

DOI: 10.7652/xjtuxb201609023

汽车坐盆安全气囊对假人伤害的仿真及优化

卢礼华^{1,2}, 陆建辉¹, 刘志峰¹, 高发华², 代立宏², 罗明军²

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 230009, 合肥;

2. 奇瑞商用车有限公司汽车工程研究院, 241006, 安徽芜湖)

摘要: 针对汽车前碰撞过程中假人胸部压缩量超标这一难点, 开发了一种安装在座椅坐盆处的全新坐盆安全气囊。通过理论探索坐盆气囊在碰撞过程中的作用原理, 证明了坐盆气囊可以有效抑制假人 X 向运动, 达到了减少假人胸部压缩量的目的。借用计算机辅助工程(CAE)中 MADYMO 软件建立了坐盆气囊模型, 通过零部件和子系统的试验验证了该模型的精度。在某款运动型多功能车(SUV)车型上建立了整车约束系统模型且与试验进行了对标验证; 在验证后的系统模型中通过增加坐盆气囊的 CAE 模块作为优化的基础模型, 对坐盆气囊的安装位置、角度以及点爆时间进行了灵敏度分析和试验设计(DOE)优化, 以探寻最佳的优化方案。经台车试验和限力式预紧安全带对比分析表明, 坐盆安全气囊可以降低假人胸部 14.79% 的压缩量, 有效抑制了人体骨盆纵向位移。该结果可为保护假人胸部研究提供参考。

关键词: 坐盆安全气囊; 试验设计优化; 灵敏度分析; 台车试验

中图分类号: U461 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)09-0146-07

Simulation and Optimization of Automobile Seat Basin Airbag for Dummy Injury

LU Lihua^{1,2}, LU Jianhui¹, LIU Zhifeng¹, GAO Fahua², DAI Lihong², LUO Mingjun²

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

2. Automotive Engineering Research Institute, Wuhu Chery Commercial Vehicle Company, Wuhu, Anhui 241006, China)

Abstract: An innovative seat basin airbag installed on the front seat is developed as a solution to the over compression of the dummy chest in the event of full frontal impacts. The operation principle of the seat basin airbag is theoretically investigated to demonstrate its effect on restraining the movement in X-direction and reduce the compression of the dummy chest. The purpose of reducing chest compression of dummies can be achieved via seat basin airbag. A seat basin airbag model is established with the commercial code of MADYMO and its precision is validated by the tests on sub-system and components. A restraint system model for a SUV is established and validated via a full scale test. Putting seat basin airbag CAE module into the validated full scale restraint system model facilitates constructing an essential optimization scheme, in which DOE (design of experiment) optimization method and sensitivity analysis are performed for the installation position, angle and ignition time of the seat basin airbag. The analysis indicates that the compression of dummy chest can be reduced by 14.79%, and the movement of the pelvic is significantly restrained.

Keywords: seat basin airbag; design of experiment optimization; sensitivity analysis; sled test

收稿日期: 2016-01-27。 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: 2016-06-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160614.1714.002.html>

随着汽车安全法规的进一步实施,用户对汽车安全性的要求越来越高^[1-2],汽车整车安全系统的设计更为重要。较早的安全气囊已开发出多种类型^[3],如驾驶者安全气囊(DAB)、乘员侧安全气囊(PAB)、侧面安全气囊(SAB)和安全气帘(CAB)、膝部安全气囊(KAB)等。在多数前碰撞试验中,假人的胸部压缩量一直是约束系统优化的难点^[4]。在约束系统开发过程中,通常采用预紧式安全带来消除碰撞开始时乘员与安全带间的松弛量,减小假人上半身相对于车体的位移量,达到减小假人头部和胸部伤害的目标。但是,预紧式安全带只作用于假人上半身,对假人下半身的效果并不明显。

