

某 SUV 车型行人腿部碰撞安全性的仿真分析与改进设计

刘森海¹, 关永学¹, 徐莉¹, 李骏², 袁杰¹, 郭举²

(1. 江铃汽车股份有限公司, 南昌 330208; 2. 华东交通大学 机电与车辆工程学院, 南昌 330013)

摘要: 以 2024 版 C-NCAP 评价规程为依据, 运用 ANSA 软件建立某 SUV 车型前端结构与行人腿部碰撞的有限元模型, 利用 LS-DYNA 软件进行数值模拟计算, 并利用试验结果对模型进行了有效性验证。对仿真和试验得到的伤害值进行评估后发现, 大腿弯矩和膝部韧带伸长量分别符合 2024 版 C-NCAP 的高性能限值, 但小腿弯矩 T1 不符合。由于车辆前端结构的下格栅顶住膝盖部位, 占据 X 向吸能空间, 影响前保险杠变形吸能, 导致小腿弯矩增加。对结构进行针对性的改进, 将吸能泡沫中间位置处的实体结构改为开孔结构, 且上端设有小凹槽; 将牌照安装点结构的 X 向高度降低 10 mm。结果表明, 结构改进后, 小腿弯矩 T1 为 265.1 Nm, 符合 2024 版 C-NCAP 的高性能限值, 大腿弯矩和膝部韧带伸长量也都符合 2024 版 C-NCAP 的高性能要求。

关键词: 2024 版 C-NCAP; SUV 车型; 行人腿部碰撞; 结构改进; 仿真验证; 高性能

中图分类号: U461.91 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2025.04.06

Simulation and Design Improvements to Enhance Pedestrian Leg-Impact Safety for an SUV Model

LIU Senhai¹, GUAN Yongxue¹, XU Li¹, LI Jun², YUAN Jie¹, GUO Ju²

(1. Jiangling Motor Co., Ltd., Nanchang 330208, China;

2. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In this paper, based on the 2024 C-NCAP evaluation regulations, a finite element model of an SUV front end impacting a pedestrian's leg was established using ANSA software. Numerical simulations were carried out using LS-DYNA, and test data were employed to validate the model. Evaluation of the injury values obtained from the simulation and testing shows that the thigh bending moment and knee ligament elongation comply with the high performance limits of the 2024 C-NCAP, whereas the calf bending moment T1 does not. Further analysis shows that the lower front-end grille presses against the knee, occupies the X-direction energy-absorbing space, limits the deformation of the front bumper to absorb energy, and thus increases the calf bending moment. Two targeted structural improvements were made: the solid structure in the center of the energy-absorbing foam was replaced by an open-cell structure with a small groove at the upper end, and the license-plate mounting bracket was lowered by 10 mm along the X-direction. After these modifications, the calf bending moment T1 drops to 265.1 Nm, meeting the 2024 C-NCAP high-performance

收稿日期: 2025-01-22 改稿日期: 2025-03-06 网络首发日期: 2025-04-16

基金项目: 江西省重点研发计划项目(20232BBE50008); 复杂场景下新能源汽车碰撞数字孪生关键技术

参考文献引用格式:

刘森海, 关永学, 徐莉, 等. 某 SUV 车型行人腿部碰撞安全性的仿真分析与改进设计[J]. 汽车工程学报, 2025, 15(4): 489-496.

LIU Senhai, GUAN Yongxue, XU Li, et al. Simulation and Design Improvements to Enhance Pedestrian Leg-Impact Safety for an SUV Model[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2025, 15(4): 489-496. (in Chinese)



limit, and the thigh bending moment and the knee ligament elongation continue to satisfy the same criteria.

