

## 预碰撞制动乘员响应及侧碰工况离位乘员损伤分析

崔东<sup>1,2</sup>, 曹树谦<sup>1</sup>, 杨昊<sup>3</sup>, 蒋成约<sup>3</sup>, 韩菲菲<sup>2</sup>

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300350; 2. 中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司, 天津 300300;  
3. 重庆理工大学 汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室, 重庆 400054)

**摘要:** 为了研究被撞车辆预碰撞阶段制动引发的乘员离位及其对侧碰工况中乘员响应与损伤的影响, 采用志愿者试验与CAE仿真相结合的方法, 构建了标准姿态侧碰模型、肌肉紧张状态侧碰模型与肌肉放松状态侧碰模型, 并针对不同乘员的动态响应与关键损伤指标开展了比对分析。结果表明, 制动时肌肉放松状态的志愿者离位量较大, 其头部与第一胸椎(T1)最大离位量达到225 mm与145 mm。乘员离位使侧碰工况中假人上半身与侧面约束系统接触形态发生较大变化, 假人胸部区域存在脱离侧气囊防护范围的风险。最大头部Y向加速度增加了163.98 m/s<sup>2</sup> (79.4%), 最大腹部压缩量增加了13.53 mm (64.0%)。研究结果有助于后期新型约束系统开发与一体化安全测试。

**关键词:** 紧急制动; 乘员离位; 侧面碰撞; 乘员损伤

中图分类号: U467.1+4 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2025.03.03

## Occupant Kinematics During Pre-Crash Braking and Injury Analysis of Out-of-Position Occupants in Side Impacts

CUI Dong<sup>1,2</sup>, CAO Shuqian<sup>1</sup>, YANG Hao<sup>3</sup>, JIANG Chengyue<sup>3</sup>, HAN Feifei<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;  
2. CATARC (Tianjin) Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300300, China;  
3. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Automobile Parts Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract:** At present, the vehicle side impact safety evaluations rarely consider the effect of pre-crash braking on occupant posture. In order to study the occupant displacement induced by braking during the pre-crash phase and its impact on occupant kinematics and injury outcomes under side impact conditions, the paper combines volunteer experiments with CAE simulations. Three side impact models, including a standard posture model, a muscle-tensed model, and a muscle-relaxed model, were developed to compare differences in occupant kinematics and key injury indicators across the models. The results show that, during braking, the volunteers experienced greater displacement under the relaxed muscle state, with the maximum displacements of the head and first thoracic vertebra (T1) reaching 225 mm and 145 mm, respectively. This displacement significantly changed the contact between the upper body of the dummy and the side restraint

收稿日期: 2024-05-12 改稿日期: 2024-06-20 网络首发日期: 2024-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405050); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201901141)

参考文献引用格式:

崔东, 曹树谦, 杨昊, 等. 预碰撞制动乘员响应及侧碰工况离位乘员损伤分析[J]. 汽车工程学报, 2025, 15(3): 297-305.

CUI Dong, CAO Shuqian, YANG Hao, et al. Occupant Kinematics During Pre-Crash Braking and Injury Analysis of Out-of-Position Occupants in Side Impacts[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2025, 15(3): 297-305. (in Chinese)



system during the side impact, creating a risk that the dummy's chest could move outside the effective protection zone of side airbag. The peak Y-acceleration of the head was increased by  $163.98 \text{ m/s}^2$  (79.4%), and the maximum abdominal compression was increased by 13.53 mm (64.0%) during the side impact. These results provide valuable insights for the development of advanced restraint systems and integrated safety testing methods.

**Keywords:** emergency braking; occupant displacement; side impact; occupant injury

自动紧急制动(Autonomous Emergency Braking, AEB)系统是高级驾驶辅助系统范畴中的一种主动安全技术,能降低事故发生率或减小事故发生时的碰撞速度,但现阶段还不能完全避免事故<sup>[1-5]</sup>。危险场景中AEB工作时产生的制动减速度会导致车内乘员的姿态发生变化,进而影响碰撞时相关乘员的受伤风险<sup>[6-10]</sup>。研究发现,在侧碰事故中,约70%的被撞车辆会有避免碰撞的行为,其中大约50%的被撞车辆驾驶员会采取紧急制动措施<sup>[11]</sup>,因此,结合险态制动开展侧碰乘员损伤分析有较好的应用场景。

