

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.02.004

基于柔性腿型的轿车前部吸能结构研究*

何 东^{1,2}, 杨黎明^{1*}, 刘 军¹, 谢书港², 方 锐²

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 中国汽车技术研究中心, 天津 300300)

摘要:针对轿车前端吸能结构与柔性腿碰撞伤害值的问题,对轿车前端吸能部件结构与材料进行了研究。通过运用计算机辅助工程技术,建立了某轿车以及泡沫吸能结构和薄壁钢吸能结构有限元模型;轿车前端分别采用了两种吸能结构,并改变了吸能结构的压溃空间,与柔性腿仿真模型进行了碰撞实验;通过实验数据分析、对比了两种吸能结构与柔性腿相撞的特点。实验结果表明,汽车前端吸能结构使用泡沫材料,适当减小泡沫厚度,有利于降低柔性腿韧带伸长量;吸能结构使用薄壁钢结构则需要足够的吸能空间,有利于调整碰撞腿型运动姿态,降低柔性腿胫骨弯矩及韧带伸长量;薄壁钢结构刚度均匀且具有金属的压溃特性,在与行人腿部相撞时,可以起到更好的保护作用。

关键词:汽车安全;行人保护;柔性腿型;吸能结构;计算机辅助工程

中图分类号:U462.2;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)02-0146-05

Study on sedan frontal energy absorbing structural based on Flex-PLI

HE Dong^{1,2}, YANG Li-ming¹, LIU Jun¹, XIE Shu-gang², FANG Rui²

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, NingBo University, Ningbo 315211, China;

2. China Automobile Technology and Research Center, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at car frontal energy absorption structure and flexible legs collision damage, structures and materials of car frontal energy-absorbing components were studied. Finite element model of a sedan, as well as foam energy absorption structure and thin-wall steel energy structure were established, by using the computer-aided engineering (CAE) technique. Collision experiments were developed by car frontal components and flexible legs, with two kinds of energy absorption structure adopted by automobile front-end, and the energy absorption space was changed. Characteristics of collision of two different energy absorption structures were analyzed and compared by experimental data with Flex-PLI. The results indicate that car frontal energy absorption structures use foam, thickness of the foam are reduced, which are beneficial to reduce ligaments elongations of the Flex_ PLI. And thin-walled steel are used as energy absorption structures, which enough energy absorption space can adjust the movement attitude of the legform, and reduce ligaments elongations as well as tibia bending moment of the Flex-PLI. The thin-walled steel stiffness is uniformity with crumple characteristics, when a collision, pedestrians legs can be better protected.

Key words: automotive safety; pedestrian protection; flexible pedestrian legform (Flex PLI); energy absorption structure; CAE

0 引 言

在汽车安全领域中,行人是交通中的弱势群体,行人保护是非常重要的组成部分,行人腿部又是最易受

到伤害的部位^[1]。行人腿部所受伤害受到国内外研究机构和学者的重视。

目前,行人保护试验中采用刚性行人腿型冲击器,随着近几年对行人保护的研究,发现刚性腿型在测量

收稿日期:2015-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11372148)

作者简介:何 东(1990-),男,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事汽车被动安全方面的研究. E-mail:hetangzheng@126.com

通信联系人:杨黎明,男,教授,博士生导师. E-mail:yangliming@nbu.edu.cn

伤害值方面未考虑到胫骨所受弯曲的影响,同时其刚性材料也存在一定局限性,生物逼真性不能完全反映行人撞击腿部受伤的真实状态^[2]。

2000年日本汽车工业协会 JAMA 和日本汽车研究机构 JARI 首先提出了柔性腿型的研究,柔性腿型 (Flex-PLI) 可以更加真实地模拟 50 百分位男性假人的右侧腿部撞击到车辆后受到的伤害。2009 年发布了 GTR. 9 第二阶段柔性腿型的内容^[3],对最新版本柔性腿的结构尺寸、试验标定、伤害值要求等进行了详细的描述。TEG 在 2010 年完成了对 Flex PLI 的评估^[4]。欧洲新车星级评定已于 2014 年开始采用柔性腿型进行新车星级评定试验^[5]。行人保护全球技术法规预计从 2016 年开始采用柔性腿型。相比而言,柔性小腿的伤害指标及评价方法有很大更新。

