

Comparative Analysis of the Biological Simulation of Pedestrian FLEX-PLI and TRL-LFI

Wang Kun, Li Haibin, Wang Yang

China Automobile Technology & Research Center, Tianjin, China, 300300

E-mail: wangkun@catarc.ac.cn, lihaibin@catarc.ac.cn, wangyang@catarc.ac.cn

Abstract: At present, the TRL legform impactor and FLEX legform impactor are widely accepted by pedestrian protection test standards to evaluate pedestrian lower leg protection performance. However, the performance of TRL legform is questioned because it cannot simulate bending of leg bones. In this paper, the structure and characteristic of FLEX legform impactor and TRL legform impactor are analyzed; the mechanics tests are conducted, the biological simulation performance are compared based on the research achievements of corpse tests achieved by previous researchers. Foreground of application of FLEX legform impactor is put forward.

Keywords: vehicle, safety, pedestrian protection, FLEX legform, biological simulation

行人腿型冲击器 FLEX-PLI 与 TRL-LFI 生物仿真性对比分析

王坤, 李海斌, 王阳

中国汽车技术研究中心, 天津, 中国, 300162

E-mail: wangkun@catarc.ac.cn, lihaibin@catarc.ac.cn, wangyang@catarc.ac.cn

摘要: 当前, 行人保护试验标准普遍采用 TRL 腿型冲击器和 FLEX 腿型冲击器评价车辆对行人下腿的碰撞保护性能, 但由于无法模拟腿骨的弯曲, TRL 腿型冲击器的性能受到质疑。本文分析了两种冲击器结构和特性, 对 TRL 腿型冲击器和 FLEX 腿型冲击器进行力学特性试验, 得到其力学响应, 并基于前人尸体试验的研究成果, 对比两种冲击器的生物仿真性。指出 FLEX 腿型冲击器在行人保护测试方面的应用前景。

关键词: 汽车, 安全, 行人保护, FLEX 腿型, 生物仿真性

1 引言

2003 年, 欧盟率先将行人碰撞保护写入法规, 即 2003/102 号指令, 该指令所采用的试验方法基于 EEVC (the European Experimental Vehicles Committee, 欧洲试验车辆委员会) 提出的试验议案, 采用了 TRL 公司生产的具有可变性膝部韧带关节的 TRL-LFI (TRL Leg Form Impactor, TRL 腿型冲击器) 作为行人下腿冲击器, 由于其采用了刚性管柱模拟人体腿部骨骼, 也被称为刚性腿型冲击器。2002 年, JARI 和 JAMA 开始共同研究与人体生物力学特性更为接近的柔性腿型冲击器 (FLEX-PLI, FLEX Pedestrian Legform Impactor), 经多次讨论与改进, FLEX-PLI 最终定型。2013 年开始, 日本法规和 JNCAP 均采用了 FLEX-PLI 作为行人腿型冲击器。EuroNCAP 行人保碰撞护评价也于 2014 年起使用 FLEX-PLI 替代 TRL-LFI 作为行人腿型冲击器。同时, 行人碰撞保护全球法规、ECE 标准以及美国联邦机动车法规均在讨论将 FLEX-PLI 列入实施计划, 并逐步取代 TRL-LFI。

我国汽车生产商在行人碰撞保护方面的研究落后于西方国家, 车辆行人保护设计也处于起步阶段, 行人腿部保护也多针对 TRL-LFI 进行设计。经验表明, 使用 TRL-LFI 获得较高评价的车辆, 不能确保在 FLEX-PLI 试

验中获得高分。为此，需要了解两种冲击器之间的差异，并对车辆设计方法进行有针对性的改进，才能适应行人保护法规的发展趋势。

2 行人腿部结构及伤害机理

行人腿部结构中，股骨、胫骨和膝部是最容易受伤的重要部位。股骨和胫骨是下肢支撑结构的主要构成，而膝关节内部结构复杂，多条韧带交织于关节腔内，连接骨骼和肌肉，上述部位功能的丧失会严重影响人的站立和行走功能。图 1 所示为膝关节的主要结构示意图，前十字韧带、后十字韧带、内侧副韧带和外侧副韧带是膝部主要的韧带，也是较易受伤的膝关节软组织。

