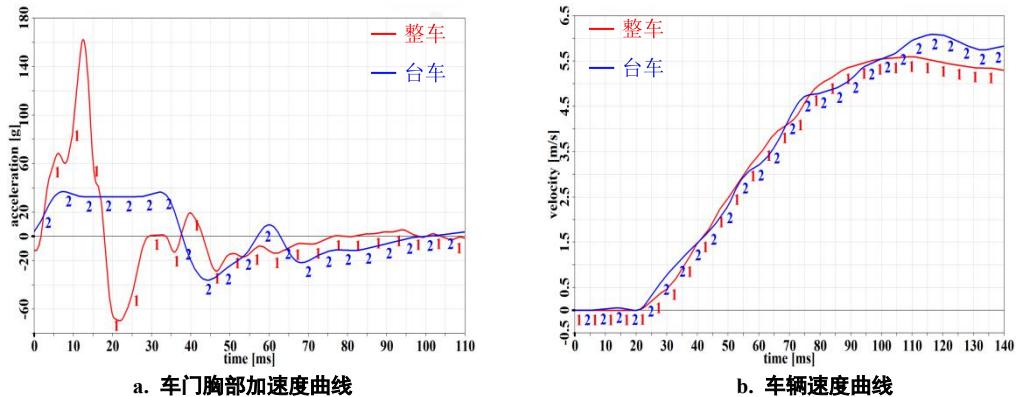


Figure 4. Door acceleration curve and vehicle speed curve before and after optimization

图 4 优化前后车门加速度和车辆速度曲线

### 3.3 车辆速度曲线的模拟

OD 曲线为车辆在被撞击后的速度曲线，采用蜂铝可很好的模拟的出车辆的速度曲线，由于蜂窝铝在被撞击后基本呈线性趋势变化，因此，一般在 2-3 次测试后，便可较好的得到车辆的速度曲线，如图 4-b 所示。

## 4 试验验证



Figure 5. Sled side impact rig

图 5 台车侧面碰撞工装

本次研究选择 C-IASI 中 50 km/h 侧面碰撞工况来进行验证。如前所述的测试方法，我们设计了对应的工装夹具进行试验，如图 5 所示。C-IASI 侧面碰撞测试采用 SID-IIIs 型假人，本次试验未考虑安全带(图 5 中橙色织带为假人保护带，非安全带)和侧气帘的影响，但在侧面碰撞中座椅侧面气囊对假人肩部及以下部位的伤害有较大影响<sup>[19]</sup>，因此台车带座椅侧面气囊进行试验，试验后得到了假人伤害的关键参数。

假人伤害从两个维度进行评价，一方面对峰值进行归一化处理，误差在±20%为可接受，另一方面，对曲线时间历程的符合程度进行评价<sup>[13]</sup>。

## 4.1 归一化评价

所谓归一化处理，即将台车测量得到的假人伤害除以整车的假人伤害得到的百分比。从图 6 可知，假人伤害的关键参数误差基本都在 $\pm 20\%$ 左右。具体的，头部 X 向加速度峰值误差在 19% 左右，而 Y 和 Z 向加速度误差均在 12% 左右；肩部力的峰值误差在 12% 左右，肩部位移的峰值误差在 19% 左右；胸部和腹部位移在侧面碰撞中是较为关键的参数之一，在 C-IASI 侧面碰撞中，主要考察胸部和腹部位移的平均值，经计算得胸部和腹部的平均位移误差为 16.5% 左右。髋骨力和髂骨力的误差相对较大，分别为 24% 和 28% 左右，这是因为本次试验模拟的是车门胸部位置的加速度曲线，而骨盆区域的加速度曲线与胸部位置的加速度曲线存在一定差异，因此不能较好的模拟骨盆位置的伤害。由此可见，台车侧面碰撞的假人伤害峰值与整车是比较接近的，精度可接受。

