

DOI: 10.7652/xjtuxb201607016

帘式安全气囊有限元建模及侧碰撞系统仿真

卢礼华^{1,2}, 刘志峰¹, 陆建辉^{1,2}, 高发华², 罗明军^{1,2}, 张绍卫³

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 230009, 合肥; 2. 芜湖凯翼汽车有限公司, 241006, 安徽芜湖;
3. 上海东方久乐汽车安全气囊有限公司, 201201, 上海)

摘要: 为了获得汽车安全气囊仿真技术的精确度和可行性,建立了帘式气囊仿真模型,集成了侧碰撞系统模型。采用拓扑映射原理进行模型节点坐标转换,从而实现了帘式气囊有限元卷折网格的自动生成和帘式气囊在任意管状结构内的卷折成型;使用 MADYMO 软件提供的均压法以及Dyna欧拉法、粒子法,依据卷折模型,对气囊展开过程的模拟结果进行了检验;通过将帘式气囊模型、假人模型、车身侧面接触结构面进行集成,建立了带安全气囊的侧碰撞分析模型。通过 3 种类型侧碰撞工况的计算和试验对比,表明所建侧碰撞仿真模型能够真实地反映人体损伤情况。所建模型下的帘式安全气囊能够很好地保护乘员安全,可以有效地应用于汽车前期开发。

关键词: 侧碰撞;帘式气囊;拓扑映射原理;节点坐标转换;乘员安全

中图分类号: U461 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)07-0104-06

Finite Element Modeling of Curtain Airbag and Simulation of Vehicle Side Impact

LU Lihua^{1,2}, LIU Zhifeng¹, LU Jianhui^{1,2}, GAO Fahua², LUO Mingjun^{1,2}, ZHANG Shaowei³

(1. School of Automotive and Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Cowin Automobile Co. Ltd., Wuhu, Anhui 241006, China; 3. Shanghai East Joy Long Motor

Airbag Company, Shanghai 201201, China)

Abstract: To acquire the accuracy and feasibility of simulation method for automobile airbag, a curtain airbag FE model, including vehicle occupant safety system of side impact modeling, was established. The auto-meshing of folded curtain airbag was realized, and curtain airbag mesh among any type of tube cross section was generated following the topology mapping theory to make mesh nodes coordinate be transformed. Three kinds of methodology (pressure method of MADYMO, ALE gas method and particle method of Dyna) were compared by simulating airbag deployment of the folding model. The side impact analysis model with airbags was constructed by integrating the curtain airbag model, dummy, and body side contact surface. The comparison between calculation of three types of side impact conditions and tests indicates that the model of side impact simulation can accurately reflect human injury. The curtain airbag can more effectively protect passenger and facilitate early-stage design of automobiles.

Keywords: side impact; curtain airbag; topology mapping theory; node coordinate conversion; passenger safety

收稿日期: 2015-12-02。 作者简介: 卢礼华(1978—),男,博士生;陆建辉(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405123)。

网络出版时间: 2016-05-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160510.1520.008.html>

随着汽车工业的发展,汽车保有量增大,汽车造成的交通事故不断增多。据统计,侧碰撞事故约占事故总数的 30%,仅次于正面碰撞,而在造成死亡和重伤的事故中侧碰撞事故约占 35%^[1]。所以,汽车侧碰撞的乘员安全保护受到重视,各种侧碰撞约束系统被广泛应用,特别是帘式气囊在侧碰撞事故中对乘员头部的保护具有明显的效果。帘式安全气囊固定在车辆顶棚横梁上,工作时车窗与人体之间形成气囊,由此起到了保护人体的作用。McKendrew 等研究表明,安全气囊参数配置不当是引起前臂伤害的重要原因^[2]。Horstemeyer 等的分析表明,以伤害为衡量标准设计的汽车更具安全性^[3-4]。Cheng 等将台车撞击试验与气囊碰撞对比后得出,气囊对假人的作用力会随着假人位置的不同而改变^[5-6]。