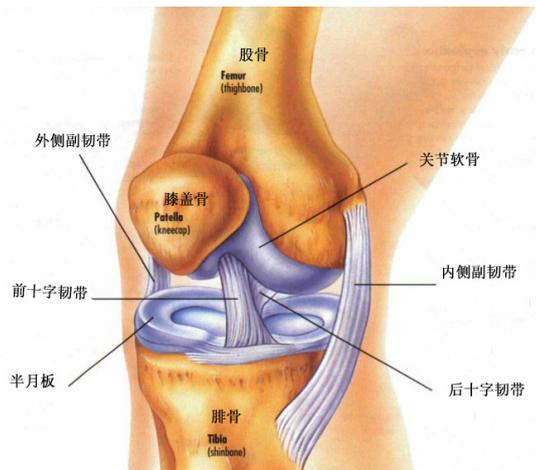


Figure1. structure of knee

图 1 膝关节结构示意图

图 1 膝关节结构示意图

行人碰撞事故中，碰撞产生的力作用在皮肤、肌肉、韧带、骨骼等部位。一旦相应部位的受力超过限值，就会造成骨折、韧带断裂、肌肉损伤等伤害。

股骨和胫骨骨折的原因是碰撞产生的弯矩导致腿骨所受应力超出其强度极限。因此，行人碰撞器需充分考虑腿部的弯曲变形，并且能够测量碰撞过程中腿部的弯曲应力或所受到的弯矩，才能更为有效地评价行人腿部的受伤程度。

碰撞事故中，行人上下腿先后接触车辆，从而导致膝关节受到较大的剪切作用力，进而拉伸韧带；另外，行人与车辆发生正面碰撞后，膝关节的弯曲方向与其自由运动方向相反，导致韧带承受巨大的拉力。当韧带的拉伸应力超过其强度时就会导致韧带断裂。因此，对行人碰撞器的膝部应有特殊设计，以测定碰撞过程中，膝关节的弯曲角度、剪切位移，进而依据生物力学特性，评价行人膝部的受伤程度。

3 FLEX-PLI 与 TRL-LFI 结构对比

行人腿型冲击器的性能直接影响测试结果的有效性和可重复性。为保证这一点，需要对人体腿部结构进行模块划分，依照每个模块的生物力学特性来设计冲击器。FLEX-PLI 与 TRL-LFI 均由大腿模块、膝部模块和小腿模块构成，但设计方式上 FLEX-PLI 整体采用了可变性的弹性体而 TRL-LFI 则采用了部分可变形的刚性体。图 2 所示两种腿型冲击器与人体腿部结构的对比。可见，FLEX-PLI 具有更多的柔性可变形关节，且具有更多的骨骼测量通道和膝部韧带测量通道。

