

# Simulation Analysis of Pedestrian Protection Based on FLEX-PLI and aPLI Model

Mengqi LI<sup>1</sup>, Lujiang LI<sup>1</sup>, Xiaobing BU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CATARC Automotive Test Center (Tianjin)CO.,Ltd, Tianjin, China

Email: limengqi@catarc.ac.cn

**Abstract:** Firstly, this paper introduces the development of pedestrian protection regulations and standards and the changes of pedestrian protection leg impactors. In 2021 C-NCAP and 2022 EURO-NCAP, aPLI will be used to replace the original FLEXPLI. Taking an SUV for example, the accuracy of FLEX-PLI simulation model is verified by combining simulation analysis and experiment. Then aPLI model is simulated and analyzed. The simulation results show that tibial bending moment of aPLI leg is 1.2~1.5 times higher than FLEX-PLI, MCL and PCL is 2.1~2.3 times higher than FLEX-PLI, ACL elongation is 1.2 times higher than FLEX-PLI. All injury indexes of aPLI are greatly improved compared with FLEX-PLI. The aPLI also puts forward higher requirements for vehicle modeling design, general arrangement and structural optimization design.

**Keywords:** Pedestrian Protection; FLEX-PLI; aPLI

## 基于 FLEX-PLI 和 aPLI 腿型的行人保护仿真分析

李梦琦<sup>1</sup>, 李璐江<sup>1</sup>, 卜晓兵<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中汽研汽车检验中心(天津)有限公司, 天津, 中国, 300300

Email: limengqi@catarc.ac.cn

**摘要:** 本文首先介绍了行人保护法规标准的发展及行人保护腿部冲击器的变化, 在 2021 版 C-NCAP 和 2022 版 EURO-NCAP 中, 都将采用带有上体质量的腿部冲击器 aPLI 替代原先的柔性腿。以某紧凑型 SUV 车型为例, 通过仿真分析结合试验对标的方法, 验证了 FLEX-PLI 腿型仿真模型的准确性, 再对 aPLI 腿型进行仿真分析, 仿真结果显示, aPLI 腿型的胫骨弯矩较 FLEX-PLI 增加 1.2~1.5 倍, MCL 和 PCL 伸长量较 FLEX-PLI 增加 2.1~2.3 倍, ACL 伸长量较 FLEX-PLI 增加 1.2 倍。aPLI 腿型的各项伤害指标较 FLEX-PLI 均有大幅提高, 新腿型的评价必将对车辆的造型设计、总布置和结构优化设计提出更高的要求。

**关键词:** 行人保护; FLEX-PLI; aPLI;

## 1 引言

根据我国车辆事故深度调查体系(CI-DAS)数据统计显示, 2011年至2016年乘用车与弱势道路参与者的碰撞事故及其伤亡人数占比较高, 其中行人交通事故数占比为20%, 死亡人数占比高达30%<sup>[1]</sup>。在车辆与行人的交通事故中, 行人头部与下肢是最容易受到伤害的部位, 其中40%的事故属于下肢损伤, 并且由于下肢损伤通常较为严重, 极易造成腿部的长期残疾<sup>[2-4]</sup>。因此, 大多数国家都将下肢损伤纳入行人保护考核项, 并且车辆与行人碰撞中的腿部保护已成为研究热点。

## 2 行人保护法规发展

上世纪60年代开始, 美国、欧洲、日本等国家和地区先后开展了行人保护方面的研究<sup>[5-8]</sup>。经过数十年的研究, 2002年EURO-NCAP和A-NCAP先后将行人保护纳入新车评价规程<sup>[9]</sup>, 2003年, 欧盟委员会通过了行人保护法规2003/102/EC, 同年J-NCAP增加了行人保护评价内容<sup>[10]</sup>, 2010年K-NCAP增加了行人保护评价内容。

