

Study on Accelerator Pedal Dynamic Impact Test Based on Lower leg Injury

Zhang Tengting, Wang Dazhi, Feng Lingbing, Ding Haijian, Dong Qingzhan

SAIC Motor Technical Center, Shanghai, 201805

Email: zhangtengteng@saicmotor.com

Abstract: In the current process of frontal impact, how to effectively reduce the lower leg injury of the front occupants is a serious problem. When impact happens, accelerator pedal is an important component to contact legs of the driver, so this paper focuses on stiffness performance of the acceleration pedal during physical experiments. Whereas velocity is a key factor, three kinds of velocity were carried out to study. Research indicated that when the impact velocity was less than 2m/s, the integrity and the consistency of the accelerator pedal were better, while the maximum bearing capacity was less than 1000N. When the impact velocity was 2.5m/s, the consistency of the accelerator pedal was not stable, and it may has the risk of breaking. When the impact velocity was more than 3m/s, the accelerator pedal must be broken and the bearing capacity reached 1000N. These results will improve the understanding of the injury mechanism of occupant lower legs, and will help to study further relationships between the accelerator pedal and the dummy lower legs.

Keywords: lower leg injury; accelerator pedal; dynamic impact; stiffness

基于乘员小腿伤害的加速踏板冲击实验研究

张滕滕, 王大志, 冯玲兵, 丁海建, 董庆战

上海汽车集团股份有限公司技术中心, 上海, 中国, 201805

Email: zhangtengteng@saicmotor.com

摘 要: 目前, 正面碰撞过程中, 如何有效地降低前排驾乘人员的小腿伤害是亟待解决的问题。加速踏板是前排驾驶员小腿接触的重要组成部分, 对此本文重点研究通过试验模拟加速踏板在碰撞中的刚度性能, 并分别进行三种不同冲击速度的动态冲击试验。研究表明, 当冲击速度小于 2m/s 时, 加速踏板的完整性保持较好, 一致性较高, 最大承载力小于 1000N; 当冲击速度在 2.5m/s 时, 加速踏板的完整性表现不稳定, 有时断裂, 有时完整; 当冲击速度大于 3m/s 时, 加速踏板一定发生断裂, 断裂前承载力达到 1000N。此研究有助于加深理解小腿伤害的机理, 并利于深入研究加速踏板与假人小腿伤害之间的关系。

关键词: 小腿伤害; 加速踏板; 动态冲击; 刚度

1 引言

随着安全技术不断发展, 消费者越来越关心车辆的被动安全性能, 目前我国大多数车型已标配了正面安全气囊, 对改善和提高车辆内前排乘员头部和胸部的保护性能, 发挥了积极作用^[1]。然而, 在汽车正面碰撞性能开发试验中, 小腿的伤害却没有得到较好的控制, 有关统计数据表明, 在 C-NCAP 碰撞测试车型中, 在正面 100% 重叠刚性壁障碰撞试验中, 小腿得分为满分的还不足 1%, 而低于 1.4 分的则接近 50%; 在在正面 40% 重叠可变形壁障碰撞试验中, 小腿得分为满分的仅为 16%, 而低于 3.2 分的则接近 35%。在正面碰撞试验中, 小腿由于受 F_x 和 F_z 的作用力, 及乘员舱和踏板的侵入作用, 导致的 M_y 需要重点关注^[2]。由此可知, 小腿失分情况相当严重, 降低小腿伤害和 NCAP 中提高小腿得分迫在眉睫。在碰撞车辆开发试验中, 假人与车辆内部结构运动匹配的相互作用比较复杂, 这也导致了验证乘员小腿伤害的过程比较复杂^[3,4]。

孙振东等指出小腿上部的伤害指标要比小腿的下部指标大，右腿的伤害大于左腿的伤害。在小腿运动的过程中，碰撞产生的瞬时加速度作用在小腿踝关节上，形成高应力区，使踝关节产生过度运动，形成轴向力。而此轴向力沿踝关节和胫骨向上传递，引起小腿部位的损伤^[5]。有关研究结论表明，对脚跟部进行冲击时，当冲击速度小于 2m/s，可有效降低显著性伤害值上胫骨弯矩 M_y ，对工程应用以及提高下肢得分有一定的指导意义^[6]。因此，对于驾驶员小腿右腿的伤害，需要重点考虑加速踏板的运动形式和刚度。