Keywords: version 2024 C-NCAP; SUV models; pedestrian leg impact; structural improvement; simulation verification; high performance

随着汽车保有量的不断增加, 交通事故问题愈发严峻, 逐渐成为社会中的突出难题。2023年, 我国共发生道路交通事故 254 738 次, 交通事故导致死亡 60 028 人^[1]。在交通事故中, 行人与车辆发生碰撞的事故占比很高。行人与车辆发生碰撞时, 行人腿部是碰撞的第一接触点, 腿部损伤的几率高达 69%^[2]。腿部碰撞虽然不是致命伤害, 但有可能导致终身残疾, 彻底丧失劳动能力, 因此, 行人的安全问题变得越来越重要。各个国家都在制定或更新行人保护的法规和标准, 以此加强对行人的保护。中国在 2018 年将行人保护测试正式引入 C-NCAP 评价体系, 推动了国内对行人保护技术的研究和应用。2024 版 C-NCAP 在行人保护方面进行了全面的升级和调整, 以更严格和全面的要求对车辆进行安全性能测试。

近年来, SUV 车型因其具有宽敞的内部空间、良好的动力性能、多功能性和较高的安全性等特点, 越来越受到人们的喜爱。2024 年 11 月, 我国 SUV 车型销量达到 158.8 万辆, 同比增长 18.4%; 此外, 在 2024 年 1—11 月, 我国 SUV 车型的销量始终占车型总销量的 50% 以上^[3]。随着城市中 SUV 车型数量的不断增加, SUV 车型引起的行人安全问题应该引起足够的重视。

本文以最新的 2024 版 C-NCAP 评价规程为依据, 研究某 SUV 车型与行人腿部碰撞的保护性能, 对该车型前端结构与行人腿部碰撞进行仿真分析与改进设计, 力求使该 SUV 车型行人保护腿部碰撞的 3 个伤害性指标均满足 2024 版 C-NCAP 评价规程中的高性能限值。

1 行人腿部碰撞试验评价

1.1 行人腿部碰撞模型

构建行人腿部碰撞模型对于研究汽车和行人腿

部发生碰撞造成的伤害至关重要, 这些模型的生物仿真精度对于试验的有效性和准确性具有显著的影响。国内外相关学者在行人腿部碰撞模型领域开展了大量研究工作, 开发了一系列生物拟合度较高的专用行人假人和行人腿部碰撞模型, 这些模型既包括实物模型, 也包括用于仿真分析的有限元和多刚体模型。图 1 为一款先进行人腿部冲击器 (Advanced Pedestrian Legform Impactor, aPLI) 的有限元模型, 相对于传统的腿部冲击器, aPLI 的设计考虑了人体下肢的生物力学特性和上体质量的影响, 更加贴近实际人体腿部的质量布局, 提升了腿型的适用性, 提供了比以往测试工具更加全面和准确的伤害指标监测^[4], 所以 aPLI 被广泛用于评估汽车前端结构与行人腿部发生碰撞时的影响。试验数据依靠 aPLI 的多个传感器输出, 试验结果与实际碰撞中人体的损伤情况基本一致, 图 2 为 aPLI 的传感器分布。通过这些模型的应用, 可以更准确地预测和分析汽车与行人相互作用时的损伤风险, 为车辆安全设计提供科学依据。

