

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20240156

网络首发日期: 2025-06-19; 网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20250619.0925.001>

大角度乘坐姿态下安全带上固定点位置对乘员保护影响的研究

李 琨, 刘玉涛, 潘如杨, 刘 冲, 王鹏翔

(吉利汽车研究院(宁波)有限公司, 浙江省全省智能汽车全域安全重点实验室, 宁波 315336)

摘要: 为了研究正面碰撞工况下安全带约束方式对大角度乘坐姿态乘员保护的影响,应用 THOR-AV 假人以及某车型座椅有限元模型搭建仿真试验进行分析。将安全带出口分别布置在车辆 B 柱以及座椅上,分析安全带约束方式对大角度坐姿乘员头颈及胸腹部的保护效果,并讨论不同 B 柱上固定点位置对乘员伤害的影响。结果表明:在该研究车型下安全带出口布置在 B 柱上时,碰撞前期假人上躯干恢复直立姿态较早,假人未出现明显下潜及腹部损伤现象,并且假人头颈部伤害也较小。在该研究中,当安全带布置在 B 柱上时对大角度乘坐姿态假人有较好的保护效果。

关键词: 乘员保护; 大角度乘坐姿态; 安全带; THOR-AV 假人

中图分类号: U461.91

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2025)04-0073-08

Study on the Influence of Seat Belt Upper Fixed Position on Occupant Protection under Reclined Position

LI Kun, LIU Yutao, PAN Ruyang, LIU Chong, WANG Pengxiang

(Geely Automobile Research Institute (Ningbo) Co., Ltd., Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Vehicle Comprehensive Safety, Ningbo 315336, China)

Abstract: In order to make an investigation of seat belt restraint performance on occupants with reclined position in frontal collision, THOR-AV dummy and a vehicle model were used for the present study. The seat belt upper point fixed on B-pillar and fixed on seat were investigated for the head, neck and chest injury in simulation, and the influence of the different upper point positions on B-pillar of the occupant injury was discussed. The results showed that the dummy had no significant submarining and abdomen injuries observed in simulation, and the condition of head and neck was better when the seat belt fixed on B-pillar because of the upper torso rotated forward earlier. Moreover, it was found in the study that the protection when the seat belt fixed on B-pillar was better for reclined position occupant in frontal impact.

Key words: occupant protection; reclined position; seat belt; THOR-AV dummy

引文格式:

李琨, 刘玉涛, 潘如杨, 等. 大角度乘坐姿态下安全带上固定点位置对乘员保护影响的研究[J]. 天津科技大学学报, 2025, 40(4): 73-80.

LI K, LIU Y T, PAN R Y, et al. Study on the influence of seat belt upper fixed position on occupant protection under reclined position[J]. Journal of Tianjin university of science and technology, 2025, 40(4): 73-80.

1959 年, 沃尔沃作为第一个使用三点式安全带的汽车制造商, 开始将安全带作为前排乘员保护的标

准配置, 现如今三点式安全带已经在汽车上使用了 60 多年。从汽车安全的角度来看, 安全带对乘员的保

收稿日期: 2024-07-31; 修回日期: 2025-05-10

基金项目: 浙江省全省智能汽车全域安全重点实验室开放基金资助项目(ZKLIVCS-202401)

作者简介: 李 琨(1995—), 男, 河北秦皇岛人, 工程师, kun.li12@geely.com

护作用相当明显,正确使用安全带可使驾驶员和前排乘员的死亡风险降低 45% ~ 55%^[1]。随着自动驾驶技术的发展,人们期待着自动驾驶汽车可以减少碰撞事故的发生。然而,有证据表明,自动驾驶汽车永远不会接近无碰撞事故发生^[2-3],除了期望自动驾驶技术能减少碰撞事故,自动驾驶汽车也进行了新颖的内饰设计^[4]并且提供了更舒适的功能座椅,例如向后倾斜角度更大的座椅靠背和更靠后的座椅位置,可以为乘员提供更多的车内空间^[5-7]。这些全新的驾乘体验,对当前的约束系统产品设计提出全新的挑战,将减弱当今最先进的乘员约束系统产品的作用。

美国航空航天局(NASA)对空间站中宇航员的姿态进行观测,发现人体往往表现出放松及没有外力作用的特定姿态,即中位身体姿态(neutral body posture, NBP)。Han 等^[8]采用多机位的三维测量技术观察太空飞行中机组成员的身体姿态,得到了更为准确的中位身体姿态。研发人员将这种姿态借鉴到汽车座椅的开发中,引入零重力座椅概念。当乘员座椅从试验位置移动到零重力座椅位置时,增加了假人头部到安全气囊以及膝部到仪表板的距离,碰撞中身体的惯性会增加腰椎的压迫以及骨盆位移^[9]。Haland^[11]为应对翻滚工况中假人容易从肩带滑出的风险,设计出了座椅集成式安全带,如今这种安全带被越来越多地应用到乘员零重力座椅中,对大角度乘坐姿态的假人进行正面碰撞保护。