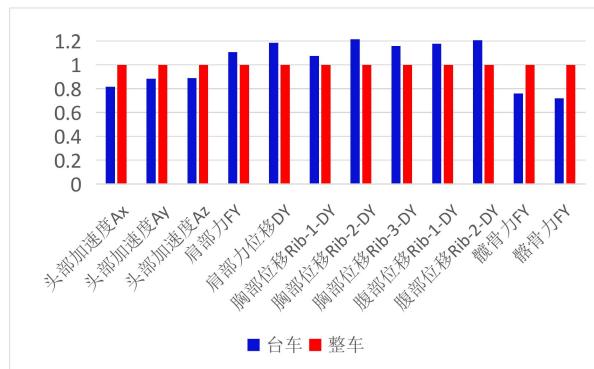


Figure 6. Unitary processing about the key parameters of the dummy

图 6 假人伤害关键参数归一化对比

## 4.2 曲线时间历程评价

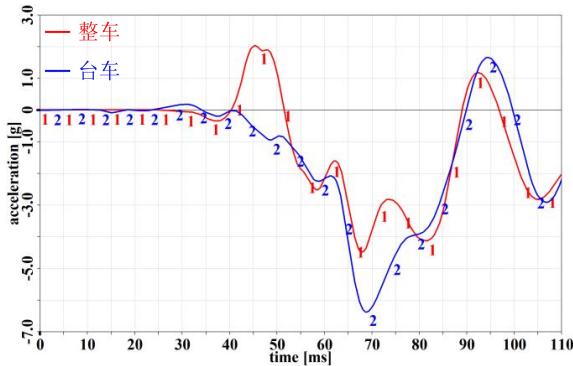


Figure 7. Head acceleration Ax

图 7 头部加速度 Ax

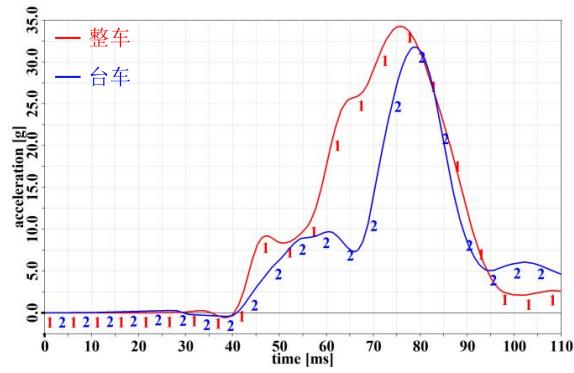


Figure 8. Head acceleration Ay

图 8 头部加速度 Ay

除了对峰值参数的归一化对比以外，还需要进行各关键参数的趋势对比与分析。如图 7~图 9 所示，头部加速度除 Ax 误差稍大以外，Ay 和 Az 的整体走势以及峰值出现的时间都非常接近，而 Ax 在侧面碰撞中的峰值较低，对假人头部伤害的贡献较小，因此可基本忽略 Ax 的误差。