目前,国内外的新车评价规程(NCAP)主要聚焦乘员在标准姿态下的碰撞测评,且多数关于离位姿态下的碰撞研究主要关注正面碰撞,对侧面碰撞的研究较少<sup>[12-13]</sup>。李月明等<sup>[14]</sup>通过滑台试验研究了AEB系统对假人姿态和约束系统保护效能的影响,发现制动减速度越大,假人离位量越大,其中 $8 \text{ m/s}^2$ 左右的制动加速度下头部最大离位量达到169 mm,且碰撞阶段假人头部会与气囊发生不稳定接触。在此基础上,周大勇等<sup>[15]</sup>对基于加速滑台的主被动融合试验的可行性进行了研究。通过滑台试验和CAE仿真相结合的方法,对THOR假人加载 $8 \text{ m/s}^2$ 左右的制动加速度,并且在制动离位的基础上对碰撞阶段的头部和胸部伤害进行分析。其研究表明:AEB作用下,制动后0.3 s左右THOR假人出现最大离位,0.4 s后离位程度基本不变,并且头部和胸部伤害的仿真值和碰撞试验结果比较接近。ÖSTH等<sup>[16]</sup>通过志愿者试验得到了自动紧急制动阶段乘员关键部位的离位量、安全带参数以及肌肉紧张程度,其研究发现,在AEB作用下男性志愿者头部最大离位量在295 mm左右,女性志愿者头部最大离位量在228 mm左右。此外,相关研

究表明,乘员姿态、肌肉紧张程度等会对制动时乘员的前倾量产生影响。BOSE等<sup>[17]</sup>利用人体模型(HBM)研究了乘员的身材、体重、姿态和肌肉紧张程度等特征对正面碰撞乘员损伤风险的影响,发现乘员姿态变化对结果的影响最大。DEVANE等<sup>[18]</sup>研究5%女性和50%男性在两种肌肉状态(放松和紧张)下,通过施加碰撞前制动( $9.8 \text{ m/s}^2$ )和低速碰撞( $25 \text{ m/s}^2$ )的两个加速脉冲来观察乘员反应,结果发现乘员的前倾量随着肌肉的紧张程度增加而减小,说明制动阶段乘员的肌肉紧张程度对离位前倾量有很大影响。

在侧面碰撞中,乘员离位前倾可能导致头部超出侧气帘的设计保护范围,使乘员损伤指标增大<sup>[19]</sup>。DIEZ等<sup>[20]</sup>为了探究非标准坐姿下乘员对侧面碰撞的敏感程度,基于World-SID假人进行有限元仿真分析,其仿真结果表明:目前的安全标准并不能对非标坐姿下的乘员提供最大程度的保护,并且手臂的位置会影响侧面碰撞工况中乘员胸部压缩量的变化。HWANG等<sup>[21]</sup>使用人体模型进行敏感性分析,结果表明,在侧面碰撞工况中,人体姿态是影响乘员动态响应的一个重要因素,但关于离位乘员损伤的具体量化表征还有待研究。LI Min等<sup>[22]</sup>为了研究在不可规避的侧面碰撞事故中主动安全带的影响,对比分析了主动安全带和传统安全带对乘员的保护作用,结果表明,主动安全带能更有效地减少乘员离位和乘员损伤的WIC值(Weighted Injury Criterion)。

不同于上述研究方法,本文融合志愿者试验与CAE仿真开展预碰撞阶段乘员离位分析及侧面碰撞工况中的乘员关键损伤研究。首先,通过志愿者试验数据分析得到实车制动试验中乘员在不同肌肉紧张度下的关键部位离位量,进而基于对标后的侧面

碰撞约束系统模型构建考虑离位效应的侧面碰撞CAE分析模型，最后评价制动离位对侧碰工况乘员动态响应及损伤的影响。

## 1 志愿者试验及乘员关键部位离位数据解析

本次志愿者试验主要研究险态制动中驾驶员在肌肉紧张和放松两种状态下的动态响应及关键部位的量化离位。为了获取险态制动阶段乘员关键部位离位信息，在专业试验场开展了志愿者制动离位试验，测试场地为平整无坑洼的柏油路面。试验车型为相关研究项目的测试用车（Nissan），车内相关设备布置如图1所示。在座椅头枕下方安装拉绳位移传感器记录志愿者第1胸椎（T1）的位移；在安全带上安装力传感器记录试验过程中的安全带肩带力和腰带力；在车内B柱下端安装光栅位移传感器测量试验过程中的安全带拉出量；在志愿者正前方和右侧安装摄像头并在志愿者关键部位粘贴图标记录志愿者关键部位的运动。



图1 试验制动机器人及数采布置

被试对象选择接近50%男性假人特征的志愿者（身高174 mm，体重70 kg，如图2所示），筛选志愿者时要求被试对象身体状况良好，无心脏病、癫痫、颈部疾病等病史，并按要求完成了试验伦理审查（批准编号为202324号）。试验前，志愿者熟悉试验流程且按要求完成培训；试验中，志愿者按照指令要求开展试验并保持初始坐姿接近；志愿者在试验间隔期间放松肌肉以缓解肌肉疲劳。为记录试验过程中志愿者的肌肉紧张程度，试验开始前将肌电传感器放置在已清洁的皮肤表面，使传感器位于肌肉中心位置，肌电传感器上的箭头与肌肉的纤维方向平行。试验中主要记录左右胫骨前肌、二头肌、中斜方肌、胸锁乳突肌、上斜方肌等肌肉的肌电信号。此外，在正式试验前，志愿者需要做肌肉最大自主收缩（MVC）测试，若制动试验过程中志愿者的肌电值大于MVC测试中志愿者肌电值的5%，则视为肌肉处于激活状态<sup>[16]</sup>。



