

# 浅谈 LS-DYNA 在汽车碰撞安全领域的仿真分析精度改善方法

吴春涛

(宝能(西安)汽车研究院有限公司, 西安 710029)

**摘要:** 汽车碰撞安全性能是汽车的关键性能之一, 与其相关的性能开发涉及到诸多碰撞试验: 整车碰撞、滑台试验、行人保护试验、准静态强度试验等均可以通过有限元仿真分析进行虚拟试验, 在设计过程中即可改善碰撞安全性能, 最终通过试验验证。碰撞安全的仿真分析的精度即与实验结果的相关性, 尤为重要。以某车型整车碰撞仿真分析为例, 可靠的材料数据库以及成熟的建模方法, 可以改善仿真分析精度。

**关键词:** 碰撞安全; 性能开发; 仿真精度; 整车碰撞; 相关性; 影响因子法; 改进权重法;

汽车是日常使用交通工具的重要组成部分, 给人们带来了便利的同时, 潜在的交通事故也给人们带来哀痛。如何减少交通事故, 降低交通事故危害是汽车工业的一项重要课题。

自 1946 年, 英国工程师 George Cayley 发明安全带以来, 汽车的安全性能不断提升。汽车作为交通工具, 在交通事故中, 车身结构吸收碰撞能量, 乘员舱保持足够生存空间, 约束系统能够良好束缚人体在乘坐空间内, 有效降低乘员损伤, 降低交通事故危害。为了加强提升汽车的整体安全性能, 各种政府及第三方机构对整车安全性能的认证与评价规程不断提高。面对市场的压力, 整车开发周期, 在不断缩减。在有限的时间内开发碰撞安全足够优异性能的整车是各主机厂面对的共同问题。

Volvo 提出 2020 战略, 集成主动安全技术希望达到交通事故死亡率降低到零, 模块化设计结合虚拟仿真技术, 减少整车验证轮次, 使整车开发从启动到 SOP 周期缩减 50%, 减少为 20 个月, 提升整车研发能力。虚拟仿真分析精度是性能开发虚拟验证的关键技术, 也是影响 Volvo2020 战略的关键因素。对于碰撞安全性能开发来讲如何提高碰撞安全的仿真分析精度也是其中的核心问题。

## 1 碰撞安全性仿真分析精度

### 1.1 碰撞安全仿真分析影响要素

仿真分析精度与考察对象的描述、响应所涉及的各种因素有直接或间接关系。

诸如材料牌号、零件形状、厚度、总成连接关系: 螺栓、铆接、点焊、弧焊, 零件、系统重量, 特有的机械、力学性能要求等产品设计信息, 进行准确合理的离散化来正确反映设计状态。材料本身的力学特性: 密度、弹性模量、泊松比、非线性行为、失效准则等描述的准确性, 影响了零件的材料精度, 直接决定了零件的变形模式, 是模型精度的基本要素。各种连接关系的适应性建模方法及其材料模型, 决定了连接的仿真精度: 弹性、塑性行为, 及失效判定等, 尤其的悬架柔性件的适当建模对整车的传递路径、运动姿态及变形模式都有影响。对于特定碰撞仿真分析所必须的第三方模型: 壁障、假人、冲击器等其自身的精度以及对其的妥善的处理如定位、边界条件的处理, 可以决定是否可以准确预报乘员的运动姿态、损伤, 壁障与车体的相互作用关系: 如壁障变形模式、车体侵入情况等, 这些第三方模型同样直接影响整车碰撞安全仿真分析精度。生产制造各种成型工艺: 冲压、注塑、压注等工艺会对零件的材料特性有影响: 经冲压工艺成型的零部件会发生厚度变化、局部拉伸的塑性变形、初始屈服应力提高樱花效应; 注塑成型的塑料件其材料特性与注塑流向强相关, 存在正交各向异性, 尤其是纤维增强的塑料件, 更为明显。压注工艺成型的零件, 可能因流动导致内部缺陷, 受高温到常温冷却影响金属材料的晶相, 从而影响材料的宏观力

