

# Modeling and correlation of seatbelt based on components test

Hua PAN<sup>1</sup>, Kefeng ZHANG<sup>1</sup>

<sup>1</sup>China merchants testing vehicle technology research institute Co.,Ltd, Chongqing, China

Email: cjpanhua@cmhk.com, cjzhangkefeng@cmhk.com

**Abstract:** In order to better match the injury of the dummy in a frontal collision with the sled test, this paper studies the testing method of key components of the seatbelt system and the establishment of LSDYNA finite element simulation model. Including seatbelt webbing elongation test, retractor retraction characteristic test, seatbelt static burst test, seatbelt dynamic verification test, etc. The results indicate that the LSDYNA finite element seatbelt system composed of a sled simulation model, which has been validated through the effectiveness of key component tests, exhibits good consistency between dummy injuries and sled tests. This provides a new technical route reference for high-precision simulation of vehicle occupant protection.

**Keywords:** Vehicle safety; Components test; Seatbelt; correlation

## 基于零部件试验的安全带建模及对标

潘 华<sup>1</sup>, 张科峰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>招商局检测车辆技术研究院有限公司, 重庆, 中国, 401329

Email: cjpanhua@cmhk.com, cjzhangkefeng@cmhk.com

**摘 要:** 为了使汽车正面碰撞中假人的伤害值更能与滑台试验吻合, 本文对安全带系统关键零部件试验方法及其 LSDYNA 有限元仿真模型的建立进行了研究。主要包括安全带织带延伸率试验、卷收器卷收特性试验、安全带静态点爆试验、安全带动态验证试验等。结果表明, 通过关键零部件试验有效性验证后的 LSDYNA 有限元安全带系统组成的滑车仿真模型, 假人伤害与滑台试验有着良好的一致性。为整车乘员保护高精度仿真提供了新的技术路线参考。

**关键词:** 汽车安全; 零部件试验; 安全带; 对标

## 1 引言

汽车被动安全性能的开发主要包括结构耐撞性、乘员约束系统、行人保护三个方面的内容[10]。其中, 约束系统因其配置复杂多变, 直接关系到乘员的损伤而受到主机厂的重点关注, 它主要包括方向盘、安全气囊、转向管柱、安全带、座椅、仪表内饰等。有限元法和计算机硬件的快速发展使得行业内几乎都采用 LSDYNA 软件来进行乘员约束系统的开发。但是, 直接利用 LSDYNA 关键字建模来模拟安全带的卷收器和预紧器特性[2], 不能完整的反映出安全带的物理特性, 这是行业中所关注的难点与焦点。本文提出通过弹簧等离散单元串并联的方式实现安全带的预紧特性和卷收器特性, 并通过关键零部件试验对标后的参数作为安全带系统仿真模型的输入条件[9], 建立 LSDYNA 安全带系统有限元仿真模型的技术路线, 为实现高精度的约束系统滑车建模奠定模块化基础。

## 2 安全带有限元仿真模型建立

汽车安全带系统主要包括卷收器、织带、插锁总成、高调器等[14]。在仿真中, 采用 6 个弹簧单元和 7 个 BEAM 单元串并连组成安全带的卷收器模型, 其中弹簧单元模型采用关键字\*MAT\_DAMPER\_NONLINEAR\_VISCOUS 和\*MAT\_SPRING\_ELASTIC 模拟, BEAM 单元模型采用关键字\*MAT\_GENERAL\_NONLINEAR\_6DOF\_DISC

RETE\_BEAM 模拟[13]。安全带织带采用 1D 安全带单元和 2D 安全带单元混合建模，其中与卷收器连接的那一端采用一段 1D 安全带模拟，其余全部采用 2D 安全带单元模拟[10]。安全带 1D 和 2D 单元模型均采用\*MAT\_SEATBELT 关键字模拟。滑环采用关键字\*ELEMENT\_SEATBELT\_SLIPRING 模拟[3]。建立好的安全带系统仿真模型如下图 1 所示。



Figure 1. Simulation model of seatbelt system

图 1. 安全带系统仿真模型

### 3 安全带系统零部件试验及仿真

在正面碰撞过程中，安全带是直接影响假人伤害的关键子系统之一，由于新开发产品的差异性，需要对每款不同的安全带产品验证相关的力学特性。为了使仿真输出的假人损伤与滑台试验有更高的吻合度，需要做安全带织带延伸率试验<sup>[1]</sup>、卷收器卷收特性试验以及安全带静态点爆试验等来验证安全带系统模型的力学性能<sup>[9]</sup>。