正确了解帘式安全气囊与人体头部在汽车碰撞中的相互作用关系和内在机理,以及对相应的参数进行优化设计^[7-9]尤为重要和迫切。为了提高汽车前期开发水平,计算机仿真已经成为试验验证、参数优化和设计方案评估的重要手段。本文着重研究了帘式气囊仿真模型的建立、侧碰撞系统模型的集成,基于帘式气囊平面模型开发了有限元卷折网络的自动生成技术,从而有效解决了帘式气囊在任意管状结构内卷折成型困难的问题,同时使用 MADYMO 软件提供的均压法和 Dyna 欧拉法、粒子法,分别对卷折模型进行了气囊展开过程的模拟,确定 Dyna 粒子法能够较好地提供计算结果。在此基础上,将帘式气囊模型、假人模型以及车身侧面接触结构面进行了集成,针对 3 种类型的侧碰撞工况进行了计算和试验对比。

1 帘式安全气囊系统的仿真建模

帘式安全气囊仿真过程主要包括气囊几何表面的有限元模型生成,气体发生器的定义,接触表面的定义,撞击刚度的验证,系统模型的集成,侧碰撞系统模型的对标与修正,侧碰撞试验仿真和预测^[10-12]。由于气囊几何表面有限元建模涉及到单元的不规则卷曲和弯曲,所以运用常规的建模方法无法有效完成。本文利用一种网格自动生成技术、根据不同的几何边界,将平面网格数据集自动转换成卷曲和弯曲的网格数据集。

1.1 有限元建模

有限元建模流程如图 1 所示。该流程由平面网格、线性冲击刚度的验证、卷折网络、弯曲网络、帘式

气囊模型的展开过程来判定。根据拓扑映射原理,本文开发了一种节点坐标转换程序,以自动完成网格卷曲过程。该自动卷折程序的理论基础源于集合论数学的映射原理,如图 2 所示。

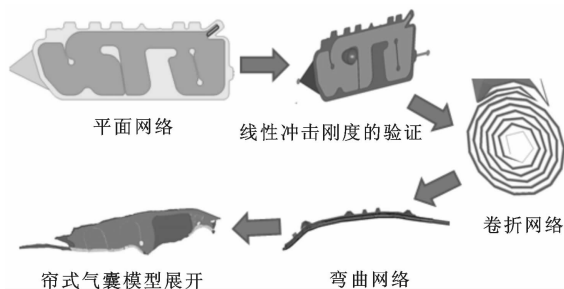


图 1 有限元建模流程

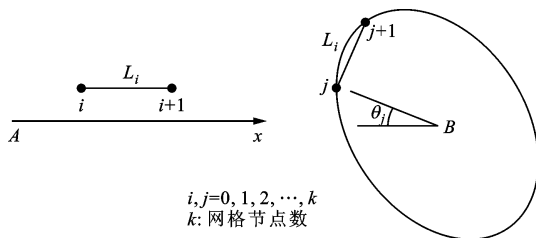


图 2 坐标映射原理图

设 A 为帘式气囊平面模型网格中的节点集合, B 为帘式气囊卷折模型网格中的节点集合,二者均为非空集合。如果存在一个法则 f (一个座标变换的计算过程),使得对 A 中的每个元素 A_i 按法则 f 在 B 中有唯一确定的元素 B_j 与之对应,则称 f 为从 A 到 B 的映射,记作 $f:A \rightarrow B$ 。其中: B_j 称为元素 A_i 在映射 f 下的象,记作 $B_j = f(A_i)$; A_i 称为 B_j 关于映射 f 的原象。集合 B 中所有元素的象的集合称为映射 f 的值域,记作 $f(A)$,且满足以下条件:①对于 A 中不同的元素,在 B 中不一定有不同的象;② B 中每个元素都有原象,称映射 f 建立了集合 A 和集合 B 之间的一个一一对应关系,也称 f 是 A 到 B 上的映射。根据上述数学原理,定义 $A = \{x | x \text{ 具有特性 } p(\text{原点为 } p_0, \text{法矢量为 } y \text{ 的平面坐标系})\}$, $B = \{y | y \text{ 具有特性 } q(\text{起点为 } u_0, \text{方向向量 } w \text{ 为 } L_i \text{ 的螺旋极坐标系})\}$, $f:A \rightarrow B$ 。具体原理说明见图 1、图 2。