图2 志愿者肌电传感器布置

紧急制动试验中，车辆加速到50 km/h的速度正常行驶一段距离，使用制动机器人进行紧急制动。车辆以接近 $8 \text{ m/s}^2$ 左右的制动强度从50 km/h制动减速至0 km/h，相同试验设定重复2次。滤波处理后的车辆制动减速度曲线如图3所示。

试验后对乘员头部、T1、肩部、髌骨等部位的运动姿态进行提取，两种肌肉状态下不同时刻的志愿者离位姿态如图4所示。

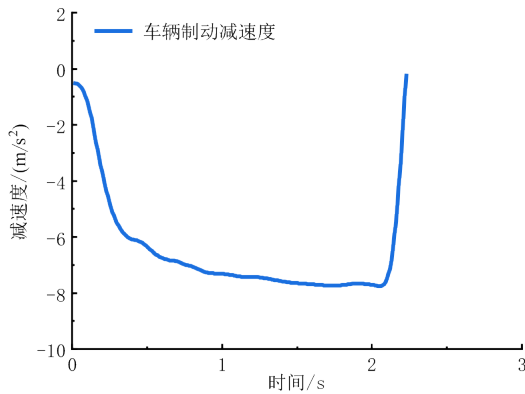
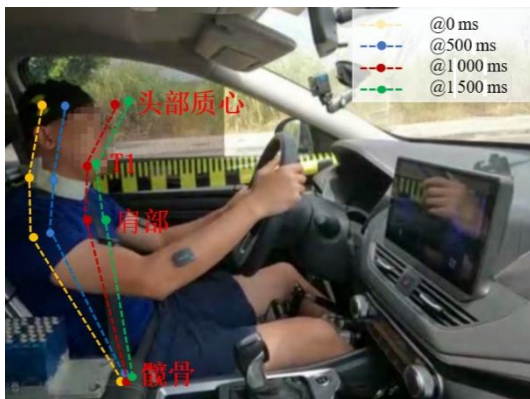


图3 试验中的车辆制动减速度



(a) 紧张状态



(b) 放松状态

图4 紧张状态和放松状态不同时刻志愿者离位姿态

试验中志愿者的头部和第1节胸椎(T1)最大离位量见表1, 志愿者放松时其T1离位量相较于紧张状态增加47 mm, 头部离位量则增加57 mm。

表1 不同紧张程度乘员关键部位离位量

参数	肌肉紧张	肌肉放松
头部离位量/mm	168	225
T1离位量/mm	98	145

## 2 侧碰约束系统模型构建

### 2.1 标准姿态侧碰约束系统模型构建与对标

基于某项目车身结构数据及其C-NCAP侧面碰撞工况的试验结果, 采用多刚体运动学分析软件MADYMO搭建侧面碰撞约束系统仿真模型。模型的结构入侵采用规定结构运动(Prescribed Structure Motion, PSM)的方式来设定, PSM子结构模型是通过节点位移与时间历程的关系来描述模型的节点运动, 能节省CAE模型的仿真时间并提高计算效率, 其节点位移的信息来源于整车结构碰撞仿真对标结果。整个侧面碰撞约束系统模型包括左侧前车门与B柱、侧气帘(CAB)、侧气囊(SAB)、座椅等。

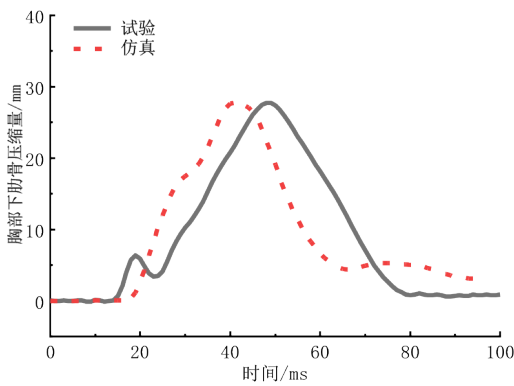
参考物理试验, 仿真采用的假人是MADYMO假人库中自带的World-SID侧碰假人, 其结构上减小了胸部结构和腹部结构的干涉, 具有较好的生物逼真度<sup>[23]</sup>, 假人定位主要参考物理试验中假人姿态。模型的对标分析主要是对比试验和仿真的假人运动响应及关键部位的损伤曲线。图5为30 ms时刻的物理试验录像和仿真分析动画的对比, 仿真中SAB及CAB的展开状态与试验录像中的较接近, 且两者中的假人运动姿态相似。