随着自动驾驶技术的发展,车企为消费者提供了更多的座椅位置。武和全等^[10]通过应用 THUMS 10 岁儿童假人研究正面碰撞过程中不同座椅位置对儿童伤害的影响,发现后向乘坐位置儿童损伤风险最小。Mroz 等^[11]和 Östling 等^[12-13]应用人体生物力学模型假人及 THOR-50M 研究发现,通过增大靠背角可以实现更舒适的姿态,然而随着靠背角度的增大,与常规坐姿相比,乘员腰椎位置遭受更大的损伤风险,可以通过在滑轨上加装限力装置有效减轻乘员腰

部损伤。李琨等^[14]对不同角度下 THOR-AV 假人伤害进行分析后发现,靠背角度增大会使假人面临全新的伤害风险。Shin 等^[15]对死后人类受试者进行研究,发现在大角度坐姿情况下人体腰椎存在骨折风险。

现阶段对大角度乘坐姿态乘员保护的研究,均应用座椅集成式安全带对乘员进行保护。本研究应用座椅集成式安全带和布置在 B 柱的三点式安全带分别与 THOR-AV-50M 假人有限元模型搭建 50 km/h 正面碰撞仿真模型,研究不同的安全带固定点位置对乘员在正面碰撞过程中的运动学响应与伤害,为大角度乘坐姿态下的乘员约束系统开发提供支持与参考。

1 材料与方 法

本研究采用的假人有限元模型为 THOR-AV-50M,该模型专为大角度座椅下的乘员保护进行开发,相较于 THOR-50M 模型可以更好地表现出大角度乘坐姿态下的运动学响应。该模型假人质量设置为 85.1 kg,具有超过 150 个数据采集通道,包括加速度、力和弯矩等^[16]。

座椅有限元模型采用开发中的某款车型数据,应用 THOR-AV-50M 假人有限元模型与汽车座椅有限元模型,根据中国新车评价规程(C-NCAP)正面 100%重叠刚性壁障碰撞试验要求^[17],在有限元前处理软件 ANSA 中设置仿真参数,假人位于副驾驶员座椅处,碰撞初始速度为 50 km/h。应用两种不同布置类型的安全带,安全带配置卷收器预紧、锁止锁舌以及腰部预紧功能,安全带布置位置及假人姿态如图 1 所示。THOR-AV-50M 假人有限元模型的躯干角度为 120°,调整安全带上固定点的位置,设置 2 组仿真模型。整车坐标系定义如下:车辆中心最前端地面位置为原点,车辆向前方向为 x 向正向,车辆左侧向右侧方向为 y 向正向,车辆下部向上部方向为 z 向正向。

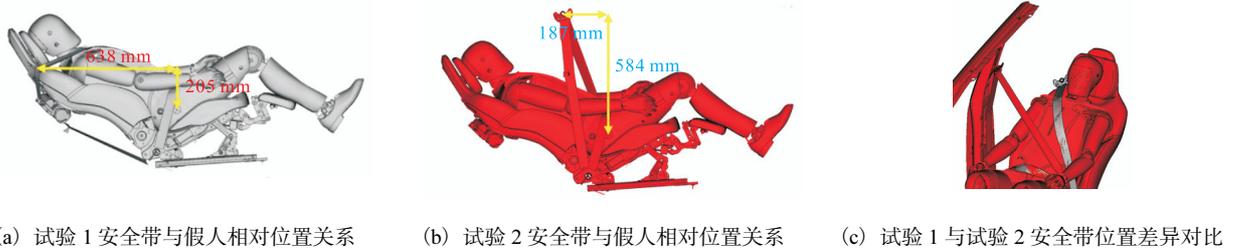


图 1 安全带布置位置及假人姿态

Fig. 1 Seat belt arrangement position and dummy posture

仿真工况中设置靠背角度为 65°,坐垫角度为 30°;头部质心位置为: $x = -3\ 718\ \text{mm}$ 、 $y = 380\ \text{mm}$ 、

$z = 1193 \text{ mm}$; 右侧肩部位置为: $x = -3654 \text{ mm}$ 、 $y = 585 \text{ mm}$ 、 $z = 1026 \text{ mm}$; 髋部中心坐标 H 点位置为: $x = -3187 \text{ mm}$ 、 $y = 380 \text{ mm}$ 、 $z = 780 \text{ mm}$; 右侧膝关节位置为: $x = -2811 \text{ mm}$ 、 $y = 564 \text{ mm}$ 、 $z = 990 \text{ mm}$; 试验 1 使用集成式安全带, 试验 2 使用 B 柱三点式安全带。