卷曲和弯曲网格模型如图 3 和图 4 所示,是通过图形映射运算程序自动将平面网格转换成卷曲网格的,其中输入参数为节点坐标值、横截面边界几何文件、折叠隔层间隙,输出参数为卷曲后的节点坐标值、利用 Pre-dyna 软件中的 8-Line Mapping 功能进行处理的弯曲网格^[13-14]。

为了正确模拟侧碰气囊展开过程中的特性,必

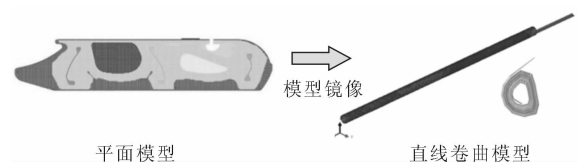


图 3 卷曲网格模型

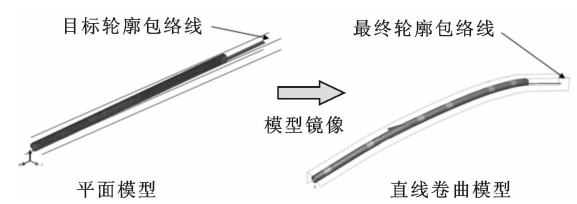


图 4 弯曲网格模型

须获得气体发生器的物理参数,包括气体成分、气体质量流率、气体温度流率,此外还要考虑发生器的位置、喷嘴方向、喷嘴尺寸以及气囊腔室与发生器之间的相互作用,如图 5 所示。

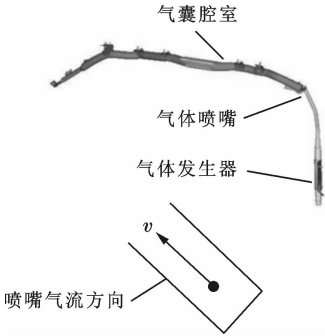


图 5 气体发生器模型

利用 3 种不同的计算流体分析方法比较了运算时间与分析精度的差异,结果见表 1,从中发现:均压法在气囊展开后的分析效果较好,运算时间最短;欧拉法的分析精度最好,运算时间过长;粒子法的计算精度优于均压法,运算时间适中。显然,均压法可以用于早期开发阶段的简化模型,粒子法可以用于碰撞试验的预测和人体损伤值的评估。

表 1 3 种方法的运算时间和分析精度比较

参数	均压法	粒子法	欧拉法
运算时间/h	1	4	30
计算精度	气囊展开前效果差,展开后效果好	气囊展开前下垂运动略滞后,展开后效果好	整个展开过程效果好
处理过程	容易	容易	困难
难易程度			