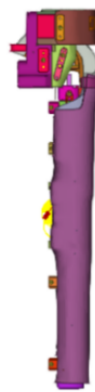


图 1 aPLI 有限元模型

1.2 行人腿部碰撞伤害试验评价

中国汽车技术研究中心发布的 2024 版 C-NCAP 评价规程中使用 aPLI 代替行人腿部来考察汽车前端对行人的碰撞伤害情况, 如图 3 所示。

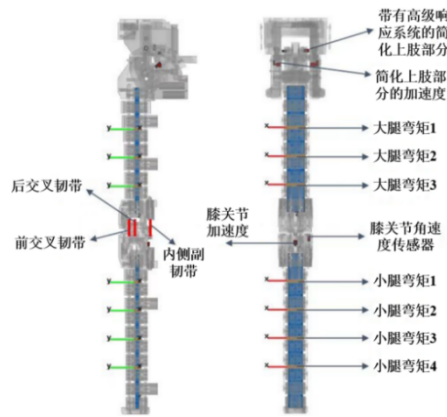


图2 aPLI传感器分布

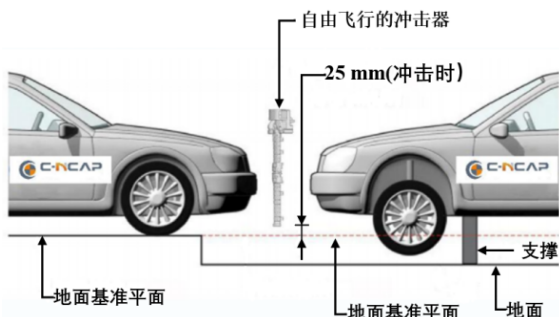


图3 C-NCAP腿部与车辆碰撞试验

试验基本条件为：

- (1) 保证车辆标记过程中处于正常行驶状态；
- (2) 试验前，保证下腿型、车辆、发射系统和数据采集系统已在16℃至24℃的温度环境下放置至少4h；
- (3) 调整车辆前后位置，保证下腿型的自由飞行距离；
- (4) 在初始撞击瞬间，冲击器的底部需保持在距离地面基准平面25mm，误差范围±10mm的高度；
- (5) 撞击保险杠时，冲击器的速度设定为40km/h，测速装置的精度至少达到±0.072km/h；
- (6) 在冲击器与车辆前端发生接触的整个过程中，应保证冲击器不与地面发生触碰^[5]。

试验内容包括以下3点。

- (1) aPLI小腿部位与保险杠的碰撞试验。通过冲击器小腿部位的弯矩值分析车辆保险杠对行人小腿部位的碰撞保护性能。
- (2) aPLI膝盖部位与保险杠的碰撞试验。通过冲击器膝盖部位的膝部韧带伸长量考察保险杠对行

人膝盖部位的碰撞保护性能。

(3) aPLI大腿部位与发动机盖前缘的碰撞试验。通过冲击器大腿部位的弯矩值分析发动机盖前缘对行人大腿部位的碰撞保护性能。

1.3 行人碰撞损伤评价

行人碰撞损伤评价主要是对行人与车辆发生碰撞时可能受到的伤害进行评估，目的是提高车辆的行人保护性能，减少行人在交通事故中的伤亡。该评价体系采用的衡量指标包括：生理学基准(GCS)、伤害简化分类(AIS)和社会影响尺度(ICS)。在实际的交通事故分析中，通常依据AIS标准评定伤害程度，该标准等级越高，表明受伤越严重，表1为AIS与人体损伤程度之间的对应关系。在碰撞事故中，行人的下肢是骨折、软组织损伤和关节损伤的高发区域，依据AIS分级，通常处于1~3级范围内^[6-7]。在行人碰撞安全法规中，对于下肢伤害的评价通常使用C-NCAP规定的力学评价标准，分析腿部弯矩和膝部韧带伸长量。

表1 AIS与人体损伤程度之间的对应关系

AIS等级	损伤程度
1	轻微损伤
2	中度损伤
3	严重损伤，但不危及生命
4	严重危及生命的损伤
5	危重但可能存活的损伤
6	不可救治的损伤

2 建立有限元仿真模型

以某SUV整车模型为基础，建立有限元仿真模型。为了减少计算工作量并缩短仿真时间，车辆模型需要去除车门、后备厢门、悬架和副车架等一些距离保险杠较远且较大的部件，只选取对试验结果有显著影响的车辆前端关键部件，包括前保险杠、中网、车灯、发动机盖、前防撞梁、前纵梁和翼子板等，同时还要去除其他距离前保险杠比较远的小部件^[8-9]。

本文的有限元模型是在ANSA软件中建立的。选取网格尺寸时，使用较小的网格尺寸，可以更精确地捕捉关键结构在复杂载荷作用下的微小变形细

节和变形模式，同时确保有限元模型的有效性。但是，如果都使用小网格尺寸进行模拟，将会使模型的计算量呈几何级数增加，会极大地消耗计算资源并延长计算时间，而非关键结构使用大网格尺寸不会对模型的有效性产生实质性的影响，所以关键结构使用较小的网格尺寸，非关键结构使用较大的网格尺寸。因此，对与行人腿部可能发生直接接触的前保险杠、中网和车灯等部件采用 4 mm 的网格尺寸；对于靠近保险杠的发动机盖、前防撞梁和翼子板等部件，使用 6 mm 的网格尺寸；那些与保险杠有一定距离的部件，采用 8 mm 的网格尺寸进行建模。

aPLI 有限元模型的高度为 1 107 mm，质量为 25 kg。2024 版 C-NCAP 规定：aPLI 距离地面 25 mm，以 40 ± 0.72 km/h 的速度水平撞击车辆前端，仿真模型与工况如图 4 所示。