行人保护设计与车辆前端造型及结构布置有关,主要影响行人保护小腿碰撞的车辆前端装置有:前保险杠(包括散热格栅)、前大灯、前横梁及吸能装置、下支撑、发动机罩等^[6]。

本研究以 Flex_PLI 腿型为基础,通过计算机辅助工程,确定小型轿车前横梁不同吸能结构、材料对柔性腿伤害值的影响。

1 Flex-GTR 腿型介绍

Flex-GTR 是目前行保试验中使用的柔性腿版本,其由股骨、胫骨、膝盖及皮肤/肌肉 4 个主要部分组成。总长度为 928 mm,质量为 13.2 kg,其组成模型如图 1 所示。股骨由 8 个骨节依次排列在股骨中心组成。胫骨同样由 10 个骨节依次排列在胫骨中心组成。除了胫骨和股骨顶部及底部骨节由铝制成,其他骨节均由塑料材料制成。膝盖分由 12 个钢索连接,其中钢索上嵌入弹簧并装有位移传感器来模拟膝盖韧带所受伤害^[7]。

标准柔性腿型设置有 12 个数据采集通道,股骨上 3 个,胫骨上 4 个应变测量传感器用以测量弯矩,膝盖上 4 个位移传感器用以测量韧带伸长量,以及 1 个膝盖底部加速度传感器,另外还提供可选择性的 26 个线性加速度传感器以及 6 个角速度传感器^[8]。

小腿伤害评价指标有 7 个,分为两类:第一类为韧带伸长量,包括前十字韧带伸长量 (anterior collateral ligament, ACL)、后十字韧带伸长量 (posterior collateral ligament, PCL)、内侧副韧带伸长量 (medial collateral ligament, MCL)。第二类为胫骨弯矩,包括胫骨上部

弯矩 (tibia-upper bending moment, T_1)、胫骨中上部弯矩 (tibia-mid upper bending moment, T_2)、胫骨中下部弯矩 (tibia-mid lower bending moment, T_3)、胫骨下部弯矩 (tibia-lower bending moment, T_4)。

最新欧洲标准柔性腿伤害限值要求:胫骨弯矩 $\{T_1, T_2, T_3, T_4\} \leq 340 \text{ Nm}$;前、后十字韧带 $ACL \& PCL \leq 13 \text{ mm}$;内侧副韧带 $MCL \leq 22 \text{ mm}$ 。

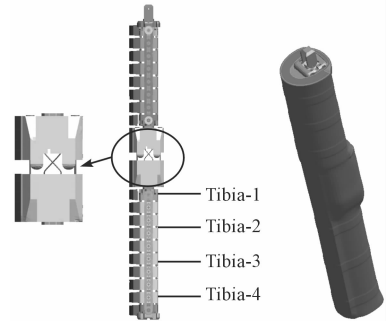


图1 Flex-GTR 腿型

2 仿真模型简介

2.1 汽车模型建立

由于目标车型原 CAE 模型较为复杂,运行一次计算程序需耗时 20 多个小时。华南理工大学陈洁清,郑炳杰等人^[9]发现在行人保护中,行人腿部与车辆正面碰撞,主要由汽车前端结构参加变形吸能,后面部分基本不变形。本研究建立汽车简化模型,并证明汽车简化模型正碰指标和原车输出结果之间的误差是在可接受范围之内。

车身简化模型如图 2 所示。本研究截取车身前半部分,约束模型后端的 6 个自由度。轿车前部造型特征中对行人腿部有影响特征参数较多,如果都进行研究,势必会加大研究的难度。通过进行变量筛选可以去掉影响小的特征参数,提高运算效率。本研究中针对轿车去掉蒙皮、格栅等影响因素,主要研究车前部发动机罩,前横梁吸能装置和下支撑。

在行人腿部与汽车前端碰撞中,蒙皮以及格栅都采用塑料件,可以起到缓冲和调整腿型的作用,但主要起到吸能及支撑作用的结构,是发动机罩或上支撑 (SUV 多用)、中间吸能装置及下支撑。如去掉蒙皮、格栅,会增大腿部碰撞整体伤害值,但对主要吸能结构吸能效果判断影响不大。