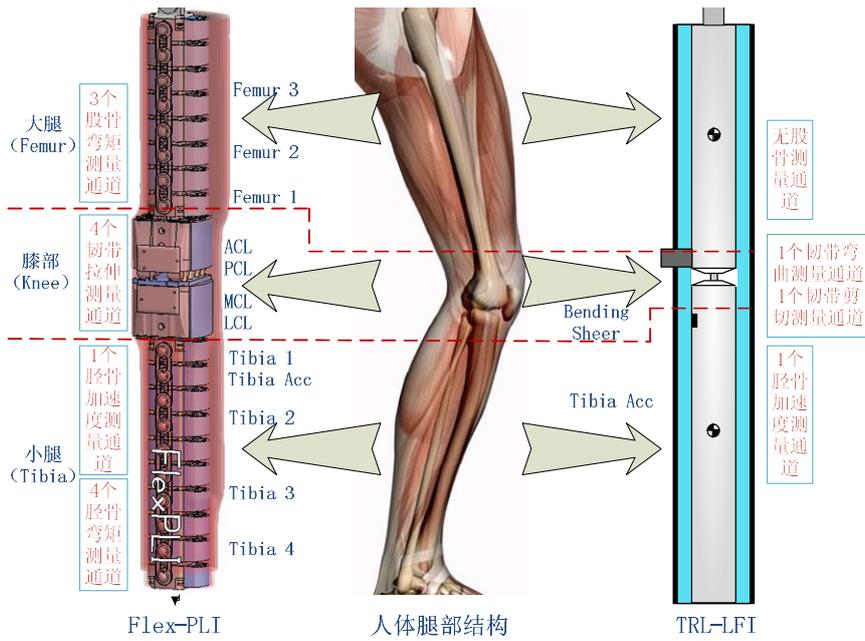


Figure 2. Structure of FLEX-PLI & TRL-LFI
图2 FLEX-PLI、TRL-LFI 结构示意图

图3所示为FLEX-PLI的模拟骨骼结构。FLEX-PLI的股骨与胫骨骨骼使用工程塑料制成，能够模拟腿部的弯曲变形状况，通过骨骼上的7组应变测量装置Tibia-1、Tibia-2、Tibia-3、Femur-1、Femur-2、Femur-3、Femur-4测量腿骨所受的弯曲载荷。另外，胫骨还装有加速度传感器，测试碰撞时胫骨上端的减速度。

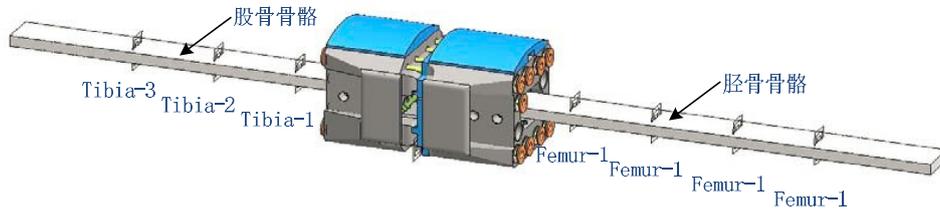


Figure 3. Simulant bone structure of FLEX-PLI
图3 FLEX-PLI 的模拟骨骼结构

图4所示为FLEX-PLI的模拟膝部结构。其内部安装24根弹簧构成一个弹性系统，模拟人体腿部关节的力学特性。同时，膝部模块模拟人体膝关节的韧带结构布置了四个位移传感器，用于测量ACL（Anterior Cruciate Ligament，前十字韧带）、PCL（Posterior Cruciate Ligament，后交叉韧带）、LCL（Lateral Collateral Ligament，外侧副韧带）、MCL（Medial Collateral Ligament，内侧副韧带）的拉伸量。

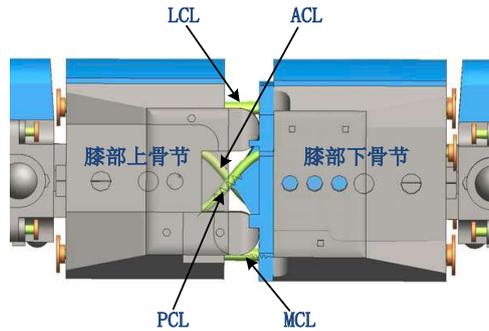


Figure 4. Simulant knee structure of FLEX-PLI
图4 FLEX-PLI 的模拟膝部结构

图5所示为TRL-LFI的结构。该冲击器上安装了三个传感器，一个加速度传感器和两个角位移传感器，分别用于测量胫骨加速度、膝关节弯曲角及膝关节剪切位移。其中，角位移传感器采集到数据后，经过一定的换算关系得到弯曲角度和剪切位移信息。