2 仿真结果

2.1 假人运动学响应

假人头部运动轨迹对比如图 2 所示, 人体运动学姿态对比如图 3 所示, 灰色假人为试验 1, 橙色假人为试验 2。

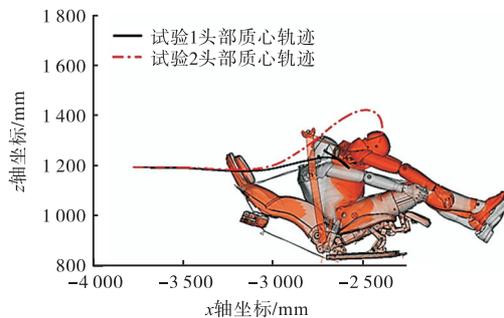


图 2 假人头部运动轨迹对比

Fig. 2 Comparison of head movements of the dummy

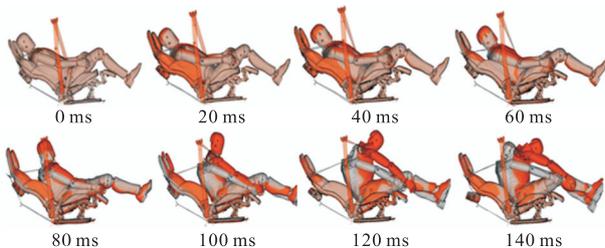


图 3 人体运动学姿态对比

Fig. 3 Kinematic posture comparison

在前 60 ms, 两组假人运动学响应一致。随着假人继续向前运动, 试验 1 肩带对假人有更早的约束作用, 阻止假人躯干向前运动; 试验 2 中假人上躯干由于没有肩带的约束, 继续向前运动, 碰撞发生 80 ms 时开始受到肩带作用, 可以发现此时两组模型假人姿态存在明显差异。在肩带与腰带的共同作用下, 试验 1 中假人躯干被有效约束, 假人的头颈部继续向前运动; 在试验 2 中, 假人上躯干能量前期未被减弱, 假人与肩带作用后继续向前运动, 在安全带的进一步作用下头颈部相对躯干继续向前运动, 假人头颈部相对试验 1 运动距离更远。

2.2 头部损伤

人体脑组织受到外力的作用后会产生平移或旋转运动, 线性加速度或者角加速度可能导致脑组织变形, 出现脑组织损伤。本文通过对假人提取由线性载荷造成的头部伤害指标以及旋转载荷造成的弥漫性轴索多轴综合评价 (diffuse axonal multi-axis general evaluation, DAMAGE) 指标判断假人在碰撞过程中的头部伤害情况。

头部伤害指标被视为与受头部平移加速度影响较大的颅骨骨折和脑挫伤相关联的指标^[18], 其求解公式基于韦恩州立大学耐受性曲线进行定义, 适用于不同的头部加速度波形。

$$I_{\text{HIC}} = (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \quad (1)$$

式中: t 为时间; I_{HIC} 为头部伤害指标; t_1 、 t_2 分别为 I_{HIC} 取得最大值区域的起始时刻和终止时刻, 在实际应用中选取的两者间隔一般不超过 15 ms; $a(t)$ 为头部质心合成加速度。

假人头部运动学响应如图 4 所示。通过曲线对比可以发现, 在仿真试验 1 中, 假人头部伤害值较大, 在头部 z 向加速度曲线中可以发现试验 1 曲线在 77 ms 时出现明显波动, 假人头部相对颈部进行旋转。最终两组仿真实验的假人头部的 $I_{\text{HIC}_{15}}$ 分别为 338 (试验 1)、243 (试验 2)。

轻度创伤性脑损伤在交通事故中较为常见。2018 年以来, 欧洲新车碰撞安全评鉴协会 (Euro NCAP) 正面碰撞工作组和脑损伤工作组一直在研究旋转脑损伤指标。随着 THOR 假人中功能更强大的测试工具的采用, 更多的测量结果可用于建立脑损伤标准。DAMAGE 指标被用来评价人体头部旋转脑损伤风险, 当 DAMAGE 指标达到 0.42 时, 脑组织有 50% 可能性产生 AIS2+ 损伤^[19]。经过计算, 试验 1 的 DAMAGE 指标为 0.43, 产生 AIS2+ 损伤的风险为 75.4%, 试验 2 的 DAMAGE 指标为 0.24, 产生 AIS2+ 损伤的风险为 14.0%。

2.3 颈部伤害

在大角度工况下, 正面碰撞过程中安全带无法对乘员的头颈部进行有效约束, 假人的颈部伤害随着靠背角度的增大而增大。本实验提取了两种不同安全带布置下的假人颈部剪切力 F_x 、轴向力 F_z 以及弯矩 M_y 的数据, 研究安全带差异对乘员颈部伤害的影响, 结果如图 5 所示。由图 5 可知: 试验 1 工况下乘员在颈部剪切力 F_x 为 1.01 kN, 轴向力 F_z 为 5.43 kN, 试

验 2 工况下二者分别为 1.10 kN 和 2.35 kN;而在颈部弯矩方面,试验 1 工况的颈部弯矩为 30.3 N·m,试验 2 工况的颈部弯矩为 45 N·m,可见试验 2 对颈部伤害更为明显。