研究表明,正面碰撞时增大座椅坐垫与地面的夹角,能够有效降低乘员头部和胸部伤害^[5],实际上,座椅坐垫倾角与乘坐舒适性相矛盾^[6],因此本文结合约束系统开发中的实际需求,提出了一种安装在座椅前端的坐盆安全气囊。传统的安全气囊是通过气囊来隔离假人与车身的^[7],坐盆气囊是主动地推动假人远离碰撞区域,从而减小假人的胸部伤害。

1 坐盆气囊工作原理

为有效抑制驾驶员和乘员在整车碰撞过程中发生纵向位移,从而造成假人伤害,提出了一种安装在座椅前端的坐盆安全气囊。根据动力学和运动学的基础理论,通过对坐盆气囊的作用原理进行分析,初步论证了坐盆气囊对假人保护的可行性。图 1 为假人 X 向受力分析。为便于分析,将假人模型和受力情况进行必要的简化。设假人位移为 x ,初始碰撞时假人的 X 向速度为 $\dot{x}_1$,最终假人的 X 向速度为 $\dot{x}_e=0$ 。

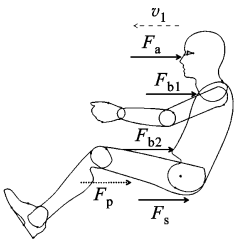


图 1 假人的 X 向受力分析

如果只配备了 DAB 和安全带,没有配置坐盆气囊,则假人 X 向受到的约束力有 DAB 对假人头部和胸部的约束力 F_a ,安全带的肩带约束力 F_{b1} 和腰带约束力 F_{b2} ,坐垫对假人大腿和骨盆的摩擦力 F_s 。根据受力和运动建立的动力学和运动学方程如下

$$F_{x_1} = F_a + F_{b1} + F_{b2} + F_s = m\ddot{x}_1 \quad (1)$$

$$\dot{x}_1^2 - \dot{x}_e^2 = 2\dot{x}_1 x_1 \quad (2)$$

式中: F_{x_1} 为假人在 X 方向上受到的合力; m 为假人的总质量; $\dot{x}_1$ 为假人 X 向的加速度; x_1 为假人 X 向的位移。

假如在前碰撞试验中配备了坐盆安全气囊,假人在 X 向还受到了坐盆气囊阻碍其向前运动的力 F_p ,因此新的动力学和运动学方程如下

$$F_{x_2} = F_a + F_{b1} + F_{b2} + F_s + F_p = m\ddot{x}_2 \quad (3)$$

$$\dot{x}_1^2 - \dot{x}_e^2 = 2\dot{x}_2 x_2 \quad (4)$$

式中: F_{x_2} 为配有坐盆气囊时假人在 X 方向上受到的合力; $\ddot{x}_2$ 为配有坐盆气囊时假人 X 向的加速度; x_2 为配有坐盆气囊时假人 X 向的位移。

对比式(1)和式(3), F_{x_2} 明显大于 F_{x_1} ,则 $\ddot{x}_2$ 大于 $\ddot{x}_1$ 。 $\dot{x}_1$ 和 $\dot{x}_2$ 恒定不变,根据式(2)和式(4)可以得 x_2 小于 x_1 。可见,采用坐盆气囊后,假人整体 X 向位移减小,这利于假人上半身远离 DAB 和方向盘,避免出现 DAB 挤压带来的胸压过大的情况,同时也可减小大腿的伤害。

2 坐盆气囊计算机辅助工程建模及验证

2.1 坐盆气囊计算机辅助工程模型

在 MADYMO 软件中建立坐盆气囊的计算机辅助工程(CAE)模型,模型主要由气袋和集气盒两部分组成。气袋在参考未折叠情况的同时,采用 Primer 模块进行了 4 步折叠,以消除气袋网格在折叠过程中产生的交叉和穿透。集气盒采用有限元进行模拟,将折叠后的气袋放置在集气盒中,并保证气袋网格与集气盒网格之间不存在初始穿透。由 CONTACT.FE_FE 模块设置气袋与集气盒之间的接触,由此生成坐盆气囊的 CAE 模型,如图 2 所示。