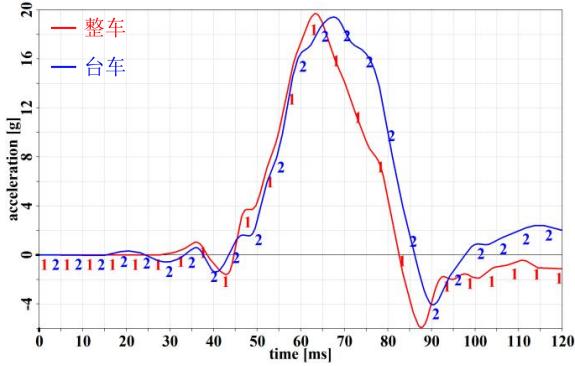


Figure 9. Head acceleration Az

图 9 头部加速度 Az

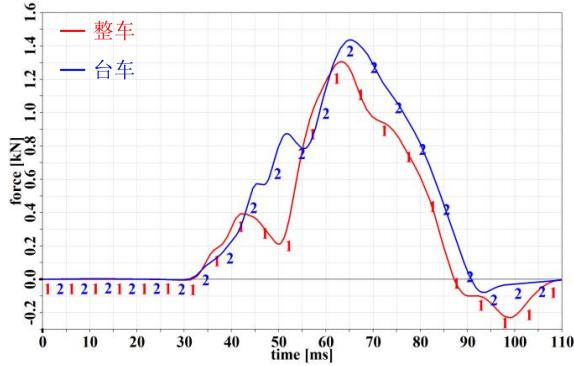


Figure 10. Shoulder force Fy

图 10 肩部力 Fy

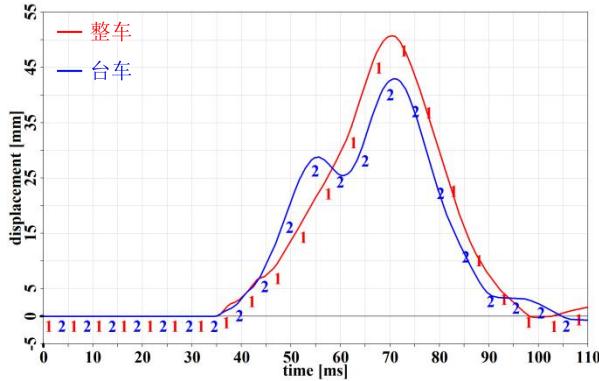


Figure 11. Shoulder displacement

图 11 肩部位移

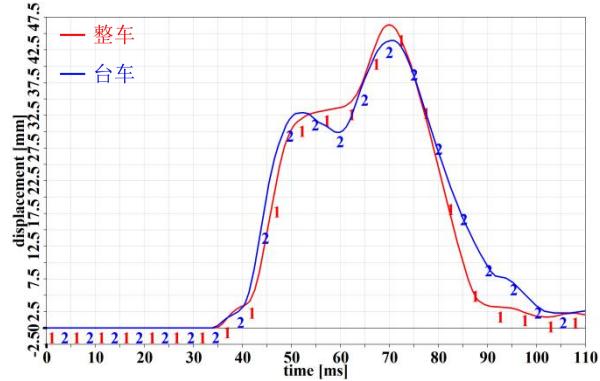


Figure 12. Chest displacement 1

图 12 胸部位移 1

如图 10 和图 11 所示，假人肩部力和肩部位移的总体曲线历程符合度较高。其中，台车肩部力的峰值时间为 65ms 左右，整车为 62.5ms 左右，误差约 2.5ms；肩部位移的峰值时间台车与整车基本相同，精度较高。

