

Protection Performance Evaluation of Overhead Airbag Based on CAE Simulation

ZHANG Haiyang¹, WANG Jin¹, ZHOU Dayong¹, LI Jun², XU Linli², HU Yuanzhi², REN Lihai²

¹Geely Automobile Engineering Research Institute, Hangzhou 311228, China

²Chongqing University of Technology, Institute of Vehicle Engineering, Chongqing 400054, China

Email: yuanyzhihu@cqut.edu.cn

Abstract: With the development of intelligent transportation technology and automatic driving technology, higher requirements are put forward for the design of the future occupant restraint system. This project aims at the overhead airbag design according to the occupant protection requirements under the highly automated driving scene (when the steering wheel was folded), based on the original vehicle restraint system MADYMO simulation model. Besides, the comparison of occupant injury indexes between the original driver airbag model and the overhead airbag model was carried out, and occupant protection effects of the overhead airbag was evaluated. Finally, the airbag energy absorption under certain load-cases was analyzed based on the airbag energy absorption characteristic theory. The results show that the overhead airbag absorbs less occupant's head kinetic energy, resulting in more energy transmitted to the neck, which increases the neck injury indexes among 40% offset deformable barrier load-case. Therefore, optimizing the overhead airbag's dynamic stiffness can effectively increase the airbag's kinetic energy absorption and improve the occupant neck injury indexes.

Keywords: overhead airbag; MADYMO simulation; energy absorption characteristics; occupant injury

基于 CAE 仿真的顶置气囊防护性能评价

张海洋¹, 王金¹, 周大永¹, 李军², 胥林立², 胡远志², 任立海²

¹吉利汽车工程研究院, 杭州, 中国, 311228

²重庆理工大学车辆工程学院, 重庆, 中国, 400054

Email: yuanyzhihu@cqut.edu.cn

摘要: 随着智能交通技术和自动驾驶技术的发展, 对未来乘员约束系统的设计提出了更高的要求。本项目针对某车型高度自动驾驶场景(方向盘收缩后)的乘员防护需求, 基于该车型已对标的约束系统MADYMO仿真模型, 开展顶置式气囊设计; 比对配备原始主驾气囊与顶置气囊的乘员伤害指标差异, 评估顶置式气囊的乘员防护效果。最后, 基于安全气囊吸能特性理论对相关工况中的气囊吸收能量进行分析。仿真结果表明: 40%正面碰撞工况中顶置气囊吸收乘员头部的动能较少, 导致乘员头部传递给颈部的能量较多, 增加了乘员颈部的伤害。因而可通过优化顶置气囊刚度, 增加气囊对乘员头部动能的吸收, 改善乘员颈部伤害指标。

关键词: 顶置气囊; MADYMO仿真; 吸能特性; 乘员

1 引言

智能交通系统和网联汽车已经成为未来交通的一个发展方向, 降低人为因素引发的事故的同时, 也带来了新的交通事故模式和乘员碰撞防护方面的挑战, 对适应自动驾驶汽车的乘员约束系统设计提出了更高的要求^[1]。Frank Laakmann 等人^[2]对未来高水平的自动驾驶汽车乘员防护设计了自适应乘员约束系统; 姬佩君等人^[3]提出了均衡约束概念的乘员碰撞保护, 武和全等人^[4]面向高度自动驾驶汽车, 提出使用旋转座椅改变乘员朝向与碰撞相对位置的规避策略, Krystoffer Mroz 等人^[5]提出了自适应安全带的概念。上述新型乘员约束系统设计依然依托于现有的汽车内饰环境, 随着内饰设计理念的进步, 未来高度自动驾驶汽车的内饰将更为多样, 但相应地增加

项目资助信息: 浙江省汽车安全技术研究重点实验室开放基金
(2009E10013) 与教委科学技术研究项目

了乘员约束系统设计的难度，而新型顶置气囊概念的提出能较好地适应未来自动驾驶汽车乘员防护的要求，然而现有顶置气囊相关基础研究基本与副驾驶及后排有关，Alfonso Bustos 等人^[6]设计了适应某车型内饰布置要求的副驾驶侧顶置气囊；Byungho Min 等人^[7]对翻滚或者侧碰工况下的乘员防护，设计了全景式天窗气囊；JingwenHu 和 Chun-Tao, Wu 等人^[8,9]设计了适应后排不同体型乘员碰撞防护的后排顶置气囊。