本文以三个平台和多项目的加速踏板为研究对象，对其进行不同速度的动态冲击试验，以研究加速踏板的刚度，总结不同的动态速度的情况下，加速踏板的刚度性能，对于加速踏板的安全性能设计和降低小腿伤害有一定的指导意义，有助于后续研究小腿伤害的机理。

2 小腿伤害

2.1 小腿摆放

在碰撞试验前，C-NCAP 管理规则中^[7]，明确规定了小腿、脚与加速踏板的摆放位置关系，即驾驶员侧假人的右脚应放在未踩下的加速踏板上，处于地板表明上的脚后跟点应在踏板平面内，若脚不能放在加速踏板上，则应垂直于小腿放在适当位置，且沿踏板中心线方向尽量靠前，脚跟最后点搁在地板表面上。碰撞过程中，加速踏板与脚及小腿之间的运动形式和姿态，直接影响着小腿的伤害关键。

2.2 小腿伤害计算

由 C-NCAP 管理规则中^[7]，乘员侧假人的该部位得分通过测量假人相关指标而产生，而驾驶员侧假人的该部位得分还需在此分数基础上减去由于踏板变形所造成的罚分。

$$TI = \left| \frac{\sqrt{(M_x)^2 + (M_y)^2}}{225} \right| + \left| \frac{F_z}{35.9} \right| \quad (1)$$

式(1)中： M_x ——绕x轴的弯矩； M_y ——绕y轴的弯矩； F_z ——z向的轴向压缩力；

由小腿部位的评分规则及 TI 公式可知，在计算小腿得分时，需要关注的指标为假人小腿各个部位的 F_z 、 M_x 和 M_y 。

高性能限值：胫骨指数（TI） 0.4 小腿压缩力 2kN；低性能限值：胫骨指数（TI） 1.3 小腿压缩力 8kN；

只有综合分析各个部位数值，计算出对应的 F_z ，TI，才能计算出各个部位的对应得分，对比驾驶员假人及乘员假人小腿得分，然后取最小分值，才能得到最终的小腿得分。

速踏板与脚及小腿之间的运动形式和姿态，直接影响着小腿的伤害关键。

2.3 胫骨指数伤害分析

由公式（1）可知，影响因素主要有三个 M_x 、 M_y 和 F_z ，而 F_z 是乘员小腿外界最直接作用的力。有关文献指出^[8,9]，在正面碰撞过程中，产生乘员小腿脚部伤害大致经历以下阶段，碰撞发生后，由于车辆惯性作用，带动假人骨盆和下肢继续向前运动，由于加速踏板的作用力较小，在 2~5ms 时间内将加速踏板踩到底，此时脚部与踏板会发生相对运动；由于发动机等部件的侵入，造车防火墙及安装踏板总成处对乘员舱造车侵入，以及前地板可能会发生变形，此时会导致假人脚部受力方向和受力作用点会发生变化；受到乘员舱防火墙局部变形、加速踏板的反作用力和踏板的变形情况会影响脚部的运动姿态，严重情况可能会出现崴脚现象。

因此，影响驾驶员右腿胫骨指数及压缩力的因素是由于约束系统的作用约束的乘员髋部运动带动的小腿姿态、脚部运动姿态、踏板和前地板变形等部件与脚部之间相互作用力和运动姿态。

3 研究方法

为了研究影响小腿伤害的约束部件因素，根据公式（1）中的参数，且参考相关文献^[10,11]，对影响驾驶员右腿 TI 的压缩力进行分析和研究，在此本文仅对加速踏板的刚度和断裂情况进行动态冲击试验方法研究。

3.1 加速踏板的冲击器

除了一些众所周知的英文缩写，如 CPU，所有的英文缩写在文中第一次出现时都应该给出其全称。文章标

题中尽量避免使用生僻的英文缩写。为了保证试验的可控性及可重复性，加速踏板的本身变形所带来的影响，此处只有加速踏板的几何尺寸和刚度作为变量因素。通过初步仿真及分析，针对不同质量的冲击器和冲击器的加速度对比分析，最终将质量确定为 25.7kg，初始速度为 2.5m/s，并根据冲击试验台架和不同项目中的加速踏板安装位置关系，最终确定其安装底面形式为垂直面，如图 1 所示。