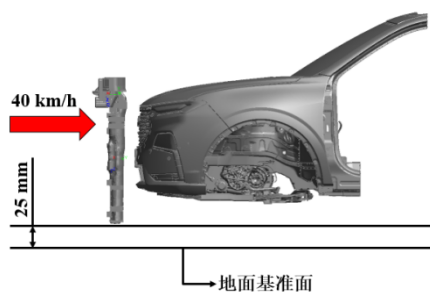


图 4 仿真模型与工况

试验和仿真选定的撞击点一致。为了节省计算时间，选择横向坐标 $y=0$ mm (L0) 和 $y=400$ mm (L-4) 处，如图 5 所示。

设置仿真模型沙漏控制、aPLI 与车辆前端接触、时间步长等相关参数，仿真模拟的总时长设定为 80 ms，速度、加速度、力和能量的输出频率均

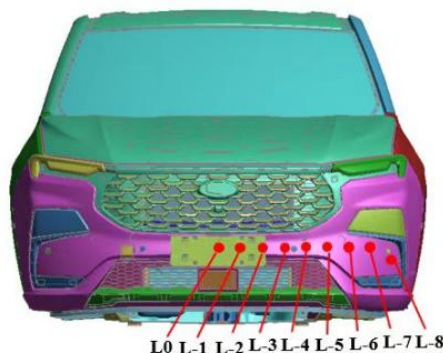


图 5 腿型碰撞区域及撞击点选取

设定为 0.1 ms/次，将建立的模型导入 LS-DYNA 求解器中进行求解。

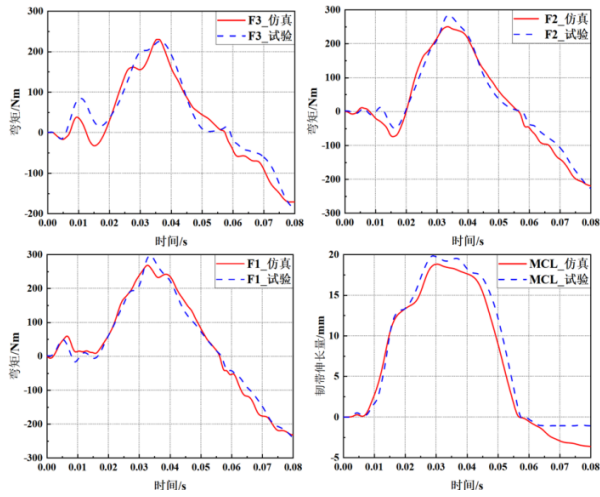
3 仿真模型验证与结果分析

根据上述选取的撞击点，从仿真试验中提取 $y=0$ mm 和 $y=400$ mm 处的伤害值曲线，根据 2024 版 C-NCAP 的要求对这些曲线进行滤波处理，然后将滤波后的伤害值曲线与试验曲线进行对比分析，仿真和试验结果见表 2、图 6 和图 7。由表 2、图 6 和图 7 可知，仿真与试验结果中的伤害值变化趋势具有较高的一致性，并且峰值幅度也十分接近，这说明构建的有限元模型在仿真精度方面具有较高的可靠性和准确性，能作为实际分析的基础。

