

# Study on Improving the Test Method of Knee Mapping Based on Sled

Peng ZHANG<sup>1</sup>, Huowang WAN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>China Automotive Engineering Research Institute Co.,Ltd., Chongqing, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Technology, Chongqing, China

Email: zhangpeng01@caeri.com.cn

**Abstract:** In the context of automotive crash safety, the Knee Mapping test is designed to prevent serious knee injuries to passengers. Throughout the process of conducting Knee Mapping tests, various reasons may lead to test failures, which can result in the waste of time and resources, as well as increased costs. Therefore, this paper organizes and statistically analyzes the existing problems in the Knee Mapping test process, analyzes the causes of these problems, and proposes targeted solutions. Finally, the method is verified through testing to effectively improve the success rate of the tests and reduce test costs.

**Keywords:** Knee injury; Knee impact; Femur injury; Sled test

## 基于台车的KNEE MAPPING试验方法改进研究

张 鹏<sup>1</sup>, 万火旺<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆, 中国, 401122

<sup>2</sup>汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室, 重庆, 中国, 401122

Email: zhangpeng01@caeri.com.cn

**摘要:** 在汽车碰撞安全中, 因避免乘员膝部受到严重伤害而设计的Knee Mapping试验, 其在试验过程中会因各类原因导致试验失效从而造成时间和成本的浪费。因此, 本文梳理统计了Knee Mapping试验过程中的现有问题, 并分析了导致问题的原因, 且针对性的提出了解决办法, 最后通过试验验证了该方法可有效提高试验的成功率, 降低了试验成本。

**关键词:** 膝部伤害; 膝部碰撞; 大腿伤害; 台车试验

## 1 研究的背景和意义

随着中国科技水平的不断提升, 汽车安全技术在被动安全方面取得了显著进步, 成为消费者选择汽车的主要参考因素之一。随着安全带、安全气囊等乘用车安全装置的普及, 乘员头胸部在正面碰撞中受到严重伤害的几率大大降低, 然而乘员的下肢损伤越来越严重<sup>[1]</sup>。实际上, 相较于头部和胸部伤害的研究, 对乘客腿部伤害的研究相对较少。大腿伤害是交通事故中导致下肢残疾的主要原因之一, 严重时甚至可能危及生命<sup>[2]</sup>。然而传统验证仪表板对膝部碰撞保护性能的方式是实车碰撞试验, 但在实车碰撞试验中都只能进行某种特定工况的试验, 不能考核所有工况; 此外, 实车碰撞试验存在成本高、周期长等问题, 因此需要一种成本更低且可靠性强的试验验证手段。早在2011年6月, E-NCAP发布了《膝部碰撞伤害评价的台车试验规程》, 对膝部碰撞区域的乘员伤害进行评价<sup>[3]</sup>。而对于国内, 在C-NCAP、C-IASI的正碰和偏置碰试验中, 均增加了大腿膝部罚分项, 用于评价前排乘员膝部可能撞击区域的安全风险<sup>[4,5]</sup>。因此, 国内外其他安全规程也提出了针对膝部碰撞的Knee Mapping试验, 它是利用台车来模拟汽车在发生正面碰撞时, 仪表对应的膝部碰撞区域对前排乘员膝部可能造成的损伤风险。

目前, 国内外对Knee Mapping试验进行了广泛的研究。曾庆勇等提出了一种直观的大腿伤害评估方法来判断大腿的损伤程度, 并从仪表(冲击点)位置、乘员下肢偏置角度、小腿与地面之间的角度三个方面对大腿伤害进行了仿真研究并得到了最佳的位置和角度<sup>[2]</sup>。唐洪斌分析了某车型膝部碰撞典型部位试验结果, 提出了影响膝部碰撞时膝部大腿力和膝部滑移量的主要因素<sup>[3]</sup>。刘珊等通过Knee Mapping试验程序仿真, 搭建有限元模

