

乘用车正面碰撞中假人膝部碰撞的研究与应用

孙涛¹, 王熙泉¹, 陶钧¹

(1. 东风延锋汽车饰件系统有限公司, 武汉 430056)

摘要: 在乘用车正面碰撞过程中, 为了保护乘员避免受到下肢韧带断裂, 瘫痪等严重伤害, 中国新车评价规程 (C-NCAP) 设定了评价假人大腿部位的损伤指标。为了提高在 C-NCAP 汽车碰撞试验中的大腿部位得分, 本文展开了假人腿部伤害机理、影响因素, 分析方法的研究, 并着重介绍了仪表板子系统膝碰评价方式, 同时还以某车型膝碰问题改善为例介绍了膝碰研究成果在实际中的应用。

关键词: C-NCAP; 膝部碰撞; CAE; 仪表板; LS-DYNA

1 引言

在中国新车评价规程 (C-NCAP) 中^[1], 50km/h 正面碰撞和 64km/h 偏置碰撞试验中对假人大腿部位进行评分, 得分分别是 2 分和 4 分。假人大腿性能指标通过大腿压缩力和膝盖滑动位移两项指标进行评价, 大腿压缩力和膝盖滑动位移的高低性能限值如图 1 所示。

高性能限值: 大腿压缩力	3.8kN
膝盖滑动位移	6mm
低性能限值: 大腿压缩力	9.07kN @ 0 msec, 7.56kN @ ≥10msec
膝盖滑动位移	15mm

图 1 C-NCAP 正碰假人大腿部位性能评价指标

为了提高车辆在新车评价规程中的得分, 各大主机厂在车辆被动安全开发过程中越来越关注乘员的膝部保护, 因此展开假人膝碰研究具有重要意义。

2 假人大腿部位伤害机理及影响因素

2.1 假人大腿部位伤害机理

在目前 C-NCAP 的正面偏置碰撞试验中, 前排采用的是 Hybrid III 50 百分位男性假人, 假人的膝盖结构和传感器布置如图 2 所示^[2], 大腿压缩力是由假人大腿骨上的轴向载荷传感器测量, 负责记录大腿受到正面冲击时的损伤情况, 膝盖滑动位移是由安装在膝盖关节处的拉绳位移传感器测量, 负责记录膝关节受到撕裂及脱臼时的损伤情况。通常的碰撞试验中, 假人的腿部会冲击到仪表板上, 在假人膝盖和小腿区域产生大小不同的接触反力。一般来说, 当腿部与仪表板之间的接触反力主要集中在假人膝盖区域时, 假人大腿压缩力与接触反力基本相同; 当腿部与仪表板之间的接触反力主要集中在假人小腿区域、或小腿区域的接触反力过大时, 大腿就会相对小腿产生明显的相对滑动, 导致很高的膝盖滑动位移。