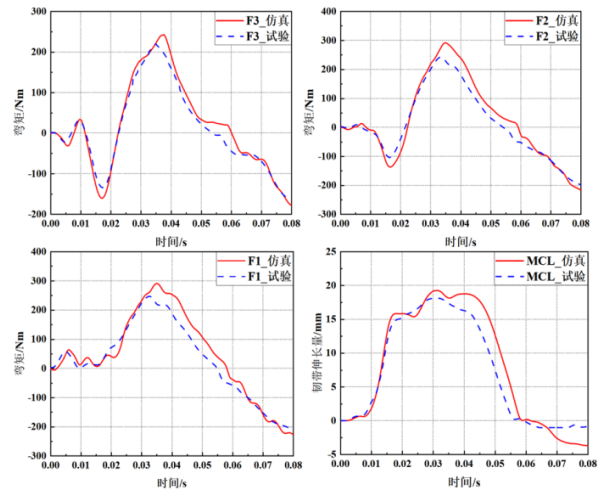
在撞击点 $y=0$ mm 和 $y=400$ mm 处，大腿弯矩、小腿弯矩和膝部韧带伸长量的仿真与试验伤害值变化曲线如图 6 和图 7 所示。由表 2、图 6 和图 7 可知，在撞击点 $y=400$ mm 处，该 SUV 车型行人保护腿部碰撞仿真与试验的 3 个伤害性指标均符合 2024 版 C-NCAP 的高性能限值；在撞击点 $y=0$ mm 处，该 SUV 车型行人保护腿部碰撞仿真与试验的 3 个伤害性指标中，大腿弯矩和膝部韧带伸长量分别符合

表 2 仿真峰值和试验峰值与 C-NCAP 高性能限值对比

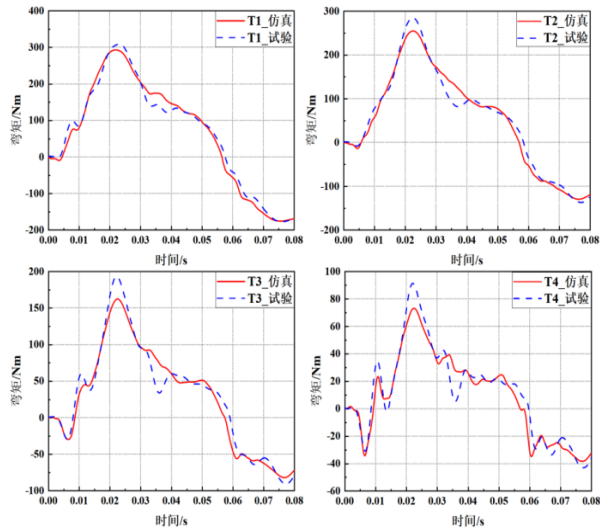
测试点	类别	大腿弯矩数值/Nm				小腿弯矩数值/Nm			膝部韧带伸长量/mm
		F3	F2	F1	T1	T2	T3	T4	MCL
$y=0$ mm	仿真峰值	227.4	249.2	268.1	296.3	254.2	157.5	74.3	19.2
$y=0$ mm	试验峰值	221.3	275.5	296.8	301.5	272.6	186.2	89.8	19.8
$y=400$ mm	仿真峰值	232.6	285.3	287.9	273.9	270.3	171.5	84.3	19
$y=400$ mm	试验峰值	219.6	256.5	258.8	269.8	271.1	178.7	86.8	18.3
	C-NCAP 高性能限值	390	390	390	275	275	275	275	27



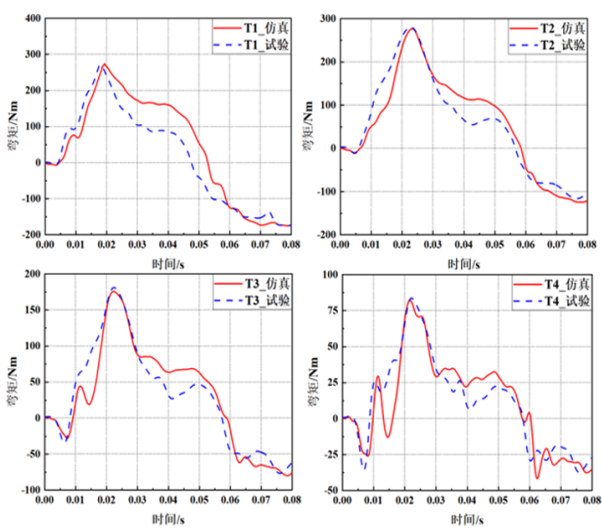
(a) 大腿弯矩和膝部韧带伸长量



(a) 大腿弯矩和膝部韧带伸长量



(b) 小腿弯矩



(b) 小腿弯矩

图 6 $y=0$ mm 处试验与仿真伤害值变化曲线

图 7 $y=400$ mm 处试验与仿真伤害值变化曲线

2024 版 C-NCAP 的高性能限值 390 Nm 和 27 mm，但小腿弯矩 T1 分别为 296.3 Nm 和 301.5 Nm，均超过了 2024 版 C-NCAP 的高性能限值 275 mm。因此，该 SUV 车型的行人保护腿部碰撞性能不佳，需要针对撞击点 $y=0$ mm 处的碰撞情况进行分析和结构改进。