我国于2009年10月发布推荐性国家标准GB/T 24550-2009《汽车对行人的碰撞保护》, 并在2018年将行

人保护纳入 C-NCAP 新车评价规程<sup>[11]</sup>。虽然我国在行人保护方面的研究起步相对较晚，但是近年来发展迅猛，在 2021 版 C-NCAP 中对行人保护评价做出重大调整，提出了更加符合中国道路交通事故现状的两轮车碰撞测评方法，在腿部测评方面，采用带有上体质量块的 aPLI 新腿型替代原先的 FLEX-PLI 腿型，可以更加准确的反应人体腿部在车辆保险杠撞击时的伤害情况，并且新腿型的实施时间比 EURO-NCAP 更早。此外，2018 年 5 月，工信部发布了公开征集对《汽车对行人的碰撞保护》强制性国家标准计划项目意见。

### 3 行人保护腿部评价方法

目前，行人保护法规和新车评价规程均要求行人保护试验采用模块化试验方法，即头部和腿部分别使用相应冲击器与车辆前端发生碰撞<sup>[12]</sup>。腿部冲击器最早使用英国 TRL (Transport Research Laboratory) 刚性冲击模型<sup>[13]</sup>，该模型在胫骨和股骨位置采用刚性材料，在碰撞过程中胫骨和股骨无法变形，只有膝关节相对位移和韧带弯曲，其在生物仿真性方面存在一定局限性。此后，TRL 被柔性冲击模型 (FLEX-PLI) 取而代之，FLEX-PLI 其构成更符合人体膝关节和小腿的仿生结构，也是现行的行人保护评价规程所要求使用的冲击模型。虽然 FLEX-PLI 具有更好仿生结构，但是二款腿型均没有考虑人体上肢质量对下肢运动的影响。

2021 版 C-NCAP 和 2022 版 EURO-NCAP 都将使用带有上体质量的腿部冲击器 aPLI (Advanced Pedestrian Legform Impactor) 替代 FLEX-PLI。根据日本汽车研究所研究显示，新腿型可以更好模拟碰撞中上肢质量的惯性作用对腿部运动姿态的影响<sup>[14-15]</sup>，如图 1 所示。

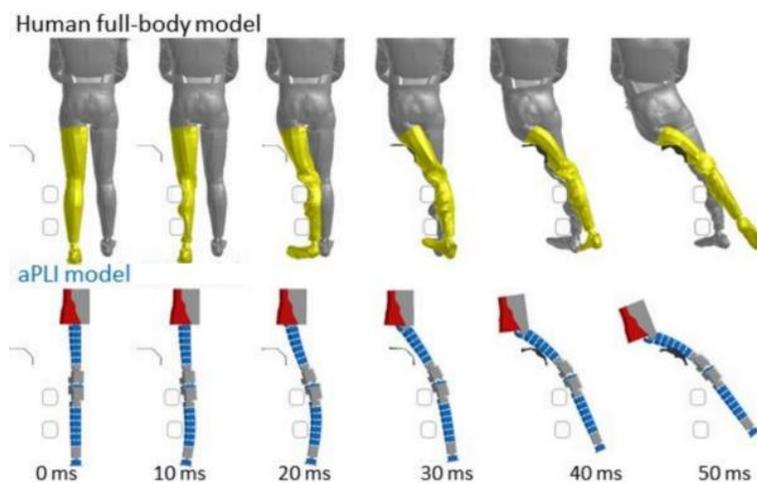


Figure 1. Comparison of Human Full-Body Model and aPLI Collision Attitude

图 1. 人体模型与 aPLI 腿型碰撞姿态对比

## 4 FLEX-PLI 与 aPLI 仿真分析

### 4.1 有限元模型搭建

本文以某 SUV 车型开发项目为例，建立了该车的有限元模型，按照实车 Bom 表设置各零件的材料和厚度，通过焊接、螺栓、铰链等方式建立各部件之间的连接关系，截取车辆 B 柱之前部分进行行人保护腿部仿真分析。根据 2018 版 C-NCAP 评价规程要求，采用 FLEX-PLI 腿部冲击器以 40Km/h 撞击车辆前端，腿部地面高度为 75mm，如图 2 所示。