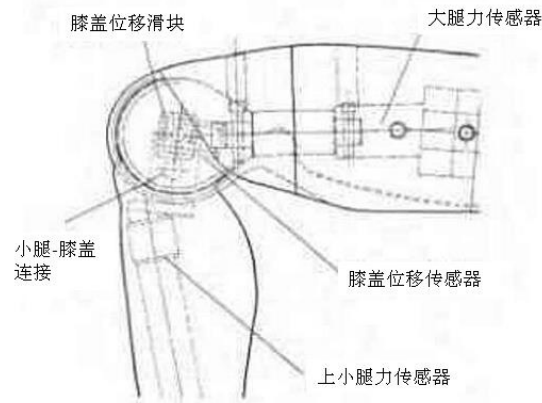


图 2 Hybrid III 50 百分位假人腿部结构

2.2 假人大腿部位伤害影响因素

研究发现，整车试验中假人腿部的碰撞过程是个复杂的瞬间运动过程，众多因素影响着假人腿部的伤害指标，例如仪表板造型，仪表板内部结构，假人坐姿，座椅强度，气囊安全带约束系统，车体加速度，车身前围侵入，地毯等等。对上述各因素综合分析，假人大腿部位撞击仪表板所受到的伤害影响因素大致可归纳为三类：第一类因素主要是影响假人腿部撞击仪表板的能量，如车体加速度等；第二类因素主要是影响假人腿部撞击仪表板的接触作用方式（包括假人腿部不同部位的接触顺序，接触反力分布及大小），如假人坐姿，仪表板造型，仪表板内部结构等；第三类因素是既影响假人腿部撞击仪表板的能量又同时影响接触作用方式的，如气囊、安全带等约束系统。

3 仪表板子系统膝碰

在大多数乘用车正面碰撞试验中，假人大腿的伤害主要来自于假人膝部、小腿对座舱系统中仪表板的撞击，因此展开仪表板对腿部伤害的研究是提升车辆乘员膝部保护性能的重要着力方向。目前常用研究乘员膝部碰撞的方法是实车碰撞试验、滑车试验及其 CAE 仿真，虽然实车和滑车方式对假人膝碰影响因素考察的更加真实全面，但实车和滑车方式对其实施输入条件要求多，且成本高，时间长，不利于展开仪表板膝碰性能研究。为了降低这些不利因素，研发出一套仅包含仪表板子系统的膝碰评价方法。

3.1 仪表板子系统膝碰评价方法

为了提高评价实施效率，同时也为了降低评价实施输入条件的要求，排除其它非研究因素对膝碰结果的影响，仪表板子系统膝碰评价方法中被评价部件通常只有仪表板总成，它是按照实际装车固定点进行约束。仪表板子系统膝碰的评价方式通常有两种，单腿膝碰方式和双腿膝碰方式（图 6）。单腿膝碰方式使用假人的半条腿撞击仪表板，通过假人腿部传感器输出的伤害值来评价仪表板的膝碰性能。单腿膝碰方式中按照整车试验假人的坐姿摆放腿部姿势，固定假人脚部，约束假人骨盆 H 点使其仅能前后方向平动，然后对假人腿部进行加载，使其达到一定速度撞击仪表板。双腿膝碰方式则通常使用带骨盆的下半身假人撞击仪表板，在假人腿部约束方式，速度加载方式，假人坐姿要求上与单腿膝碰方式基本相似。

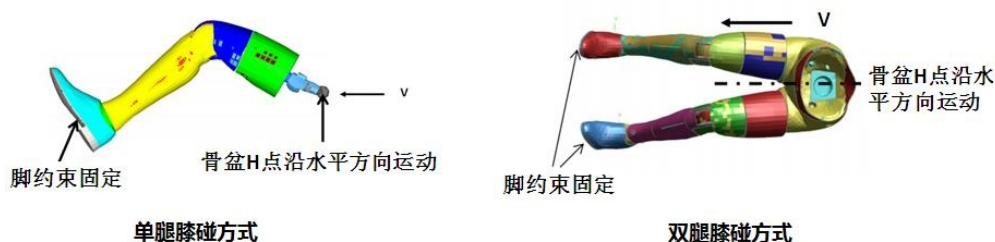


图 3 仪表板子系统膝碰方式

3.2 仪表板子系统膝碰与整车，滑车试验的区别与联系

假人腿部伤害的评价来源于 C-NCAP 正面碰撞试验，因此整车碰撞试验对考察假人的大腿伤害情况是最真实可信的，考察的影响因素也是最全的，但因成本和时间昂贵也是最难多次实施的。

滑车试验通过复现整车碰撞中车体的减速度波形来考察乘员人体响应的情况，它考虑了安全带、气囊约束系统，座椅，仪表板，地毯，转向管柱等座舱各子系统的影响因素，但由于滑车试验其本身特点，忽略了车体侵入变形，车体左右和上下两个方向的减加速度对乘员响应的影响。^[3]