1.2 侧碰撞帘式气囊安全系统模型

整个侧碰撞过程可以分为 3 个阶段^[15]:车体在

碰撞接触力作用下产生塑性变形;汽车乘员舱在碰撞过程产生加速度;乘员受惯性作用被加速。帘式气囊安全系统的动力学分析模型如图 6 和图 7 所示。

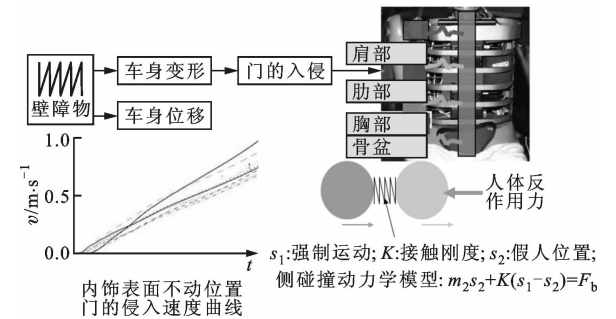


图 6 侧碰动力学系统模型

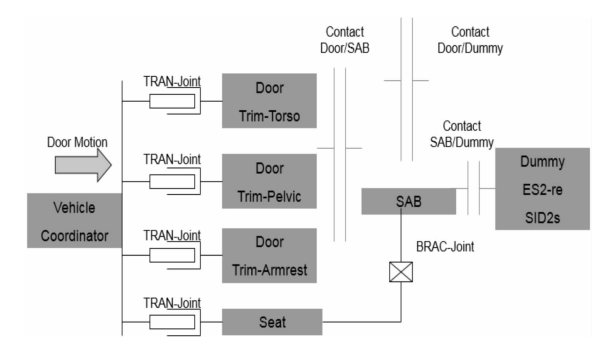


图 7 侧碰撞 MADYMO 模型

侧碰撞对人体的伤害是由车门的侵入运动造成的,这种侵入过程非常迅速,通常在 20 ms 便可造成对人体肩部、肋骨、胸腔、骨盆的严重挤压,所以整个侧碰撞帘式气囊安全系统模型需要考虑 5 方面的内容:车门结构表面形状和运动;假人模型;气囊模型;接触刚度(假人头部和气囊、气囊和车门内侧、假人肩部和车门内侧、假人肋骨和车门内侧、假人胸腔和车门内侧、假人骨盆和车门内侧);座椅运动。其中,车门结构运动侵入区域的选取和相应的运动曲线对仿真效果具有显著的影响。经过模型和试验结果的对比,在侵入区域需要获取 9 个坐标点的运动数据,才能较真实地反映侧碰撞状况。

1.3 帘式安全气囊的仿真系统模型验证

帘式安全气囊的仿真系统模型在运用之前必须进行验证,验证包括:气囊刚度和静态展开过程。气囊刚度验证由线性碰撞刚度试验来完成,涉及冲击头的加速度-位移曲线,如图 8 所示。在对侧气帘静态展开冲击试验中需要考察气帘展开过程中气帘打开的时间和外形状态等^[16],如图 9 所示。

1.4 帘式气囊冲击试验模型

为了进一步验证帘式气囊的特性,对头部进行了仿真冲击试验,即在配有帘式气囊车辆进行冲击

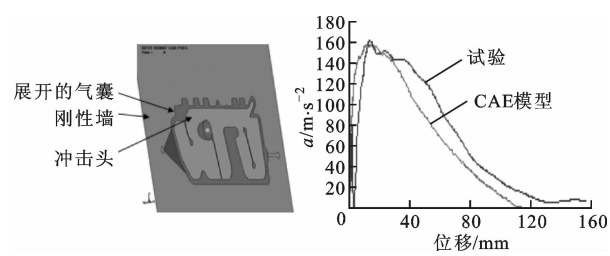
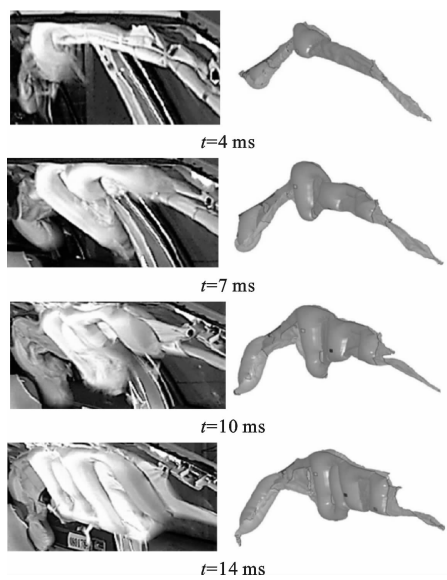


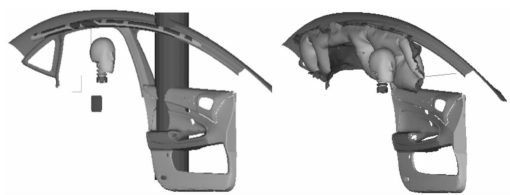
图 8 线性碰撞试验模型



(a) 试验 (b) 仿真

图 9 帘式气囊静态展开试验与仿真对比

试验中观察头部与气囊冲击的力学反应。帘式气囊冲击试验仿真模型如图 10 所示。



(a) 气囊未展开 (b) 气囊展开

图 10 帘式气囊冲击试验仿真模型

2 侧碰撞仿真系统的应用

经验证后的系统模型,可以支持侧碰撞安全气囊约束系统的开发和法规的验证。侧碰撞安全法规主要包括 3 种碰撞试验规范:中国碰撞安全性能测试规范(C-NCAP),欧洲新车安全评鉴协会侧面柱碰撞试验规范(E-NCAP);美国高速公路安全保险协会整车碰撞安全法规(IIHS)。