前横梁吸能装置和下支撑是影响小腿碰撞的关键因素。吸能装置位于前横梁前端,其主要作用是吸收小腿碰撞时的冲击能量,降低腿部加速度;下支撑位于前横梁下端,安装在水箱下横梁前端,其主要作用调整

小腿的运动姿态。

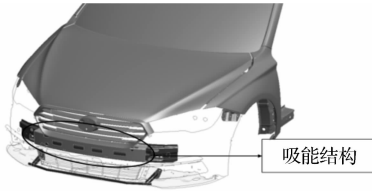


图 2 车辆前端结构

前横梁吸能装置采用两种效果最好的结构,分别如图 3、图 4 所示,第一种是泡沫结构,采用 EPP 泡沫材料^[10],密度为 20 g/L。第二种是薄壁钢结构,材料屈服强度为 160 MP,厚度为 0.7 mm。

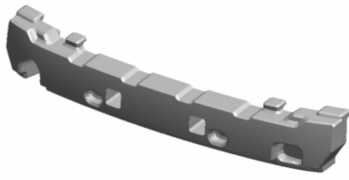


图 3 泡沫结构

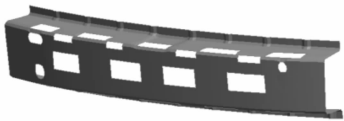


图 4 薄壁钢结构

2.2 汽车前端造型参数

车辆前端造型参数如图 5 所示。

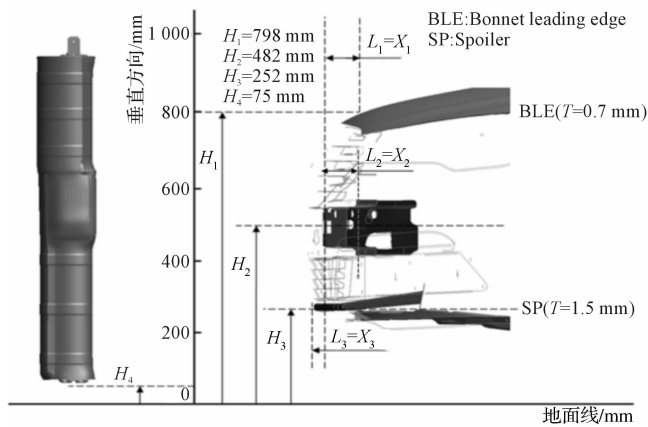


图 5 车辆前端造型参数

H_1 —发动机罩前缘参考线高度; H_2 —前防撞横梁中心高度; H_3 —下支撑高度; H_4 —柔性腿离地高度; L_1 — X 方向的发动机罩前缘参考线与前防撞横梁前端水平距离; L_2 —吸能装置 X 向水平距离,也是碰撞时可压溃的空间; L_3 —防撞横梁前端与下支撑前端 X 向距离

3 吸能结构对柔性腿伤害指标影响分析

本研究运用 Hypermesh 以及 LS-DYNA,数值模拟 Euro NCAP 法规工况下的柔性腿撞击实验,即选择以速度 11.11 m/s,使柔性腿撞击车辆。

目前多数行人保护试验中都采用刚性腿作为下肢冲击器,优化时,只需要一些结构微调,就可以达到法规标准。但采用柔性腿作为下肢冲击器时,由于柔性腿伤害指标灵敏度高,且更加精确,汽车前端位置布置不当,很容易导致伤害值大增,且后期优化也非常困难。

目前,各大汽车厂均采用两种结构作为吸能装置,即吸能泡沫与薄壁钢。但还没有研究指出哪种结构对减小柔性腿碰撞伤害值更有利。本研究的目的是研究轿车安装不同吸能结构,对柔性腿碰撞造成的影响。这样,研究人员就可以根据需求,选用不同的结构。

3.1 泡沫材料对柔性腿影响分析

车体前防撞横梁安装吸能泡沫,密度为 20 g/L。根据研究,这种泡沫是目前比较软的泡沫材料,吸收能量效果较好。撞击点为车辆 y 轴中心。改变变量 L_2 ,取值范围 $40 \text{ mm} \leq L_2 \leq 130 \text{ mm}$ 。4 种厚度泡沫如表 1 所示,泡沫 X 向厚度为 45 mm, 70 mm, 100 mm, 125 mm。 L_3 值不变,即改变下肢撑的 X 向长度,保持 L_3 值。变量 L_1 随着 L_2 改变而改变。