#### 3.1 安全带织带延伸率试验

安全带织带的延伸率不同，所表现出来的刚度特性也会不同，织带延伸率越大，刚度就越小，反之织带延伸率越小，刚度就越大<sup>[1]</sup>。为了得到精确的安全带织带延伸率模型，把织带两端固定在静力拉伸机上，设置拉伸速度 500mm/min。启动拉伸机测量织带张力，然后通过图像分析安全带的变形量得到织带延伸率曲线。将试验获得的力学特性数据作为安全带织带拉伸响应仿真的输入，并与试验结果进行对比来验证安全带建模的有效性。安全带织带延伸率试验与仿真如下图 2 所示，仿真输出的织带力与应变曲线与试验很接近，吻合度很高。

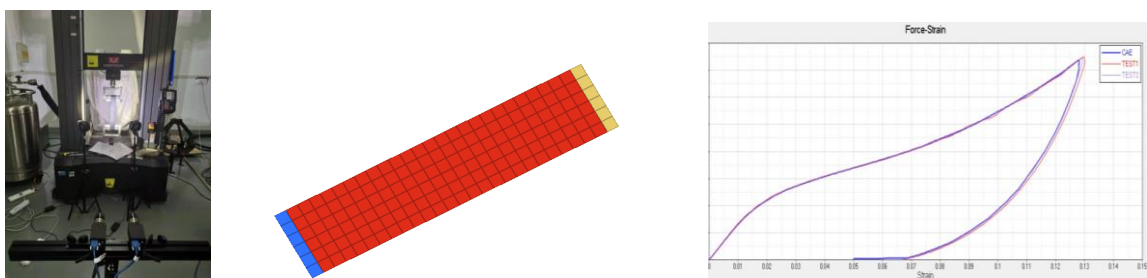


Figure 2. Elongation test and simulation of seatbelt webbing

图 2. 安全带织带延伸率试验与仿真

#### 3.2 卷收器特性试验

将卷收器固定在拉伸机上，织带固定在夹持头上，调整卷收器内残余织带长度分别为 600mm，800mm，1000mm，1200mm，设置拉伸速度 500mm/min，测量织带的位移与张力，得到卷收器特性曲线<sup>[9]</sup>。将试验获得的卷收器力学特性数据作为安全带卷收器模型仿真的输入，与试验对比的结果如下图 3 所示，安全带仿真模型表现出了良好的吻合度。

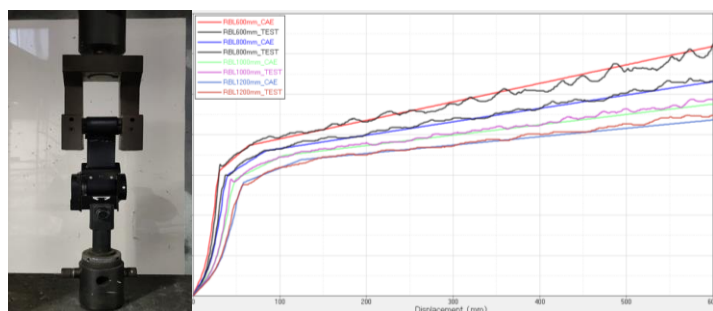


Figure 3. The retractor characteristic test and simulation

图 3. 安全带卷收器特性试验与仿真

### 3.3 安全带静态点爆试验

将 H3-50th 假人按照试验要求摆放在刚性座椅上，按照实车点位安装安全带。静态点爆预紧器，测量安全带 B1、B3、B4、B6 力及安全带预紧量数据。将试验所获得的安全带预紧力和预紧量数据作为仿真输入，建立了安全带静态点爆仿真模型。并与试验采集的 B1、B3、B4、B6 力以及安全带预紧量进行对比来验证安全带建模的有效性<sup>[4][5][6][7][15]</sup>。安全带静态点爆试验与仿真如下图 4 所示，仿真输出的参数与试验吻合度良好。