2.1 C-NCAP 仿真和试验结果

采用验证了的乘员约束系统计算机辅助工程

(CAE)模型,如图 11 所示,根据 C-NCAP 对整车侧碰进行了仿真,并与侧碰试验进行了对比。

采用了 2015 版 C-NCAP 中头部伤害(式(1))、肋骨伤害(上、中、下部肋骨变形最大值分别与标准值对比)、腹部伤害(选取腹部合力与标准值对比)、骨盆伤害(耻骨合力与标准值对比)的低性能限值作为评判标准,来衡量整车侧碰,试验与仿真对比如表 2 所示。

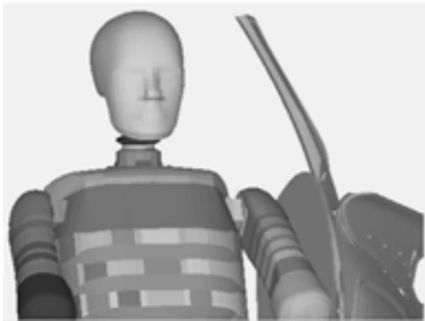


图 11 乘员约束系统模型

头部伤害的当量值 HIC 计算式为

$$\xi_{HIC} = (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2.5} \tag{1}$$

式中; a 为测量出的合成加速度,用 g 衡量, $g=9.81 \text{ m/s}^2$; t_2 和 t_1 为冲击过程的开始、结束 2 个时刻,在该时间间隔($t_2 - t_1 \leq 15 \text{ ms}$)内 HIC 取最大值。

表 2 整车侧碰试验结果

参数	试验	仿真	规范	相对误差/%
头部当量值	74.32	50.12	1 000	2.42
上肋变形/mm	41.17	46.35	42	-12.30
中肋变形/mm	37.44	41.06	42	-8.62
下肋变形/mm	35.50	40.54	42	-12.00
前腹部力/kN	0.353 4	0.324 4		8.21
中腹部力/kN	0.562 6	0.477 0		15.22
后腹部力/kN	0.357 7	0.414 6		15.91
腹部合力/kN	1.374 3	1.210 0	2.5	6.57
耻骨力/kN	1.794 8	1.920 0	6.0	-2.08

通过试验对标可知,虽然头部伤害(头部损伤标准 HIC15)的试验值与仿真值绝对误差较大(试验与约束系统模型仿真损伤差值为 24.2),但与 C-NCAP 头部伤害 HIC15 评价标准要求的最低下限 1 000 相比,相对误差(试验、CAE 差值与评价标准下线值的比值)只有 2.42%,显然仿真结果与试验结果基本吻合。上、中、下肋骨压缩变形仿真值与试验值的误差较小,试验值均小于法规中最低标准值

42 mm,其中变形量最大的为上肋骨;腹部的各项指标仿真值与试验值的误差较小,腹部合力小于 C-NCAP 低性能限值;骨盆耻骨合力仿真值与试验值的误差较小,仿真值远小于 C-NCAP 标准的下限值。通过对比可以看出,本文模型准确度较高,CAE 分析结果与试验结果吻合较好,说明帘式气囊在侧碰过程中起到了保护乘员安全的作用。

2.2 E-NCAP 的 29 km/h 侧碰仿真和试验结果

图 12 为 E-NCAP 的 29 km/h 侧杆仿真模型。

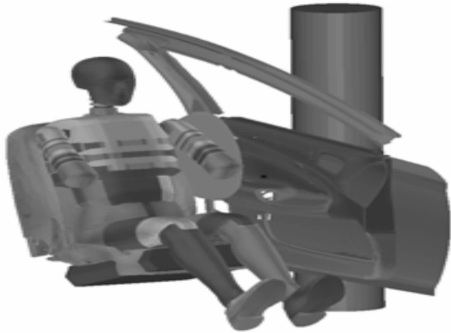


图 12 E-NCAP 的 29km/h 侧碰仿真模型

按 E-NCAP 要求,对整车侧柱碰进行了试验,并与仿真进行了对比,结果如表 3 所示。

表 3 29 km/h 侧柱碰试验与仿真对比

参数	试验	仿真	规范	相对误差/%
头部当量值	251.3	238.4	700	1.83
上肋变形/mm	43.63	39.7	50	7.86
中肋变形/mm	39.19	38.05	50	2.28
下肋变形/mm	35.15	35.86	50	-1.42
腹部合力/kN	1.24	1.39		-12.10
耻骨力/kN	1.97	1.60	2.8	13.20