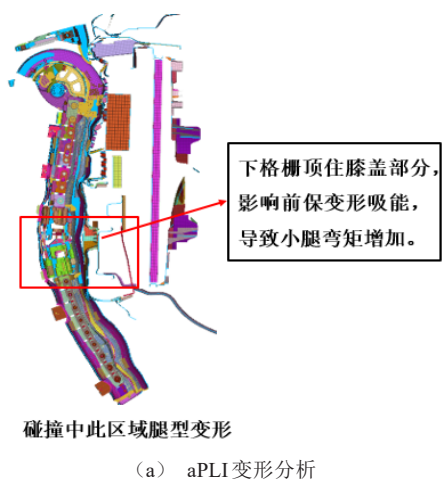
对小腿弯矩 T1 超过 2024 版 C-NCAP 的高性能限值进行分析。分析可知，由于车辆前端结构中的下格栅顶住膝盖部分，占据 X 向吸能空间约 42 mm，影响前保变形吸能，所以使小腿弯矩增加，仿真分析结果如图 8 所示。

4 结构改进及验证

4.1 结构改进

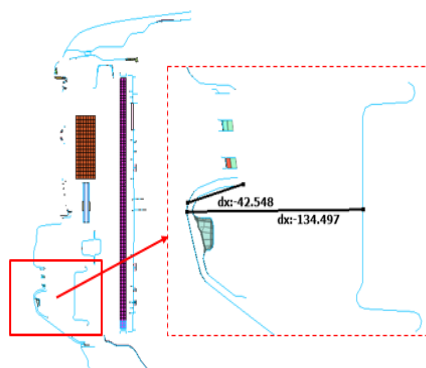
对车辆的前端结构进行改进时，不仅要保证改进之后小腿弯矩 T1 符合 2024 版 C-NCAP 的高性能限值，还要保证大腿弯矩、膝部韧带伸长量和小腿弯矩 T2、T3、T4 仍然符合 2024 版 C-NCAP 的高性能限值。

常见的改进策略有：保险杠结构改进，如选用合适的吸能材料、吸能泡沫结构改进、保险杠造型改进和增加缓冲装置等；发动机盖前缘结构改进，如降低刚度设计、增加吸能结构和改进与保险杠的



碰撞中此区域腿型变形

(a) aPLI 变形分析



下格栅设计约占据X向吸能空间42 mm, 影响前保变形吸能。

(b) 下格栅占据吸能空间结构放大图

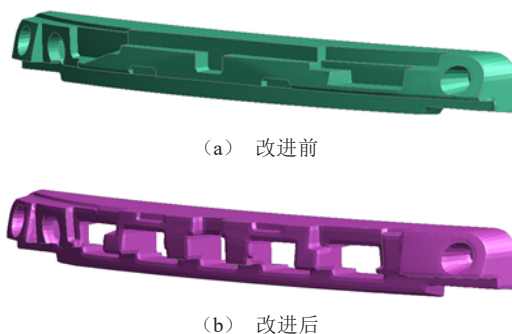
图 8 仿真分析结果

连接等；车辆前端整体结构改进，如设置行人保护支架和改进车身结构刚度分布等^[10-12]。

以常见的改进策略为基础，以小腿弯矩 T1 符合 2024 版 C-NCAP 的高性能限值为目标，对车辆前端结构和零部件进行综合考虑，制定改进方案。

(1) 吸能泡沫结构改进：吸能泡沫采用聚丙烯塑料发泡材料 (EPP)，调整吸能泡沫的局部结构，将中间位置的实体结构改为开孔结构，且上端设有小凹槽，可以改进吸能泡沫的变形空间和能量吸收