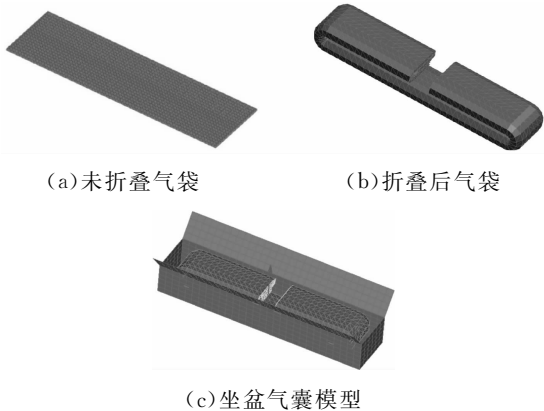


图 2 坐盆气囊有限元模型

为准确模拟气囊的整个展开过程,本文采用 Gas Flow 算法^[8-11]对发生器注入气袋的气体进行了流场模拟,将模型进行静态点爆分析,得到气囊展

开过程,如图3所示。

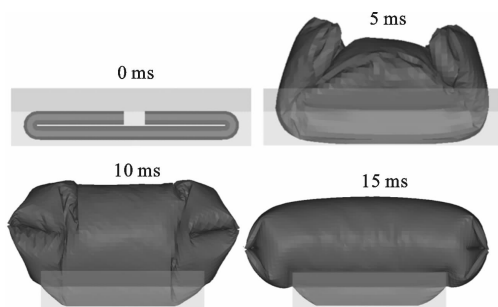


图3 坐盆气囊静态展开过程

2.2 坐盆气囊模型刚度验证

通常,气囊 CAE 模型必须通过刚度试验验证之后才能保证模型的精度。试验时先将坐盆气囊安装在刚性壁障上,冲击块与壁障相隔 60 mm 且静止放置。冲击块上装有传感器,气囊点爆后冲击块运动,从而可以获得气囊的加速度曲线。在 MADYMO 软件中依据如上试验参数建立模型,仿真后得到气囊的展开动画及加速度曲线,如图4和图5所示。



图4 气囊的展开过程

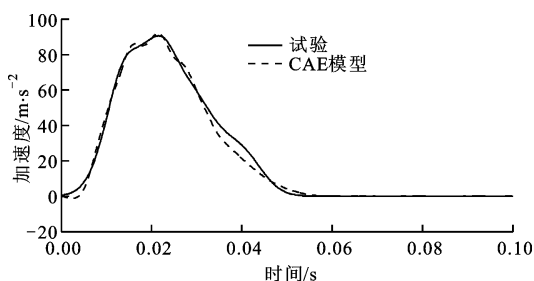


图5 气囊的加速度曲线

由图4可知,仿真中安全气囊的展开高度及包型与试验较为一致。由图5可知,试验和仿真的加速度曲线吻合度较高,表明气囊刚度一致。可见,本文 CAE 模型具有较高的精度,可以准确模拟坐盆气囊的实际情况。

2.3 子系统模型验证

由于坐盆气囊是集成在座椅上的,座椅对坐盆气囊的影响不可忽略,因此需要对子系统试验进行

验证。子系统试验时先将假人放置在装有坐盆气囊的座椅上,点爆坐盆气囊,观察气囊作用于假人大腿的时刻(到位时刻),以及气囊使假人大腿的抬起高度。CAE 模型包含座椅、坐盆气囊、假人和背板,其中假人采用精度较高的 d_hyb350fc 型有限元假人,由此得到 CAE 的仿真动画与试验录像如图6所示。