仪表板子系统膝部试验与整车、滑车试验相比，虽然忽略了安全带气囊约束系统，座椅，地毯，车体变形等因素，但它考虑了假人膝部撞击仪表板过程中的三个关键因素（仪表板板的造型、膝碰接触区的刚度、假人坐姿），并且用可控和可重复的方式使假人腿部到达指定碰撞点，因此在通常情况下可以实施与整车、滑车试验等效的膝部碰撞，并得到等效的假人大腿部位伤害评价（图 4）。

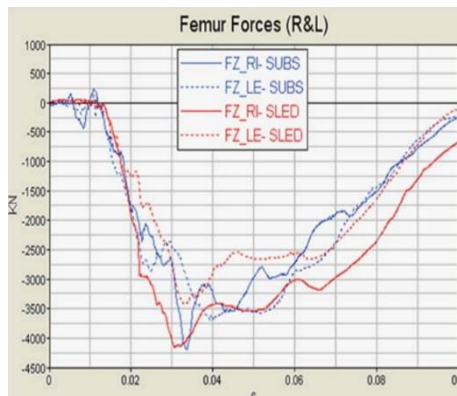


图 4 滑车试验与仪表板子系统膝碰试验结果对比

3.3 仪表板子系统膝碰评价优势

和整车、滑车试验相比，仪表板子系统膝部试验成本最低，可控性、重复性最好，可在开发阶段高效的进行多次试验。除此之外，它还具有以下方面优势：

1. 可以实现仪表板膝碰区域结构刚度分布检查；
2. 大腿部位伤害指标控制和整车膝碰指标再现；
3. 不同仪表板设计方案的高效研究或验证；
4. 判断仪表板膝碰要求制定是否合理。
5. 辅助分析整车试验中膝碰问题原因。

因此正确合理使用仪表板子系统膝碰评价方法，可让仪表板子系统膝碰性能的满足成为整车膝碰目标达成的强有力支撑。

4 实例应用

4.1 某车型问题描述

东风乘用车某车型在第一次正面偏置碰撞开发试验中，发现前排副驾驶左腿的膝盖滑动位移将近 8.0mm,超出了高性能限值，根据 C-NCAP 评分规则，失分 0.89，影响了整车的得分和星级评价。

4.2 仪表板膝碰区域型面校核

当知悉整车试验出现膝盖滑动位移过大的现象，首先进行判断仪表板的造型是否是影响膝盖滑动位移的重要因素。一般认为，若仪表板型面先接触假人膝盖，膝盖滑动位移一般不会超标；若仪表板型面先接触假人小腿，膝盖滑动位移一般会超标^[4]。于是以碰撞前的假人坐姿为输入，固定脚踝点，对仪表板乘员侧的型面进行校核，校核结果显示仪表板型面基本满足膝盖是第一接触点，符合了假人膝盖先接触仪表板的相对位置关系要求（图 5）。



图 5 某车型乘员侧仪表板膝碰区域型面校核

4.3 仪表板膝碰区域刚度分布检查

在判断仪表板膝碰区域造型满足要求之后，对仪表板膝碰区域结构刚度分布进行检查，此过程使用 LS_DYNA 进行单腿膝碰 CAE 仿真计算，详细研究仪表板结构对膝碰结果的影响。仿真计算中假人左腿按照整车试验前乘客侧假人的乘坐坐姿进行摆放，骨盆 H 点碰撞速度依据实车试验骨盆 H 点加速度曲线减去车身 B 柱加速度曲线积分得到的相对速度结果。仿真结果表明（图 6），按照整车试验前假人的坐姿进行单腿膝碰，仪表板小腿接触区域刚度并不会造成过大的膝盖滑动位移。