特性，使行人腿部受到的冲击力和变形程度得到缓解，从而降低受伤的风险。改进前后的吸能泡沫结构如图 9 所示。



(a) 改进前

(b) 改进后

图 9 吸能泡沫结构改进

(2) 牌照安装点结构改进：综合考虑法规要求、车辆前端几何形状以及吸能结构布局，将牌照安装点结构的 X 向高度降低 10 mm，避让吸能泡沫等吸能结构的变形空间，可以改进吸能结构的变形空间和前端结构的能量传递路径，使能量更有效地传递到吸能结构中，更好地分散和承受这些冲击力，从而降低行人腿部受到的伤害。牌照安装点结构改进如图 10 所示。

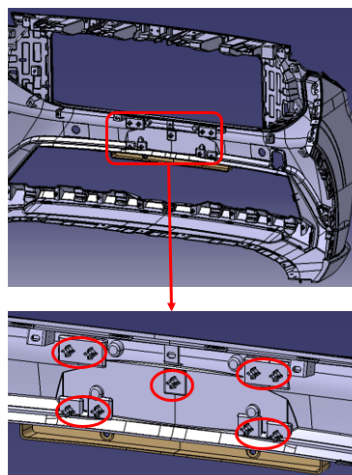


图 10 牌照安装点结构改进及位置放大图

表 3 y=0 mm 处结构改进后仿真峰值与 C-NCAP 高性能限值对比

测试点	类别	大腿弯矩数值/Nm				小腿弯矩数值/Nm				膝部韧带伸长量/mm
		F3	F2	F1	T1	T2	T3	T4		
坐标		F3	F2	F1	T1	T2	T3	T4	MCL	
y=0 mm	改进前仿真峰值	227.4	249.2	268.1	296.3	254.2	157.5	74.3	19.2	
y=0 mm	改进后仿真峰值	232.6	258.7	261.5	265.1	231.6	150.3	70.7	18.6	
	C-NCAP 高性能限值	390	390	390	275	275	275	275	27	

4.2 改进验证

结构改进完成后进行仿真分析,结果如表3和图11所示。由图11可知,结构改进后,aPLI的变形程度明显减小。由表3可知,结构改进后,小腿弯矩T1为265.1 Nm,符合2024版C-NCAP的高性能限值275 mm,大腿弯矩和膝部韧带伸长量也都符合2024版C-NCAP的高性能限值。所以该SUV车型的行人保护腿部碰撞性能符合2024版C-NCAP的高性能标准。

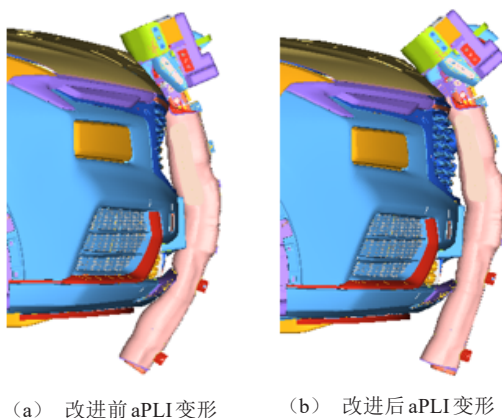


图11 结构改进后的仿真验证结果

5 结论

本文以2024版C-NCAP评价规程为依据,对某SUV车型前端结构与行人腿部碰撞的安全性进行了有限元分析与改进设计,仿真和试验结果表明,在选定撞击点 $y=0$ mm处的小腿弯矩T1超过2024版C-NCAP的高性能限值,随后提出改进方案,并进行仿真验证,得到以下结论。

(1) 在SUV车型前端结构与行人腿部碰撞的过程中,车辆前端结构中的下格栅会顶住膝盖部分,占据X向吸能空间,影响前保险杠变形吸能,导致小腿弯矩增加。

(2) 吸能泡沫设置减弱孔可以更有效地吸收碰撞能量,降低腿部受到的伤害。合理降低牌照安装点结构的X向高度可以使能量更有效地传递到吸能结构中,提高行人腿部的保护效果。改进方案的结果符合2024版C-NCAP的高性能标准,本文的研究思路和改进方案可以为不同车型前端结构的开发设计提供参考。

参考文献 (References)