(a)动画

(b)录像

图6 CAE 的仿真动画与试验录像

由图6可知,仿真时假人大腿抬起时间与试验相同,约为 18~20 ms,说明 CAE 模型中气囊的到位时间较为准确,另外参考背板上的格子可发现,仿真时假人大腿抬起高度与试验较为一致,表明子系统中坐盆气囊的展开高度和刚度与实际一致。动画中隐藏了座椅和假人的大腿部分,而通过 CAE 模型可获得坐盆气囊与假人的具体情况。因此,通过子系统对比,证明了座椅和坐盆气囊的子系统模型具有较高的精度,其为搭建带坐盆气囊的整车模型提供了基础。

3 整车约束系统模型

3.1 整车约束系统基础模型

根据实车 50FRB、采用 MADYMO 软件建立了有限元模型,模型中结构包括风窗、前围板、仪表板、脚踏板、地板、座椅和转向操纵等^[10-13],各部件之间采用铰链连接。驾驶员安全气囊和安全带的约束系统采用有限元法进行模拟,假人模型采用 Hybrid III 第 50 百分位(即中国公民中等身高身材)的有限元模型,假人 H 点、骨盆角、假人与车身的相对位置均与试验测量值保持一致。模型中假人与 DAB、安全带以及座椅、仪表板、地板等结构部件的接触采用 CONTACT.FE_FE 方式进行设置^[14]。同时,模型附加了诸多细节功能:DAB 罩盖撕裂,转向管柱压溃,方向盘上轮缘弯曲变形,座椅翻转等。50FRB 模型如图7所示。

约束系统模型建成后,需要将假人伤害仿真与试验进行对标验证,以保证模型的精度。验证时将仿真和试验信号(力和加速度)导入 Objective Rat-

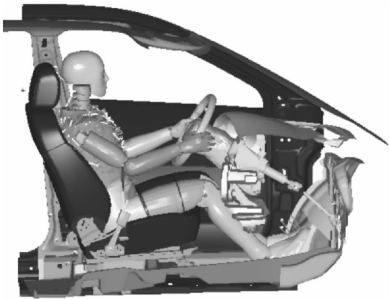


图 7 50FRB 模型

ing 软件进行评判,验证顺序为骨盆、大腿小腿、胸部、颈部、头部,各部位伤害吻合程度如表 1 所示。

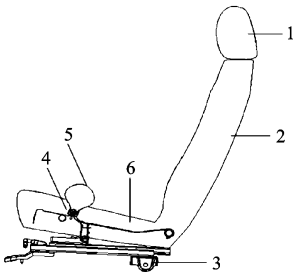
表 1 假人伤害对标结果

伤害部位	头部	胸部	颈部	骨盆
对标值/%	74.86	84.13	69.97	88.40
伤害部位	股骨	安全带	综合	
对标值/%	84.1	94.17	82.60	

由表 1 可知,假人伤害的仿真与试验的综合拟合得分达到了 82.60%,高于通常模型要求的 80%,表明本文模型具有较高的精度,可用于后续约束系统分析。

3.2 装配坐盆气囊的系统模型

以验证后的约束系统为基础,在座椅坐盆处通过添加已验证的坐盆气囊模型,生成装配有坐盆气囊的整车约束系统模型。图 8 为坐盆气囊模型及部件构成。



1:头枕;2:靠背;3:座椅骨架;4:坐垫;
5:坐盆气囊集气盒;6:坐盆气囊气袋
图 8 坐盆气囊模型及部件构成

集气盒通过铰链与座椅坐盆相连,这样整车碰撞过程中坐盆气囊将随着座椅一起进行水平运动和翻转。

为使坐盆气囊的保护效果最大化,采用灵敏度分析、结合 DOE 优化的方法,探寻出最佳的坐盆气囊设置方案。

4 坐盆气囊优化及台车试验验证

4.1 灵敏度分析

在整车约束系统上坐盆气囊优化参数分别为坐盆气囊的安装位置、角度及点火时间,如表 2 所示。坐盆气囊安装位置如图 9 所示。坐盆气囊安装角度如图 10 所示。

表 2 坐盆气囊优化参数

优化参数	优化 1	优化 2	优化 3	优化 4
坐盆气囊到最前端距离/mm	0	50	100	
与 Z 轴的夹角/(°)	0	15	30	
点爆时间/ms	0	5	10	15