Figure 1. Impactor of accelerator pedal
图 1. 加速踏板的冲击器

3.2 加速踏板的工装确定

冲击器导轨由低摩擦导轨、加强板、踏板冲击块组成。导轨连接板为 T 字型结构，结构稳定可靠，重复性较强，同时能够保证试验的重复性和速度的一致性的要求。通过试验室冲击器的发射装置有效控制冲击速度，精确到 $\pm 0.05\text{m/s}$ 。冲击器的低摩擦和强刚度能够保证每次试验的冲击位置相同，冲击器模拟脚部与加速踏板之间的相互作用力和碰撞冲击力，试验搭建加速踏板的动态冲击试验工装如图 2 所示。



Figure 2. Clamp of accelerator pedal impact test
图 2. 加速踏板的冲击试验工装

3.3 动态冲击的试验矩阵

用刚性冲击器对多个不同平台多个项目的加速踏板进行 3 种不同速度的刚性冲击试验，以建立并验证全新的动态冲击试验方法，试验矩阵如下表 1 所示。

表 1. 动态冲击试验矩阵

Table 1. Matrix of Dynamic impact test

序号	项目	速度(m/s)	质量(kg)	次数
1	A	2.0	25.7	2
2	B	2.5	25.7	2
3	C	3.0	25.7	2

4 动态冲击仿真与试验分析

4.1 仿真分析模型

通过 MADYMO 软件建立加速踏板动态冲击的过程, 将踏板冲击器设定为不变形的刚体, 质量为 25.7kg; 踏板与工装的连接采用固定连接方式, 根据踏板的运动关系, 将踏板根部旋转连接处设定旋转铰链, 根据加速踏板的几何形状和尺寸, 建立椭球体和相互之间的约束特性, 以模拟不同部位断裂属性, 加速踏板动态冲击仿真分析模型如图 3 所示。

4.2 仿真模型对标

通过在踏板冲击器上安装加速度传感器, 得到其运动过程的动态过程曲线, 加速踏板的动态冲击加速速度与试验结果对标曲线如图 4 所示, 其中冲击器的质量为 25.7kg, 冲击速度为 2 m/s。

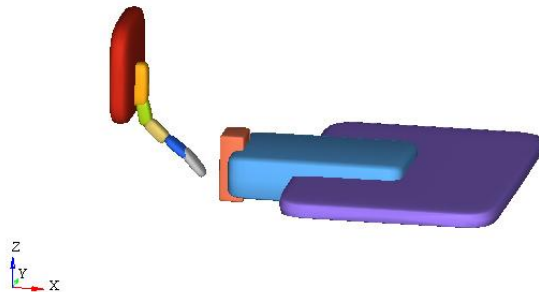


Figure 3. Simulation model of pedal dynamic impact

图 3. 踏板动态冲击仿真模型

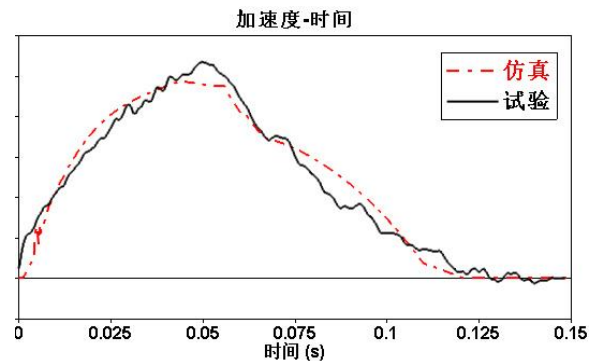


Figure 4. Curve: correlation of test and simulation

图 4. 仿真与试验对标曲线

加速踏板的动态冲击过程如图 5 所示, 在 0ms 是, 冲击器与加速踏板的最下端接触, 因踏板的行程为 50mm, 在此运动过程中, 作用在此阶段力比较小约为 25N; 当加速踏板的行程到底后, 踏板自身刚度的反作用力开始起作用, 随着冲击器的不断冲击运动, 反作用力较大, 当力达到 1000N 作用时, 冲击器的行程约 80mm 时, 加速踏板在根部发生断裂, 此时反作用力急剧下降。