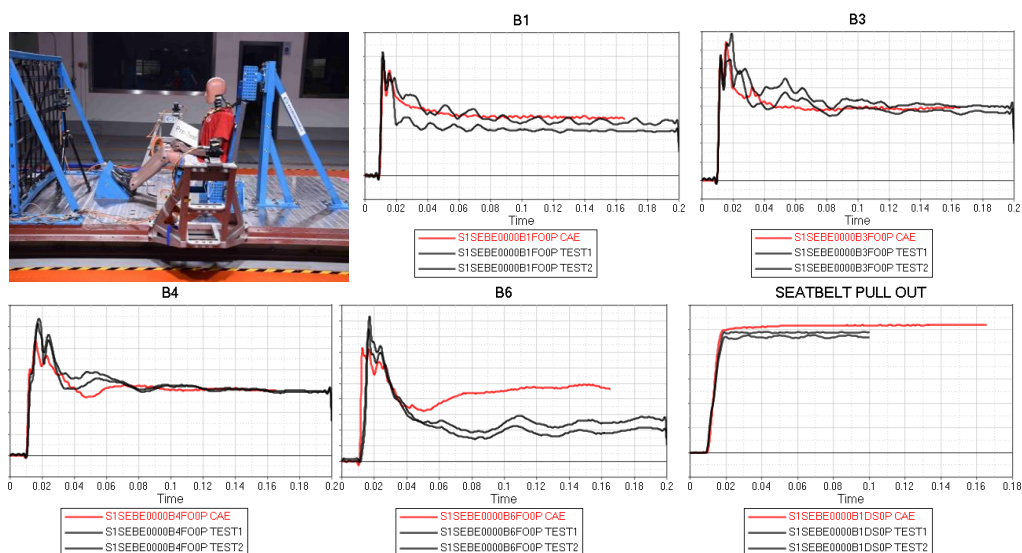


Figure 4. The seatbelt and static burst test and simulation

图 4. 安全带静态点爆试验与仿真

## 4 安全带系统动态滑台试验与仿真对标

为了使安全带在整车约束系统仿真中有着更贴近试验的吻合度，需要设计安全带系统动态试验验证其一致性。先将假人按照试验要求摆放到刚性座椅上，再将经过安全带织带延伸率试验、卷收器力学特性试验以及安全带系统静态点爆试验验证的安全带系统仿真模型按照实车的点位安装在滑车上，组装成正面碰撞的滑车仿真模型。将某车型 50km/h 正面 100%重叠刚性壁障碰撞试验、64km/h 正面 40%重叠偏置碰撞试验以及 32km/h 正面中心柱碰撞工况的车身 B 柱下方 X 向加速度曲线及重力加速度作为滑台仿真的边界条件。最终在保证仿真假人运动姿态和试验假人基本一致的前提下，假通过 CORA 值对仿真输出的安全带力和假人的伤害值与试验对比做相关性评价来衡量安全带系统仿真模型的仿真精度。

#### 4.1 乘员运动姿态的滑台仿真与试验对比

在 50km/h 正面 100%重叠刚性壁障碰撞试验、64km/h 正面 40%重叠偏置碰撞试验以及 32km/h 正面中心柱碰撞工况的车身 B 柱下方 X 向加速度曲线及重力加速度作为边界条件的滑车模型仿真中，假人的运动姿态和试验基本一致（如下图 5 所示），保持了良好的吻合度，验证了滑车系统模型的有效性。