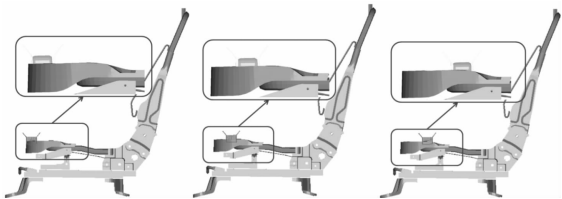


图 9 坐盆气囊安装位置

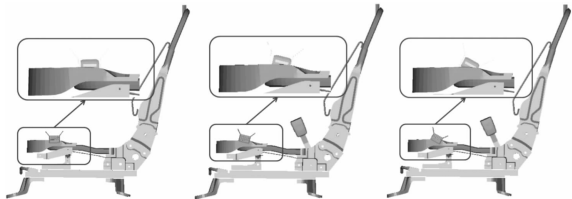


图 10 坐盆气囊安装角度

如果直接将 3 种优化参数的水平值进行 DOE 全排列分析,则将生成 36 组试验矩阵。为减小 DOE 优化的计算时间,先通过灵敏度分析剔除对胸压影响不敏感的优化参数,再针对余下参数进行 DOE 优化,灵敏度分析结果如图 11 所示。

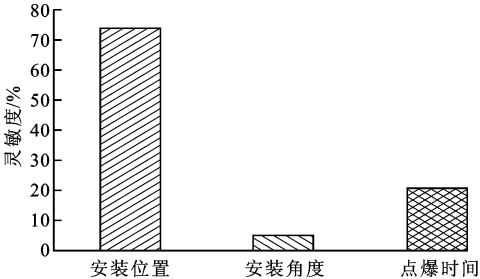


图 11 灵敏度分析结果

由图 11 可知,3 种优化参数中胸压受坐盆气囊的安装位置和点爆时间影响较为敏感,而安装角度的影响较小。所以,在 DOE 优化中只选取安装位

置和点爆时间作为最佳优化参数,这样试验矩阵为 12 组,可大大降低计算量,缩短了开发周期。

4.2 DOE 优化分析

对安装位置和点爆时间进行了全因子计算,对 12 组优化方案进行了分析。从 12 组优化方案中选择出一组最佳的参数:坐盆气囊距最前端 100 mm,点爆时间为 10 ms。由于在 DOE 优化中忽略了安装角度这一优化参数,故在已确定优化参数的基础上,对 3 种安装角度进行了对比分析,结果显示,当气囊集气盒中心线与 Z 轴成 30°时,胸部压缩量最小。所以,最优的方案为:坐盆气囊距最前端 100 mm,点爆时间为 10 ms,安装角度为中心线与整车 Z 轴成 30°。优化前后假人伤害值对比如表 3 所示。

表 3 优化前后假人伤害值对比

参数	基础模型	DOE 优化	改进程度 /%
HIC36 值	750.17	697.29	-7.03
胸部压缩量/mm	44.60	38.00	-14.80
颈部所受力矩/N·m	33.05	36.78	+11.29
左大腿压缩力/N	438	23	-94
右大腿压缩力/N	1 695	90	-95

由表 3 看出:优化后胸部压缩量下降了 14.80%,头部 HIC36 值下降了 7.03%,左、右大腿压缩力分别下降了 94%、95%。其原因是坐盆气囊限制了假人下半身运动,从而减小了假人大腿与仪表盘的碰撞,可见坐盆气囊对假人下半身具有保护作用。表 3 还显示,颈部所有力矩上升,但未达到 C-NCAP 标准的扣分限值 42 N·m,同时胸部压缩量下降最多,因此可将该优化参数视为最优选择,并应用于台车试验进行验证。