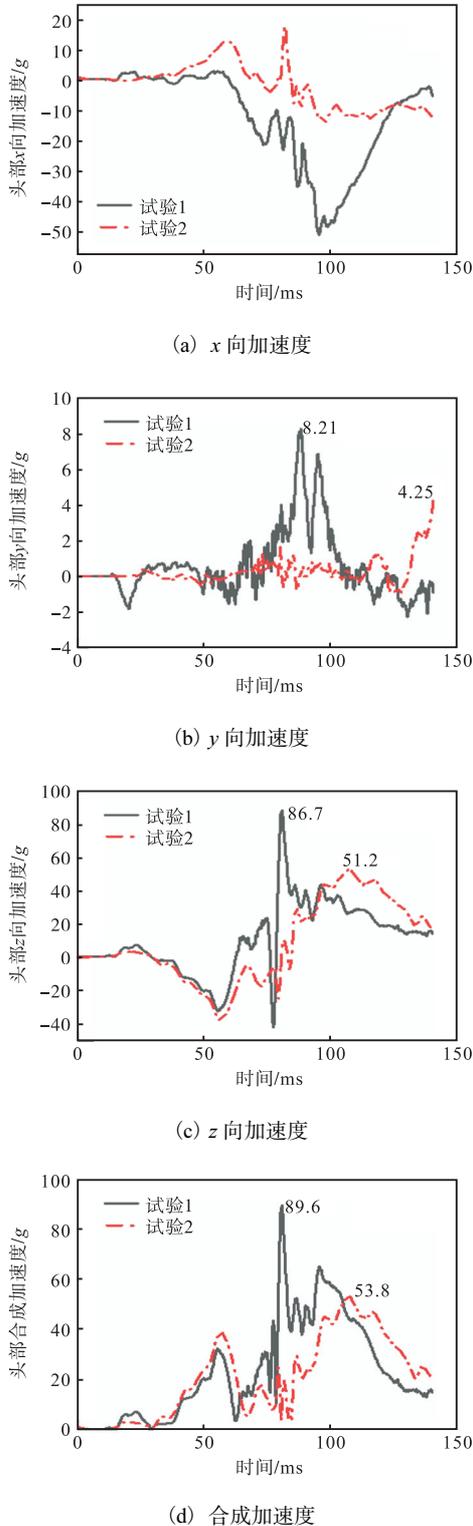


图 4 假人头运动学响应

Fig. 4 Kinematic response of the dummy head

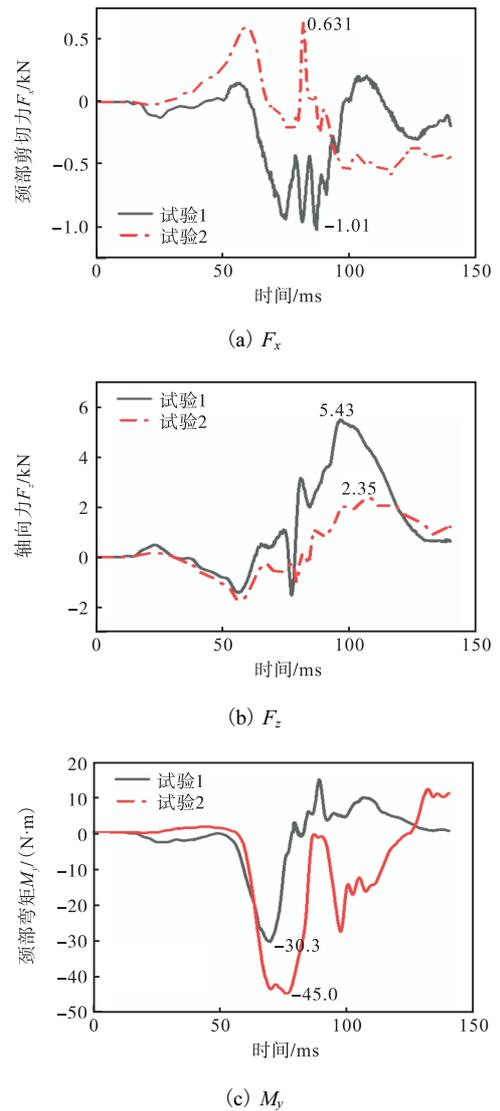


图 5 假人颈部伤害情况

Fig. 5 Injury of dummy neck

2.4 胸腹部伤害

在大角度正面碰撞工况中,由于假人姿态的原因,安全带的腰带对假人约束的效果变差,容易造成人体腹部内脏器官的伤害;并且由于安全带不能有效地约束髋翼,人体脊椎更容易遭受冲击。研究人员分析发现,人体腰椎的抗压强度为 0.6 ~ 15.6 kN,出现骨折的压缩力为 (4.84 ± 2.5) kN^[20]。提取两组仿真实验中假人的胸部压缩量、腹部压强以及第 12 节胸椎(T12)压缩力的数据(表 1),对比这些数据后发现两种布置形式对假人胸腹部伤害较为一致。

表 1 假人胸腹部伤害数据

Tab. 1 Injury data of dummy chest and abdomen

编号	胸部压缩量/mm	腹部压强/kPa	T12 压缩力/kN
试验 1	66	129	7.9
试验 2	63	140	7.4

2.5 安全带 B 柱上固定点位置差异影响

在车辆设计过程中, 考虑到不同体态乘员的差异, B 柱安全带的位置一般是可调的。本文基于某一车型设计 B 柱上的安全带位置, 为进一步研究安全带布置在 B 柱不同位置以及乘员座椅位置差异所造