从仿真分析的动画与曲线可以看出, 通过仿真模型参数进行调试, 仿真动画结果与试验结果基本一致, 对标加速度时间历程曲线吻合度较高, 说明了模型参数的正确性, 能够较好的反应实际试验的结果, 仿真模型是可靠的, 即该加速踏板的模型和该动态冲击的方法能够用于测定和评估加速踏板的刚度特性。

4.3 结果分析

根据加速踏板动态冲击的试验矩阵表 X, 并根据不同平台和不同项目之间的不同, 采用质量为 25.7kg 冲击器的, 进行三种不同速度能量的动态冲击试验, 汇总试验结果如表 2 所示。

表 2 中最大力代表在整个试验过程中, 通过刚性冲击器的加速度求解力的最大值, 当加速踏板在试验中发

生断裂情况，刚性有可能撞击到安装固定的刚性工装，因此在分析时，需排除试验中加速度异常的曲线，将加速度时间历程曲线积分处理后，得到加速踏板在冲击过程中的刚度曲线，并将不同项目的加速踏板的刚度曲线叠加，如图 6 所示。从动画可知，加速踏板自由行程结束到加速踏板断裂所需要的时间约为 40~50ms。从不同项目加速踏板的刚度可知，除去加速踏板的自由工作行程为 50mm，加速踏板在与车身地板接触前，加速踏板的所需要的断裂行程约 75mm，此时不同项目的踏板断裂前所承载的最大力约在 1kN 至 1.4kN 之间的范围内。

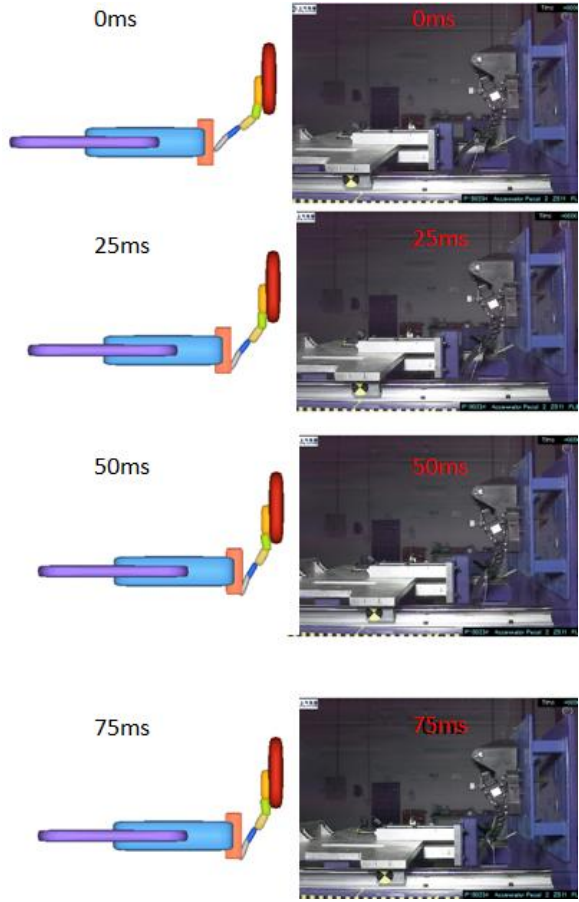


Figure 5. Curve: system result of standard experiment
图 5. 标准试验系统结果曲线

表 1. 动态冲击试验结果数据
Table 1. Results of dynamic impact test

序号	项目	速度 (m/s)	最大力 (N)	结果
1	A	2.18	1375	保持完整
2	A	2.5	5581	断裂
3	A	3.02	7572	断裂
4	B	2.0	908	保持完整
5	B	2.54	2847	局部断裂
6	B	3.02	5253	断裂
7	C	2.16	1006	保持完整
8	C	2.5	2475	断裂
9	C	3.03	8352	断裂