- [1] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2024.
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2024. (in Chinese)
- [2] Informal Group on Pedestrian Safety Phase 2 (IG PS2). History of Development of the Flexible Pedestrian Legform Impactor, GTR9-C-04[Z]. Bonn: Working Party on Passive Safety (GRSP), 2011.
- [3] 中国汽车流通协会乘用车市场信息联席分会.2024年车型大类销量统计数据[EB/OL].(2025-01-02)[2025-03-06].<https://data.cpcadata.com/CategoryMarket>.
Chinese Automobile Circulation Association Passenger Car Joint Branch. 2024 Sales Statistics Model Categories [EB/OL]. (2025-01-02) [2025-03-06]. <https://data.cpcadata.com/CategoryMarket>. (in Chinese)
- [4] 杨瑞,孙丽梅,曾祥义,等.行人保护FlexPLI与aPLI标定限值对比研究[J].汽车技术,2024(4):40-46.
YANG Rui, SUN Limei, ZENG Xiangyi, et al. Comparison of FlexPLI and aPLI Calibration Limits for Pedestrian Protection [J]. Automotive Technology, 2024(4): 40-46. (in Chinese)
- [5] 中国汽车技术研究中心有限公司.C-NCAP管理规则(2024年版)[Z].天津:中国汽车技术研究中心有限公司,2024.
China Automotive Technology Research Center Co., Ltd. C-NCAP Management Rules (2024 Edition) [Z]. Tianjin: China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., 2024. (in Chinese)
- [6] 邹铁方,刘志旗,王丹琦.人车碰撞事故中人地碰撞损伤研究进展[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(3):116-133.
ZOU Tiefang, LIU Zhiqi, WANG Danqi. Research Progress of Human-Ground Injury in Human-Vehicle Collision [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 21(3): 116-133. (in Chinese)
- [7] 邹铁方,曾冲,王丹琦,等.面向特定车头的人地碰撞损伤防护极简方法[J].中国公路学报,2024,37(1):255-266.
ZOU Tiefang, ZENG Chong, WANG Danqi, et al. A

- Minimalist Approach to Human-Ground Collision Damage Protection for a Specific locomotive [J]. China Journal of Highway and Transportation, 2024, 37 (1): 255-266. (in Chinese)
- [8] 王萍. 面向行人保护的汽车前端结构参数化优化设计 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
WANG Ping. Parametric Optimization Design of Vehicle Front End Structure for Pedestrian Protection [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [9] 杜鑫坤. 基于低速碰撞和行人腿部保护的汽车前保险杠结构优化仿真研究 [D]. 西安: 长安大学, 2021.
DU Xinkun. Structural Optimization Simulation of Automobile Front Bumper Based on Low Speed Collision and Pedestrian Leg Protection [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese)
- [10] 江圆迪, 赵军, 娄万里, 等. 基于行人腿部保护的某车型保险杠结构优化 [J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53 (11): 17-22.
JIANG Yuandi, ZHAO Jun, LOU Wanli, et al. Bumper Structure Optimization of a Vehicle Based on Pedestrian Leg Protection [J]. Mechanical Design & Manufacturing Engineering, 2024, 53(11): 17-22. (in Chinese)
- [11] AFRASIABI A, MOHAMMADI H, HASHEMNIA K. Optimized Design of Car Frontal Bumper with Aluminum Foam Sandwich Structure Under Low Velocity Impacts [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2024, 46(10): 591-591.
- [12] 类成立, 杨帆. 某皮卡车型行人保护腿型结构优化设计 [C]//2020 中国汽车工程学会年会论文集(4). 2020: 1-4.
LEI Chengli, YANG Fan. Optimization Design of Pedestrian Protection Leg Structure of a Pickup Truck [C]//Proceedings of the 2020 Annual Meeting of China Society of Automotive Engineers (4). 2020: 1-4. (in Chinese)

作者简介



刘森海 (1981-), 男, 江西吉安人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为汽车产品研发与设计。
E-mail: lxu10@jmc.com.cn

通信作者



李骏 (1969-), 男, 江西丰城人, 博士, 教授, 主要研究方向为车辆安全与检测、机械/车辆零部件设计。
E-mail: 1948895742@qq.com