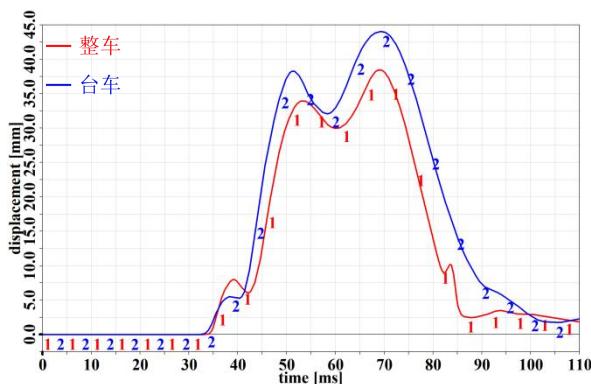


Figure 13. Chest displacement 2

图 13 胸部位移 2

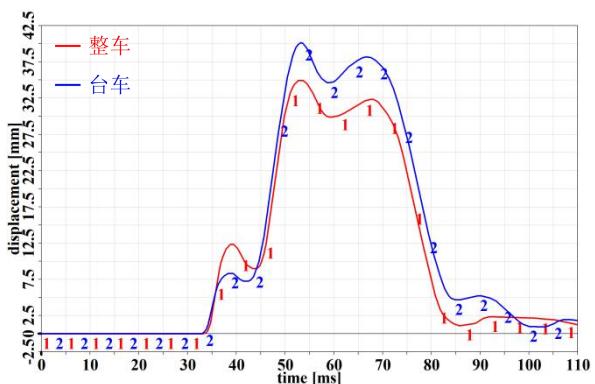


Figure 14. Chest displacement 3

图 14 胸部位移 3

胸部位移和腹部位移通常由于受到侧面气囊冲击和车门内饰的影响伤害通常较大。其中，胸部位移 1 和胸部位移 2 最直接受到侧气囊和车门内饰的作用，因此更加容易超出标准规定的限制。从图 12 到图 16 可看出，台车胸部位移和腹部位移呈现整体偏大的趋势，但误差基本在 20% 以内，满足精度要求<sup>[13]</sup>。同时，胸部和腹部位移的峰值时间符合度较高，这反应出台车侧面碰撞后的假人在胸部区域的运动姿态与整车基本一致。

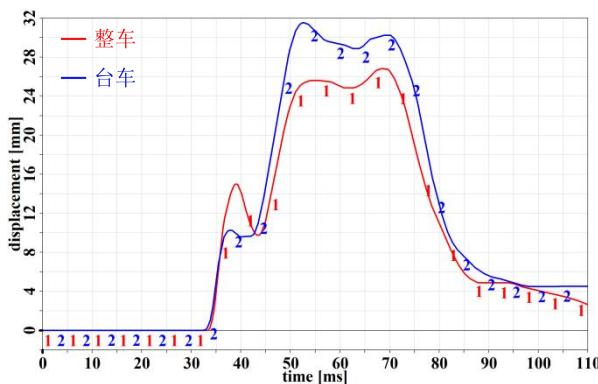


Figure 15. Abdominal displacement 1

图 15 腹部位移 1

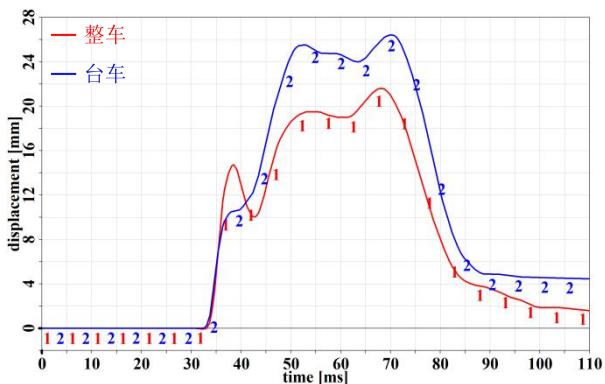


Figure 16. Abdominal displacement 2

图 16 腹部位移 2

髋骨力及髂骨力趋势对比如图 17 和图 18 所示, 由于台车模拟的是车门胸部位置的速度曲线, 而髋骨与髂骨距离胸部位置的距离相对更远, 因此其速度差异更大, 因此台车与整车的时间历程符合程度相对更差, 但总体趋势和峰值时刻仍能一定程度的反应整车侧面碰撞时在该区域的运动姿态和伤害大小。