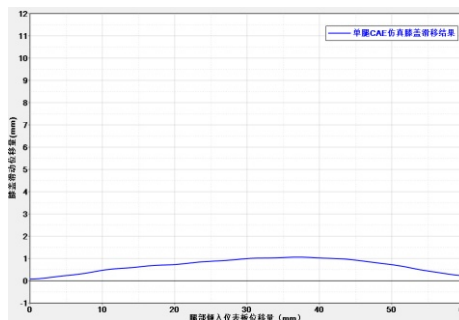


图 6 乘坐坐姿下单腿膝碰 CAE 仿真结果

4.4 问题原因分析

在进行仪表板型面校核和膝碰区域刚度分布检查后，发现正常乘坐坐姿下假人腿部碰撞仪表板，仪表板并不会造成过大膝盖滑动位移。分析整车偏置碰试验输出的大腿压缩力和膝盖滑动位移时间曲线，发现膝盖滑动位移的响应时刻比大腿压缩力的响应时刻约早 5ms，推测乘客侧假人在车身剧烈的减加速度作用下，假人脚部沿着搁脚地毯斜面向上移动，脚踝点位置也随之上移，导致在小腿绕脚踝点旋转运动的过程中，小腿的中上部最先接触仪表板，而不是膝盖先接触仪表板；小腿由于受到仪表板的作用运动受阻，大腿在骨盆的推动下继续向前运动，从而导致膝盖滑移值偏大。

为了证实所做的推测，查看了台车试验录像中的腿部运动形态，高速录像显示碰撞过程中假人脚部的确存在上移的情形（图 7 左），并且在跟踪此车型第二次偏置碰撞试验时，在地毯搁脚斜面的泡沫上发现假人脚跟留下的压痕，测量发现假人左脚跟压痕距离碰撞前脚跟的位置大约上移 60mm（图 7 右）。于是根据实车试验时假人脚跟上移的情况调整坐姿再次进行单腿膝碰 CAE 仿真分析，分析结果表明假人脚部上移后膝盖滑移值明显增大，并与整车偏置碰试验结果有明显的对应性（图 8）。单腿膝碰仿真后还实施单腿膝碰试验，试验结果再次验证了对此问题原因的分析。