学性能。

主观上，开展仿真分析的工程师的专业素养，对问题的抽象理解，建模方法、经验等等对仿真分析精度有决定性影响。

以整车碰撞分析为例，涉及整车碰撞的各种因素均可能对仿真精度有影响，如图 1 所示。

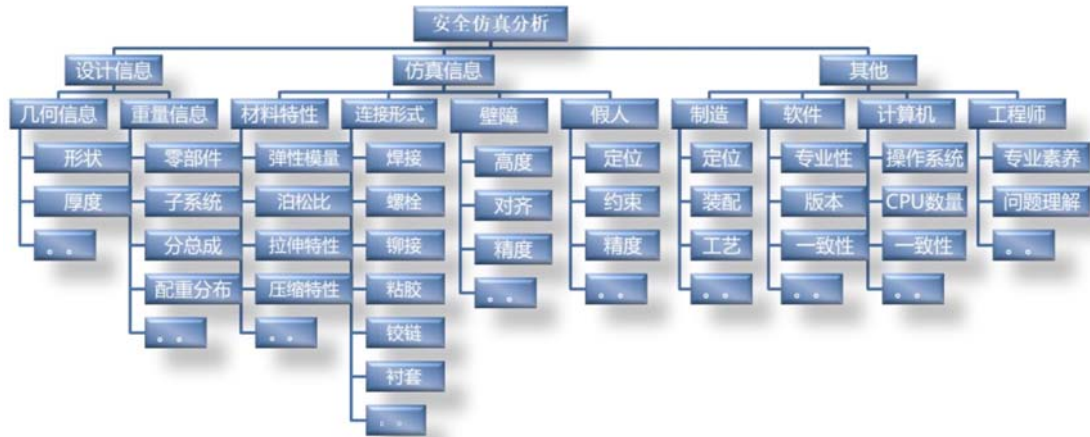


图 1 整车碰撞仿真分析影响因素

## 1.2 仿真精度改善思路

仿真分析本身是通过数学方法描述客观试验、事件通过计算机迭代计算虚拟再现、预报客观问题。其各个影响要素的准确描述是仿真精度的关键所在。

各个要素的描述准确性，需要逐一验证。有的属简单物理参数，如：密度、弹性模量、泊松比等常数，仅需试验获取即可。对于复杂情况，如塑性变形、应变率效应、失效行为以及部件承载能力、变形特征等复杂要素需要开展试验相关性分析，即需要设计、开展系统性试验，通过仿真与试验比对逐一评价各个要素的模拟精度。基本流程如图 2 所示。



图 2 仿真分析精度改善流程

即根据事件要素对象相应的同步开展仿真分析及试验验证工作。综合考虑仿真与试验方法，找到关键要素的试验和仿真方法，进行试验设计、备件、加载、监测得到结果，同时开展仿真分析工作。得到的试验数据与仿真结果进行相关性评价，如果精度不满足要求，需要重新考察试验方案或仿真方法的合理性，并再次开展相关工作，直至结果达到可接受状态。

## 1.3 仿真精度评价方法

仿真与试验的相关性程度，直接对仿真与试验的对应结果进行比对来数值化。笔者等<sup>[1]</sup>于 2014 年介绍了评价仿真精度的方法及其应用。

对于单一静态测量数值，Eriksson, L 等<sup>[2]</sup>引入微小正数 $\delta$ 改进了 F. Delcroix 等<sup>[3]</sup>提出的因子法（Factor Method - FM）评价其相关性，如式-1 所示。

$$C_{con} = \frac{\text{Max}(0, T_{con} * S_{con})}{\text{max}(\delta, T_{con}^2, S_{con}^2)} \quad (\text{式-1})$$

其中：

$C_{con}$ -静态测量相关性因子；  
 $T_{con}$ -试验静态测量结果；  
 $S_{con}$ -仿真分析静态结果；  
 $\delta$ -微小正数；

采用上述方法逐一对时域信号的各个样本进行比较并加权平均来评价时域信号的相关性，即为修改的权重法（Modified Weighted Integration Factor Method- MWIFAC），如式-2 所示。

$$C_{his} = 1 - \sqrt{\frac{\sum \max(T_n^2, S_n^2) \cdot \left(1 - \frac{\max(0, T_n \cdot S_n)}{\max(\delta, T_n^2, S_n^2)}\right)^2}{\sum \max(T_n^2, S_n^2)}} \quad (\text{式-2})$$