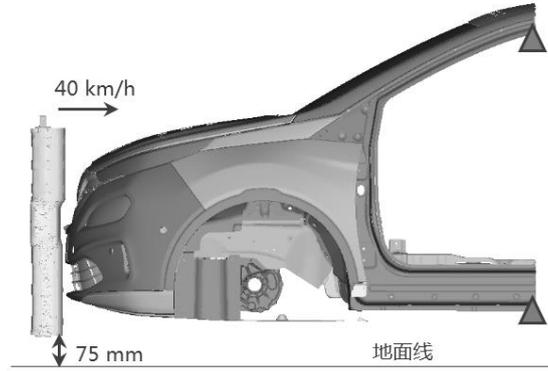


Figure 2. FLEX-PLI simulation model

图 2. FLEX-PLI 仿真分析模型

#### 4.2 FLEX-PLI 试验对标分析

该车型以 2018 版 C-NCAP 五星为开发目标，车辆前端外造型相对平齐，防撞横梁与前保险杠蒙皮之间预留了足够空间，下支撑采用金属管梁结构，对应胫骨弯矩 T3 位置，发动机罩前缘位置相对靠后。根据多轮仿真优化分析结合试验验证，腿部各评价指标均满足 C-NCAP 高性能值要求，FLEX-PLI 腿型与车辆前保碰撞过程中，腿部运动姿态如图 3 所示。

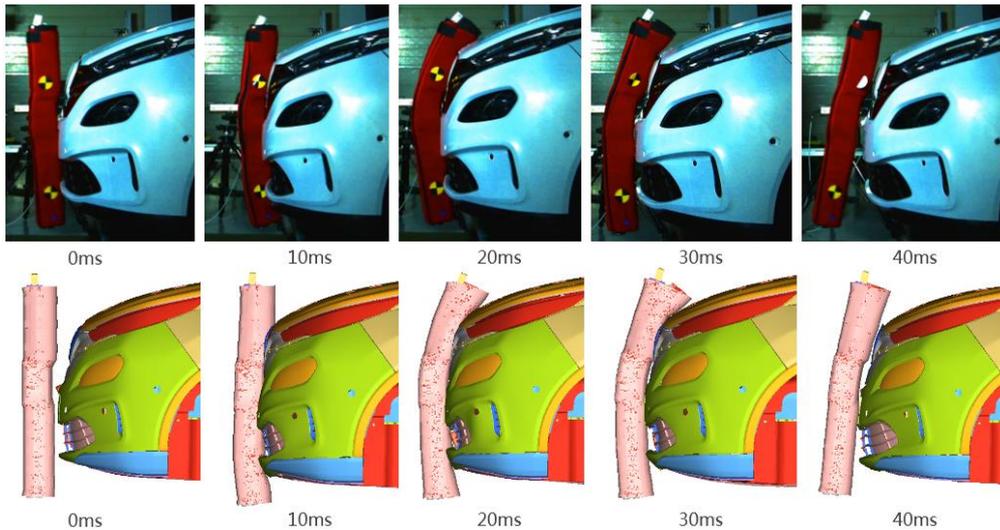


Figure 3. FLEX-PLI experiment and simulation animation comparison

图 3. FLEX-PLI 试验与仿真动画对比

从碰撞时序图可以看出，冲击过程中 FLEX-PLI 与车辆前保中下部最先接触，在 20ms 左右时，FLEX-PLI 腿型挤压前保险杠，此时小腿横梁起到了较好支撑作用，使腿型下部未发生明显弯曲，在 40ms 左右时，腿型开始脱离车体向后反弹。由于前端结构刚度和支撑点位置关系匹配较好，FLEX-PLI 胫骨和膝部在碰撞中基本保持竖直状态，无明显的折弯变形，试验与仿真结果见表 1。