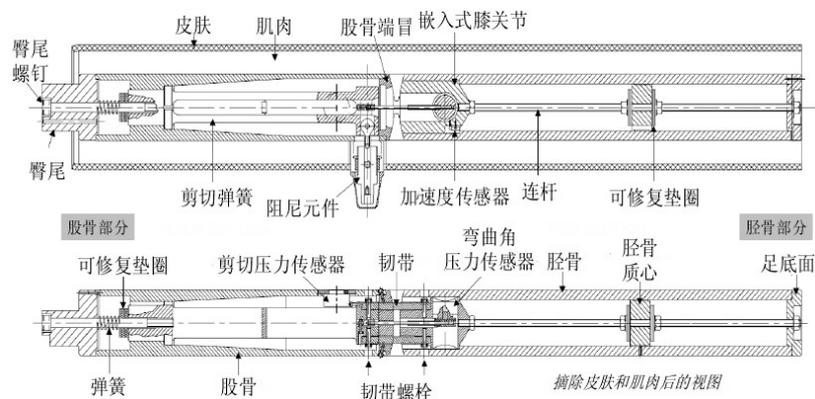


Figure 5. Structure of TRL-LFI
图5 TRL-LFI 结构图

TRL-LFI 采用了刚性金属管模拟胫骨和股骨，骨骼内部拥有调节腿部质心的机械结构，由于金属管的强度较高，很难有效地模拟人体腿部的变形，因此，TRL-LFI 不能模拟腿骨各个部位的骨折，仅能通过安装在下腿的加速度传感器评价腿部骨折的风险。

图6所示为TRL-LFI的膝部结构，它是一个可塑形变形的关节，股骨与胫骨之间通过一对金属韧带片相连，该韧带片经过精细的计算与设计以确保与人体膝部韧带的生物力学性能相近。但是，由于发生塑性变形后，膝部金属韧带片的特性有较大改变，其试验的重复性并不理想。同时，TRL-LFI 简化的设计结构与人体膝关节的实际构造有较大差别，因而，其无法模拟膝关节各条韧带的受损情况。

综合以上论述可知，设计方式的不同决定了FLEX-PLI在结构上比TRL-LFI更接近人体腿部构造，因此，能够针对人体腿部的特定部位放置测量单元，只要腿部模型的力学特性设计能够与人体生物力学性能吻合，其必然能获得更为客观的评价结果。

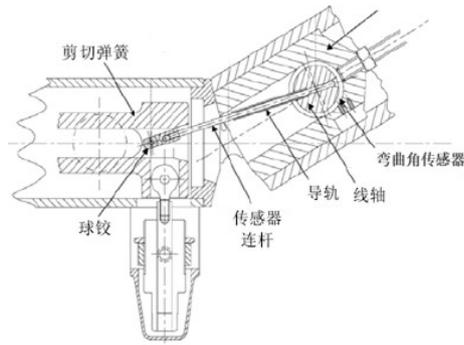


Figure 6.Knee structure of TRL-LFI
图 6 TRL-LFI 膝部结构

4 FLEX-PLI 与 TRL-LFI 性能对比

尸体试验是获取人体的生物力学特性的有效手段，对大腿、小腿、膝关节等新鲜尸体施加一定的载荷，直至骨骼折断或膝关节韧带断裂，通过传感器记录试验过程中的力矩、变形量、弯曲角度、剪切位移等数值即可确定大腿、小腿和膝部的生物力学响应。Kerrigan et al 等研究者通过对试验得到的结果如图 7~图 11 所示。