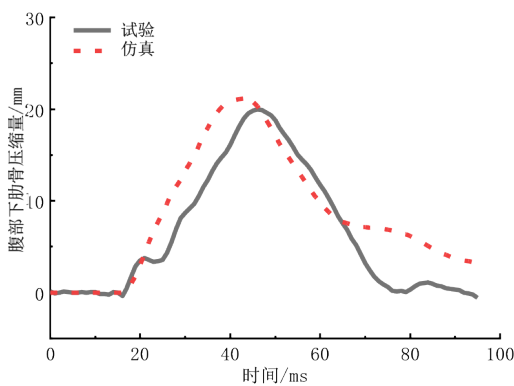
图5 物理试验和CAE仿真的假人运动响应对比

图6为试验中的假人关键损伤指标曲线(包括胸部下肋骨压缩量、腹部下肋骨压缩量及骨盆加速度等)与仿真损伤曲线的对比, 整体拟合效果较好。

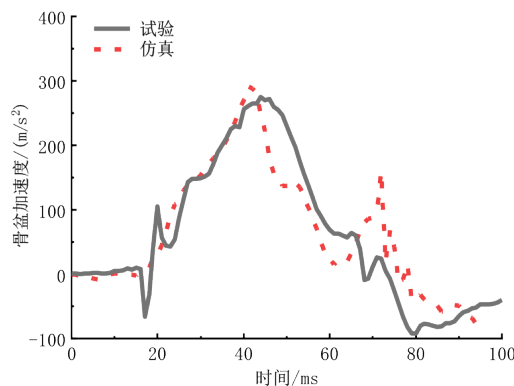
表2为试验和仿真中的假人关键损伤指标对比。由表可知, 胸部、腹部和骨盆的损伤指标误差都能控制在10%以内, 整体差异较小, 说明该约束系统模型可信度较高, 模型可用于后续的仿真研究。



(a) 胸部下肋骨压缩量



(b) 腹部下肋骨压缩量



(c) 骨盆加速度

图6 假人关键损伤曲线对标

表2 物理试验与CAE仿真的关键损伤指标对比

参数	试验值	仿真值	变化率/%
胸部压缩量/mm	27.73	27.77	0.1
腹部压缩量/mm	19.93	21.14	6.1
骨盆加速度/(m/s <sup>2</sup> )	274.50	291.06	6.0

## 2.2 离位姿态侧碰约束系统模型构建

当志愿者处于离位状态时，上躯干会绕骨盆位

置旋转，因此，其上躯干的离位要大于下躯干，头部的离位程度最大。骨盆及下肢由于受到座椅的摩擦力和安全带腰带力影响，其离位量较小。结合制动试验中提取的志愿者在不同肌肉紧张状态下的最大离位姿态，在仿真中通过 Joint-positioning 命令调整 World-SID 假人的 dummy、neck 等铰链设置，使其拟合试验所示的离位状态，并微调 hip、knee 等铰链使其下肢与地板贴合。肌肉紧张状态和放松状态下的 World-SID 假人姿态如图7所示。在碰撞仿真开始前先开展模型静平衡处理：整个模型只加载重力场进行计算，使假人在重力及座椅支撑力等作用下保持初步平衡；进而将平衡后的假人姿态设定为仿真初始状态；最后开展离位状态下的假人动态响应与损伤指标分析。

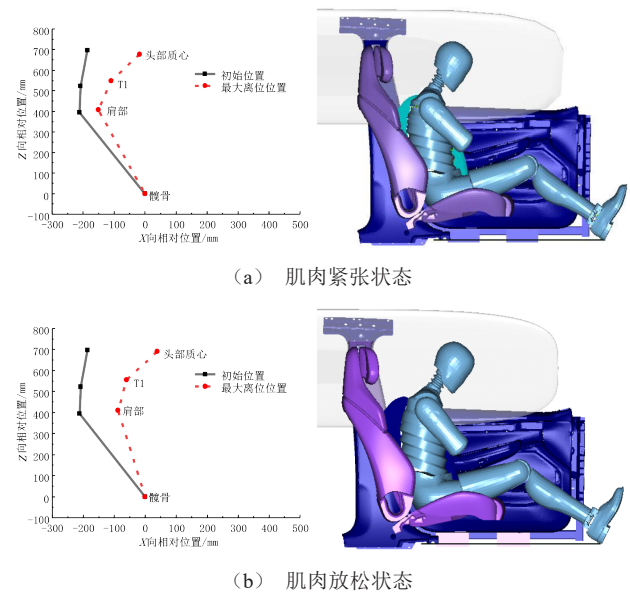


图7 肌肉紧张状态 (Nervous) 和放松状态 (Relax) 的侧碰模型构建

## 3 结果分析

### 3.1 侧碰假人动态响应对比分析

初始标准模型及两个考虑乘员离位的仿真模型在不同时刻的 World-SID 假人动态响应对比如图8所示，从上到下依次为标准模型、肌肉紧张状态下的离位模型和肌肉放松状态下的离位模型。无制动作用时，假人的头部和躯干都在侧面气囊的保护范围内，且处于气囊充气比较充足的区域；当制动介入后，假人的头部及躯干因惯性作用而前倾，导致