其中：

$C_{his}$ -时域信号相关性因子；  
 $T_n$ -试验测得时域信号 n 时刻结果；  
 $S_n$ -仿真分析时域信号 n 时刻结果；  
 $\delta$ -微小正数；

## 2 碰撞安全分析要素仿真方法

碰撞安全仿真分析的各种要素，需要根据其特性行为，针对性的开展验证分析工作。

整车系统包括车身、底盘、内外饰、动力和电子电器，其中碰撞安全关注的是机械结构部分或影响机械性能的产品特性部分。需要逐个剖析其特性。

### 2.1 材料本构仿真标定

LS-DYNA 具有丰富的材料本构模型<sup>[4][5]</sup>，可以仿真多样的汽车常用材料，如：冷轧钢板、热轧钢板、挤压铝合金、铝板、压注铝合金、注塑塑料等，如表-1 所示。

材料种类不同，相应的选取合适的材料模型。通常钢材、铝合金均可选用 24 号材料可表征其应变率效应，并可直接输入塑性应变率相关的塑性曲线进行精确模拟。塑料材料可选用 89 号材料，表征其弹塑性段均存在应变率效应的本构行为，同时可以考虑不同应变率效应下材料的硬化脆断特性。对于非金属材料，织物、皮革等膜类材料可选用 \*MAT\_034 号材料进行表征，并可考虑材料的各项异性，涂层效果，以及不可承受压缩失稳特性。对于通常的橡胶体如：轮胎、衬套、缓冲块等可选用 \*MAT\_007 材料模型，简单高效的表征橡胶的不可压缩特性。PU 发泡及 EPP 可以选用 \*MAT\_057 和 \*MAT\_083 两种材料表征塑胶基膨胀材料，可准确模拟座椅发泡及防撞梁膨胀聚丙烯。风窗玻璃为夹层三明治材料，可选用专用材料模型 \*MAT\_032 表征玻璃受载脆性破坏后，PVC 夹层的韧性拉伸，单元本体仍有一定强度，表征风窗出现大面积开裂但不破碎的状态。对于散热器、冷凝器的芯体，是由铝质流道间填充规则散热片构成，初始压缩模量低，压实后弹性模量与铝材本身相当，其特性可采用 \*MAT\_126 进行近似模拟。

表 1 LS-DYNA 整车碰撞分析常用材料模型

材料编号	材料名称	备注
*MAT_001	*MAT_ELASTIC	通用、流体
*MAT_003	*MAT_PLASTIC_KINEMATIC	通用、金属、塑料
*MAT_007	*MAT_BLATZ-KO_RUBBER	橡胶
*MAT_009	*MAT_NULL	流体、液体动力学
*MAT_015	*MAT_JOHNSON_COOK	金属、流体
*MAT_024	*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY	金属、塑料
*MAT_032	*MAT_LAMINATED_GLASS	复合材料、玻璃

*MAT_034	*MAT_FABRIC	织物
*MAT_057	*MAT_LOW_DENSITY_FOAM	泡沫
*MAT_083	*MAT_FU_CHANG_FOAM	泡沫
*MAT_089	*MAT_PLASTICITY_POLYMER	塑料
*MAT_100	*MAT_SPOTWELD	焊点
*MAT_124	*MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION	金属、塑料
*MAT_126	*MAT_MODIFIED_HONEYCOMB	蜂窝铝
*MAT_240	*MAT_COHESIVE_MIXED_MODE_ELASTOPLASTIC_RATE	粘胶
*MAT_119	*MAT_GENERAL_NONLINEAR_6DOF_DISCRETE_BEAM	衬套、连接失效
*MAT_S01	*MAT_SPRING_ELASTIC	弹性弹簧
*MAT_S04	*MAT_SPRING_ELASOPLASTIC	弹塑性弹簧
*MAT_S05	*MAT_DAMPER_NONLINEAR_VISCOUS	减震器
*MAT_B01	*MAT_SEATBELT	安全带