本文基于企业某车型高度智能驾驶环境下的乘员保护需求，创新性地提出了可折叠式转向系统搭载顶置气囊的概念，通过 CAE 分析的方法，探究该方案的可行性并评估其对驾驶员的防护效果。

2 正面碰撞约束系统模型的搭建

2.1 约束系统基础 CAE 模型及验证

本文利用多刚体动力学软件 MADYMO 作为仿真分析工具，搭建的约束系统模型涵盖了乘员舱、安全带及安全气囊等模块，乘员舱模块主要包括地板、护膝板、仪表板、风挡玻璃、转向系统、踏脚板、座椅等，各部件的空间位置按车辆实际尺寸布置^[10]，依据 C-NCAP(China-New Car Assessment Program)试验要求，导入 Hybrid III 50th 多刚体男性假人，正常坐在驾驶位置上，搭建的约束系统仿真基础模型如图 1 所示。



Fig.1 Restraint system simulation model

图 1 约束系统仿真基础模型

选取正面碰撞 60ms 与 100ms 时刻的仿真结果与实验结果的运动进行对比如图 2 所示，由图可知，选取的两个时刻的乘员运动姿态、气囊的展开形态、乘员与气囊的接触时刻等仿真结果与实验结果基本一致。

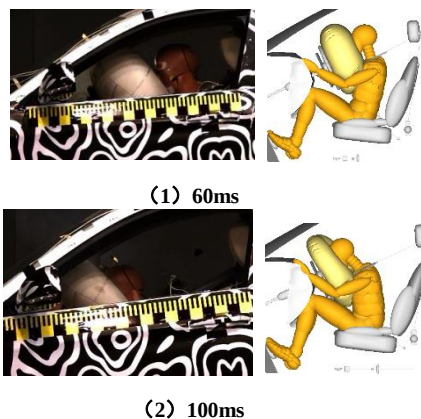


Fig.2 Occupant kinematics comparison

图 2 乘员的运动对比

2.2 顶置气囊设计及模块仿真

项目组前期基于新型汽车内饰设计的理念，提出了可折叠转向系统的概念，该方案下的转向盘折叠收纳于仪表板内，并可按照驾驶员实际驾驶需求自动展开至原有驾驶位置。本文基于转向盘折叠后的内饰空间，参考

乘员侧气囊的展开形状，设计了一款适应于该车型自动驾驶乘员保护需求的顶置气囊，综合评估多种折叠方式的展开效果后，选择 Z 字型折叠进行折叠，并将其折叠文件进行动态松弛，最后导入 MADYMO 约束系统模型中，调整至风挡玻璃与顶棚间，动态松弛后的气囊及气囊展开效果如图 3 所示。

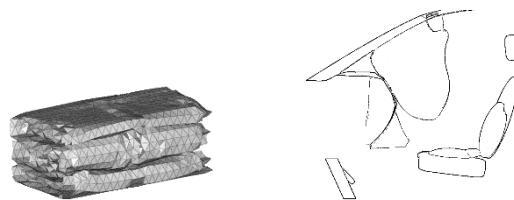


Figure 3: Dynamically relaxed airbag (left) and interior deployment result (right)

图 3 动态松弛后的气囊（左）及车内展开效果（右）

将动态松弛好的顶置气囊（Overhead Airbag 下文简称 OAB）有限元文件导入 MADYMO 软件中，与原始 DAB 在相同条件下进行单独的模块仿真计算，分析其静态展开特性。图 4 表示两种气囊的展开外形对比，图 5 表示两种气囊展开体积曲线对比，图 6 表示两种气囊气室内压力曲线对比。

由图 4、图 5 可知，OAB 展开外形类似于乘员侧气囊，两者体积相差较大，原始 DAB 体积为 54L，OAB 则为 106L。由图 6 可知，两种气囊在展开初期均有一个突然增加的压力，且 OAB 高于 DAB。OAB 的折叠层数多于 DAB，展开过程中折叠层间的干扰作用更明显，展开前期需要的充气压力更高^[11]，展开中后期两种气囊气室内压力均呈现先渐进上升后降低的趋势^[12]，中后期压力 DAB 高于 OAB。