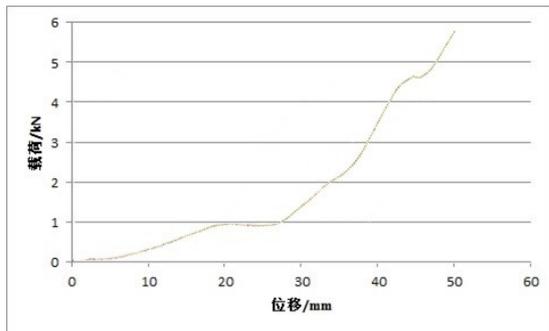


Figure 7.Bending moment-displacement of femur
图 7 大腿中部弯矩与位移关系

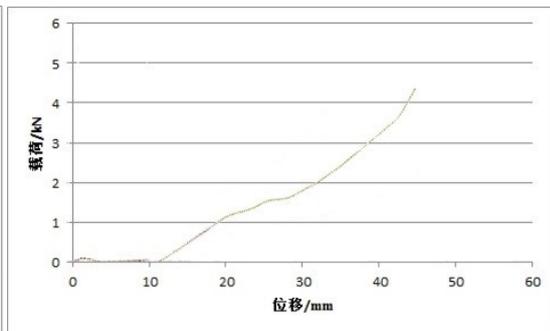


Figure 8.Bending moment-displacement of tibia
图 8 小腿中部弯矩与位移关系

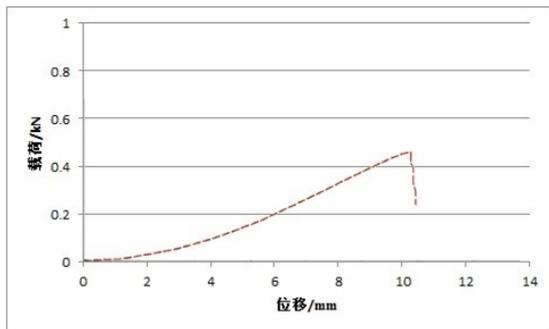


Figure 9. Tensile force-displacement of MCL
图 9 膝部 MCL 准静态拉伸力与位移关系

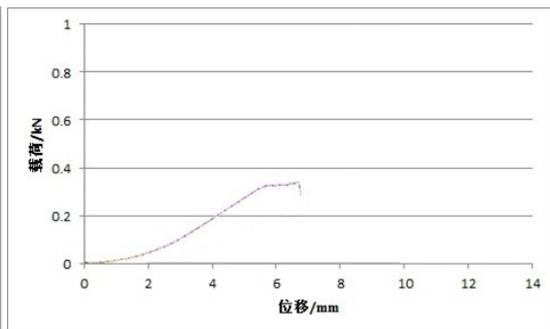


Figure 10. Tensile force-displacement of LCL
图 10 膝部 LCL 准静态拉伸力与位移关系

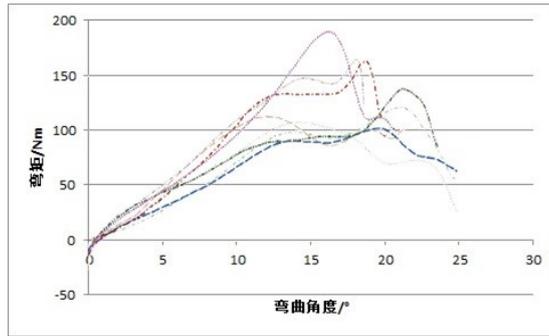


Figure 11. Bending angle-bending moment of knee
图 11 膝关节弯曲角度与膝关节弯矩关系

为了进行力学特性对比,对 FLEX-PLI 的大腿、小腿和膝部进行静力加载测试,图 12 所示为大腿和膝部的静力加载试验,通过记录试验中腿部模块受到的载荷、弯矩、变形及其相互关系,即可获得其力学特性。图 13、图 14 所示为 FLEX-PLI 大腿、小腿和膝部弯曲载荷与变形之间的关系,对比其受力变形特性与腿部的生物力学特性可以看出, FLEX-PLI 具有较高的生物仿真度。

图 15 所示为 TRL-LFI 的静力加载测试,对腿部施加弯矩,对膝部附近施加剪切力,得到 TRL-LFI 的膝部弯角、膝部剪切位移与载荷之间的关系,如图 16 所示。可以看出,TRL-LFI 膝部弯角对载荷的响应整体上与膝部的生物力学特性接近,但有所差别。

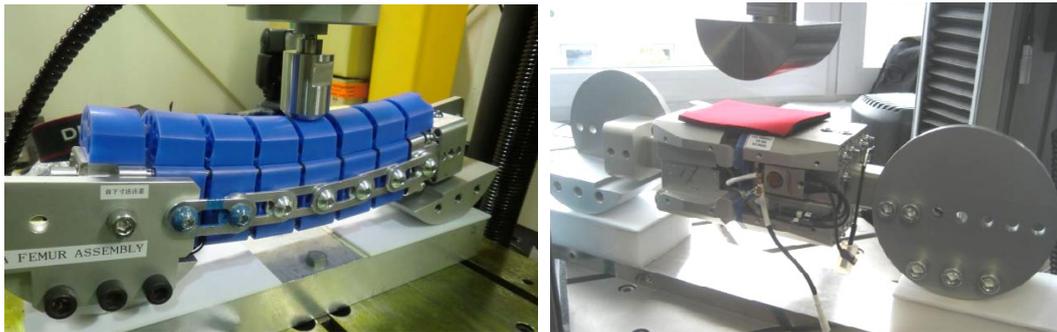


Figure 12. Static load test of femur and knee of FLEX-PLI
图 12 FLEX-PLI 大腿、膝部静力加载测试