型, 进行仿真试验, 确定危险结构, 针对危险结构提出了改进措施, 以降低乘员腿部伤害<sup>[6, 7]</sup>。曹啸峰等设计了一种膝部模块冲击仪表板的试验方法及试验台架, 复现实车碰撞中假人腿部与仪表板的碰撞接触情况<sup>[8]</sup>。刘珍海等基于 E-NCAP 的评估方法, 分析了某车辆在正面碰撞中大腿伤害的得分情况, 通过有限元分析验证了改进方案的有效性, 提出了大腿伤害评价及性能提升流程和策略, 证明了通过有效设计可以降低 Knee Mapping 测试中假人大腿伤害, 实现 E-NCAP 性能目标<sup>[9]</sup>。李威等基于对 2021 版 C-NCAP 膝碰评分规程解读, 探索并提出达成五星膝碰的仪表板设计方法<sup>[10]</sup>。孙航提出了一种新的方法, 通过假人骨盆加速度、角速度以及假人大腿转动角度来计算假人膝部位移量。该方法不受假人运动姿态、仪表板遮挡和膝部皮肤碰撞变形等因素的影响, 避免了图像分析方法的依赖<sup>[11]</sup>。张耀辉简单分析了假人的膝盖结构和传感器布置的位置及原理, 研究了膝盖滑移量的伤害机理和影响因素, 并提出了解决方案以避免因膝盖滑移量偏大而导致大腿得分降低的现象<sup>[12]</sup>。Sun H 等提供了一种改进的测量方法, 用于在车辆台车碰撞试验中测量假人膝盖的位移<sup>[13]</sup>。

综上, 当前对于 Knee Mapping 试验的研究主要集中在通过多方面的设计和方法, 如仿真设计、试验方法设计、性能评估和改进方案, 来提高车辆安全性和减少乘员在碰撞中的伤害。但是, 关于 Knee Mapping 试验自身的特点以及试验过程中的突出问题和改进方法研究尚少。事实上, Knee Mapping 试验较大程度依赖试验人员的经验, 具有一定的主观性和不确定性, 因此试验自身失效概率较大, 进而造成时间和成本的浪费。因此, 本文将针对这一问题, 就 Knee Mapping 试验在试验过程中遇到的各种问题进行详细的分析和讨论, 并提出对应的改进方法, 以提高试验的成功率和工作效率, 降低试验成本。

## 2 Knee Mapping 试验简介

### 2.1 试验目的

目的在于评价前排乘员膝部在划定的风险评价区域内可能存在的安全风险。在评估区域内对应每条腿, 若存在可变区域接触或集中力载荷, 则进行相应罚分。车企可通过 Knee Mapping 试验证明这些伤害目标点(以下简称目标点)并不会造成严重伤害, 从而消除该罚分。

### 2.2 试验过程及方法

Knee Mapping 试验在滑台上进行。首先将白车身安装在滑台上, 确保车身及其安装无永久变形, 采用 95<sup>th</sup> 男性假人或 05<sup>th</sup> 女性假人(95<sup>th</sup> 男性假人优先), 并按规程调整假人姿态, 进而模拟整车碰撞试验时目标点对假人下肢的伤害。对于 Knee Mapping 试验的测试波形(目标波形), 可选用规程规定的正式评价波形或企业提供的整车试验碰撞侧 B 柱加速度波形, 并要求台车实际波形应比目标波形更为严苛, 且满足规程规定的 DV、DX 的要求<sup>[4][5]</sup>。其中, DV 为目标波形和台车实际波形之差的速度曲线, DX 为目标波形和台车实际波形之差的位移曲线。

### 2.3 试验评价

以 E-NCAP 要求为基础, 比较了各个新车评价规程在 Knee Mapping 试验中对膝部伤害的评价和要求<sup>[13]</sup>。如表 1 所示, 除 C-IASI 以外, 其它规程要求基本一致, 即: 风险评价区域内大腿力载荷应小于 3.8kN, 膝盖滑移量小于 6mm。此外, 部分新车评价规程还针对前排乘员侧假人的膝部穿透量作了要求, 如 E-NCAP、C-IASI 等要求前排乘员侧假人应在试验过程中使假人最小膝盖穿透量达到 20mm 检查区域, 否则试验无效。

Table 1.Comparison of each assessment program about Knee Mapping  
表 1. 各规程 Knee Mapping 试验评价对比

规程	E-NCAP	ASEAN NCAP	A-NCAP	Latin NCAP	C-NCAP	C-IASI
考查项		集中载荷 (-1 分), 可变接触载荷 (-1 分)				集中载荷 (-1 分)
伤害限值		大腿力 < 3.8kN, 膝盖滑移量 < 6mm				大腿力 < 3.8kN, 膝盖滑移量 < 12mm