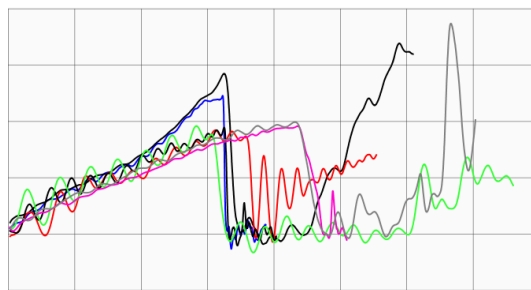


Figure6. Curve: stiffness of accelerator pedal impact

图 6. 加速踏板刚性冲击的动态曲线

由表 2 中数据及试验动画录像分析总结知, 加速踏板最小断裂力为不小于 1000N; 加速踏板在大于 3m/s, 115.7J 的动能冲击下, 会断裂; 加速踏板在小于 2m/s, 41.7J 的动能冲击下, 不会断裂。

5 结论

目前, 如何有效地降低前排驾乘人员的小腿伤害是亟待解决的问题。加速踏板是前排驾驶员在 C-NCAP 碰撞测试中小腿接触的重要组成部件, 在设计过程中, 需要对其重点研究和分析。本文重点研究模拟加速踏板在碰撞中的刚度性能, 进行了三种不同冲击速度的动态冲击试验。研究表明, 当冲击速度小于 2m/s 时, 加速踏板的完整性保持较好, 一致性较高, 最大承载力小于 1000N; 当冲击速度在 2.5m/s 时, 加速踏板的完整性表现不稳定, 有时断裂, 有时保持完整; 当冲击速度大于 3m/s 时, 加速踏板一定发生断裂, 断裂前承载力达到 1000N。此试验方法矩阵和动态冲击能量为后续加速踏板的刚度设计提供借鉴和参考。

因此, 在设计加速踏板时, 需考虑其在适当时刻和位置设计其断裂, 避免造成因踏板导致的小腿轴向力过大, 造成小腿伤害 TI 增加。加速踏板的刚度与小腿伤害是否有直接联系, 同时加速踏板的侵入量和运动形态对小腿的伤害是否有强相关性, 需在后续继续进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 钟志华, 张维刚, 曹立波, 等. 汽车碰撞安全技术[M]. 第一版, 机械工业出版社, 2003, 55-139
- [2] 朱兰芹, 张滕滕, 王大志, 等. 正面碰撞中假人小腿伤害特点的分析研究[C]//第十九届汽车安全技术学术会议, 上海, 2016
- [3] Kitagawa Y., H. Ichikawa, A. I. King, R. S. Levine, A Severe Ankle and Foot Injury in Frontal Crashes and its Mechanism, Proceedings of the 42nd Stapp Car Crash Conference, [C]. SAE Paper 983145.
- [4] Rundell S., A. Guiang, B. Weaver, et al., Characterization of Occupant Lower Lower Extremity Behavior During Moderate to High Speed Rear Impacts [C]. SAE Paper 2013-01-0222.
- [5] 孙振东, 朱海涛, 刘玉光. 正面碰撞试验中乘员小腿伤害特性研究[C]//第五届国际汽车交通安全学术会议, 长沙, 中国, 2007: 180-185.
- [6] 颜强, 张滕滕, 丁海建, 等. 前排乘员下肢小腿伤害的实验研究[C]//第十三届国际汽车交通安全学术会议, 杭州, 2016
- [7] 《C-NCAP 管理规则 2015 版》, 中国汽车技术研究中心, 2015, 2.1, 20-51
- [8] Yoganandan N., F. A. Pinter, M. Boynton, et al., Dynamic Axial Tolerance of the Human Foot-Ankle Complex [C]. SAE Paper 962426
- [9] 王锡铭, 木飞, 周家伟, 等. 某车型油门踏板断裂位置对小腿胫骨指数影响的研究[C]//第十八届汽车安全技术学术会议, 苏州, 2015
- [10] Crandall, J.R, C.R, Bass, G.S., Kloop, et al., Sled Tests With Toepan Intrusion Using Post Mortem Human Surrogates and the Hybrid III Dummy, Proceedings of the International Research Council on the Biomechanics of Impact, Dublin, Ireland, 1999, pp. 339-352.
- [11] Rudd R.W., J.R.Crandall, C.R. Bass, et al., Lower Extremity and Brake Pedal Interaction in Frontal collision Sled Tests[C]. SAE Paper 980359