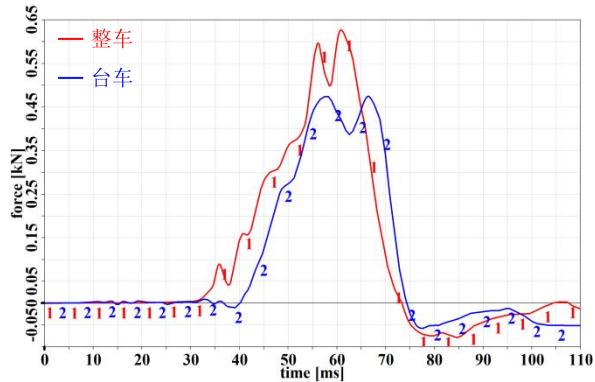


Figure 17. Public force Fy

图 17 髋骨力 Fy

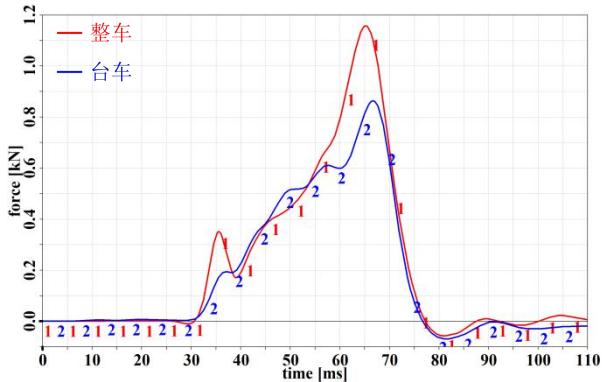


Figure 18. Iliac Force Fy

图 18 髂骨力 Fy

以上分别展示了头部、肩部、胸部和骨盆位置的关键参数曲线对比, 从对比曲线可以看出, 各参数的曲线历程与整车碰撞基本一致, 精度可控。

## 5 结论

本文基于加速台车提出了一种侧面碰撞的试验方法。本文采用波形等效的方法和蜂窝铝材料分别模拟了车门的入侵速度和车辆的运动速度, 从而有效解决车门与假人的接触速度以及假人的速度分布的难点问题。在此基础上, 设计了一套完整的基于加速台车的侧面碰撞装置, 并以 C-NCAP 规程下的侧面碰撞为例进行了试验验证。试验结果表明, 关键参数的峰值和时间历程曲线与整车吻合度较高, 精度可控。该方法结构简单, 可快速、低成本的有效验证整车方案, 也可在同类加速台上加以运用, 具有较强的扩展性。但该方法依然存在诸多不足, 一方面未考虑安全带和侧气帘的影响, 另一方面仅能模拟单一的车门速度, 试验验证的全面性相对不足, 后期需重点在这两个方面加以改进, 可更大程度的提升试验精度。

## 参考文献 (References)

- [1] C-NCAP MANAGEMENT REGULATION (2024 EDITION) [S/OL].<https://www.c-ncap.org.cn>, 2024.
- C-NCAP 管理规则 (2024 版) [S/OL].<https://www.c-ncap.org.cn>, 2024.
- [2] Side Impact Mobile Deformable Barrier Testing Protocol(Version 8.2.1)[S/OL]. <http://www.euroncap.com>, 2023
- [3] Vehicle Occupant Safety Index Side Impact Crash Test Protocol(2023 EDITION)[S/OL].<http://www.ciasi.org.cn>, 2023.