4.3 台车试验验证

将坐盆安全气囊安装在台车上对两轮台车进行试验,由此来验证坐盆安全气囊对胸部压缩量的效果。第一轮台车试验中安装了坐盆安全气囊,但气囊不点爆;第二轮台车试验中安装坐盆安全气囊,且气囊点爆,同时采用了最优方案(坐盆气囊距最前端 100 mm,点爆时间为 10 ms,安装角度为中心线与整车 Z 轴成 30°)。两轮台车试验如图 12 所示。

在两轮台车碰撞试验中,DAB、安全带等设置相同,同时采集假人的骨盆和胸部的关键参数,经整理得到安装坐盆气囊前后两轮试验的假人骨盆和胸部压缩随碰撞时间的变化,如图 13 所示。

由图 13a 可见,安装坐盆气囊后骨盆位移量小



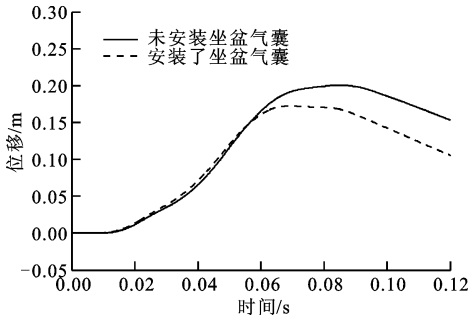
(a) 坐盆安全气囊起爆前



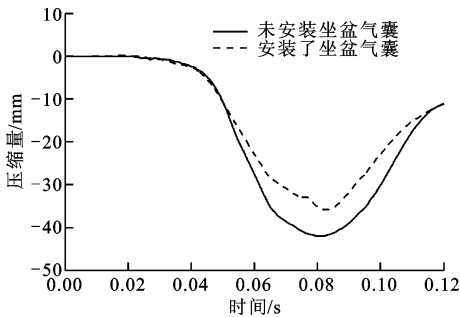
(b) 坐盆安全气囊起爆后

图 12 两轮台车试验

于未安装的位移,最大值下降了 28 mm,说明坐盆气囊可以减小假人 X 向的位移,这与理论模型结论吻合。由图 13b 可知,安装坐盆气囊后假人胸部压缩量为 35.88 mm,降低了 14.79%,与仿真结果 14.80%一致。另外,坐盆气囊的其他作用也得到了



(a) 骨盆相位移对比



(b) 胸部压缩量对比

图 13 两轮台车试验数据对比

验证,如假人左、右大腿受力下降了 86%和 97%。因此,通过试验充分证明了安装坐盆安全气囊可以有效保护假人,可以解决约束系统开发的难点,即假人胸部压缩量超标的问题。

5 与限力式预紧安全带对比

目前,带有限力装置的预紧安全带已经得到广泛应用,预紧装置可使安全带维持在一个足够的张紧状态,以固定乘客身体。限力装置需设定某一阈值,当施加在安全带上的力度达到限值时,安全带限力装置自动放出安全带,避免乘员胸部承受过大的安全带压力,工作原理如图 14 所示。

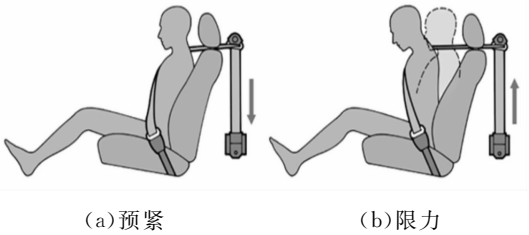


图 14 预紧和限力装置的工作原理

为了对比限力式预紧安全带与坐盆气囊约束的效果,本文采用坐盆气囊通过降低乘员正面碰撞中骨盆位移和胸部压缩量,来评估约束的作用。限力式预紧安全带模型的预紧量为 0.09 m,且在 0.01 s 内卷入并锁止,安全带的限力等级为 2 500 N。