Figure 4 Comparison of DAB (left) and OAB (right) expansion profile

图 4 DAB（左）与 OAB（右）展开外形对比

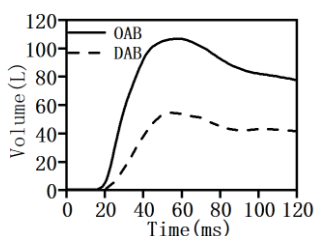


Figure 5 Comparison of DAB and OAB volume

图 5 DAB 与 OAB 展开体积曲线对比

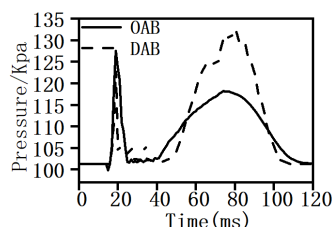


Figure 6 Comparison of DAB and OAB internal pressure

图 6 DAB 与 OAB 气室内压力曲线对比

3 顶置气囊乘员防护效能评估

本文选取100%正面碰撞工况(FRB)及40%正面碰撞工况（ODB）下的乘员头部、颈部及胸部的损伤值作为评价指标，对比配备原始DAB与新型OAB的乘员动态响应及各项伤害指标差异，探究可折叠式转向盘搭载顶置气囊在乘员防护方面的可行性，并评估顶置气囊对驾驶员的防护效能。

3.1 FRB 及 ODB 工况下的乘员响应分析

图 7 为 FRB 工况中配备 DAB 与 OAB 的乘员的不同时刻的动态响应。由图可知，转向盘折叠后，OAB 充气后朝着风挡玻璃展开然后与仪表板接触，沿着仪表板向乘员展开的过程中未与乘员发生头部、胸部及颈部等

关键部位发生接触，而 DAB 由于转向系统的支撑，冲出气囊盒体后与乘员胸部有挤压，两种气囊完全展开后，配备 OAB 的乘员头部的运动间隙余量高于配备 DAB 的乘员。

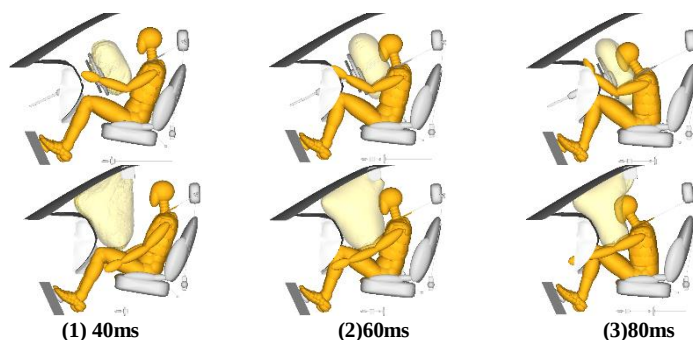


Figure7 Occupant dynamic response comparison at different times under FRB load-case

图 7 FRB 工况下不同时刻的乘员动力学响应对比

图 8 为 ODB 工况中配备 DAB 与 OAB 的乘员的不同时刻的动态响应，由图可知，配备两种气囊的乘员头部均未能接触到气囊中心部位，DAB 由于有转向盘的支撑，对乘员头部的支撑作用优于 OAB，乘员头部向前运动的位移及颈部弯曲的幅度均低于配备 OAB 的乘员。

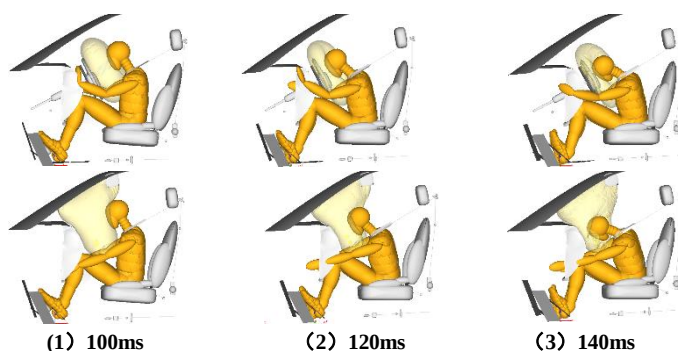


Figure8 Occupant dynamic response comparison at different times under ODB load-case