- 车内乘员安全指数侧面碰撞试验规程(2023 版)[S/OL].<http://www.ciasi.org.cn>,2023.
- [4] Vehicle Occupant Safety Index Side Impact Crash Rating Protocol(2023 EDITION)[S/OL].<http://www.ciasi.org.cn>,2023.
- 车内乘员安全指数侧面碰撞评价规程(2023 版)[S/OL].<http://www.ciasi.org.cn>,2023.
- [5] Zhang Jinhuai,Li Kerui,Ma Chunsheng ,et al.Pre-Crashed door in side impact sled test decices[C].China Automotive Safety Technology International Academic Conference and China Automotive Engineering Society Automotive Safety Technology annual Conference.2008.  
张金换,李可瑞,马春生等.侧面碰撞台车试验系统的预变形车门研究[C]中国汽车安全技术国际学术会议暨中国汽车工程学会汽车安全技术年会.2008.
- [6] Liu Zhixin,Zhang,Xiaolong,Lou Lei,et al.research method of side impact sled test[C].China Automotive Safety Technology International Academic Conference and China Automotive Engineering Society Automotive Safety Technology annual Conference. 2010.  
刘志新,张晓龙,娄磊等.侧面碰撞台车试验方法研究[C].中国汽车安全技术国际学术会议暨中国汽车工程学会汽车安全技术年会.2010.
- [7] Aekbote K , Sobick J , Zhao L ,et al.A Dynamic Sled-to-Sled Test Methodology for Simulating Dummy Responses in Side Impact[C].Sae World Congress & Exhibition.2007.
- [8] Sunyi,Ma Caijun,Jiang Nan,et al.Side pole sled test methodology using ASIS system[J].J Automotive Safety and Energy,2014,5(02):p. 132-138.  
孙奕,马财俊,江南等.基于 ASIS 系统的侧面柱碰台车试验方法[J].汽车安全与节能学报,2014,5(02):p. 132-138.
- [9] Kinoshita A , Shigeno N , Kuniyuki H ,et al.Development of a side impact sled test method using multiple actuators[J].2011.
- [10] Zhang Mengzhou,Fan Pin,Zhang Guiping.A new side impact sled system and its test method are introduced.[J].Shanghai Auto, 2013,5(04):p. 47-50.  
张孟周,樊平,张桂明.一种新型的侧面碰撞台车系统及其试验方法[J].上海汽车, 2013,5(04):p. 47-50.
- [11] Lou Lei,Gu Haiming,He Yonglong ,et al.a device and method for side pole sled test device[P]. Tianjin: CN115343064A,2022-11-15.  
娄磊,顾海明,贺永龙等. 一种侧面柱碰撞台车试验装置及方法[P]. 天津市: CN115343064A,2022-11-15.
- [12] Liu Zhixin,Lou Lei,Shi Yongwan,et al.a test and parameter extraction method for side pole sled test[P]. Tianjin:CN11028597B,2020-12-25.  
刘志新,娄磊,史永万等. 一种侧面柱碰撞台车试验方法及其参数提取方法[P]. 天津市: CN11028597B,2020-12-25.
- [13] Dix J , Lee H , Stein D .A Validated Oblique Pole Sled Test Methodology to Analyze Occupant Response[C]. International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles.2009.
- [14] K. Aekbote , L. Zhao , M. Maltarich , J. Cheng ,et al.A door sub-system sled test methodology for simulation of occupant responses in FMVSS 214 side impact oblique pole test[J].International Journal of Vehicle Safety,2009(03).
- [15] Liao Tianjun,Wang Wenli,Zhao Hui,et al.side impact method for sled test[P].Chongqing: CN110823587B,2021-04-06.  
廖天俊,王文利,赵会等. 侧面碰撞的台车试验方法[P]. 重庆市: CN110823587B,2021-04-06.
- [16] Peng Lingdan,Liao Tianjun,Liu yong,et al.a simulated test equipment for side pole impact sled test[P]. Chongqing: CN115266139A,2022-11-01.  
彭令旦,廖天俊,刘勇等. 一种台车侧面柱碰模拟试验装置[P]. 重庆市: CN115266139A,2022-11-01.
- [17] Hu Lei,Yin Changqing,Li Xiaolei,et al.The Study of AE-MDB Simulation Test Method based on Frontal Crash Simulation Acceleration Sled[C].The 15<sup>th</sup> international forum of automotive traffic safety.2023. Shanghai, China.  
胡雷,尹长青,李筱磊等.基于正碰模拟加速台车的 AE-MDB 侧面碰撞模拟试验方法研究[C].第十五届国际汽车交通安全学术会议.2023.上海, 中国.
- [18] Ma Zhixiong,Zhu Xichan,Tao Ying,et al.study on correlation between door movement and dummy injury response in side impact[J].automobile technology,2010(01):48-52+56.  
马志雄,朱西产,陶颖等.侧面碰撞试验中车门运动与假人伤害响应的相关性[J].汽车技术,2010(01):48-52+56.
- [19] Viano D C , Parenteau C S .Difference in dummy responses in matched side impact tests of vehicles with and without side airbags[J].Journal of Crash Prevention & Injury Control, 2015, 17(5):524-529.