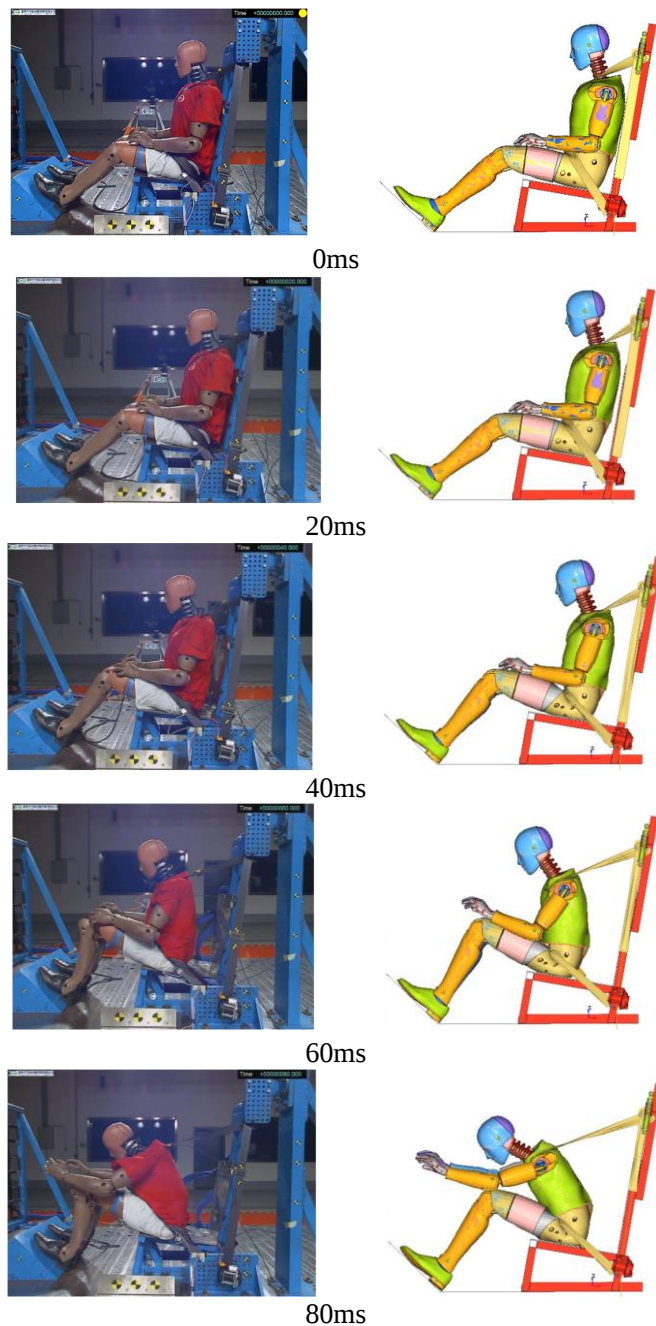


Figure 5. The comparison of dummy motion posture between simulation and experimental

图 5. 假人运动姿态仿真与实验对比

#### 4.2 假人伤害值及安全带力仿真与试验对比

在安全带系统动态滑车试验仿真中，将安全带输出的 B1、B3、B4、B6 力以及假人伤害值与试验进行对比

作为考察安全带系统仿真模型有效性的评价方法。当每一个单一工况的 CORA 值在 0.8 以上, 总体评价的 CORA 值在 0.85 以上就认为模型是有效的。下图 6、图 7 和图 8 分别是 50km/h 正面 100%重叠刚性壁障碰撞试验、64km/h 正面 40%重叠偏置碰撞试验以及 32km/h 正面中心柱碰撞工况动态滑车试验仿真的安全带力响应及仿真假人伤害值与试验假人伤害值的对比, 除 32km/h 正面中心柱碰撞工况假人胸压比试验值稍大外, 其余指标都和试验吻合度较高。其中 50km/h 正面 100%重叠刚性壁障碰撞试验工况 CORA 值在 0.878, 64km/h 正面 40%重叠偏置碰撞试验工况 CORA 值在 0.925, 32km/h 正面中心柱碰撞工况 CORA 值在 0.848, 从而得出总体评价 CORA 值为 0.884 (如下表 1 所示)。结果表明, 该安全带系统仿真模型可作为约束匹配仿真可靠的基础模型。