假人肩部和胸部偏上部分脱离了侧气囊的保护范围,侧气囊主要和假人腹部及胸部下沿接触;离位量较小时(肌肉紧张),假人头部处于侧气帘边缘区域,离位量较大时(肌肉放松),碰撞后期假人头部会出现略微超出侧气帘保护范围的情况。

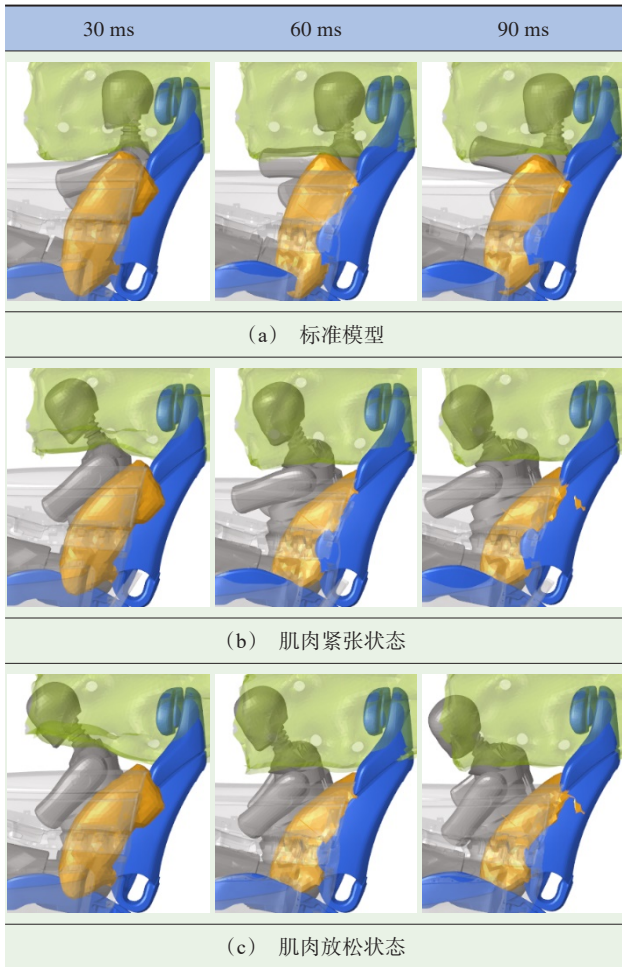


图8 标准模型与离位模型不同时刻的假人姿态对比

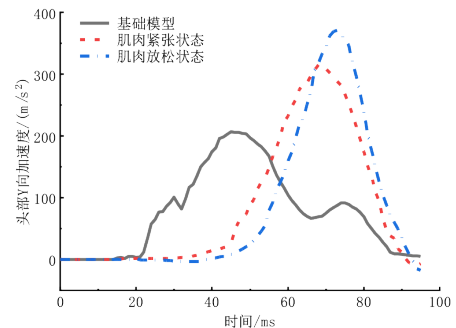
### 3.2 侧碰假人损伤分析

基于上述3个仿真模型的构建,参考中国新车评价规程(C-NCAP)对假人在碰撞阶段的损伤情况进行比对分析。图9包含3个模型的假人头部Y向加速度、肩部力、腹部的压缩量及骨盆加速度。

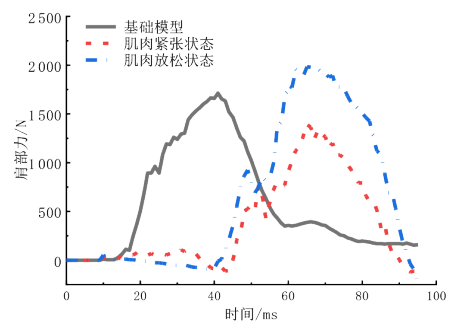
对比分析3个模型的假人头部Y向加速度曲线可知,假人离位后,头部靠近侧气帘的边缘区域,使肌肉紧张和放松状态两种离位姿态下假人头部Y向加速度相比基础模型分别提高了52.7%和79.4%,峰值时间延后了约25 ms;放松状态模型中假人头部近一半脱离侧气帘的防护区域。

基础模型中,侧气囊能较好地支撑假人的胸部及肩部区域,但离位模型中假人上半身有较大的前倾现象。在肌肉紧张状态下,肩部力减小了18.7%;在放松状态下肩部力增大了15.8%,两者的峰值时刻均靠后。其主要原因在于不同肌肉状态下离位量的差异影响假人与侧气囊的相对位置及随后肩部与内饰的碰撞。