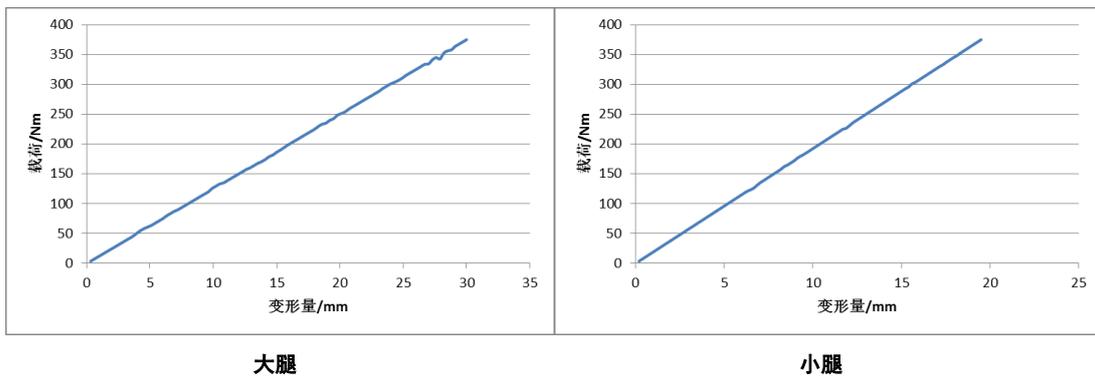


Figure 13. Bending Moment-displacement of femur and tibia of FLEX-PLI
图 13 FLEX-PLI 大腿、小腿弯矩与变形的关系

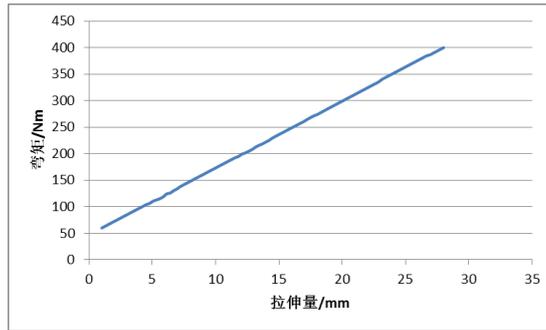


Figure 14. Bending moment-tensile displacement of knee of FLEX-PLI
图 14 FLEX-PLI 膝部拉伸量与弯矩的关系



Figure 15. Static load test of TRL-LFI
图 15 TRL-LFI 的静力加载测试

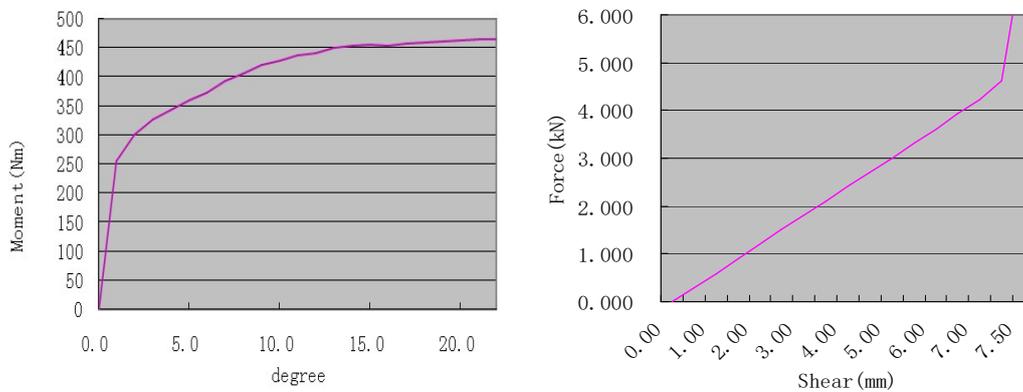


Figure 16. Load-bending angle & load-sheering displacement of knee of TRL-LFI
图 16 TRL-LFI 膝部弯角、膝部剪切位移与载荷的关系

5 总结与展望

综合本文以上论述可知，在结构上，FLEX-PLI 较 TRL-FLI，增加了对大腿、小腿骨骼的模拟，增加了对前、后、内侧及外侧韧带的模拟，评价指标更加具有针对性、更加全面，更为接近人体腿部构造；同时，在生物力学性能方面，FLEX-PLI 更加接近人体的生物力学特性，具有更高的生物仿真度。尽管将 FLEX-PLI 应用于行人