图 8 ODB 工况下不同时刻的乘员动力学响应对比

3.2 FRB 工况乘员关键部位伤害分析

FRB 工况中配备 OAB 的乘员头部、胸部及颈部的各项伤害指标均低于配备 DAB 的乘员，具体指标如表 1 所示。结合图 5、图 6 及图 7 分析可知，OAB 展开过程中未与乘员发生接触，且乘员头部与其接触时气囊处于完全展开的状态，而 DAB 展开过程中与乘员胸部有挤压，乘员头部与其接触时气囊仍处于充气状态，气室内压力呈上升趋势且高于 OAB，增加了乘员头部与胸部的损伤指标；OAB 较 DAB 气袋内的气量多，碰撞后期能够较好地支撑乘员头部，减少了乘员头部与胸部的相对位移及颈部的弯曲程度，进而降低了乘员颈部的损伤。

Table 1 Occupant injury indexes comparison under FRB load-case

表 1 FRB 工况乘员关键部位伤害值对比

	配备 DAB	配备 OAB
HIC ₃₆	478	442
Head A3ms	62.47g	56.35g
Chet-D	25.29mm	21.59mm
Chet VC	0.10m/s	0.09m/s
Neck Fx	437.11N	351.77N
Neck Fz	1041.97N	741.21N
Neck My	33.74N·m	31.89N·m

3.3 ODB 工况乘员关键部位伤害分析

ODB 工况中配备 OAB 的乘员头部、胸部的伤害指标低于配备 DAB 的乘员，具体指标变化如表 2 所示。由于偏置碰工况下车身与壁障接触产生的绕 Z 轴的转角及 Y 向加速度的作用，乘员头部易从气囊表面滑出，而转向系统折叠收纳后，OAB 在 Z 向的运动空间更大但左右两侧无固定支撑，偏置碰撞发生后，乘员头部推动其向右运动，导致碰撞末期头部接触到气囊左侧，气囊无法提供充足的支撑，增加了头部向前运动的位移及其与胸部的相对位移，导致乘员颈部 Fx 与颈部弯矩 My 的峰值高于配备 DAB 的乘员，但两者仍处于 C-NCAP 规定的高性能限值范围内。

Table 2 Occupant injury indexes comparison under ODB load-case

表 2 ODB 工况乘员关键部位伤害值对比

	配备 DAB	配备 OAB
HIC36	475	318
Head A3ms	54.76g	49.28g
Chet-D	21.63mm	19.12mm
Chet VC	0.08m/s	0.07m/s
Neck Fx	449.50N	695.99N
Neck Fz	1064.25N	688.64N
Neck My	18.31N·m	28.27N·m

4 安全气囊吸能特性分析

乘员头部与颈部紧密相连，安全气囊作用于头部的同时也会对乘员颈部造成影响，甚至会加剧乘员颈部的损伤。文献[13]指出汽车正面碰撞过程中，乘员头部主要受到颈部的牵制作用及汽车安全气囊的缓冲作用，头部的总能量主要转移到颈部和安全气囊；文献[14]表明在正面偏置碰撞过程中，安全气囊吸收乘员头部 X 向能量达总能量的 80%以上，且吸收能量越高，对颈部保护效果越好。本文基于安全气囊吸能理论，通过达朗贝尔原理^[14-15]分析乘员头部 X,Y,Z 方向的受力情况（以 X 方向为例，Y，Z 方向同理可求出）：

$$F_{head-x} + F_x - m_{head}a_x = 0 \quad (1)$$

$$a_{head-x} = a_x - F_x/m_{head} \quad (2)$$

其中， F_{head-x} 为乘员头部 X 向所受外力， F_x 为乘员颈部剪切力， a_x 为乘员头部 X 向加速度， a_{head-x} 为安全气囊作用加速度，Hybrid III 50th 假人头部质量 m_{head} 为 4.54kg。

由式（1）、式（2）计算出安全气囊作用下的乘员头部 X,Y,Z 向的加速度，合成得到气囊对头部的加速度曲线如图 9 所示，并对其积分得到速度曲线图 10 所示，最后由动能定理得出安全气囊吸收的乘员头部动能，对比 ODB 工况下，传统 DAB 与新型 OAB 吸收能量的差异如图 11 所示，进一步探究 OAB 的乘员防护性能。