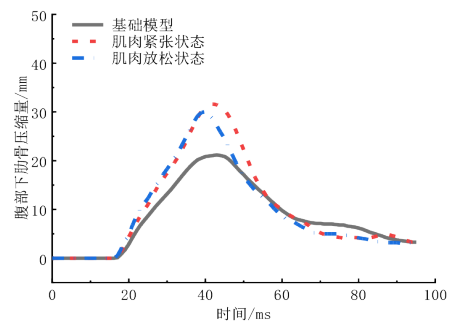
由于离位模型中假人的前倾姿态,使侧气囊主要与假人胸部下端及腹部接触,所以腹部下肋骨压缩量等指标上升(图9);3个模型中的假人骨盆加速度趋势比较接近,离位假人的加速度峰值略微增大。



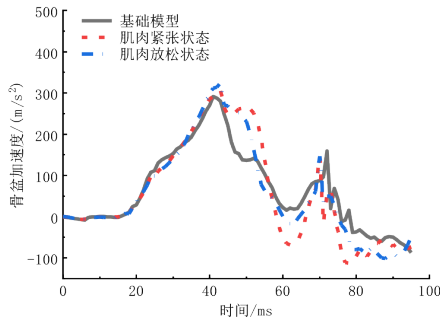
(a) 头部Y向加速度



(b) 肩部力



(c) 腹部下肋骨压缩量



(d) 骨盆加速度

图9 标准模型与离位模型假人关键损伤曲线对比

将基础模型中假人部分关键损伤指标归一化为100%，并将不同肌肉紧张程度的两个模型损伤指标进行对比，如图10所示。

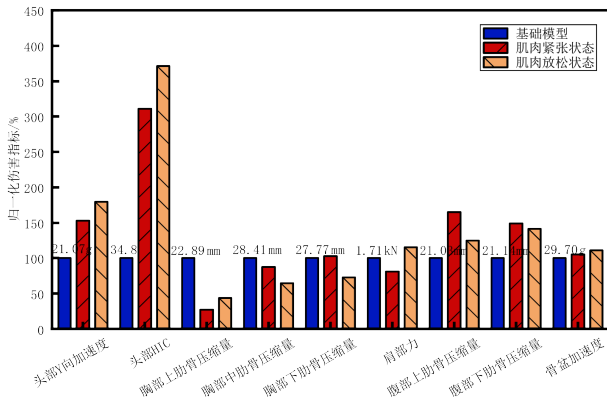


图10 标准模型与离位模型的假人伤害对比

比对分析可知，该车型离位姿态下假人的头部损伤指标及腹部损伤指标增加较大，其中，离位姿态下假人头部HIC值相比基础模型增加了200%~300%；最大腹部压缩量由21.14 mm增加到34.67 mm（增幅为64.0%）。离位姿态下假人的骨盆加速度及胸部区域的最大肋骨压缩量变化不大，但上肋骨与中肋骨的压缩量有较大幅度的减少（肌肉紧张模型中胸部上肋骨压缩量较基础模型降低了72.7%），其主要原因在于乘员离位后假人上、中肋骨区域与侧气囊的接触面积减小，使肋骨压缩量降低。结合上述的乘员运动比对可知，假人在前倾姿态下侧气囊主要与腹部等区域接触，载荷更加集中，因此，假人在前倾姿态下腹部肋骨的最大压缩量增长了64.0%。

### 3.3 讨论

本文基于某车型设计志愿者制动试验，对不同肌肉紧张程度的志愿者在8 m/s<sup>2</sup>左右制动强度下的乘员响应进行了研究。解析了志愿者头部与T1位置的最大离位量及不同位置的离位响应差异。肌肉紧张状态下，志愿者头部离位量为168 mm，T1离位量为98 mm；肌肉放松状态下，志愿者头部离位量为225 mm，T1离位量为145 mm。对比国内外相关志愿者制动试验，本次试验中的关键离位量在其上下限之间<sup>[16, 24]</sup>。

本文研究结果显示，假人头部伤害随其离位量的增加而增大，主要原因在于侧碰工况中不同离位程度的假人头部撞击气帘时的速度以及接触区域的变化。前期类似研究也表明，在侧面碰撞时前倾的坐姿会增加头部撞到侧气帘的相对速度，尤其在侧面碰撞时躯干姿势会影响躯干和头部的反应<sup>[25]</sup>。

此外，侧气囊设计时主要考虑与正常坐姿假人的胸、腹部区域接触。由于离位的影响，假人胸部会脱离侧气囊防护区域，使腹部区域受到更大的气囊作用力（图11），这也会造成更大的腹部压缩量。对比MAEBO等<sup>[26]</sup>的研究结果发现，预碰撞阶段乘员姿态前倾，肋骨偏下受到的力要高56%，其结论与本文部分结果比较相似。