在坐盆气囊和限力式预紧安全带这 2 种约束装置下,人体的骨盆纵向位移和胸部压缩量如图 15 和图 16 所示。

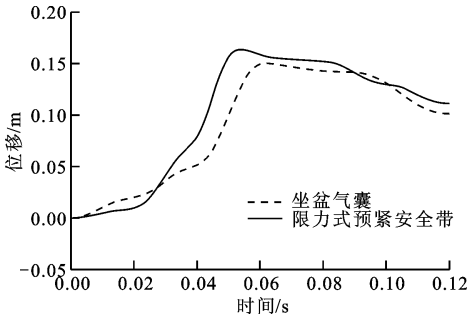


图 15 骨盆相对位移

由图 15 和图 16 可知,坐盆气囊下骨盆相对位移量小于限力式预紧安全带,胸部压缩量不如限力式预紧安全带。总体来说,坐盆气囊起到了一定的预期效果,可以有效抑制胸部位移,缩短人体骨盆的位移,减小膝盖和大小腿等与内饰之间的二次碰撞等,但仍有较大的优化和改进空间,两者的结合与合理搭配有待于进一步研究。

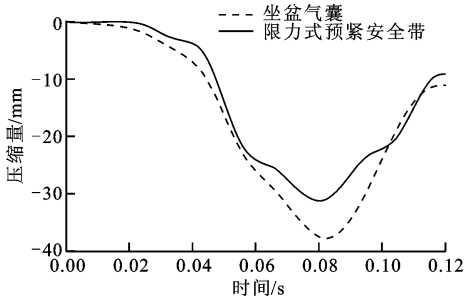


图 16 胸部压缩量

6 结 论

(1)本文开发了一种安装在座椅坐盆处的全新坐盆安全气囊,根据动力学和运动学的理论,对假人 X 向运动位移进行了分析,证明了坐盆气囊可以减小假人胸部压缩量。

(2)采用 Gas Flow 算法对气囊内的气体进行了流场模拟,并将气囊 CAE 模型与气囊刚度和子系统试验进行了对标,以验证 CAE 模型的精度。

(3)依据某款 SUV 实车建立了约束系统模型,通过试验验证确保模型的准确性。在该模型的基础上添加了坐盆气囊模块,作为坐盆安全气囊优化的基础模型。通过对坐盆气囊安装位置、角度及点爆时间这 3 个优化参数进行灵敏度分析和 DOE 优化,得到了最佳的优化方案:坐盆气囊距最前端 100 mm,点爆时间为 10 ms,安装角度为中心线与整车 Z 轴成 30°。这样,胸压大幅下降 14.80%。

(4)经与限力式预紧安全带对比,结果表明坐盆气囊不仅能有效抑制胸部位移,还可有效缩短人体骨盆的位移,减小膝盖和大小腿等与内饰之间的二次碰撞等。

参考文献:

[1] 王焯,李宏光,赵航. 现代汽车安全 [M]. 北京:人民交通出版社,1997:157.
[2] 林逸,郭九大. 汽车被动安全性研究综述 [J]. 汽车工程,1998,120(1):1-8.
LIN Yi, GUO Jiuda. A review on vehicle passive safety research [J]. Automotive Engineering, 1998, 120 (1): 1-8.
[3] 田婧婷. 汽车正面安全气囊充气过程模拟及试验验证技术 [D]. 长春:吉林大学,2009.
[4] 郝玮,黄江寅,杜亮,等. 正面假人胸部压缩量优化方法研究 [J]. 汽车与配件,2014,41(3):142-147.
HAO Wei, HUANG Jiangyin, DU Liang, et al. Study on chest deflection optimization method of frontal