表 1 泡沫 X 向厚度参数

工况	L_2/mm	L_3/mm	L_1/mm	撞击速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Case1	45	10	55	11.11
Case2	70	9	80	11.11
Case3	100	10	110	11.11
Case4	125	10	135	11.11

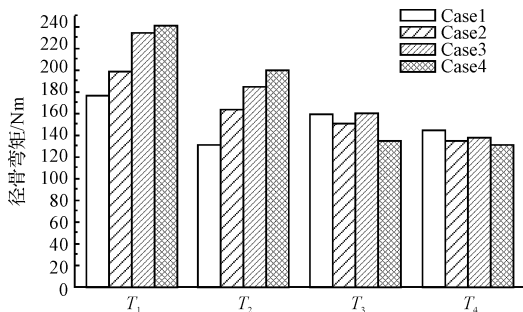
3.1.1 实验结果与分析

变量 L_2 变化对柔性腿伤害值对比如表 2、图 6 所示。

表 2 仿真计算结果(峰值)

工况	$T_1/$	$T_2/$	$T_3/$	$T_4/$	$ACL\&$	MCL/mm
	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{N} \cdot \text{m}$	PCL/mm	
Case1	176	130	160	153	8.1/4.1	14.7
Case2	190	164	142	135	6.9/3.8	14.1
Case3	230	180	160	126	7.56/4.7	17.0
Case4	245	166	136	131	7.5/3.2	14.6

4 个工况中,胫骨弯矩 T_1 处是柔性小腿胫骨处受到伤害最大的部位。其中: ACL 代表前十字韧带伸长量; PCL 代表后十字韧带伸长量; MCL 代表内侧副十字韧带伸长量。由图 6 可知,变量 L_2 值增加, ACL 的值也在增加。 T_1 和 T_2 都在一定程度上增加, T_3 和 T_4 变化不明显。

图6 胫骨弯矩 $T_1 \sim T_4$ 峰值对比

工况1和工况4的动画效果如图7所示。

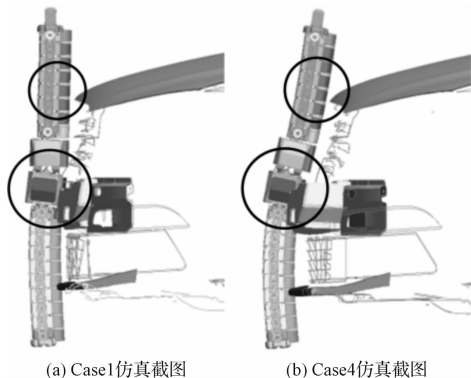


图7 仿真动画对比

工况4由于泡沫厚度增加,且泡沫有压缩极限,导致 L_1 变大,吸能前缘与保险杠上缘的 X 向距离增加;工况4中,大腿需要更长时间接触发动机罩,股骨支撑位置后移,导致发罩前缘 BLEA 对大腿的支撑力减小。且泡沫有压缩极限,膝盖受到保险杠支撑力逐渐增大,造成膝盖前十字韧带拉伸 ACL 值增大,并且由于胫骨弯矩 T_1 和 T_2 离保险杠较近,也受到一定的影响。

通过上述研究,车辆使用吸能泡沫,泡沫在一定范围内越薄, L_1 越小,越有利于控制膝盖前十字韧带的拉伸和与胫骨弯矩值。

3.2 薄壁钢对柔性腿影响分析

车体前防撞横梁安装薄壁钢结构,材料屈服强度为 200 MPa,厚度为 0.7 mm。撞击点为车辆 y 轴中心。改变变量 L_2 ,取值范围 $40 \text{ mm} \leq L_2 \leq 130 \text{ mm}$ 。薄壁钢 X 向截面宽度参数如表3所示。表3中列出薄壁钢 X 向截面宽度 L_2 为 45 mm, 70 mm, 100 mm, 125 mm 4种工况。