Table 1. FLEX-PLI Simulation and Test Results at L0 Position

表 1. L0 位置腿部仿真与试验结果

评价项	高性能值	试验结果	仿真结果
T1/Nm	<282	121.3	138.9
T2/Nm	<282	119.9	116.8
T3/Nm	<282	159.8	171.0
T4/Nm	<282	96.4	119.1
ACL/mm	<10	4.4	4.0
PCL/mm	<10	4.3	3.9
MCL/mm	<19	12.8	12.3

从以上结果可以看出，胫骨弯矩和膝部韧带伸长量均满足 C-NCAP 高性能值要求且有一定余量，仿真与试验结果基本一致，其中对应小腿横梁处的胫骨弯矩（T3）最大，试验结果为 159.8Nm，前、后交叉韧带（ACL、PCL）伸长量分别为 4.4mm 和 4.3mm，内侧副韧带（MCL）伸长量为 12.8mm。仿真与试验曲线对比如图 4 所示，仿真和试验各项伤害曲线变化趋势基本相同，伤害值误差均小于 10%，说明仿真模型的精确度较高，可以较为准确的模拟柔性腿与车辆的撞击过程，可用于后续的仿真分析。

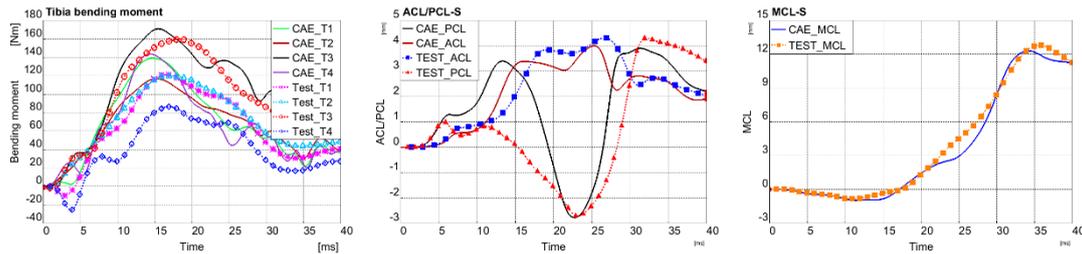


Figure 4. Comparison of FLEX-PLI Test and Simulation Injury Curves

图 4. FLEX-PLI 试验与仿真伤害曲线对比

### 4.3 aPLI 腿型仿真分析

aPLI 腿部冲击器主要由上体质量块、股骨、膝部、韧带、胫骨和皮肤等部件构成，如图 5 所示。腿型总长度约 1096mm，总质量约为 25Kg，其中上体质量约为 11.8Kg。此外，考虑了脚踝对胫骨弯矩的影响，aPLI 腿型的胫骨结构进行了优化设计，腿部离地间隙降低为 25mm。



Figure 5. aPLI Model Structure

图 5. aPLI 腿型结构示意图

以前保险杠中部 L0 位置为例，腿部冲击器替换为 aPLI 有限元模型，车辆使用对标后的仿真模型，设置腿部冲击器速度为 40Km/h，更新腿型与车辆的接触卡片和控制卡片，求解器采用 Dyna R9.3 版本，重新计算后读取结果，模型能量和质量增加曲线均无异常，截取仿真动画与 FLEX-PLI 进行对比，如图 6 所示。