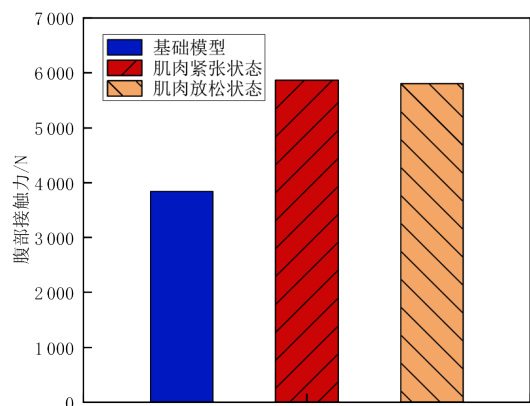


图11 标准模型与离位模型的假人腹部接触力对比

本次研究分析主要基于某项目车型，考虑到不同车型布置及约束系统设计方案的影响，研究结果的适用性有限，后期可考虑开展不同车型的影响评价。

## 4 结论

本文基于志愿者试验与 CAE 仿真开展侧碰工况中不同离位程度的乘员动态响应和损伤指标分析,初步结论如下。

1) 预碰撞阶段,较大强度制动的介入会导致乘员出现明显离位现象。在肌肉放松状态下乘员的离位程度会更大,其中,志愿者 T1 的最大离位量达到 145 mm,头部最大离位量达到 225 mm。

2) 本项目研究车型中引入乘员离位后会增大

头部 Y 向加速度、头部伤害指数 (HIC) 和腹部压缩量等损伤指标。其中,放松状态下假人头部 Y 向加速度从 206.45 m/s<sup>2</sup> 增加到 370.43 m/s<sup>2</sup>,增幅达 79.4%;头部伤害指数 (HIC) 增加了近 3 倍。在紧张状态下,假人腹部上肋骨最大压缩量增幅达到 64.0%。

3) 乘员离位改变了侧气囊与假人的接触区域,使部分胸部损伤指标得以改善,仿真结果显示,胸部上肋骨压缩量从 22.89 mm 减小至 6.25 mm,减少了 72.7%。

## 参考文献 (References)

- [1] 张新锋,李浩,宋瑞,等.雨雾天气下的自动紧急制动系统测试评价方法研究[J].汽车工程学报,2023,13(5):623-634.  
ZHANG Xinfeng, LI Hao, SONG Rui, et al. Research on Testing and Evaluation Method for Autonomous Emergency Braking Systems in Rain and Fog[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2023, 13(5): 623-634. (in Chinese)
- [2] KOVACEVA J, BÄRGMAN J, DOZZA M. On the Importance of Driver Models for the Development and Assessment of Active Safety: A New Collision Warning System to Make Overtaking Cyclists Safer[J]. Accident Analysis & Prevention, 2022, 165: 106513.1-106513.14.
- [3] HU Lin, LI Haibo, YI Ping, et al. Investigation on AEB Key Parameters for Improving Car to Two-Wheeler Collision Safety Using In-Depth Traffic Accident Data [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 72(1): 113-124.
- [4] 刘建平,郑望晓,郑阳. AEB 系统性能与碰撞时间关联性研究[J].汽车技术,2018(8):51-53.  
LIU Jianping, ZHENG Wangxiao, ZHENG Yang. Research on Relevance of AEB System Performance and TTC [J]. Automobile Technology, 2018(8): 51-53. (in Chinese)
- [5] KIM J, HAN H, KIM S, et al. A Study on the AEB Operation Simulation Using Prescan Based on the Vehicle Test [J]. Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, 2022, 30(3): 249-257.
- [6] MISHRA E, MROZ K, PIPKORN B, et al. Effects of Automated Emergency Braking and Seatbelt Pre-Tensioning on Occupant Injury Risks in High-Severity Frontal Crashes [J]. Frontiers in Future Transportation, 2022, 3: 883951.1-883951.8.
- [7] 何仁,冯海鹏.自动紧急制动(AEB)技术的研究与进展[J].汽车安全与节能学报,2019,10(1):174-182.  
HE Ren, FENG Haipeng. Research and Development of Autonomous Emergency Brake (AEB) Technology [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2019, 10(1): 174-182. (in Chinese)
- [8] KAI Wang, ZHANG Changjiang, LIU Dongchun. Research on the Crash Test Considering Pre-Crash Technology [C]//Proceedings of China SAE Congress 2020: Selected Papers. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 1473-1484.
- [9] 任立海,罗志秦,陈浩,等.假人与人体模型在 AEB 作用下的驾驶员离位响应对比[J].汽车安全与节能学报,2023,14(4):448-456.  
REN Lihai, LUO Zhiqin, CHEN Hao, et al. Comparison of Driver's Out-of-Position Response of Dummy and Human Models Under AEB [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2023, 14(4): 448-456. (in Chinese)
- [10] 孙振东,朱海涛,彭伟强. AEB 制动对 THOR 50th 假人乘坐姿态影响[J].汽车安全与节能学报,2021,12(4):499-506.  
SUN Zhendong, ZHU Haitao, PENG Weiqiang. Influence of AEB for THOR 50th Dummy Seating Position [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2021, 12(4): 499-506. (in Chinese)
- [11] DAHIYA A, UNTAROIU C. Influence of Pre-Crash Vehicle Maneuvers on Front Passenger Safety Performance Response [J]. SAE International Journal of Transportation Safety, 2023, 11(2): 263-272.
- [12] GUO T, GONG C, WANG J, et al. Analysis of Driver Departure and Damage in Frontal 100% Overlap Rigid Barrier Crash Conditions with AEB Intervention [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2587(1): 012071.1-012071.12.