- dummy [J]. *Automobile & Parts*, 2014, 41(3): 142-147.
- [5] 葛如海, 臧绫, 王浩涛, 等. 汽车座椅坐垫倾角对正面碰撞乘员保护影响分析 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(11): 230-234.
- GE Ruhai, ZANG Ling, WANG Haotao, et al. Analysis on the influence for the protection on frontal impact by vehicle seat cushion obliquity [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(11): 230-234.
- [6] 李铁柱, 李光耀, 顾纪超, 等. 汽车乘员舱安全性与舒适性多学科设计优化 [J]. *机械工程学报*, 2012, 48(2): 138-145.
- LI Tiezhu, LI Guangyao, GU Jichao, et al. Multidisciplinary design optimization of passenger compartment safety and comfort [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(2): 138-145.
- [7] MARKLUND P O, NILSSON L. Optimization of air-bag inflation parameters for the minimization of out of position occupant injury [J]. *Computational Mechanics*, 2003, 31(6): 496-504.
- [8] YOGANANDAN N, PINTAR F A, ZHANG J, et al. Lateral impact injuries with side airbag deployments: a descriptive study [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2007, 39(1): 22-27.
- [9] 王宪伟. 某乘用车驾驶员安全气囊匹配优化与方案研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [10] 万鑫铭. 汽车驾、乘人员安全气囊有限元模型的建立及其在前碰撞中的应用 [D]. 长沙: 湖南大学, 2003.
- [11] 郝旭超. 汽车安全气囊仿真分析方法的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [12] JIANG C, NEAL-STURGESS C E, HU Y. Kinematics simulation and head injury analysis for rollovers using MADYMO [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2010, 15(5): 505-515.
- [13] 何文, 钟志华, 杨济匡. 汽车安全气囊工作性能仿真试验验证技术研究 [J]. *机械工程学报*, 2002, 38(4): 126-130.
- HE Wen, ZHONG Zhihua, YANG Jikuang. Research on experimental validation of computer simulation of working performance of automobile airbag [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(4): 126-130.
- [14] LABERGE-NADEAU C, BELLAVANCE F, MESSIER S, et al. Occupant injury severity from lateral collisions: a literature review [J]. *Journal of Safety Research*, 2009, 40(6): 427-435.

(编辑 苗凌)

(上接第24页)

- [5] 雷天觉. 新编液压工程手册 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998: 311-600.
- [6] 张海竹, 卢勇, 张薇, 等. 高压叶片泵流体泄漏研究 [J]. *流体机械*, 2009, 37(3): 1-5.
- ZHANG Haizhu, LU Yong, ZHANG Wei, et al. Analysis on the flow leakage in high pressure vane pump [J]. *Fluid Machinery*, 2009, 37(3): 1-5.
- [7] 高殿荣, 吴晓明. 工程流体力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 115-122.
- [8] 路甬祥. 液压气动技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 210-453.
- [9] 林信彰. 凸轮转子叶片马达的研究 [J]. *福州大学学报 (自然科学版)*, 1995, 23(2): 59-64.
- LIN Xinzhang. The research of cam-rotor vane motor [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 1995, 23(2): 59-64.
- [10] WEN Desheng. Theoretical analysis of output speed of multi-pump and multi-motor driving system [J]. *Sci China: Tech Sci*, 2011, 54(4): 992-997.
- [11] 黎克英, 陆祥生. 叶片式液压泵和马达 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993: 262-268.
- [12] 闻德生, 张勇, 王志力, 等. 三作用多泵多马达输出转速和转矩的理论分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(3): 81-84.
- WEN Desheng, ZHANG Yong, WANG Zhili, et al. Rotating speed and torque of triple-acting multi-pump and multi-motor [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(3): 81-84.
- [13] 刘一山, 闻德生, 杜孝杰. 多泵多速马达传动系统简介 [J]. *液压气动与密封*, 2012(2): 73-76.
- LIU Yishan, WEN Desheng, DU Xiaojie. Introduction of multi-pumps and multi-motors hydraulic transmission system [J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2012(2): 73-76.

(编辑 苗凌)