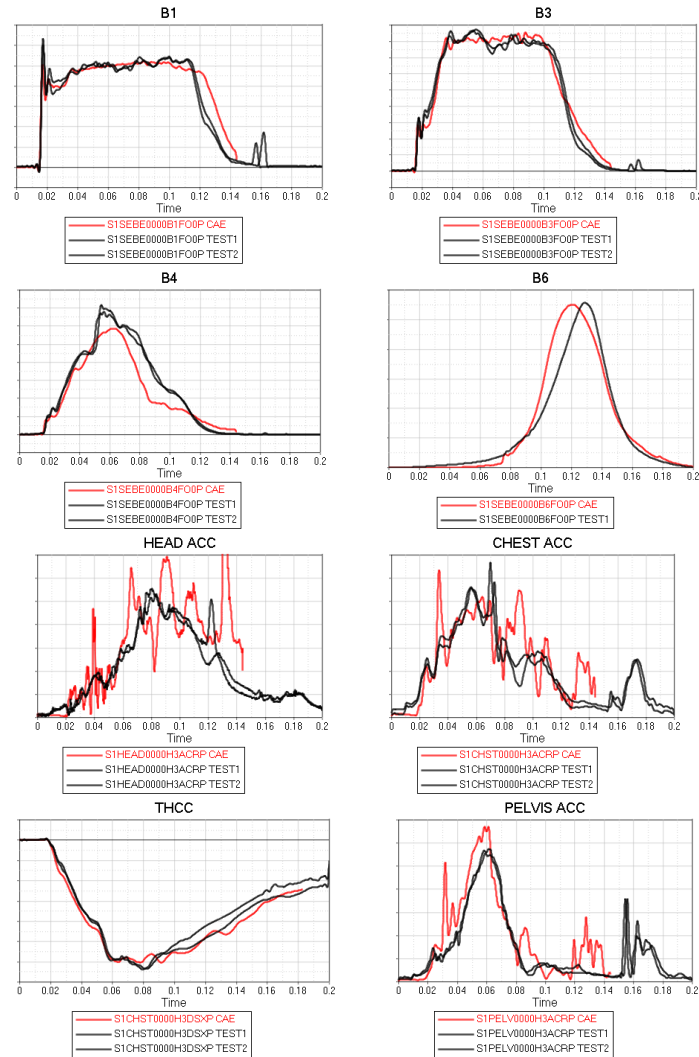
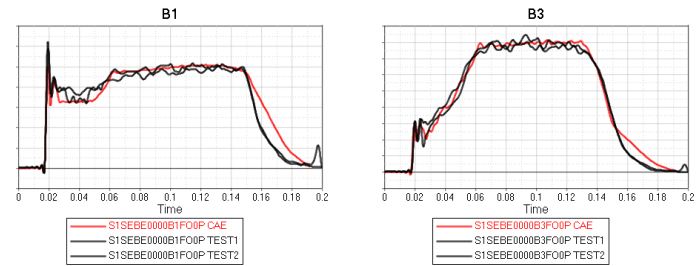


Figure6. The comparison of frontal 100% overlapping rigid barrier crash test between simulation and experimental

图 6. 正面 100%重叠刚性壁障碰撞试验仿真与试验响应对比



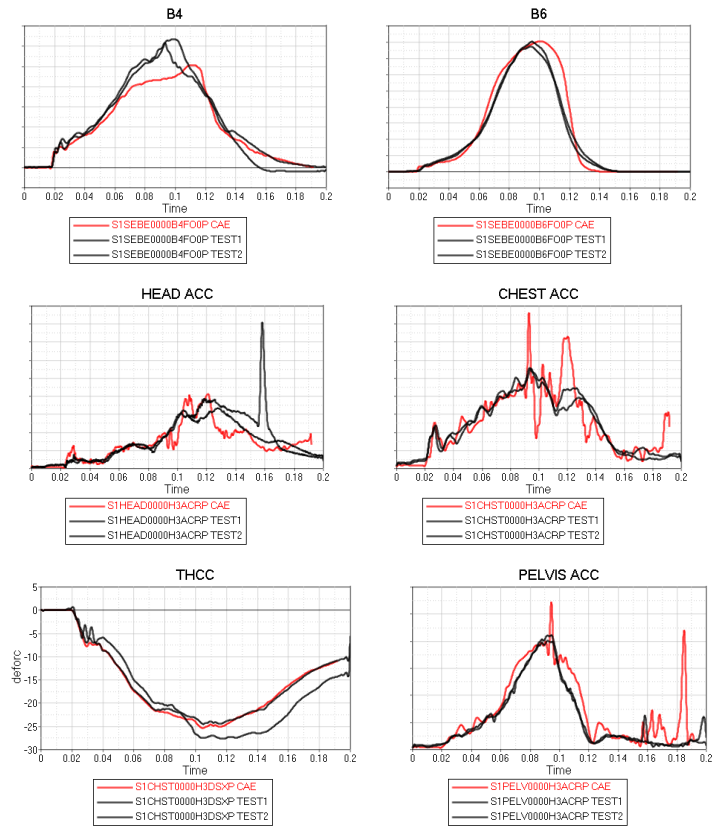
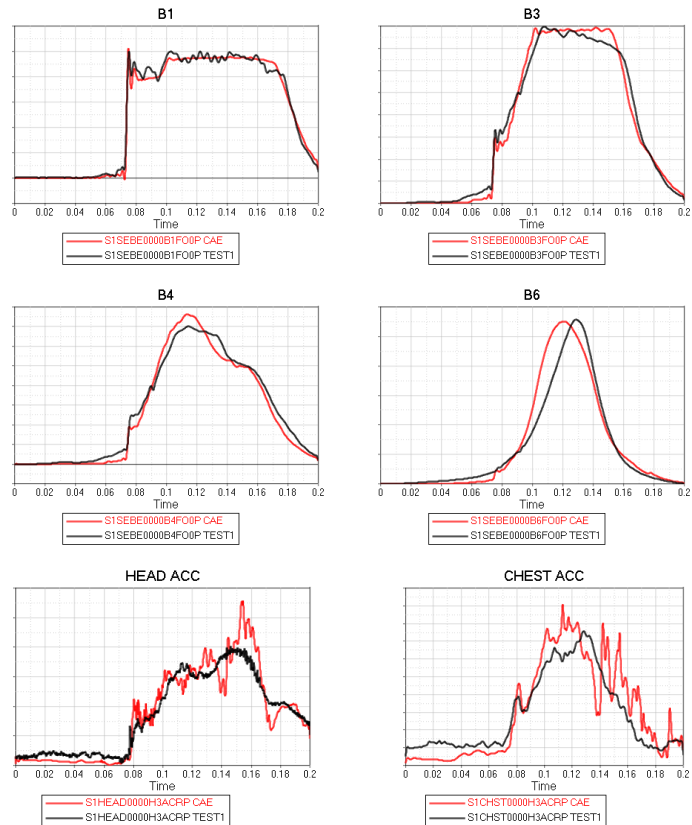