- [13] WOITSCH G, SINZ W. Influences of Pre-Crash Braking Induced Dummy—Forward Displacements on Dummy Behaviour During EuroNCAP Frontal Crash Test [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2014, 62: 268–275.
- [14] 李月明, 王鹏翔, 张毅, 等. 自动紧急制动对约束系统保护功能影响的研究[J]. *汽车技术*, 2022(10): 56–62.  
LI Yueming, WANG Pengxiang, ZHANG Yi, et al. Study on Effect of Autonomous Emergency Braking on the Protection Function of Restraint System [J]. *Automobile Technology*, 2022(10): 56–62. (in Chinese)
- [15] 周大永, 李月明, 王鹏翔, 等. 基于加速滑台的主被动融合试验方法研究[J]. *汽车技术*, 2023(2): 56–62.  
ZHOU Dayong, LI Yueming, WANG Pengxiang, et al. Research on Active-Passive Integration Test Method Based on Acceleration Sled [J]. *Automobile Technology*, 2023(2): 56–62. (in Chinese)
- [16] ÖSTH J, ÓLAFSDÓTTIR J M, DAVIDSSON J, et al. Driver Kinematic and Muscle Responses in Braking Events with Standard and Reversible Pre-Tensioned Restraints: Validation Data for Human Models [C]//SAE Technical Papers, 20013–22–0001, 2013.
- [17] BOSE D, CRANDALL J R, UNTAROIU C D, et al. Influence of Pre-Collision Occupant Parameters on Injury Outcome in a Frontal Collision [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2010, 42(4): 1398–1407.
- [18] DEVANE K, CHAN H, ALBERT D, et al. Response of Small Female and Midsize Male Models with Active Musculature in Pre-Crash Maneuvers and Low-Speed Impacts [J]. *Traffic Injury Prevention*, 2023, 24(S1): S9–S15.
- [19] MATSUDA T, YAMADA K, HAYASHI S, et al. Simulation of Occupant Posture Changes Due to Evasive Manoeuvres and Injury Predictions in Vehicle Frontal and Side Collisions [C]//Proceedings of IRCOBI Conference, 2018: 512–523.
- [20] DIEZ M, ABAJO J, DE PRADA J V, et al. Sitting Posture Influence in Autonomous Vehicles for the Evaluation of Occupant Safety in Side Impact [J]. *Safety Science*, 2023, 159: 106002.1–106002.12.
- [21] HWANG E, HU J, CHEN C, et al. Development, Evaluation, and Sensitivity Analysis of Parametric Finite Element Whole-Body Human Models in Side Impacts [C]//SAE Technical Papers, 2016–22–0014, 2016.
- [22] LI Min, ZHANG Daowen, LIU Qi, et al. Driver Injury from Vehicle Side Impacts When Automatic Emergency Braking and Active Seat Belts are Used [J]. *Sensors*, 2023, 23(13): 1–18.
- [23] 周会锋, 李碧浩, 王大志. WorldSID 50th 假人与 ES-2 假人的性能对比分析[J]. *汽车安全与节能学报*, 2017, 8(3): 261–267.  
ZHOU Huifeng, LI Bihao, WANG Dazhi. Dummy Performance Comparative Analysis Based on WorldSID 50th Dummy and ES-2 Dummy [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2017, 8(3): 261–267. (in Chinese)
- [24] GRACI V, DOUGLAS E, SEACRIST T, et al. Effect of Automated Versus Manual Emergency Braking on Rear Seat Adult and Pediatric Occupant Precrash Motion [J]. *Traffic Injury Prevention*, 2019, 20(S1): S106–S111.
- [25] LELEDAKIS A, ÖSTH J, DAVIDSSON J, et al. The Influence of Car Passengers' Sitting Postures in Intersection Crashes [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2021, 157: 106170.1–106170.13.
- [26] MAEBO Y, MAEKAWA R, KOTAMA S, et al. Study of the Effect of Pre-Crash Seatbelts in Side Impact and the Necessary Work Load of Pre-Crash Seatbelts [C]//25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), June 5–8, 2017, Detroit, Michigan, USA. 2017: 1–7.

#### 作者简介



崔东 (1985–), 男, 河北任丘人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为汽车安全开发与碰撞场景构建。

E-mail: cuidong@catarc.ac.cn

#### 通信作者



蒋成约 (1982–), 男, 浙江温州人, 博士, 教授, 主要研究方向为汽车主被动安全与乘员智能防护。

E-mail: jiangchengyue@cqut.edu.cn