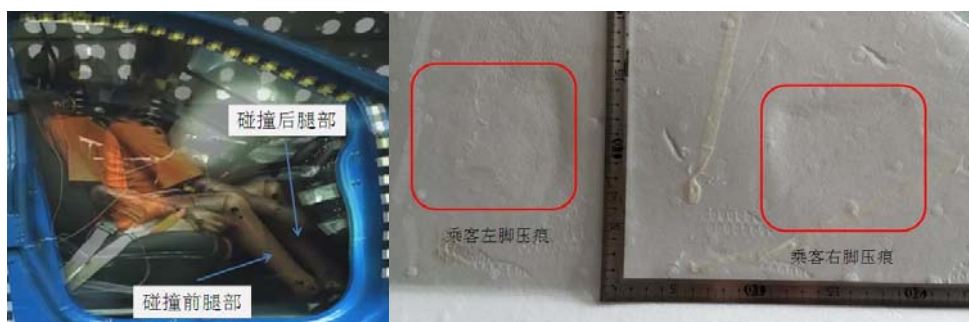


图 7 滑车试验录像照片

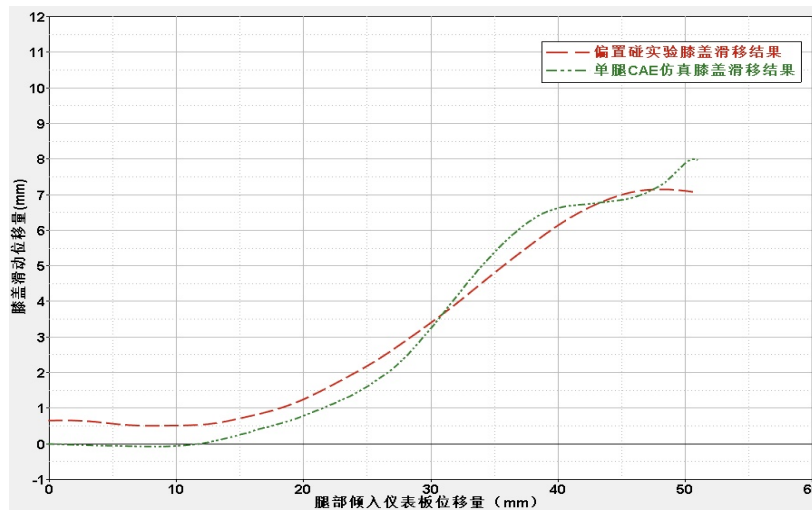


图 8 调整腿姿后单腿膝碰 CAE 仿真结果与偏置碰试验结果

4.5 改善方案措施及仿真验证

根据对该车型在偏置碰试验中乘员左腿膝盖滑动位移偏大问题的原因分析，改善假人腿部与仪表板的接触方式是解决问题的关键。由于该车型结构设计阶段已完成，很快就要量产上市，实施优化车身结构吸能特性，修改仪表板造型和增加膝碰区域的安全配置等措施的难度较大，成本太高，且验证试验需要的周期长，难以满足项目节点要求。通过综合考虑，选取改动代价最小，且容易实施的方案。初步确定以下两个方案，并进行仿真分析。

- 1) 更换摩擦系数大的地毯材料；
- 2) 增大搁脚斜面的角度到 45 度。

方案 1 和方案 2 措施目的主要是通过阻止假人脚部在碰撞中的上移运动，来实现假人膝盖与仪表板的提前接触，而非小腿与仪表板的先接触，进而降低膝盖滑动位移量。^[5]

采用 LS-DYNA 对初始方案进行仿真计算，初始方案仿真结果的膝部滑动位移大概 7.5mm，脚部上移大概 60mm，与实车试验数据较为接近。然后在此基础上对两个改进方案也使用 LS-DYNA 求解器进行仿真分析，仿真结果如下图 9 所示。

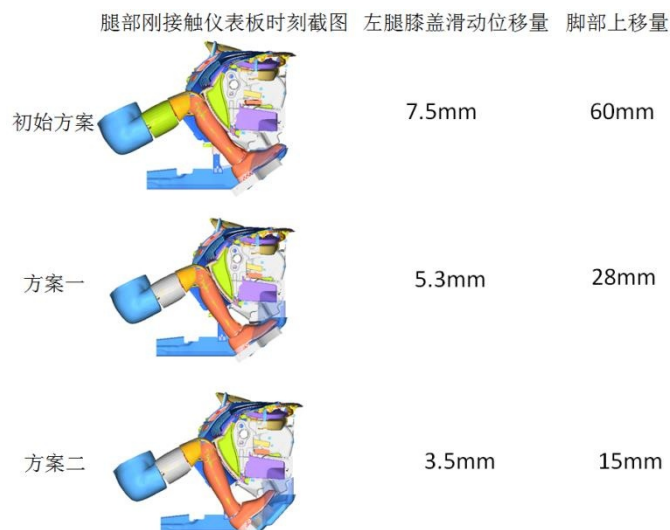


图 9 仿真结果对比

4.6 实车验证

综合项目时间，改动大小，实施难易等因素，选取了方案二进行了整车偏置碰试验，同时为了平衡乘员乘坐的舒适性，搁脚斜面角度最后确定从原来的 35 度增加到 40 度。在随后的第三次偏置碰试验中，由于增大了乘员搁脚斜面的角度，碰撞过程中假人脚部上移的情形得到了改善，从原来的上移 60mm 减少到