## 3 现有问题及原因分析

Knee Mapping 试验与其他试验不同, 试验完成后需要判断试验是否有效, 但是各大规程对试验有效性的判定并无严格的规定和统一明确的标准, 这就导致其具备一定的主观性和不确定性。因此, 在实际的试验过程中, Knee Mapping 试验会因各类原因导致试验失效。如表 2 所示, 本文针对 10 个车型共 86 次的 Knee Mapping 试验进行了统计, 结果表示, Knee Mapping 试验的平均成功率仅为 72.1%, 而试验失效意味着周期、成本的严重浪

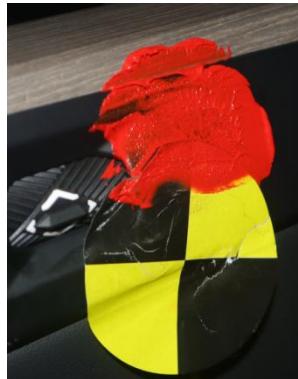
费。根据法规要求，需通过高速摄像、油彩印记和受力分析对试验失效的原因进行进一步分析。以 C-NCAP 为例，规程要求：为保证 Knee Mapping 试验的有效性，对于关注大腿力风险的目标点，载荷主承载腿的膝部应与目标点保持稳定接触，对于关注膝部滑移量风险的目标点，主承载腿的小腿上部应与目标点保持稳定接触。若膝部或小腿上部出现斜偏，视为无效测量。另一腿部也应尽可能承载较小的载荷或不承载载荷<sup>[4]</sup>。因此本文针对这 10 个车型的试验失效原因进行分析和统计，如表 3 所示。从表 3 可以看出，导致试验失效的表现形式多样，但主要集中在载荷主承载腿（目标腿）撞击斜偏和撞击力异常。其中撞击力异常主要表现在非主承载腿（非目标腿）不能体现尽可能承载较小的载荷或不承受载荷。因此，需对这两类失效形式进行重点分析和解决。

**Table 2 Knee Mapping Test validity statistics**  
**表 2 Knee Mapping 试验有效性统计**

项目	车型 1	车型 2	车型 3	车型 4	车型 5	车型 6	车型 7	车型 8	车型 9	车型 10	合计
试验次数	8	6	9	7	10	8	7	9	10	12	86
有效次数	6	6	6	5	6	6	5	7	7	8	62
失效次数	2	0	3	2	4	2	2	2	3	4	24
有效率	75%	100%	66.7%	71.4%	60%	75%	71.4%	77.8%	70%	66.7%	72.1%

**Table 3 Knee Mapping Test failure cause analysis and statistics**  
**表 3 Knee Mapping 试验失效原因分析和统计**

序号	判定依据	失效形式	失效次数	备注
1	若膝部或小腿上部出现斜偏，视为无效 测量	上下位置偏离	5	如图 1
		左右位置偏离	3	如图 2
2	载荷主承载腿的膝部应与目标点保持稳定接触	副驾膝部侵入量小于 20mm	2	未撞到
		目标腿撞击时间晚于非目标腿	1	小于 20mm 如图 3
3	非主承载腿应尽可能承载较小的载荷或不承受载荷	目标腿先撞击，但撞击力小于非目标腿	3	如图 4
		目标腿先撞击，但非目标腿承载较大载荷	5	如图 5
4	其他	波形不满足要求	1	不满足 DV、DX 要求
		假人坐姿过于倾斜或扭曲	1	/
		无法确认撞击时间	2	如图 6