采用 2015 版 E-NCAP 对头部伤害指标 HIC15、肋骨压缩变形量、腹部压缩变形量及腹部耻骨联合最大力进行了考核,并以该部位的最低性能限值作为评判标准。根据表 3 可以看出:肋骨压缩变形量仿真值与试验值的误差较小,其相对误差均小于 8%且小于标准的下限值;腹部耻骨联合最大力仿真值与试验值的误差较小,其值小于 E-NCAP 的下限值。通过对比分析可知,CAE 分析结果与试验结果吻合较好(耻骨力上的误差大约为 13.2%),表明本文模型准确度较高,相应的帘式气囊在侧面柱碰过程中能够较好地保证乘员安全。

2.3 IIHS 仿真和试验结果

为了验证本文模型是否适应美国的 IIHS^[17]要求,采用验证了的 CAE 系统模型(见图 13),根据美

国 IIHS,对整车侧碰进行了仿真分析,结果如表 4 所示。

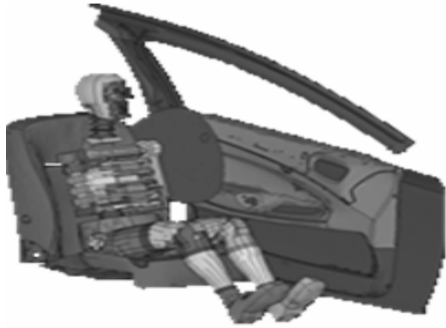


图 13 IIHS 下的系统模型

采用 2015 版 IIHS 对头部伤害指标、肋骨压缩变形量、最大肋骨压缩变形量进行了考核,采用该指标的低性能限值作为评判标准。

表 4 IIHS 下 CAE 系统模型的仿真结果

参数	试验	仿真	标准	相对误差/%
头部当量值	74.32	62.78	935	1.23
上肋变形/mm	41.17	41.13	50	0.08
中肋变形/mm	38.44	38.55	50	0.02
下肋变形/mm	37.50	36.34	50	2.32
腹部合力/kN	41.17	41.13	55	0.07

根据表 4 可以看出:头部伤害的仿真值与试验值的相对误差控制在 1.23%,二者基本吻合;肋骨压缩变形量的误差很小,且小于标准的下限值 50 mm;最大肋骨压缩变形量的相对误差为 0.07%,变形量小于 IIHS 的下限值 55 mm。显然,整体仿真与试验值基本吻合。

经有限元分析与试验表明,对于乘员侧碰中的伤害指数,CAE 分析与试验结果一致性较好,从而验证了本文模型的准确性,即帘式安全气囊在侧碰过程中可以起到保护乘员安全的作用。

3 结 论

为验证帘式安全气囊在整车侧碰过程中对乘员的防护性能,建立了帘式安全气囊 CAE 模型,重点研究了帘式气囊仿真模型的建立、侧碰撞系统模型的集成,并通过 C-NCAP、E-NCAP、IIHS 的侧碰试验、采集假人关键部位的损失值对 CAE 仿真结果进行了验证,由此得到以下结论。

(1)通过对帘式安全气囊研究,完成了侧面气帘和侧面碰撞系统建模,为侧碰撞开发提供了一种有效的工具。

(2)通过帘式安全气囊线性碰撞和静态展开试验及 CAE 分析,验证了本文模型的准确性。

(3)通过 C-NCAP、E-NCAP 和 IIHS 对乘员头部等关键部位的伤害指数进行分析,表明帘式安全气囊在车辆侧碰过程中能够有效保证乘员的安全。

参考文献:

- [1] 朱晓光,王治家,陈建明. PAM-CRASH 在侧面安全气囊仿真分析中的应用 [C]//2013 年 ESI 中国用户峰会论文选集: ESI 虚拟样机技术及应用. 北京: 知识产权出版社, 2013: 122-124.
- [2] CHRISTY M, HINES M H. Assessment of forearm injury due to a deploying driver-side air bag [C/OL]//Proceedings of the 16th International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. [2015-10-25]. <http://www.nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/esv/esv16/98S5o09.pdf>.
- [3] DENG Xingqiao, POTULA S, GREWAL H, et al. Finite element analysis of occupant head injuries: parametric effects of the side curtain airbag deployment interaction with a dummy head in a side impact crash [J]. Accident Analysis and Prevention, 2013, 55(1): 232-241.
- [4] HORSTEMEYER M F. A comparative study of design optimization methodologies for side-impact crashworthiness, using injury-based versus energy-based criterion [J]. International Journal of Crashworthiness, 2009, 14(2): 125-138.
- [5] CHENG Z, RIZER A L. Modeling and simulation of OOP occupant; airbag interaction, SAE 01-0510 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2003.
- [6] SCHNEIDER S, NIWA M. Effectiveness of thorax & pelvis side airbag for improved side impact protection [C]//The 19th ESV Conference. Washington, DC, USA: National Highway Traffic Safety Administration, 2005: 0273
- [7] JASON J, HALLMANN, YOGANANDA F, et al. Door velocity and occupant distance affect lateral thoracic injury mitigation with side airbag [J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43(3): 829-839.
- [8] 邓星桥,王进戈,何蓉,等. 汽车碰撞仿真技术中有限元模型的研究进展 [J]. 西华大学学报(自然科学版), 2013, 32(5): 31-37.
- DENG Xingqiao, WANG Jing, HE Rong, et al. Advance of research on finite element human model in car

crash simulations [J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2013, 32(5): 31-37.

- [9] CHUNG-KYU P M. LSTC/NCAC dummy model development[C/OL]//11th International LS-DYNA User Conference. [2015-10-12]. <http://www.dyna-look.com/international-conf-2010/OccupantSafety-5.pdf>.
- [10] 裴洋,乌秀春,赵洪波. 帘式气囊的计算机仿真建模研究 [J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2008, 28(4): 254-256.
- PEI Yang, WU Xiuchun, ZHAO Hongbo. Study of building of simulating model on curtain airbag [J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 28(4): 254-256.
- [11] NARAYANASAMY N. An integrated testing and application methodology for curtain airbag development [J]. SAE Transactions, 2005, 114(6): 43-50.
- [12] KWAK DAE-YOUNG. A study on the development of the curtain airbag of SUV vehicles for rollover and side impact protection proceedings [J]. JSAE Annual Congress, 2005, 65(5): 11-14.
- [13] 赵娜. 某车型侧安全气囊的匹配研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [14] 张君媛,苏国峰,苏畅,等. 计算机辅助设计技术在汽车侧面帘式气囊模块开发中的应用 [J]. 汽车工程, 2009, 5(1): 6-9.
- ZHANG Junyuan, SU Guofeng, SU Chang, et al. CAD technology application in the module development of car side curtain airbag [J]. Automotive Engineering, 2009, 5(1): 6-9.
- [15] 田迪斯. 某乘用车侧面乘员约束系统设计与集成优化 [D]. 长春, 吉林大学, 2013.
- [16] 周淑渊,向良明,楼劫,等. 侧气帘展开对内饰件影响的仿真研究 [J]. 上海汽车, 2012, 6(3): 26-29.
- ZHOU Shuyuan, XIANG Liangming, LOU Jie, et al. Effect simulation study of inner decoration from side curtain airbag [J]. Journal of Shanghai Automobile, 2012, 6(3): 26-29.
- [17] 赵桂范,杨娜. 多刚体人体模型及碰撞过程仿真 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 45-48.
- ZHAO Guifan, YANG Na. A rigid multibody model and the simulation on impact response [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 45-48.

(编辑 苗凌)