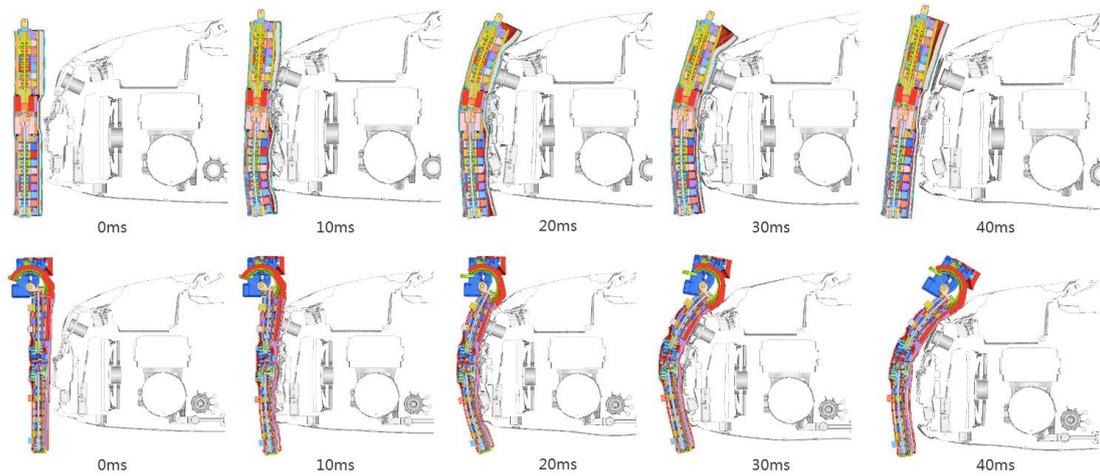


Figure 6. Comparison of collision postures between aPLI and FLEX-PLI

图 6. aPLI 与 FLEX-PLI 碰撞运动姿态对比

由图 6 可以看出，在 10ms 左右时，aPLI 与车辆前保接触，上体质量块在惯性作用下沿机罩上部发生弯曲变形，在 30ms 左右时，上体质量块撞击到机罩产生塑性变形，膝盖部分压缩前保至防撞横梁，胫骨部分接触到小腿横梁后发生明显弯曲，腿型整体呈现“C”字型折弯，非常不利于腿部保护。此外，aPLI 腿型由于质量增加，初始碰撞能量更大，导致腿部与车辆接触时间更长，回弹时刻更晚，在仿真中需要延长计算时间。aPLI 和 FLEX-PLI 腿型仿真结果对比见表 2。

Table 2. FLEX-PLI Simulation and Test Results

表 2. FLEX-PLI 和 aPLI 仿真结果

评价项	L0 位置			L3 位置			L5 位置		
	FLEX-PLI	aPLI	转换系数 aPLI/ FLEX-PLI	FLEX-PLI	aPLI	转换系数 aPLI/ FLEX-PLI	FLEX-PLI	aPLI	转换系数 aPLI/ FLEX-PLI
T1/Nm	138.9	205.1	1.48	101.5	157.4	1.55	137.1	172.3	1.40
T2/Nm	116.8	168.7	1.44	98.8	149.8	1.52	109.1	149.7	1.37
T3/Nm	171.0	242.9	1.42	159.6	238.0	1.49	122.5	165.3	1.35
T4/Nm	119.1	144.6	1.21	116.9	149.0	1.27	98.4	113.5	1.15
ACL/mm	4.0	4.8	1.20	3	3.8	1.26	6.4	7.3	1.14
PCL/mm	3.9	9.0	2.31	3.8	8.8	2.31	5.1	12.1	2.36
MCL/mm	12.3	27.8	2.26	11.1	26.3	2.37	13.7	29.4	2.15

由表 2 可以看出，在不同试验点位 aPLI 腿型的胫骨弯矩较 FLEX-PLI 腿型均有明显增加，转换系数（aPLI/FLEX-PLI）为 1.2~1.5 左右，其中胫骨弯矩最大处位于 L0 试验点位，该试验点位对应的防撞横梁下端安装有 ACC 模块，结构较硬，导致碰撞接触后弯矩急剧升高。由于 aPLI 碰撞中发生“C”字型弯曲，导致膝部韧带伸长量大幅增加，MCL 均在 25mm 以上，转换系数（aPLI/FLEX-PLI）为 2.1~2.3 左右，PCL 增长趋势相同，转换系数（aPLI/FLEX-PLI）为 2.3 左右，ACL 结构布置靠前，伸长量相对较小，较 FLEX-PLI 结果稍有增长，转