**Figure1. The target point deviates up and down**  
**图 1 目标点上下偏离**



**Figure2. The target point deviates horizontally**  
**图 2 目标点左右偏离**

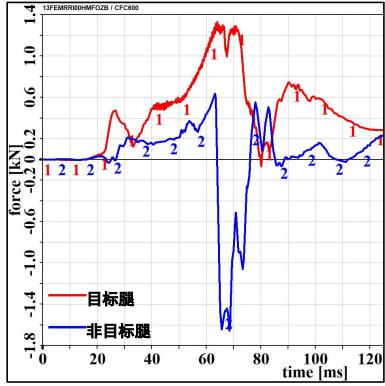


Figure3. The non-target leg hits first  
图 3 非目标腿先撞击

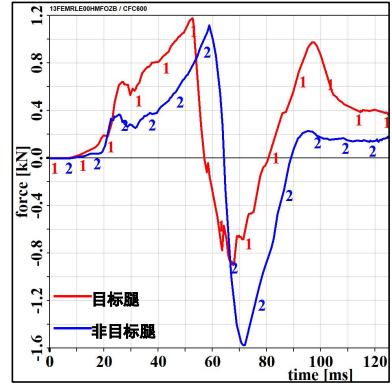


Figure4. Impact force is less than the non-target legs  
图 4 撞击力小于非目标腿

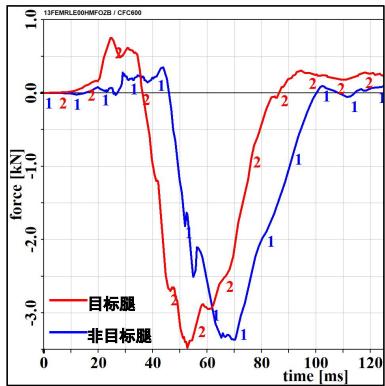


Figure5. Non-target leg bearing is larger  
图 5 非目标腿承载较大

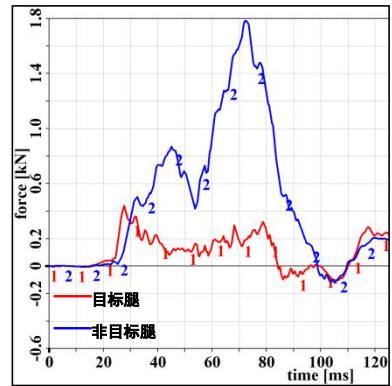


Figure6. unable to confirm the impact time  
图 6 无法确认撞击时间

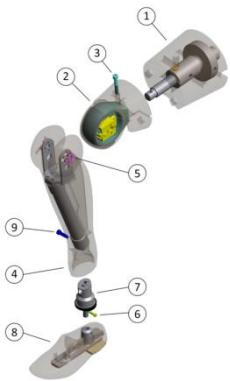
## 4 试验方法改进

### 4.1 膝部或小腿上部出现斜偏

#### 4.1.1 上下位置偏离

##### (1) 假人下肢结构及运动原理

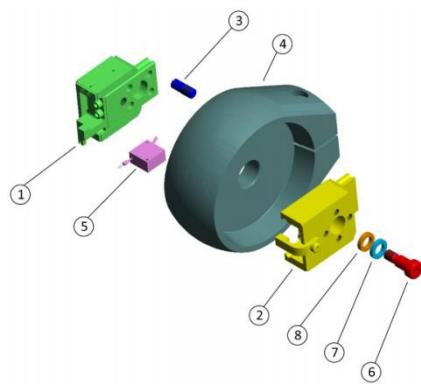
要保证大腿膝部撞击位置在高度方向的准确性，则需对假人下肢的结构和运动原理进行分析。假人下肢结构如图 7 所示，假人下肢由大腿组件 1、滑动膝关节组件 2、小腿组件 4、脚踝组件 7 和脚组件 8 构成。大腿 1 通过螺栓 3 与滑动膝关节 2 固定连接，且大腿 1 和滑动膝关节 2 之间装有压力传感器，可测量大腿在运动和碰撞过程中受到拉伸和压缩力。如图 8 所示，小腿总成 4 通过螺栓 5 与滑动膝关节总成 2 中的内外板总成进行固定连接。其中，内外板总成有滑槽和滑块，小腿总成是固定在滑块上，因此小腿总成可沿滑槽进行前后移动，组成移动副。同时，内外滑槽通过螺栓与膝部支撑组件连接，组成转动副。因此，小腿可绕膝关节转动并可滑动。且在内滑槽上装有膝部位移传感器，若小腿受到撞击则向后运动，通过膝部位移传感器便可测得小腿相对于膝关节的位移。如图 9 所示，脚踝总成 7 通过螺栓 9 与小腿总成 4 固定连接，无相对运动；脚部总成 8 通过螺栓 6 与脚踝总成 7 固定，其中脚踝总成内有球面副，因此脚部总成和小腿总成可进行三个自由度的相对转动。



1.大腿部总成;2.滑动膝关节总成;3.从膝关节到大腿连接螺栓;4.小腿总成;5.从小腿到滑动膝关节螺栓;6.脚连接螺栓;7.脚踝总成;8.脚部总成;9.从脚踝到小腿的连接螺