表3 薄壁钢 X 向截面宽度参数

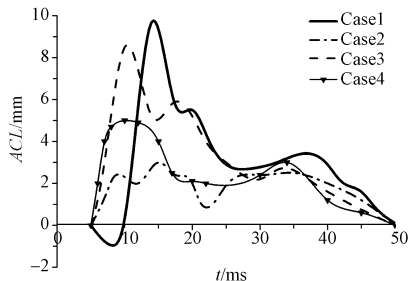
工况	L_2/mm	L_3/mm	L_1/mm	撞击速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
Case1	45	10	55	11.11
Case2	70	10	80	11.11
Case3	100	10	110	11.11
Case4	125	10	135	11.11

仿真计算结果(峰值)如表4所示。

表4 仿真计算结果(峰值)

工况	$T_1/$	$T_2/$	$T_3/$	$T_4/$	$ACL\&$ PCL/mm	MCL/mm
	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{N} \cdot \text{m}$		
Case1	161	129	152	156	9.7/4.1	15.1
Case2	144	128	136	138	2.9/3.5	10.8
Case3	135	115	140	121	5.5/2.7	8.8
Case4	130	133	136	117	8.5/2.8	10.0

ACL 结果对比如图8所示。

图8 ACL 结果对比

由表4和图8可知,相较于泡沫,随着 L_2 值的增加,柔性腿胫骨弯矩呈减小趋势,但工况2,3,4中胫骨弯矩相差不大,说明此处胫骨弯矩对参数 L_2 敏感度较低。而前十字韧带伸长量 ACL 变化明显; ACL 值在 $L_2 = 70 \text{ mm}$,达到最小值, ACL 和 MCL 在 $L_2 = 45 \text{ mm}$ 时,伤害值要高于其他工况。

工况1和工况2的动画效果如图9所示。

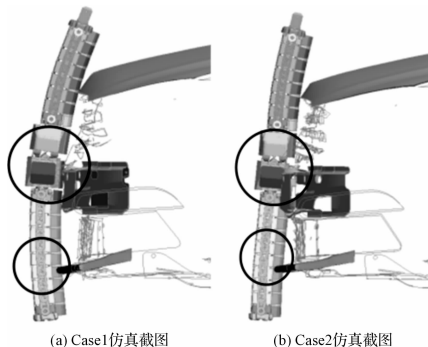


图9 仿真动画对比

由图9可知,工况1吸能空间不够,导致吸收撞击能量不充分。膝盖以较高加速度与吸能结构后面的防撞横梁相撞,防撞横梁给膝盖支撑力过大,膝盖韧带拉伸量增大;也导致胫骨部分受到下支撑反向作用力加大,造成胫骨弯矩上升。工况2吸能空间上升,金属压溃特性降低小腿加速度,改善小腿运动姿态,使得柔性腿的韧带拉伸量与胫骨弯矩值降低。工况4中 $L_2 = 135 \text{ mm}$,吸能空间过大,金属没有充分溃缩,造成和泡沫厚度大类似的情况,导致韧带伸长量增大。

在汽车安装金属吸能装置时,通过适度增加吸能空间,有利于控制柔性腿胫骨弯矩,以及韧带伸长量。

3.3 吸能结构对比

根据前面仿真结果,汽车安装不同吸能结构对柔

性腿造成伤害有很大影响, $L_2 = 70 \text{ mm}$ 和 $L_2 = 125 \text{ mm}$ 时(无代表没有安装吸能结构), 汽车安装不同吸能结构对比如表 5 所示。

表 5 不同吸能结构对比

工况	吸能结构	L_2/mm	L_1/mm	L_3/mm
Case1	泡沫	70	10	80
Case2	薄壁钢	70	10	80
Case3	无	0	80	10
Case4	泡沫	125	10	135
Case5	薄壁钢	125	10	135

不同吸能结构仿真结果对比(峰值)如表 6 所示。

表 6 不同吸能结构仿真结果对比(峰值)

工况	$T_1/$	$T_2/$	$T_3/$	$T_4/$	$ACL\&$	MCL/mm
	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{N} \cdot \text{m}$	PCL/mm	
Case1	190	164	142	135	6.95/3.87	14.17
Case2	144	128	136	138	2.95/3.59	10.82
Case3	262	220	191	137	11.03/6.20	22.61
Case4	205	166	136	131	7.56/3.23	14.62
Case5	130	133	136	117	8.56/2.81	10.01

据表 6 仿真结果得出, 汽车没有安装吸能结构, 柔性腿受到伤害明显高于其他工况。汽车前端安装薄壁钢结构, 柔性腿胫骨弯矩和膝盖韧带伸长量都明显小于汽车安装吸能泡沫。