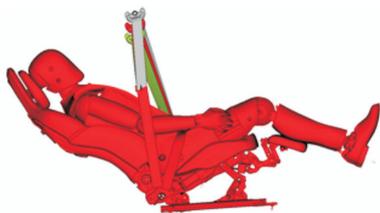
成的安全带上固定点与乘员间相对位置的差异, 设置 4 组仿真试验, 验证安全带在 B 柱不同位置对乘员伤害的影响。后续仿真模型基于试验 2 模型进行调整, 具体信息见表 2。

表 2 安全带上固定点及假人位置差异仿真矩阵

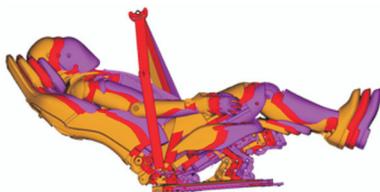
Tab. 2 Simulation matrix of the difference between the upper fixed points on the seat belt and the position of the dummy

编号	位置信息
试验 3	上固定点位置基于试验 2, z 向上移 50 mm; 头部质心: $x = 3\ 718\ \text{mm}$, $y = 448\ \text{mm}$, $z = 1\ 193\ \text{mm}$; 肩部: $x = 3\ 654\ \text{mm}$, $y = 585\ \text{mm}$, $z = 1\ 026\ \text{mm}$; H 点: $x = 3\ 187\ \text{mm}$, $y = 565\ \text{mm}$, $z = 780\ \text{mm}$; 膝关节: $x = 2\ 811\ \text{mm}$, $y = 564\ \text{mm}$, $z = 990\ \text{mm}$
试验 4	上固定点位置基于试验 2, z 向下移 50 mm; 头部质心: $x = 3\ 718\ \text{mm}$, $y = 448\ \text{mm}$, $z = 1\ 193\ \text{mm}$; 肩部: $x = 3\ 654\ \text{mm}$, $y = 585\ \text{mm}$, $z = 1\ 026\ \text{mm}$; H 点: $x = 3\ 187\ \text{mm}$, $y = 565\ \text{mm}$, $z = 780\ \text{mm}$; 膝关节: $x = 2\ 811\ \text{mm}$, $y = 564\ \text{mm}$, $z = 990\ \text{mm}$
试验 5	上固定点位置与试验 2 一致; 头部质心: $x = 3\ 668\ \text{mm}$, $y = 448\ \text{mm}$, $z = 1\ 193\ \text{mm}$; 肩部: $x = 3\ 604\ \text{mm}$, $y = 585\ \text{mm}$, $z = 1\ 026\ \text{mm}$; H 点: $x = 3\ 137\ \text{mm}$, $y = 565\ \text{mm}$, $z = 780\ \text{mm}$; 膝关节: $x = 2\ 761\ \text{mm}$, $y = 564\ \text{mm}$, $z = 990\ \text{mm}$
试验 6	上固定点位置与试验 2 一致; 头部质心: $x = 3\ 768\ \text{mm}$, $y = 448\ \text{mm}$, $z = 1\ 193\ \text{mm}$; 肩部: $x = 3\ 704\ \text{mm}$, $y = 585\ \text{mm}$, $z = 1\ 026\ \text{mm}$; H 点: $x = 3\ 237\ \text{mm}$, $y = 565\ \text{mm}$, $z = 780\ \text{mm}$; 膝关节: $x = 2\ 861\ \text{mm}$, $y = 564\ \text{mm}$, $z = 990\ \text{mm}$

基于试验 2, 对上固定点位置进行调整, 分别沿 z 向上移和下移 50 mm, 以验证安全带上固定点位置对大角度正面碰撞乘员伤害的影响; 基于试验 2, 对乘员及座椅沿 x 向前移和后移 50 mm, 以验证座椅位置对乘员伤害的影响。安全带上固定点设置及假人位置差异如图 6 所示, 头部运动学响应差异如图 7 所示, 头部合成加速度如图 8 所示。



(a) 试验 2、3、4(上固定点差异)

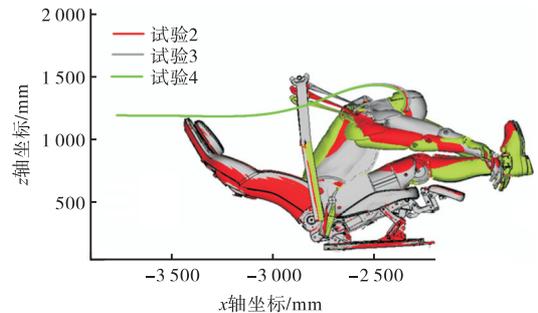


(b) 试验 2、5、6(假人位置差异)

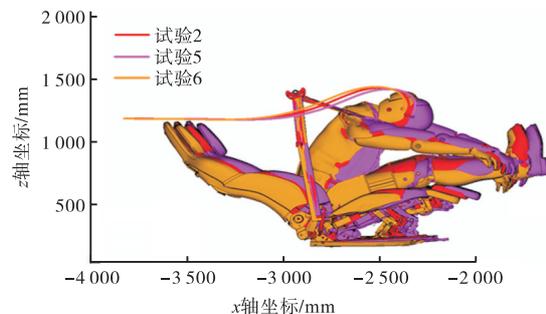
图 6 安全带上固定点设置及假人位置差异

Fig. 6 Difference between seat belt upper fixed position and dummy position

对头部运动学响应进行分析, 可以发现在一定范围内上固定点位置对乘员的运动学响应较小, 试验 3—试验 6 与试验 2 头部运动学轨迹趋于一致, 未出现明显差异。



(a) 试验 2、3、4(上固定点差异)