Figure7. Complete Lower Limb Assembly Explosion Diagram

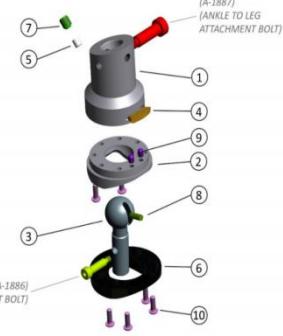
图 7 完整下肢总成爆炸图<sup>[15]</sup>



1.内板总成;2.外板总成;3.销;4.机加膝部支撑组件;5.膝部位移传感器;6.连接螺栓;7.滑动垫片;8.压紧垫片

Figure8. Ball-and-Socket Knee Joint Assembly Explosion Diagram

图 8 球滑块膝盖总成爆炸图<sup>[15]</sup>



1.上部脚踝外壳;2.下部脚踝外壳;3.踝轴;4.停止销固定器;5.踝关节摩擦垫;6.踝部缓冲器;7.紧定螺钉 1;8.销;9.紧定螺钉 2;10.连接螺钉

Figure9. Ankle Assembly Explosion Diagram

图 9 脚踝总成爆炸图<sup>[15]</sup>

在试验过程中,为保证膝部与目标点的稳定接触,允许干涉膝部伸展或阻止脚部的向前移动<sup>[4]</sup>。因此在实际运动过程中,假人足部不会向前移动,小腿带动大腿一起绕脚踝的球面副作转动,然后撞击到目标点。图 10 为假人下肢在碰撞过程中的示意图,显然假人在撞击时(红色)膝部外表面与仪表上目标点的切线相切。

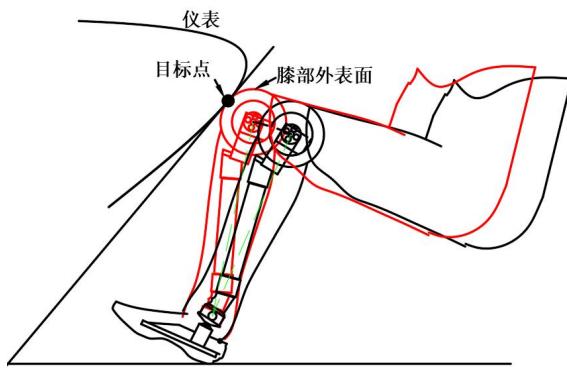


Figure10. A Schematic diagram of the lower limb movements

图 10 下肢运动示意图

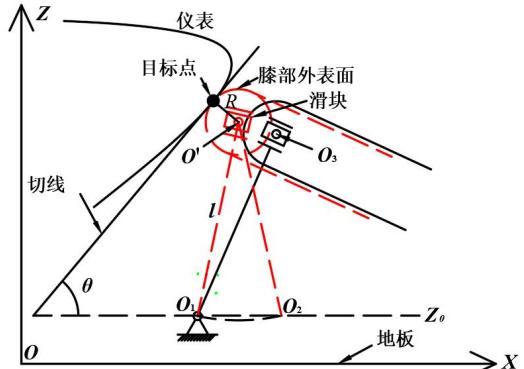


Figure11. Schematic diagram of lower limb mechanism movements

图 11 下肢机构运动简图

通过以上分析,可知假人下肢的机构运动简图如图 11 所示。其中,若目标点为硬点,则撞击时的接触位置为假人膝部而非小腿,此时小腿相对于大腿的膝部位移仅在 0-2mm 之间波动,显然可忽略其中的移动副结构<sup>[9]</sup>。因此假人下肢的运动过程,可简化为小腿绕假人脚踝的纯转动。为保证膝部能够准确撞击到目标点,并确定膝部和脚步的初始位置,则需进一步进行几何分析。