换系数 (aPLI/FLEX-PLI) 为 1.2 左右, 其中韧带伸长量最大处均位于 L5 试验点位, 该点位处于前保造型收窄位置, 防撞横梁与前保险杠之间吸能空间相对较小, 导致腿部碰撞过程中折弯更加严重。

## 5 结论

本文介绍了行人保护法规发展现状以及 2021 版 C-NCAP 最新腿部冲击器, 并以某 SUV 车型为例, 该车型以 2018 版 C-NCAP 五星目标设计开发, 通过仿真优化和试验验证, FLEX-PLI 腿型各指标均满足目标要求且有一定余量, 使用对标后的车辆模型进行 aPLI 仿真分析, 仿真结果显示, aPLI 腿型的胫骨弯矩较 FLEX-PLI 增加 1.2~1.5 倍, MCL 和 PCL 伸长量较 FLEX-PLI 增加 2.1~2.3 倍, ACL 伸长量较 FLEX-PLI 增加 1.2 倍。面对日益严苛的行人保护新车评价规程, 主机厂在车型开发过程中, 应对车辆的造型设计、总布置和结构优化设计提出更高的要求。

## 参考文献 (References)

- [49] 石亚周, 周华, 李平飞, 等. 基于车辆事故深度调查的侧碰事故特征分析[J]. 汽车实用技术, 2018, No.264(9):147-150.
- [50] 李玉华. 车辆与行人碰撞中行人下肢损伤防护技术研究[D]. 湖南大学, 2011.
- [51] 王丙雨. 基于真实行人交通事故的人体下肢损伤生物力学有限元分析研究[D]. 2016.
- [52] 王丙雨, 杨济匡, 王方. 车辆与行人碰撞事故中下肢损伤风险研究[J]. 振动与冲击, 2016(23).
- [53] 虞敬文. 基于欧洲 Euro NCAP 的行人保护技术展望[J]. 汽车实用技术, 2019, 287(8):147-151.
- [54] 张永春, 尚勇, 覃祯员. 某轻型客车行人头型碰撞保护研究[J]. 客车技术与研究, 2019, 41(1):7-10.
- [55] 张新宇, 刘彦君, 吕鑫. 基于 NCAP 的不同国家行人保护评价体系相关性研究[J]. 北京汽车, 2017(2):22-27.
- [56] 邓高攀. 基于行人保护的正面碰撞仿真分析研究[J]. 时代汽车, 2019, 305(02):22-24.
- [57] 岳国辉, 蒋斌庆, 孙晴, 等. 基于 NCAP 及法规的行人保护大腿部评价标准解读[J]. 汽车工程师, 2017(3):41-45.
- [58] 韩海英, 李博. 基于 Euro NCAP 8.0 行人上腿部评价规程的车辆前端结构设计与优化[J]. 计算机辅助工程, 2017, 26(1):26-31.
- [59] 李子云, 李峥, 李涛, 等. 基于行人头部碰撞保护的发动机罩结构设计[J]. 汽车工程师, 2017(8):27-29.
- [60] 刘莹, 杨旭, 乔鑫. 发动机舱盖的多学科设计优化方法[J]. 汽车安全与节能学报, 2018, 9(4):102-108.
- [61] Kimber R. TRL (Transport Research Laboratory) – Creating the Future of Transport[J]. Iatss Research, 2005, 29(2):78-80.
- [62] Isshiki T, Antona-Makoshi J, Konosu A, et al. Optimal Specifications for the Advanced Pedestrian Legform Impactor[J]. Stapp Car Crash Journal, 2017, 61:373.
- [63] Fuhao M O, Arnoux P J, Kong C, et al. INVESTIGATION ON THE KNEE STIFFNESS UNDER THE LATERAL IMPACT FOR THE DESIGN OF PEDESTRIAN LEGFORM IMPACTOR[J]. Journal of Mechanics in Medicine & Biology, 2015, 15(04):1749-.