(b) 试验 2、5、6(假人位置差异)

图 7 头部运动学响应差异

Fig. 7 Difference in head kinematic response

提取假人头部合成加速度曲线, 可以发现在前 80 ms 安全带肩带未约束到假人, 头部合成加速度表现一致, 随着肩带开始约束假人向前运动, 加速度峰值及峰值时刻出现差异, 但趋势较为一致, 与头部运动学响应一致。

假人颈部伤害数据见表 3。在剪切力、轴向力方面, 上固定点位置对颈部伤害无较大影响。在颈部弯矩方面, 当座椅向后调整 50 mm 时, 弯矩从 -45 N·m

下降到 $-41\text{ N}\cdot\text{m}$,推测为肩带约束较晚,头部相对颈部旋转幅度较小。

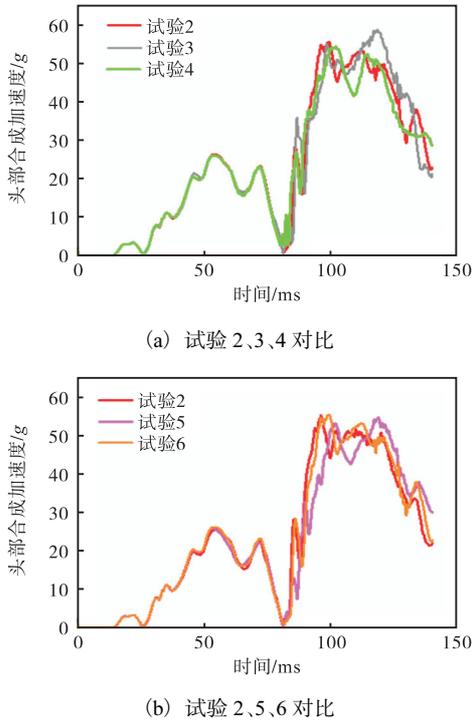


图 8 头部合成加速度对比

Fig. 8 Comparison of head composite acceleration

在 T12 压缩力方面,试验 3—试验 6 假人轴向力均为 7.4 kN ,可以发现当安全带 B 柱上固定点发生改变以及座椅位置发生变化时,对乘员胸椎伤害影响较小。试验 3—试验 6 假人均未出现下潜现象,表现与试验 2 一致。

表 3 假人颈部伤害数据

Tab. 3 Neck injury data of the dummy

编号	剪切力/kN	轴向力/kN	弯矩/N·m
试验 2	-1.1	2.4	-45
试验 3	-0.9	2.4	-44
试验 4	-0.8	2.4	-47
试验 5	-1.0	2.4	-45
试验 6	-1.1	2.3	-41

3 结果分析

通过提取仿真试验 1 与 2 中假人头部运动学轨迹,发现两种不同安全带布置位置对假人头部约束存在差异。试验 1 类型安全带可以更早地约束头部运动,在整车环境中有利于保护头部、避免硬接触,试验 2 假人头部在 80 ms 后开始向上方运动,最终在安全带的约束下绕颈部转动。通过提取假人头部伤害数据可以发现,该布置类型安全带对假人头部伤害指

标(HIC)以及 DAMAGE 指标有较大影响,尤其在 DAMAGE 指标方面,固定在座椅上的安全带由于约束较早,假人头部具有较高能量,产生较大绕颈部旋转,更容易对脑组织造成旋转损伤,本研究中试验 1 的 DAMAGE 指标达到 0.43 ,乘员头部旋转脑损伤风险较大。

在颈部伤害方面,通过提取仿真试验 1 与试验 2 剪切力曲线可以发现,当安全带布置在座椅上时,由于安全带的作用,假人头部相对颈部向前运动,随后由于头部相对颈部向后旋转,剪切力出现正向极值;随着头部继续向前运动,剪切力转为负值;由于下潜现象的发生,颈部剪切力出现波动,随后出现极值。在轴向力方面,两种布置形式下碰撞前期轴向力表现一致,随着安全带对假人约束的影响,试验 1 轴向力曲线开始上升,受到假人下潜的影响,曲线出现波动,随后继续上升,出现最大轴向力(5.4 kN);而当安全带布置在 B 柱上时,由于肩带约束时间较晚,假人颈部轴向力较小(2.4 kN)。因此,安全带布置位置对假人在颈部位置的伤害有较大影响。

在胸腹部伤害方面,从仿真结果可以发现,当安全带布置在座椅上时,安全带极易滑到腹部位置,从而出现下潜现象,腰带对假人的约束效果较差;而当安全带布置在 B 柱时,假人未出现明显下潜现象,腰带对假人的保护效果相对较好。试验后安全带相对假人髌骨位置如图 9 所示。两种不同布置形式对假人在胸部压缩量及腹部压力方面比较一致。大角度工况下,在易产生伤害的胸椎力方面,压缩力峰值表现一致。