## (2) 假人腿部姿态确定

如图 11 所示,假人膝部在撞击到仪表后,膝部皮肤外圆应与仪表目标点的切线相切并重合。首先在目标点附近选取包含目标点在内的三个点,同时此三个点需满足两个要求,一方面要求三点组成的平面应平行于车辆纵向中心平面,即 y 坐标相同,另一方面要求三个点尽量选择在同一曲率的曲面上。假设测得三点的坐标值分别为  $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_2, z_3)$ , 其中  $(x_2, y_2, z_2)$  为目标点的坐标。因此,在过目标点的车辆纵向平面内( $XOZ$  平面),由圆的一般方程可知,已知三点的坐标,可求参数  $D, E, F$ , 从而求得到圆的方程,如公式(1)。

$$x^2 + z^2 + Dx + Ez + F = 0 \quad (1)$$

将目标点的坐标带入公式(1), 求得目标点的斜率, 如公式(2):

$$k = \frac{-2x - D}{2Z + E} \quad (2)$$

显然, 如图 11 所示, 斜率  $k = \tan(\theta)$ , 即  $\theta = \tan^{-1}(k)$ 。

已知目标点坐标为  $(x_2, y_2, z_2)$ 。如图 11 所示, 当膝部皮肤外圆与目标点接触时, 由几何关系可得膝部圆心  $O'$  的坐标如公式(3)所示:

$$(x', z') = (x_2 + R \cos \theta, z_2 - R \sin \theta) \quad (3)$$

式中:

$(x', z')$ ——膝部圆心坐标;

$R$ ——膝部外圆半径;

$\theta$ ——目标点切线与水平线的夹角;

$(x_2, z_2)$ ——目标点坐标。

如图 11 所示, 以膝部中心孔为圆心, 以脚踝中心到膝部中心孔的距离  $l$  为半径作圆, 则该圆与过脚踝中心的水平线  $z = z_0$  有两个交点, 根据公式(4)计算得脚踝中心点坐标分别为:  $(x_{ankle-1}, z_0)$ ,  $(x_{ankle-2}, z_0)$ 。假人姿态调整时一般要求大腿自然向前伸直, 以模拟驾乘人员的正常坐姿, 因此舍弃  $x_{ankle-2}$ , 得到唯一解  $x_{ankle-1}$ 。最后再根据大腿和腿部在座椅上的位置, 可得到膝部中心的坐标位置位于以  $(x_{ankle-1}, z_0)$  为圆心,  $l$  为半径的圆弧上, 从而确定膝部中心孔以及假人下肢的空间位置, 进而保证假人膝部在上下位置能够准确撞击到目标点。

$$\left. \begin{aligned} (x - x')^2 + (z - z')^2 &= R^2 \\ z &= z_0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow x_{ankle-1}, x_{ankle-2} \quad (4)$$

#### 4.1.2 横向位置偏离

为了撞击到目标点, 假人通常处于非标准姿态, 从而导致假人的重心偏离, 进而导致假人在运动过程中受到横向力的作用使得横向位置的偏离。因此, 为防止腿部横向偏离, 首先应在假人下肢摆放时, 尽量使目标腿处在纵向铅垂平面内; 其次可在两大腿之间或大腿一侧塞入硬质泡沫 (图 12), 亦或采用拉带对大腿或脚踝进行横向约束 (图 13、图 14)。

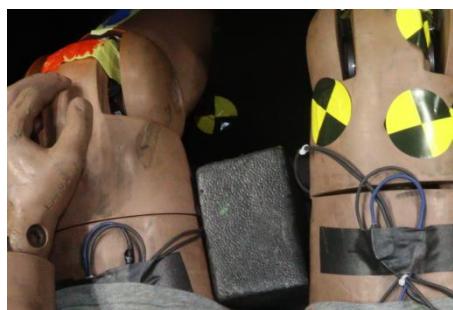


Figure 12. Plug foam between the legs

图 12 两腿间塞泡沫



Figure 13 . thigh lateral restraint

图 13 大腿横向约束



Figure 14. ankle lateral restraint

图 14 脚踝横向约束

#### 4.2 目标腿的膝部与目标点不能保持稳定接触

一方面, 为确保膝部稳定接触, 可以阻止脚部在地板上的前向移动。另一方面, 对于因副驾膝部侵入不够导致试验失效的情况, 通常可适当前移座椅位置来实现膝部与目标点的稳定接触, 具体移动距离可通过高速相机进行观察后确定, 此类情况在实际试验过程中发生的情况较少, 因此本文不作重点讨论。