25mm (图 10 左), 膝盖能比较早的接触仪表板, 膝盖滑动位移因此降低到 4.9mm (图 10 右), 使假人在大腿部位评价不失分。

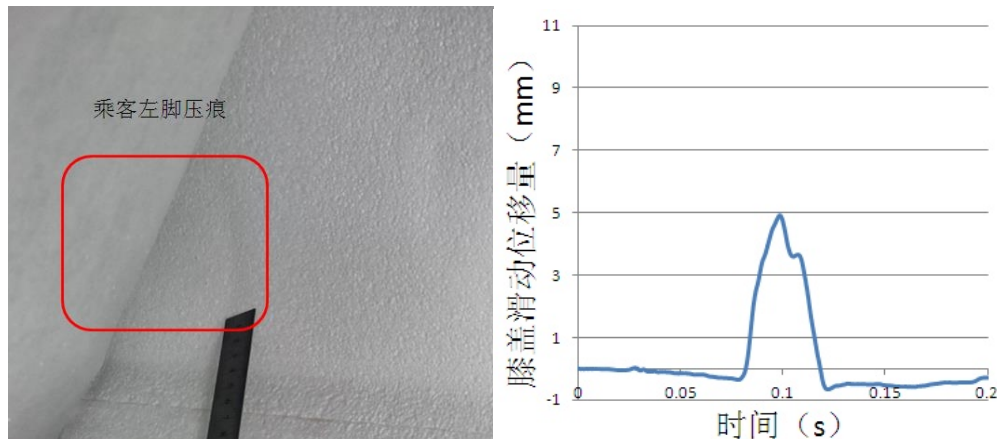


图 10 偏置碰试验结果

5 结论

传统乘用车乘员被动安全更多的关注假人的头部、颈部、胸部的伤害, 保证碰撞事故中“车毁人不死”, 随着“车毁人不伤”、C_NCAP 五星等更高安全性能的要求, 假人膝部保护势必会越来越受到关注和研究。本文所举案例通过运用假人膝碰研究成果, 成功解决了某车型膝盖滑动位移偏大的问题, 为以后解决此类工程问题积累了宝贵经验; 同时本文所述的依据整车碰撞中膝碰能量和碰撞形态作为输入的子系统膝碰评价方式是一种高效低价的评价方式, 非常适应仪表板的开发特点, 它不仅能快速及时评估仪表板膝碰区域的设计, 还能辅助查找分析整车膝碰问题原因, 是对整车、滑车膝碰评价方式的重要补充。

参考文献:

- [1] C-NCAP 管理规则. 中国汽车研究中心, 2015 年版.
- [2] 杨笠, 顾玉龙. 正面偏置碰撞中降低假人膝盖滑动位移的结构优化. 汽车安全与节能学报, 2014 年, 第 5 卷 第 4 期.
- [3] 钟志华, 张威刚, 曹立波等. 汽车碰撞安全技术[M]. 机械工业出版社, 2003 年.
- [4] 刘珍海, 陈现岭, 岳国辉. 正面碰撞中假人大腿伤害研究. 第十四届中国汽车安全技术学术会议论文集.
- [5] 张耀辉, 鞠春贤等. 正面碰撞中假人膝盖滑移量分析. 2012 年中国汽车安全技术国际研讨会论文.

The Research and Application of Knee Impact in Vehicle Frontal Crash

SUN Tao¹, WANG Xi-quan¹, TAO Jun¹

(1.Dongfeng Yanfeng Automotive Trim Systems Co., Ltd, Wuhan 430056, China)

Abstract: In order to protect the occupant from serious injuries such as rupture and paralysis of lower limb ligaments during the frontal collision of passenger cars, the C_NCAP (Chinese New Car Assessment Program) sets the injury criteria of the dummy's femur and knee. In order to improve the scores in the C_NCAP, the injury mechanism, the influencing factors and the analysis method of the dummy knee impact are studied in this paper. The instrument panel subsystem evaluation method of the knee impact is also introduced, and citing a troubleshooting as an instance to introduce the application of knee impact research in practice.

Key Words: C_NCAP; Knee impact; CAE; Instrument panel; LS-DYNA