## 2.2 连接仿真与验证

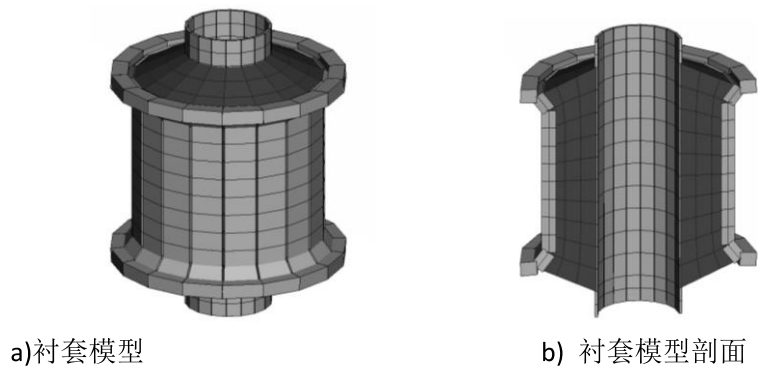
白车身连接分为：焊点/逢焊/粘胶等。焊点/焊缝本体通常可采用\***MAT\_100** 来模拟。**BEAM** 单元模拟焊缝，也可采用壳单元模拟焊缝。焊点可采用 **BEAM** 单元，单个/多个六面体单元模拟。焊点失效，可以在\***MAT\_100** 中设置极限拉力/弯矩/扭矩等，这需要预先分析焊点配对母材，根据配对预报相应焊点强度，并集成到模型中。在焊点质量合格的情况下，焊点失效表现为热影响区失效，通过设定热影响区的材料失效特性，对热影响区直接建模，焊点本体采用多六面体模型建模，通过预报热影响区的失效等效模拟焊点失效。焊点的各种模拟方式如图-3 所示。



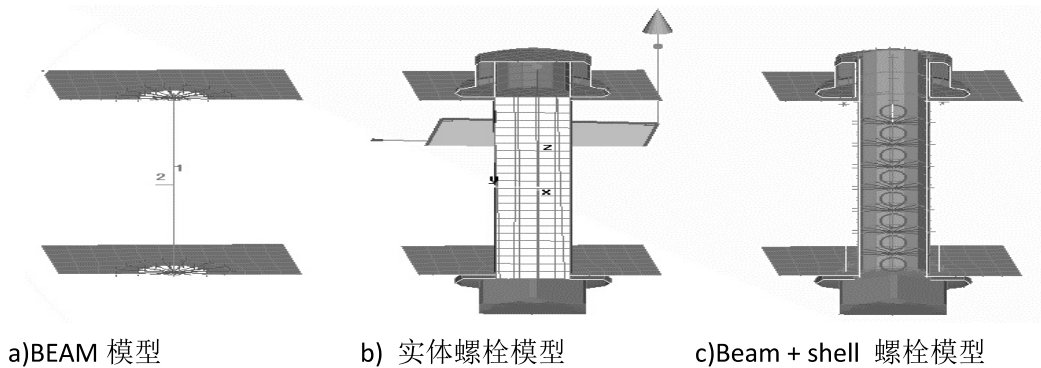
图 3 焊点模拟方式

通常粘胶采用实体六面体单元建模，在粘胶设计宽度范围内投影至钣金表面，可采用节点耦合或“**TIED**”类型的\***Contact** 与钣金进行相互作用。这与实际粘胶仅存在与两层钣金的缝隙内的情况不一致，采用\***MAT240** 可以通过 **THICK** 关键字设置近似实际厚度，以预设粘胶厚度修正粘胶抗撕裂及抗弯刚、强度。

底盘的连接主要：弹簧/减振/铰接/衬套。对于减震弹簧系统，可采用实体单元或梁单元表面包壳模拟。为了考虑弹簧预载，\***MAT\_S01** 材料的弹簧单元，直接施加预载。\***MAT\_S05** 可以直接输入阻尼曲线，在减震套筒间建立相应阻尼单元来模拟减震器的阻尼效应。**LS-DYNA** 提供了丰富的铰接模型，可以直接对铰接方式建模如：球铰、转动铰、柱铰、平动铰、万向铰、齿轮传动等，并可定义简单失效。衬套类连接常见于汽车结构中，如底盘连杆与运动体之间、动力总成与承载结构之间、机械结构总成与车身之间。即连接是由结构间的橡胶体或流体填充等弹性体传递载荷的结构均可称为衬套连接。其特点是各个方向上存在平动和转动刚度和/或阻尼。**LS-DYNA** 中有多种 **DISCRETE\_BEAM** 类型材料，可以设定刚度/阻尼，弹性，非线性，塑性，失效等各种衬套等效力学特性，需要事先获得相应六向刚度、阻尼。实际很难同时获得如此丰富的设计信息。通常也可以针对衬套直接按照几何建模，并对衬套刚度做标定分析，如图 4 所示。