在安全带布置及假人位置差异方面,通过对比试验 2、3、4 及 2、5、6 可以发现,在一定范围假人在头、颈及胸椎伤害方面差异较小,即在同一种布置形式下允许存在一定的位置差异。

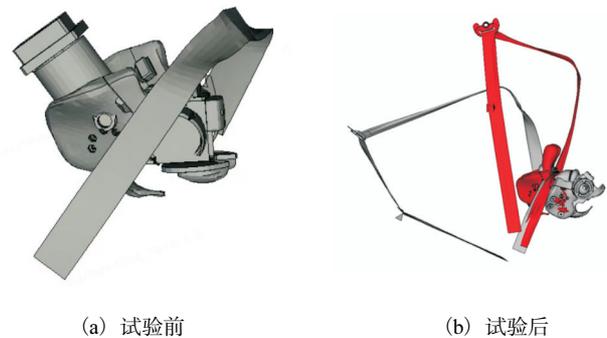


图 9 试验前后安全带位置对比

Fig. 9 Comparison of seat belt position before and after the experiment

4 结 语

选取某一具体车型及座椅,对两种不同布置类型安全带在大角度正面碰撞工况下的假人保护效果进行分析,当安全带布置在 B 柱上时,由于碰撞前期安全带对假人上躯干约束较小,假人头颈部伤害相对较小,并且假人未出现明显下潜现象。在胸部压缩量、腹部压力及胸椎压缩力方面,两种布置形式对假人伤害未表现出明显差异,通过模拟发现,当安全带布置在 B 柱上时假人未出现明显下潜现象。通过对不同 B 柱上固定点以及座椅位置的影响进行研究,发现在一定范围内假人在头、颈及胸椎伤害方面差异较小。本研究仅对正面碰撞试验进行仿真分析,后续还需对其他工况进行分析,以期可以全方位地保护乘员。

参考文献:

- [1] HALAND Y. The evolution of the three point seat belt from yesterday to tomorrow [EB/OL]. [2024-05-21]. <https://www.ircobi.org/wordpress/downloads/irc0111/2006/BertilAldmanLecture/0.pdf>.
- [2] MUELLER A S, CICCHINO J B, ZUBY D S. What humanlike errors do autonomous vehicles need to avoid to maximize safety?[J]. *Journal of safety research*, 2020, 75: 310-318.
- [3] LUBBE N, JEPPSSON H, RANJBAR A, et al. Predicted road traffic fatalities in Germany: the potential and limitations of vehicle safety technologies from passive safety to highly automated driving[C]//IRCOCI. Proceedings of IRCOCI Conference 2018. Lonavala: IRCOCI, 2018.
- [4] FILATOV A, SCANLON J M, BRUNO A, et al. Effects of innovation in automated vehicles on occupant compartment designs, evaluation, and safety: a review of public marketing, literature, and standards[EB/OL]. (2019-04-02) [2024-05-21]. <https://doi.org/10.4271/2019-01-1223>.
- [5] JORLÖV S, BOHMAN K, LARSSON A. Seating positions and activities in highly automated cars: a qualitative study of future automated driving scenarios[C]//IRCOCI. Proceedings of IRCOCI Conference 2017. Antwerp: IRCOCI, 2017.
- [6] ÖSTLING M, LARSSON A. Occupant activities and sitting positions in automated vehicles in China and Sweden[C]//National Highway Traffic Safety Administration. Proceedings of 26th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Washington: National Highway Traffic Safety Administration, 2019.
- [7] KOPPEL S, JIMÉNEZ O J, BOHMAN K, et al. Seating configuration and position preferences in fully automated vehicles[J]. *Traffic injury prevention*, 2019, 20(S2): S103-S109.
- [8] HAN K K, YOUNG K S, RAJULU S. Neutral body posture in spaceflight[J]. *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, 2019, 63(1): 992-996.
- [9] SENGOTTU V S, HUF A. Development of occupant restraint systems for future seating positions in fully or semi autonomous vehicles[C]//FISITA. Proceedings of World Automotive Congress. Barcelona: FISITA, 2018.
- [10] 武和全, 张凯, 胡林, 等. 自动驾驶汽车事故中主动旋转座椅规避儿童乘员的损伤风险研究[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(5): 273-286.
- [11] MROZ K, ÖSTLING M, RICHARDSON R, et al. Effect of seat and seat belt characteristics on the lumbar spine and pelvis loading of the SAFER human body model in reclined postures[C]//IRCOCI. Proceedings of IRCOCI Conference 2020. Munich: IRCOCI, 2020.
- [12] ÖSTLING M, LUNDGREN C, LUBBE N, et al. The influence of a seat track load limiter on lumbar spine compression forces in relaxed, reclined, and upright seating positions: a sled test study using THOR-50M[C]//IRCOCI. Proceedings of IRCOCI Conference 2021. Beijing: IRCOCI, 2021.
- [13] ÖSTLING M, LUNDGREN C, LUBBE N, et al. Reducing lumbar spine vertebra fracture risk with an adaptive seat track load limiter[J]. *Frontiers in future transportation*, 2022, 3: 890117.
- [14] 李琨, 刘玉涛, 周大永, 等. 基于 Thor-AV 假人有限元模型的不同坐姿乘员损伤分析[J]. *汽车工程师*, 2023(6): 39-44.
- [15] SHIN J, DONLON J P, RICHARDSON R, et al. Comparison of thoracolumbar spine kinematics and injuries in reclined frontal impact sled tests between mid-size adult female and male PMHS[J]. *Accident analysis & prevention*, 2023, 193: 107334.
- [16] HUMANETICS GROUP. THOR-AV-50M Finite Element model is available in LS-DYNA and PAM-CRASH codes. Consult CAE for updates[EB/OL]. [2024-12-