保护试验评价中的重复性和可靠性仍待进一步验证，但 FLEX-PLI 相较 TRL-FLI 来讲，技术上无疑是更加先进的。

目前，除日本外，TRL-FLI 仍是各国法规所采用的行人下腿冲击器，但多年的研究证实，FLEX-PLI 具有更好的生物力学特性，因此，部分国家和地区的 NCAP 率先引入了 FLEX-PLI，并制定了未来将 FLEX-PLI 引入法规的时间表。尽管如此，FLEX-PLI 也存在结构复杂、部件寿命较低等缺点，但相信通过应用过程中发现并解决所存在的问题，FLEX-PLI 会更加完善，并最终被行人保护法规所接受。

参考文献

- [1] European Union. REGULATION (EC) No 78/2009 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 14 January 2009 on the type-approval of motor vehicles with regard to the protection of pedestrians and other vulnerable road users, amending Directive 2007/46/EC and repealing Directives 2003/102/EC and 2005/66/EC. Europe: Official Journal of the European Union, 2009.4.2.
- [2] European Union. COMMISSION REGULATION (EC) No 631/2009 of 22 July 2009 laying down detailed rules for the implementation of Annex I to Regulation (EC) No 78/2009 of the European Parliament and of the Council on the type-approval of motor vehicles with regard to the protection of pedestrians and other vulnerable road users, amending Directive 2007/46/EC and repealing Directives 2003/102/EC and 2005/66/EC. Europe: Official Journal of the European Union, 2009.7.25.
- [3] Euro NCAP. *Pedestrian Testing Protocol Version 7.0*. Europe: Euro NCAP, March 2011.
- [4] UNITED NATIONS. *Global Technical Regulation No. 9 Pedestrian Safety*. Geneva: ECE/TRANS, 26 January 2009.
- [5] Du Tianqiang, Zhu Qiwen. *Pedestrian protection legform impactor modularized analysis*[J], *vehicle engineer*, 2009, (09):43-48
- [6] 杜天强, 朱其文. 行人保护下腿碰撞器模块分析[J]. *汽车工程师*, 2009, (09):43-48.
- [7] Shinya Hayashi, Masahiro Awano, Isamu Nishimura, etc. *Development of a Flex-PLI LS-DYNA Model*[C/CD]// 7th European LS-DYNA Conference, May 14-15 2009, Salzburg Austria.
- [8] Shui Y. *The FE analysis of pedestrian protection legform impactor test*[J]. *Journal of vehicle engineer*, 2011, 1(4):385-391
- [9] 水野幸治. 针对行人下肢保护的腿型冲击试验有限元分析[J]. *汽车工程学报*, 2011, 1(4):385-391.
- [10] Han Yong. *Lower limb dynamics respond and Injury biomechanics analysis during Vehicle pedestrian collision*[D]. Hunan University, 2009
- [11] 韩勇. 车辆与行人碰撞中下肢动力学响应和损伤生物力学分析[D]. 湖南大学, 2009.
- [12] Zhang Guanjun. *Study on the impact injury characteristics of pedestrian lower leg and its related parameters*[D]. Hunan University, 2009.
- [13] 张冠军. 行人下肢的碰撞损伤特性及相关参数研究[D]. 湖南大学, 2009.
- [14] Li Yuan. *Research on the design elements of motor vehicles with regard to the protection of pedestrians*[D]. Jilin University, 2009.
- [15] 李源. 乘用车与行人碰撞腿部保护设计要素研究[D]. 吉林大学, 2009.
- [16] Humanetics Innovative Solutions. *Flex PLI GTR User Manual*. 2013.
- [17] Chen Jie, Liu Junyong, Liu Qi .etc. *Application and research of pedestrians flexible lower leg base on EuroNCAP*[A]. The sixteenth international forum of automotive traffic safety 2013[C]:2013
- [18] 陈杰, 刘军勇, 刘奇等. 基于 EuroNCAP 的行人柔性小腿应用与研究[A]. 2013 年第十六届汽车安全国际研讨会[C]: 2013