**图 4 衬套实体建模示例**

另外，不同系统之间，通常采用螺栓装配连接。螺栓仿真是碰撞安全领域一个有趣的问题，完善螺栓自身模拟可以改善几点问题：1) 刚度贡献；2) 螺栓断裂；3) 有预紧力的螺栓会挤压界面，产生相应压力及摩擦力；4) 界面间及螺栓与界面的滑动及转动。多种螺栓模拟方式，如图 5 所示


**图 5 螺栓模拟方式示例**

### 2.3 零件系统仿真与验证

Mao<sup>[6]</sup>等通过细分网格提高了顶压分析仿真分析精度。网格精细的网格划分即可表征通常结构如白车身、底盘框架等全面的设计信息，再结合材料特性及连接特性通常可进行相对准确的预报零件及系统的刚度、强度、溃缩、折叠特性。为了验证模型的精度通常以碰撞中结构应用场景、承担的荷载以及变形模型设计对应的验证试验。

如防撞梁和吸能盒系统安装到台车上，以一定速度冲击刚性表面验证结构的变形模式和吸能特性，并可用于标定防撞梁系统。Matthias H.<sup>[7]</sup>采用类似方法研究了复合材料做为碰撞吸能结构。对于 B 柱以抗弯为主要承载形式的结构，可以设计三点弯曲试验进行标定验证。车门总成可借用侧门侵入法规标准：GB15743 试验，来进行刚度/强度标定。

Darshan V. D.<sup>[8]</sup>开展泡沫压缩、回弹试验标定了座椅发泡材料，并预报坐垫的动静态应力特性。类似的，长城汽车<sup>[9]</sup>采用 50% 男性假人臀块结构对坐盆整体做压缩加载及卸载，用以标定坐盆的整体刚度特性。采用特制压头，测试方向盘轮毂刚度，以标定方向盘刚度。

对于塑料件如车灯等，按照几何结构精装建模。其整体刚度，可以采用平板压头直接压缩车灯整体，记录接触位移与反力关系及变形、失效模式，用于标定相应系统模型。

### 2.4 工艺成型效应仿真与验证

无论冲压、压注、注塑还是挤压等工艺均对材料特性存在影响，成型后的零件，或多或少存在厚度尺寸、屈服强度、残余应力、塑性应变、材料相态分布等存在影响。

2001 年 Horst L. 等人<sup>[10]</sup>论述了冲压成型对零件产生局部硬化，考虑冲压效应后纵梁承载力增大 5%，变

形减少 17%。Klaus W.<sup>[11]</sup>研究了 N 形梁的变形模式，考虑冲压效应对 N 形梁的存在硬化，尤其在拐角内部硬化局部存在硬化应变集中，其正向冲击仿真变形模式与试验状态更为接近。

O.P. Sjøvik<sup>[12]</sup>介绍了挤压成型铝合金材料，经成型预弯为防撞梁，预弯工艺对几何存在影响与设计数据存在差异，采用成型预报的几何结构分析的防撞梁在正面冲击作用下，变形模式与实际零件试验的变形模式相当。

Sebastijan J 等<sup>[13]</sup>介绍了 6 系铝合金在涂装车间受烘烤影响存在预应力出现硬化现象。

Steinberger R.等<sup>[14]</sup>介绍了纤维增强塑料样板及零件的验证过程：注塑流向导致纤维方向各异引起塑料材料表现为正交各项异性特性，从而需要表征基于纤维方向的材料特性，集成了纤维方向的试验样条或零件的失效预报与试验结果更为接近。

Watson R.等<sup>[15]</sup>介绍了在 FLOW-3D 模拟压铸铝合金零件的成型过程，采用脚本集成统计方法在预报其缺陷分布，并通过 Primer 脚本将预报的缺陷映射到零件模型上，生成新的 \*PART，其材料中添加 \*MAT\_ADD\_EROSION，调整缺陷导致的失效准则，从而预报零件的失效行为。