薄壁钢结构下, 系统通过自身压溃特性, 使腿部膝盖入侵量加大, 加速度减小, 股骨支撑位置和胫骨下部支撑位置前移, 发罩前缘 BLEA 对大腿的支撑力增加。所以小腿弯曲角度变小, 膝盖韧带伸长量降低。而泡沫结构有压缩极限, 导致吸能不充分, 使腿部膝盖入侵量小于薄壁钢, 股骨和胫骨支撑位置后移, 导致膝盖弯曲角度增大, 导致胫骨弯矩也增大。

4 结束语

在人-车碰撞的过程中, 汽车前端造型参数对腿部的影响非常大, 柔性腿作为新的腿部冲击器, 具有全新的评分体系及更加严格的得分标准。在汽车造型和布置空间已大体确定的情况下, 有限的空间内合理地选取材料和结构对控制柔性腿的各项伤害指标尤为重要。本研究通过对轿车安装不同吸能结构, 进行仿真实验计算, 得到以下结论:

(1) 轿车前端安装吸能泡沫时, 在一定范围内, 随着泡沫变薄, L_1 减小, 有利于控制柔性腿的韧带伸长量及胫骨弯矩的伤害值。

(2) 薄壁钢结构具有压溃特性, 可以使金属通过塑性变形达到吸收能量目的地。这种吸能特性, 薄壁钢结构需要一定的吸能空间。因此薄壁钢结构需要足够吸能空间来吸收能量, 且有利于控制腿部运动姿态, 降低腿部伤害值。

(3) 柔性腿在结构上与刚性腿有很大不同, 其评分方式也发生变化, 在与汽车碰撞中, 汽车吸能结构极大影响柔性腿膝盖部位韧带伸长量。在柔性腿相关行人保护开发中, 相较泡沫结构, 采用薄壁钢结构, 是更为有效的选择。

参考文献 (References):

- [1] 沈宇明. 行人交通事故人员伤害分析及防护措施[J]. 汽车安全, 2007(8):70-73.
- [2] Informal Group on Pedestrian Safety Phase 2 (IG PS2). History of development of the flexible pedestrian legform impactor, GTR9-C-04 [S]. Bonn: Working Party on Passive Safety (GRSP), 2011.
- [3] Informal Group on Pedestrian Safety. Proposal to Develop Amendments to Global Technical Regulation No. 9, ECE/TRANS/WP. 29/GRSP/ 2009/ 21 [S]. Bonn: Working Party on Passive Safety (GRSP), 2009.
- [4] GEHRING D U. Flexible Pedestrian Legform Impactor Flex GTR Evaluation Tests, TEG-141 [R]. Bergisch Gladbach: Flex-PLI Technical Evaluation Group (Flex-TEG), 2010.
- [5] Euro NCAP Commission. European new car assessment program, pedestrian impact, Euro NCAP [S/OL]. [2013-08-01]. <http://www.euroncap.com/tests>, htm.
- [6] 吕铨玮. 行人保护柔性腿型碰撞的车辆前端结构优化设计[J]. 汽车安全与节能学报, 2013(3):266-272.
- [7] FTSS. Flex PLI GTR User Manual, GTR 9-3-04 [R]. Paris: Informal Group On Pedestrian Safety Phase 2 (IG PS2), 2012.
- [8] ROBERT KANT. Flex PLI GTR-FE v2. 0, GTR 9-2-09 [R]. Osaka: Informal Group on Pedestrian Safety Phase 2 (IG PS2), 2012.
- [9] 郑炳杰. 汽车正面碰撞仿真分析及车身前部吸能部件优化[D]. 广州: 华南理工大学机械与汽车工程学院, 2013.
- [10] 赵正, 陈超卓, 吴沈荣. 车体前端造型与材料对于行人腿部伤害指标的影响[J]. 汽车安全与节能学报, 2010, 1(4):297-306

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

何 东, 杨黎明, 刘 军, 等. 基于柔性腿型的轿车前部吸能结构研究[J]. 机电工程, 2016, 33(2):146-150.

HE Dong, YANG Li-ming, LIU Jun, et al. Study on sedan frontal energy absorbing structural based on Flex-PLI[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(2):146-150.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>