## 4.3 非目标腿承载较大

### 4.3.1 非目标腿先撞击

以图 3 为例, 显然非目标腿先撞击到仪表, 由于撞击力的反向作用, 导致假人相对仪表的运动速度降低, 使得当目标腿再撞击到仪表时, 由于相对速度的降低从而导致撞击力的下降, 最终测得假人的大腿压缩力偏小, 因此无法客观的反映出膝部伤害的真实情况。因此, 为保持目标腿的膝部与目标点保持稳定接触, 尽量保证目标腿要先于非目标腿撞击到仪表。为解决这一问题, 通常使假人姿态在调整过程中, 使目标腿到仪表的间距大于非目标腿到仪表的间距, 且在保证假人姿态的前提下二者间距应尽量调整到最大。

### 4.3.2 目标腿先撞击

目标腿先撞击分两种情况: 一种是目标腿撞击力小于非目标腿, 试验失效; 另一种是目标腿撞击力大于非目标腿, 但非目标腿承载较大载荷, 试验依然失效。对于第一种, 如图 4、图 5 所示, 目标腿先撞击, 但是撞击力却小于非撞击腿, 一般情况下是由于非目标腿撞击到了硬点或可变区域接触, 因此在实际假人姿态摆放时, 应使非目标腿的膝盖应对准无载荷或较少载荷区域, 一般情况下可以侧向放置在与仪表板间距最大的位置, 从而保证与目标腿的相对间距达到最大。其次, 当硬点或可变区域与非目标腿膝盖高度位置接近而无法有效避开时, 有时可使非目标腿与目标腿进行交叉摆放(如图 14 所示), 以降低非目标腿高度、加大与仪表的间距, 同时避开硬点和可变区域。对于第二种, 目标腿先撞击力虽然大于非目标腿, 但是根据判定规则, 非目标腿此时亦不能承受过大载荷, 即两腿受力应有显著区别。此时也可通过加大非目标腿与仪表的间距、避免对准硬点或可变区域的方式来进行规避。

以上三种原因导致的非目标腿承载较大, 虽表现形式有所区别, 但其根本原因基本一致, 规避措施也大同小异, 可归为同一类问题进行解决。

## 4.4 其他

对于表 3 所示的其他三种情况, 首先是波形不满足 DV、DX 的要求, 通过调整目标波形的权重系数便可解决; 其次是假人坐姿过于倾斜或扭曲, 通过采用目测的形式进行判断, 但是判断比较主观, 没有形成统一的客观的标准; 最后一种是无法确认撞击目标点时间, 如图 6 所示, 没有明显的撞击突变点, 此时可借助高速摄像进行查看, 若仍无法判断, 可增加接触开关来判断来判断接触开始和接触结束的时间。

## 5 试验验证

通过对以上措施的综合利用, 继续跟踪后续 10 款车型的 Knee Mapping 试验, 结果如表 4 所示。从表 4 可以看出, 试验平均成功率为 86.9%, 相较于之前的 72.1%, 提升明显, 证明以上改进方法行之有效。

Table 4 Knee Mapping Test validity statistics after optimization  
表 4 改进后 Knee Mapping 试验有效性统计

项目	车型 1	车型 2	车型 3	车型 4	车型 5	车型 6	车型 7	车型 8	车型 9	车型 10	合计
试验次数	7	11	9	12	10	5	7	9	8	6	84
有效次数	6	9	7	10	9	5	6	8	7	6	73
失效次数	1	2	2	2	1	0	1	1	1	0	11
有效率	85.7%	81.8%	83.3%	90%	100%	85.7%	88.9%	87.5%	87.5%	100%	86.9%

## 6 结论

本文针对 Knee Mapping 试验成功率不够高的问题进行了充分研究, 找到了当前引起试验失效的形式和主要原因, 并针对性提出了改进方法。其中重点对几何位置的斜偏和非目标腿承载较大这两个引起试验失效的主要形式进行了重点讨论。本文提出的 Knee Mapping 试验的改进方法经过试验验证有效可行, 操作简单, 可有效提高试验成功率, 具有较强的试验指导意义和工程应用价值。

## 参考文献 (References)

- [1] Liu Z , Wan R , Shi Y .Analysis of Lower Leg Injury of Occupant in Frontal Crash Tests Based on China NCAP Protocol[C].International Conference on Mechanics, Solid State and Engineering Materials.2011:400-405.
- [2] Zeng Qingyong , Zhong Kexiang , Cheng Wenming,et al.Research on the thigh injury of a frontal collision dummy based on a certain type of vehicle[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(18):116—122.