## 2.5 整车碰撞分析考虑因素

对整车系统来讲，需要其自身的条件和状态的准确性，如：质心位置、轴荷分配、悬架预载、配重分布、假人定位、边界条件与预期/已开展试验的一致性。

对于正面高速碰撞，考虑了轮胎转动比平动状态会增加转动动能 ( $E_p = \frac{J \cdot \omega^2}{2}$ )，从而增加整车碰撞能量。对于偏置碰，轮胎的转动会下压壁障，影响壁障的变形模式。实验条件下轮胎转动状态下其摩擦系数在 0.01 左右，与轮胎的平动摩擦系数 0.3-0.4。\*RIGIDWALL 可以设置正交摩擦系数来模拟该现象。设计状态的轮胎与设计地面存在干涉，可以同过 \*RIGIDWALL 的 \_MOTION 选项设置运动，通过 \*DYNAMIC\_RELAXTION 对地面进行提升预压轮胎，使轮胎承受的压力与试验相当。

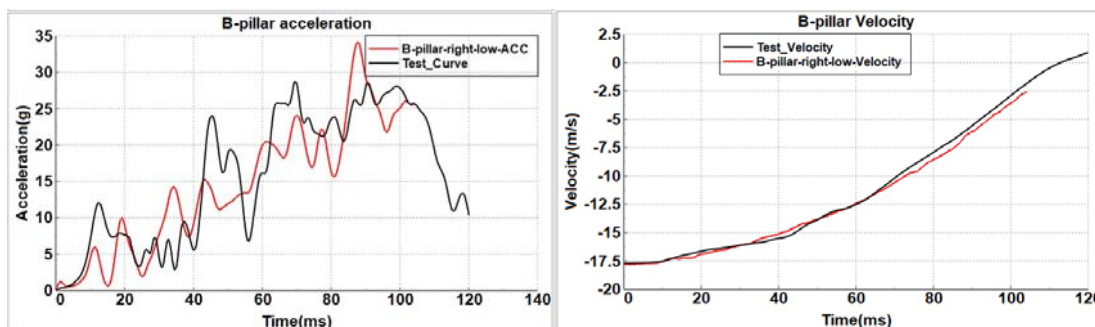
## 2.6 第三方模型

壁障、移动壁障、假人等是试验的一部分，该模型一般由第三方提供。其仿真精度也同样重要。Bernhard F.等<sup>[16]</sup>研发其自己的 ODB 模型，提升其仿真精度。Sebastian S.<sup>[17]</sup>等在德国汽车工业协会自主下开发鞭打假人 BioRIDII 有限元模型，并对假人参数设定随机变量研究其稳健性。

## 3 碰撞安全仿真分析案例

对于整车碰撞仿真分析，需要综合集成考虑上述影响因素的关键所在，根据现有条件适当细化关键位置，合理考虑建模方式。

某 SUV 车型，按照设计数据及上述可能考虑的部分因素建立整车模型。并根据试验配置重量保持轴荷与试验偏差在 20kg 以内。为了保持悬架平衡，前后悬弹簧通过 OFFSET 结合弹簧刚度设置预压载荷。同时根据碰撞速度，考虑了轮胎的转动。最终 64kph40%偏置碰的初版仿真的加速度与速度结果与试验比较如图 6 所示。加速度相关性 75%，速度相关性 96.9%。



a) 加速度相关性比较

b) 速度相关性比较

图 6 整车仿真与试验相关性

## 4 结论与展望

碰撞安全方正精度改善是一项系统工程，需要仿真工程师不断探索追求总结。不可避免的需要从材料=>连接=>零件=>系统=>整车逐级标定验证。需要对各种因素找到标定验证依据，不可或缺的需要设计特色系统性试验来标定技术不断创新的整车设计新元素。通过比对仿真与试验，不断完善总结建模方法，形成稳健规范的建模标准。通过广大工程师的不断努力，仿真精度会达到质的飞跃，与试验相当，减少试验项次/轮次，缩减开发周期，降低开发成本，使整车开发更具竞争力。