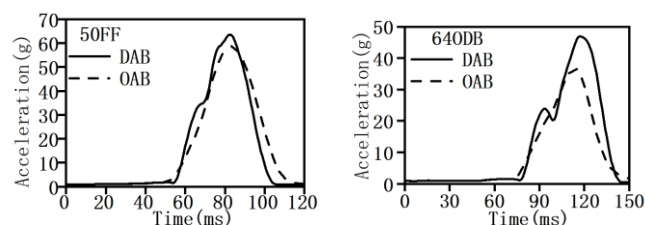


Figure9 Occupant head acceleration curve under the action of airbags

图 9 气囊对乘员头部作用合成加速度曲线

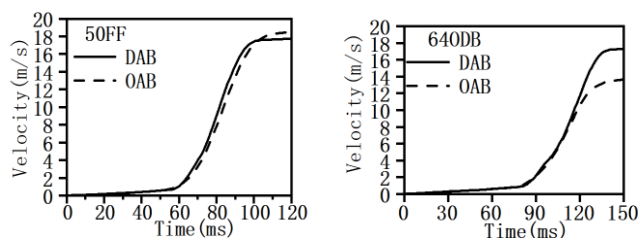


Figure 10 Occupant head velocity curve under different airbags

图 10 气囊对乘员头部作用相对速度曲线

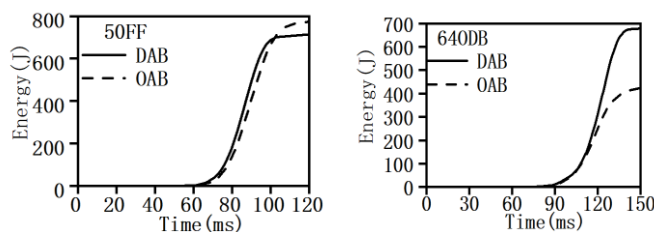


Figure 11 Airbag energy absorption curve

图 11 气囊吸收能量曲线

由图 11 可知, FRB 工况中 OAB 吸收乘员头部的动能与原始 DAB 吸收的动能相差较小, ODB 工况中 OAB 较原始 DAB 吸收乘员头部的动能低 38%。乘员头部的动能主要转移到安全气囊与乘员颈部^[13], 由能量守恒定律可知, 气囊吸收乘员头部动能的减少, 势必会增加传递给乘员颈部的能量, 而 ODB 工况中 OAB 吸收的乘员头部动能减少, 导致传递给乘员颈部的能量增加, 从侧面说明了该工况下乘员颈部损伤值增加的原因。

5 结论与讨论

本文针对未来高度自动驾驶汽车的乘员约束系统概念设计需求, 创新性地提出了可折叠式转向盘搭载顶置气囊的设计理念。通过 CAE 分析的方法, 对比了不同工况中配置原始 DAB 与新型 OAB 后的乘员动态响应及伤害指标, 并基于安全气囊吸能特性理论对 FRB 及 ODB 工况下的气囊吸收能量进行了分析, 主要的结论如下:

(1) 顶置气囊对乘员的防护性能较好, 配置顶置气囊后乘员主要伤害指标均低于 C-NCAP 规定的高性能限值, 满足乘员防护研发基本要求。

(2) FRB 工况中 OAB 与 DAB 吸收乘员头部动能无较大差距; ODB 工况中 OAB 吸收乘员头部动能较 DAB 低 38%, 导致传递给乘员颈部的能量增加, 进一步说明了 ODB 工况中乘员颈部伤害指标增加的原因, 后续可通过优化气囊动态刚度以改善乘员颈部伤害。

本文研究的主驾侧顶置气囊尚处在概念阶段, 存在较多局限性, 后期项目组将通过模块试验及整车试验评估其可行性。另外, 本文仅聚焦于顶置气囊对 Hybrid III 50th 男性假人的安全防护性能的评估, 未考虑顶置式气囊对不同体型假人的安全防护性能的评估, 未来的工作将着眼于顶置式气囊对不同乘员综合防护性能的优化及气囊本体包型的完善。

参考文献 (References)