- 21]. <https://www.humaneticsgroup.com/products/virtual-models/av-atd-virtual-models/thor-av-50m-fe>.
- [17] 中国汽车技术研究中心有限公司. C-NCAP 管理规则(2021年版)[R]. 天津:中国汽车技术研究中心有限公司,2021.
- [18] 水野幸治. 汽车碰撞安全[M]. 韩勇,陈一唯,译. 北京:人民交通出版社,2016.
- [19] EURO NCAP. EURO NCAP tb035: brain injury calculation 1.0.1[EB/OL]. [2024-12-21]. <https://cdn.euroncap.com/media/77157/tb-035-brain-injury-calculation-v101.pdf>.
- [20] JÄGER M. Extended compilation of autopsy-material measurements on lumbar ultimate compressive strength for deriving reference values in ergonomic work design: the revised dortmund recommendations[J]. EXCLI Journal, 2018, 17: 362.

责任编辑:周建军

(上接第22页)

- [58] WANG Y, LI Y Q, WANG M J, et al. Non-sterilized conversion of whole lignocellulosic components into polyhydroxybutyrate by *Halomonas* sp. Y3 with a dual anti-microbial contamination system[J]. International journal of biological macromolecules, 2023, 241: 124606.
- [59] RODRÍGUEZ-CONTRERAS A, KOLLER M, BRAUNEGG G, et al. Poly [(R)-3-hydroxybutyrate] production under different salinity conditions by a novel *Bacillus megaterium* strain[J]. New biotechnology, 2016, 33(1): 73-77.
- [60] GUNDE-CIMERMAN N, PLEMENITAŠ A, OREN A. Strategies of adaptation of microorganisms of the three domains of life to high salt concentrations[J]. FEMS Microbiology reviews, 2018, 42(3): 353-375.
- [61] SATOH Y, MURAKAMI F, TAJIMA K, et al. Enzymatic synthesis of poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) with CoA recycling using polyhydroxyalkanoate synthase and acyl-CoA synthetase[J]. Journal of bioscience and bioengineering, 2005, 99(5): 508-511.
- [62] MOHAN S V, REDDY M V. Optimization of critical factors to enhance polyhydroxyalkanoates (PHA) synthesis by mixed culture using Taguchi design of experimental methodology[J]. Bioresource technology, 2013, 128: 409-416.
- [63] TANG H, WANG M J, GAN X F, et al. Funneling lignin-derived compounds into polyhydroxyalkanoate by *Halomonas* sp. Y3[J]. Bioresource technology, 2022, 362: 127837.
- [64] TAN D, WANG Y, TONG Y, et al. Grand challenges for industrializing polyhydroxyalkanoates (PHAs) [J]. Trends in biotechnology, 2021, 39(9): 953-963.
- [65] DE MELLO A F M, DE SOUZA V L P, MACHADO C M B, et al. Polyhydroxyalkanoates production in biorefineries: a review on current status, challenges and opportunities[J]. Bioresource technology, 2024, 393: 130078.
- [66] 项兰, 翁庆北, 周桂雄. 利用廉价碳源发酵生产聚羟基脂肪酸酯 (PHAs) 的研究进展[J]. 现代化工, 2022, 42(3): 64-68.
- [67] 王川东, 张君奇, 刘丁源, 等. 微生物共利用木糖和葡萄糖生产化学品研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(1): 354-372.
- [68] GARCÍA-TORREIROA M, LÚ-CHAU T A, STEINBÜCHELB A, et al. Waste to bioplastic conversion by the moderate halophilic bacterium *Halomonas boliviensis* [J]. Chemical engineering transactions, 2016, 49: 163-168.
- [69] TAO B, PASSANHA P, KUMI P, et al. Recovery and concentration of thermally hydrolysed waste activated sludge derived volatile fatty acids and nutrients by microfiltration, electrodialysis and struvite precipitation for polyhydroxyalkanoates production[J]. Chemical engineering journal, 2016, 295: 11-19.
- [70] GAO Z L, CUI Y W, SUI Y, et al. Unveiling the mechanism of static magnetic field effects on carbon flux into polyhydroxyalkanoate synthesis by *Haloferax mediterranei* [J]. Chemical engineering journal, 2023, 476: 146647.

责任编辑:周建军