## 参考文献

- [1] Wu Derek, Zhang Kai. Overall Assessment On Correlation Simulation And Calibration Scaled Test Based On Weighted Factor. FISITA 2014;
- [2] Eriksson, L., Zellmer, H. 2007 "Assessing the BioRID II Repeatability and Reproducibility by Applying the Objective Rating Method (ORM) on Rear-End Sled Tests" In proceedings of the 20th International Technical Conference of the Enhanced Safety of Vehicles (June 18-21, Lyon, France) Paper No. 07-0201-O;
- [3] F. Delcroix, M. Marro, T. Bekkour, S. Bidal, R. Happee, J. Watson and etc. Report on ADVISER Extensions, APROSYS SP 7, European funded project, TIP3-CT-2004-506503;
- [4] John O. Hallquist. Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Theory Manual
- [5] Livermore Software Technology Corporation (Lstc), Ls-Dyna® Keyword User's Manual;
- [6] Mingzhi Mao, E.C. Chirwa, T. Chen. Vehicle Roof Crush Modelling & Validation. The 5<sup>th</sup> European LS-DYNA Users Conference;
- [7] Matthias Hormann, Marco Wacker. Simulation of the Crash Performance of Crash Boxes based on Advanced Thermoplastic Composite. The 5<sup>th</sup> European LS-DYNA Users Conference;
- [8] Darshan V. D., Subhash R., Paul-Emlie B., Modeling and validation of static and dynamic seat cushion characteristics. The 12<sup>th</sup> European LS-DYNA Conference 2019, Koblenz, Germany;
- [9] 吴春涛, 杨领军, 岳国辉, 陈现领, 张凯. 虚拟仿真主导约束系统工程开发方法, 2014 年中国汽车安全技术国际研讨会;
- [10] Influence Of Manufacturing Processes On The Performance Of Vehicles In Frontal Crash. The 3rd European LS-DYNA Conference;
- [11] Klaus Wolf, Robert Schilling, Jorn Lutjens, Thomas Wllmersperger, and etc. Coupled Fem Calculations - A Cae Tool To Improve Crash-Relevant Automotive Body Components By Local Hardening. The 7<sup>th</sup> European LS-DYNA Conference;
- [12] O.P. Søvik, A. Artelius And T.J. Brobak. Integrated Analysis Of Forming And Crashworthiness Of High Strength Aluminium Bumpers Using Ls-Dyna. The 3rd European LS-DYNA Conference;
- [13] Sebastijan J., Richard B., Shuvra S. and Zeqin Liang. FE Implementation of AA6xxx Series Aluminium Pre-strain Dependent Strengthening Response during Paint Bake. The 11<sup>th</sup> European LS-Dyna Conference 2017;
- [14] Steinberger R., Gross T., Reithofer P., Paul St.. Considering the Local Anisotropy of Short Fibre Reinforced Plastics: Validation on Specimen and Component. The 11<sup>th</sup> European LS-DYNA Conference 2017;
- [15] Watson R., Griffiths W.D., Zeguer T., Ruffle S. Towards Location Specific Statistical Fracture Prediction in High Pressure Die Castings. The 10<sup>th</sup> European LS-Dyna Conference 2015;
- [16] Bernhard Fellner, Thomas Jost. Validation and Benchmark of an all new Frontal Offset Barrier FEM Model. The

7th European LS-DYNA Conference; 2013

[17] Sebastian S., Bastian K., Katharina W., Heiner M., Uli F. Development of BioRID II Dummy Model using Stochastic Methods. The 6<sup>th</sup> European LS-Dyna Conference 2012;

## **Discussion on methodology of improving the accuracy of virtual simulation for vehicle crashworthiness**

Derek Wu ChunTao

(BaoNeng (Xi'an) Automotive R.&D. Center Ltd., Xi'an 710029)

**Abstract:** Passive safety is an improve attribute of vehicles. The development of passive safety involves numbers of crash tests, including complete vehicle crash tests, sled tests, pedestrian protection impactor tests and quasi-static strength tests. All above could be the simulated via FEA. The virtual tests could forecast the performance of current design in the real tests and improve the defects. The accuracy means the correlation between tests and simulation and it is very critical. A SUV crash simulation is introduced, which depends on reliable material database and modelling methodology, and it shows good accuracy.