- 曾庆勇,项忠珂,程文明等.基于某车型正面碰撞假大腿部伤害研究[J].机床与液压,2020,48(18):116—122.
- [3] Tang Hongbin, Yang Haiqing, Ma Zhiliang,et al.Sled Test for Knee Impact and Body Structure Design[J].Automobile Technology, 2012(5):13-16.  
唐洪斌,杨海庆,马志良,等.乘员膝部碰撞台车试验与车身结构设计[J].汽车技术,2012(5):13-16.
- [4] C-NCAP MANAGEMENT REGULATION (2024 EDITION) [S/OL].<https://www.c-ncap.org.cn>,2024.  
C-NCAP 管理规则 (2024 版) [S/OL].<https://www.c-ncap.org.cn>,2024.
- [5] Vehicle Occupant Safety Index Knee Mapping Test Protocol(2023 EDITION).<http://www.ciasi.org.cn>,2023.  
车内乘员安全指数乘员膝部保护试验规程(2023 版)[S/OL].<http://www.ciasi.org.cn>,2023.
- [6] Liu Shan,Fang Yue,Zhang Yajun ,et al.The optimization of knee inspection zone based on Knee Mapping[C].the eighteenth conference of automotive safety technology. 2015:522-527.  
刘珊,方锐,张亚军,等. 基于 Knee Mapping 的膝部碰撞区域改进[C].第十八届汽车安全技术学术会议. 2015:522-527.
- [7] Liushan.SIMULATION AND ANALYSIS OF THE KNEE INSPECTION AREA IMPACT TEST BASED ON Knee Mapping[D].Hebei University of Technology.  
刘珊.基于 Knee Mapping 的膝部碰撞区域碰撞试验仿真分析[D].河北工业大学.
- [8] Cao Xiaofeng, Liu Hongda, Chen Lin,et al.Research and Application of Knee Crash Test Equipment for Passenger Car.Automotive Engineer, 2023(9):39-44.  
曹啸峰,刘宏达,陈琳,等.乘用车膝部台架碰撞试验装置的研究与应用[J].汽车工程师, 2023(9):39-44.
- [9] Liu ZhenHai, Liu Songhai, Qiao Leilei,et al.Femur injury assessing and performance improving according to the Euro-NCAP frontal impacting tests[J].J Automotive Safety and Energy,2015, 6(2):7.  
刘珍海,刘松梅,乔磊磊,等.Euro-NCAP 大腿伤害评价及性能提升[J].汽车安全与节能学报, 2015, 6(2):7.
- [10] Li wei,Ye qin,Kang shengli,et al.Based On the 2021 C-NCAP of IP Five-star Knee Mapping Research[J].Auto Sci-tech, 2024(1):61-69.  
李威,叶勤,亢胜利,等.基于 2021 版 C-NCAP 仪表板五星膝碰研究[J].汽车科技, 2024(1):61-69.
- [11] Sun hang, Sun Zhendong.Research on Knee Displacement Measuring in Vehicle Crash Safety Test.[C].the 14<sup>th</sup> International Forum of Automotive Traffic Safety, 2017:139-145.  
孙航,孙振东.汽车碰撞试验乘员膝部位移测量方法研究[C].第十四届 INFATS 国际汽车交通安全学术会议, 2017:139-145.
- [12] Zhang Yaohui,Ju Chunxian,Yue Guohui.Injury Mechanism on Dummy Knee Sliding Displacement in Frontal Impact[J]. AUTO engineer,2014(4):30-33.  
张耀辉,鞠春贤,岳国辉,等. 正面碰撞中假人膝盖滑移量的伤害机理[J]. 汽车工程师,2014(4):30-33.
- [13] Sun H , Lou L , Liu Z , et al.Optimized Method for Knee Displacement Measurement in Vehicle Sled Crash Test[J].MATEC Web of Conferences, 2017, 100:03004.
- [14] Guo Fengjun,Sun Wenting,Duan Shangguo ,et al.Evaluation and Application of Occupant Knee Injury based on Euro NCAP Requirement[J].Shanghai Auto, 2017(4):4.  
郭凤骏,孙文婷,段尚国等.基于 Euro NCAP 要求的乘员膝部评价与应用[J].上海汽车, 2017(4):4.
- [15] USER MANUAL of Harmonized Hybrid III 95th Large Male Dummy[Z/OL].<https://www.humaneticsgroup.com>