Figure7. The comparison of frontal 40% overlap crash test between simulation and experimental

图 7. 正面 40%重叠偏置碰撞试验仿真与试验响应对比



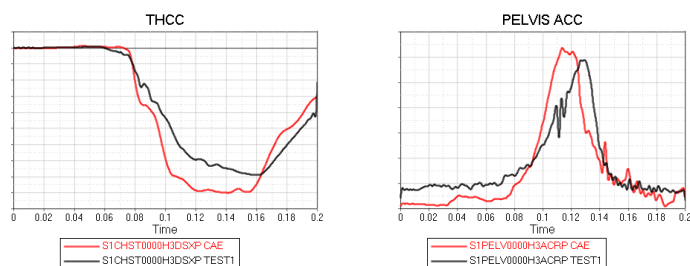


Figure8. The comparison of frontal center pole crash test between simulation and experimental

图 8. 正面中心柱碰撞试验仿真与试验响应对比

Table 1.The correlation evaluation of dynamic sled simulation model for seatbelt system

表 1. 安全带系统滑台动态仿真模型相关性评价

| CORA 值      |       |       |       |       |              |                  |       |        |
|-------------|-------|-------|-------|-------|--------------|------------------|-------|--------|
| 工况          | 安全带力  |       |       |       | 假人伤害值        |                  | 单一工况  | 总体评价得分 |
|             | B1    | B3    | B4    | B6    | Acceleration | Chest deflection |       |        |
| FRB IMPACT  | 0.902 | 0.965 | 0.863 | 0.895 | 0.865        | 0.985            | 0.925 |        |
| ODB IMPACT  | 0.903 | 0.929 | 0.777 | 0.985 | 0.747        | 0.904            | 0.878 | 0.884  |
| POLE IMPACT | 0.980 | 0.959 | 0.943 | 0.881 | 0.862        | 0.683            | 0.848 |        |

## 5 总结

本文提出通过安全带系统关键零部件试验对标后的参数作为安全带系统仿真模型的输入条件，建立以弹簧等离散单元为基础，用串并联的方式实现安全带的预紧特性和卷收器特性的 LSDYNA 安全带系统有限元仿真模型的技术路线。结果表明，这种建模方式可以获得高精度的 LSDYNA 有限元安全带系统仿真模型。为乘员约束汽车企业有限元安全带系统建模提供了新思路。