- [1] Zhou Qing, Ji Pei-jun, Huang Yi, et al. Challenges and opportunities of smart occupant protection against motor vehicle collision accidents in future traffic environment [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8(04): 333-350
周青, 姬佩君, 黄毅, 等. 未来交通事故场景中乘员智能保护的挑战与机遇[J]. 汽车安全与节能学报, 2017,8(04):333-350
- [2] Laakmann F, Zink L, Seyffert M. New Interior Concepts for Occupant Protection in Highly Automated Vehicles[J]. ATZ worldwide, 2019, 121(4): 48-53.
- [3] Ji Pei-jun. Research on occupant collision protection of equilibrium constraint concept [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
姬佩君. 均衡约束概念的乘员碰撞保护研究 [D]. 北京:清华大学, 2016.
- [4] Wu Hequan, Hou Haibin, Hu Lin, et al. Injury Risk and Evasion Strategy of Occupants in Different Seating Orientations in Autonomous Vehicles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(6).
武和全, 侯海彬, 胡林, 等. 自动驾驶汽车中乘员在不同座椅朝向下的损伤风险及规避策略[J]. 中国公路学报, 2019,32(6).
- [5] Mroz K, Pipkorn B, Sunnevång C, et al. Evaluation of Adaptive Belt Restraint Systems for the Protection of Elderly Occupants in Frontal Impacts[C]//Proceedings of IRCOBI conference. Athena, Greece. 2018.
- [6] Bustos A, Schultz D. Front passenger airbag in roof[J]. ATZ worldwide, 2012, 114(4): 34-37
- [7] Min B, Jeong G, Song J, et al. A Development of Panoramic Sunroof Airbag[C]//25th International Technical Conference on the Enhanced Airbag[C]//25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) National Highway Traffic Safety Administration. 2017
- [8] Hu J, Fischer K, Lange P, et al. Effects of crash pulse, impact angle, occupant size, front seat location, and restraint system on rear seat occupant protection[R].SAE Technical Paper, 2015 (01-1453)
- [9] Wu C T, Ka Z. Preliminary Study of Roof Airbag Protecting Rear-Seat Occupants in Frontal Impact[C]//24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) National Highway Traffic Safety Administration. 2015 (15-0130).
- [10] CAO Libo, YU Weixiong, BAI Zhonghao, et al. Optimization of Passenger Restraint system of a Production SUV Based on Automobile Frontal impact protection[J].China Mechanical Engineering, 2011(3): 374-377.
曹立波, 喻伟雄, 白中浩, 等. 基于正面碰撞防护的 SUV 车辆乘员约束系统优化[J]. 中国机械工程, 2011(3):374-377.
- [11] Wan Xinming, Yang Jikuang, Shen Bin. Influence of Airbag Folding Pattern on Deployment Loads Using Virtual Testing Technique[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005(12): 162-166
万鑫铭, 杨济匡, 沈斌. 气囊折叠方式对展开作用力影响的仿真[J]. 机械工程学报, 2005(12):162-166
- [12] Huang Jing, Zhong Zhihua, Hu Lin, et al. Protecting performance analysis and structural optimization of a sandwiched tube-type airbag[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009(06): 113-118.
黄晶, 钟志华, 胡林, 等. 新型管式气囊的防护性能分析及结构优化[J]. 机械工程学报, 2009(06):113-118.
- [13] Ge Ruhai, Wei Wei, Ying Long, et al. A Study on Occupant Restraint System Energy in Vehicle Frontal Crash [J]. Automotive Engineering, 2017, 39(07): 30-35+50.
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.
- [14] Shang Enyi. Energy absorbed characteristics of driver airbag (DAB) in frontal offset impact tests [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014, 5(2): 145-150.
商恩义. 正面偏置碰撞试验中驾驶员侧安全气囊的吸能特性[J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5(2):145-150.
- [15] Shang Enyi, Zhang Jun-yuan, Yang Bin, et al. Research and Application of Force Analysis Method for Dummy Head and Chest in Frontal Collision Test[J]. Automobile Technology, 2010(10).
商恩义, 张君媛, 杨斌, 等. 正面碰撞试验中假人头部及胸部受力分析方法的研究与应用[J]. 汽车技术, 2010(10).