## 致 谢 (Acknowledgement)

论文的研究工作得到了招商局检测车辆技术研究院有限公司碰撞试验研究部各位同事的大力协助，在此表示感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] Yang Huan, Liu Xiaochuan, Zhang Yu, et al. Research on Tensile Mechanical Properties of Aircraft Belt Webbing[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2022.  
杨欢, 刘小川, 张宇, 等. 航空安全带织带拉伸力学特性研究[J]. 机械科学与技术, 2022.
- [2] Liu Yuyun, Lu Jing, Zheng Hao, et al. Research on the Method of FE Modeling in Anti-Submarining Analysis. Automobile Technology, 2019.  
刘玉云, 卢静, 郑颢, 等. 防下潜分析的有限元建模方法研究[J]. 汽车技术, 2019.
- [3] Yanting ZHENG, Yi Ji, Qingxiang Guo, et al. The Influence on the Chest Injury of Hybrid III 50th for Different DLT Simulation Methods of SeatBelt Based on LS-DYNA. Proceeding of the 16th International Forum of Automotive Traffic Safety, 2019.  
郑艳婷, 季奕, 郭庆祥, 等. 基于 LS-DYNA 的安全带不同锁止建模方式对 Hybrid III 50th 假人胸部损伤的影响研究[C]. 第十六届国际汽车交通安全学术会议论文集, 2019.
- [4] Park, J, Ebert, S.M., Reed, M.P., Hallman, J.J. 2018. "Comparison of Three-Point Belt Fit between Humans and ATDs in Rear Seats." Traffic Injury Prevention, 19(sup1), S65-S69
- [5] Mizuno K., Yoshida R., Nakajima Y. et al. 2018. "The Effects of Inboard Shoulder Belt and Lap Belt Loadings on Chest Deflection." Stapp Car Crash Journal, 62, 67-91
- [6] Pipkorn, Bengt, LopezValdes, Francisco J, et al. Innovative Seat Belt System for Reduced Chest Deflection[c] //2015 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Gothenburg , Sweden
- [7] Eggers A, Eickhoff B, Dobberstein J, et al. Effects of Variations in Belt Geometry, Double Pretensioning and Adaptive Load Limiting on Advanced Chest Measurements of THOR and Hybrid III[C]// 2014.
- [8] Ge Ruhai, Wei Shuyan, Ying Long, et al. A Study on Occupant Restraint System Energy in Vehicle Frontal Crash. Automotive Engineering, 2017.  
葛如海, 卫姝琰, 应龙, 等. 汽车正面碰撞时乘员约束系统能量的研究[J]. 汽车工程, 2017, 39(07):30-35+50.
- [9] Kaishen Zhao, Junjie Zhou, Zengshan Wang, Simulations of Passenger Protection Based on Validation Test of the Key Components of the

- Restraint System[C]. Simulations of Passenger Protection Based on Validation Test of the Key Components of the Restraint System. The 9th Int. Forum of Automotive Traffic Safety (INFATS), 2011.
- 赵凯绅, 周俊杰, 王增山, 等. 基于约束系统零部件试验验证的乘员保护仿真[C]. 第九届国际汽车交通安全学术会议论文集, 2011.
- [10] Yuanzhi Hu, Biqiang Zeng, Shugang Xie. The Vehicle Safety Simulation and Analysis Based on LS-DYNA and Hyperworks[M]. Beijing: Tsinghua university press, 2011.
- 胡远志, 曾必强, 谢书港. 基于 LS-DYNA 和 Hyperworks 的汽车安全仿真与分析[M].北京:清华大学出版社,2011.
- [11] Yuanzhi HU, Yongfu LIANG, Chengyue JIANG, et al. Application of the occupant injury investigation in frontal crash based on THUMS model. Journal of Automotive Safety and Energy, 2015(6)4:379-383.
- 胡远志, 梁永福, 蒋成约, 等. 人体有限元模型 THUMS 用于正面碰撞乘员损伤研究[J]. 汽车安全与节能学报, 2015(6)4:379-383.
- [12] Enyi Shang, Xiaodong Chen, Bin Yang, et al. Research on the Correlation between the Dummy's Upper Belt Force, Thorax Acceleration and Thorax Distance in the Frontal Impact Test. Automobile Technology, 2011(2).
- 商恩义, 陈晓东, 杨斌, 等. 正面碰撞试验中假人肩带力、胸部加速度与胸部位移间关系的研究[J]. 汽车技术, 2011(2).
- [13] LSTC, LS-DYNA®KEYWORD USER'S MANUAL, LS-DYNA R11.0, 2018
- [14] Ruyang Pan. Modeling and Performance Optimization of Driver Restraint System under Car Frontal Crash Condition[D]. XiAn: Chang'an University, 2014.
- 潘如杨. 轿车正面碰撞驾驶员侧约束系统仿真模型建立及性能优化[D]. 西安:长安大学, 2014.
- [15] Hartka, T.R., Carr H.M., Smith B.R., Melmer M., Sochor M.R. 2018. "Does Obesity Affect the Position of Seat Belt Loading in Occupants Involved in Real-World Motor Vehicle Collisions?" Traffic Injury Prevention, 19(sup1), S70-S75