

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.02.005

基于行人保护的某微型客车前部结构设计^{*}

倪士林,袁廷辉,刘会霞,王 霄^{*}
(江苏大学 机械工程学院,江苏 镇江 212013)

摘要:针对微型客车要满足行人下肢保护的问题,以某款微型客车为研究对象,采用 CAE 仿真技术建立了行人下肢-车辆碰撞有限元模型,通过 LS-DYNA 对模型进行了求解,根据结果对碰撞过程及行人腿部伤害进行了分析。同时,针对分析结果和原微型客车的前保险杠系统结构,提出了两种结构优化方案,分别在原车上增加了吸能泡沫加小腿支撑结构和薄壁吸能板加小腿支撑结构。将改进后的结构重新建立了有限元模型代入计算。数据结果表明,两种方案明显提高了该微型客车的行人保护性能,而且薄壁吸能板加小腿支撑结构可以起到更好的保护作用,为微型客车保护行人的前保险杠结构设计提供了参考。

关键词:行人保护;结构优化;有限元;计算机辅助工程

中图分类号:TH122;U463

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)02-0125-06

Frontal structure design of a mini-bus based on pedestrian protection

NI Shi-lin, YUAN Ting-hui, LIU Hui-xia, WANG Xiao
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming at the problems of protecting the lower limb, taking a mini-bus as the research object, CAE simulation technology was used to establish finite element model of pedestrian-vehicle collision, then the model was solved by LS-DYNA and impact process and pedestrian leg injuries were analyzed by results. At the same time, according to the analysis results and the original structure of mini-bus frontal bumper system, two kinds of optimization schemes were put forward, combining energy absorbing foam and thin-wall sheet with lower leg supporting structure in the original mini-bus respectively. The finite element model of was remodeled and calculated. The results indicate that two schemes can obviously improve the protection capability for pedestrian of the mini-bus and the latter one served a better function. It provides a reference for the design of the frontal bumper of the mini-bus.

Key words: pedestrian protection; structure optimization; FEA; CAE

0 引 言

据统计,全世界31%的交通事故都与行人有关而我国所占比例最高。我国每年约有50万起交通事故发生,其中超过10万人遇难,行人约占总数的25%,且这一比例在城市中则更高,甚至达到50%^[1]。

保险杠系统位于车辆的最前端并且当车辆撞击行人时是最先与行人腿部接触的部件,人体下肢是在人车碰撞中最容易受到伤害的部位^[2]。保险杠系统应具有保护行人的功能,对作为道路中弱势群体行人的有关保护工作已经刻不容缓。

随着各国立法的推进,各汽车厂商面临的行人

收稿日期:2016-09-10

基金项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目(作者未提供)

作者简介:倪士林(1992-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事数字化设计与制造的研究。E-mail:nishilin0@126.com

通信联系人:王霄,男,教授,博士生导师。E-mail:wx@ujs.edu.cn

保护压力将越来越大,逐渐将行人保护设计纳入车辆的设计过程中,当前对于轿车基于行人保护的前保险杠系统设计优化做了很多研究^[3-5],然而微型客车考虑行人保护的前保险杠系统设计鲜有报道。微型客车的前保险杠系统较轿车有很大不同,微型客车前部结构刚度强度较大,一般不利于保护行人。

本研究将以某微型客车的保险杠系统为基础,采用先进的汽车 CAE 技术对保险杠系统进行优化设计,使该微型客车保险杠系统能够较好地保护行人,对今后的微型客车保险杠系统设计产生一些借鉴意义和参考价值。

1 行人下肢-车辆有限元模型建立

现行主要行人保护法规有 EEVC 系列、GTR、Euro-NCAP 等^[6]。其中 Euro-NCAP 法规的要求最为严格,本研究选择 Euro-NCAP 法规规定的腿部伤害指标极限值来评价该微型客车的前保险杠系统是否满足保护行人腿部的要求。这就要求该微型客车与行人腿部碰撞后,行人腿部的胫骨加速度不大于 150 g、膝关节弯曲角度不大于 15°以及膝关节剪切位移不大于 6 mm,则保险杠系统才能满足腿部保护的要求,下肢伤害指标示意图如图 1 所示。

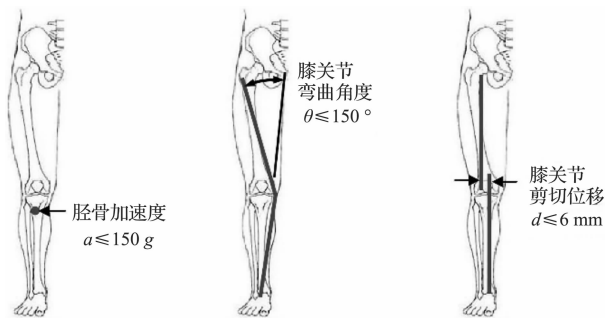


图 1 下肢伤害指标示意图

1.1 行人保护试验小腿冲击器-LSTC-LFI

该小腿冲击器由两个外覆泡沫的刚性件组成,分别代表大腿和小腿,由可变形的模拟关节相连接。冲击器的总长应是 926 mm ± 5 mm,试验质量 13.4 kg ± 0.2 kg。有限元模型是基于欧洲委员会 (EC) No. 631/2009 中对行人腿部保护要求建立的,并通过了 EC No 631/2009 实验验证要求^[7]。该冲击器有限元模型包含 47 409 个节点,33 664

个实体单元,2 960 个薄壳单元和两个梁单元,除此之外模型中还设置了传感器和弹簧单元用于测量腿部的各伤害值,其结构几何模型及有限元模型示意图如图 2 所示。

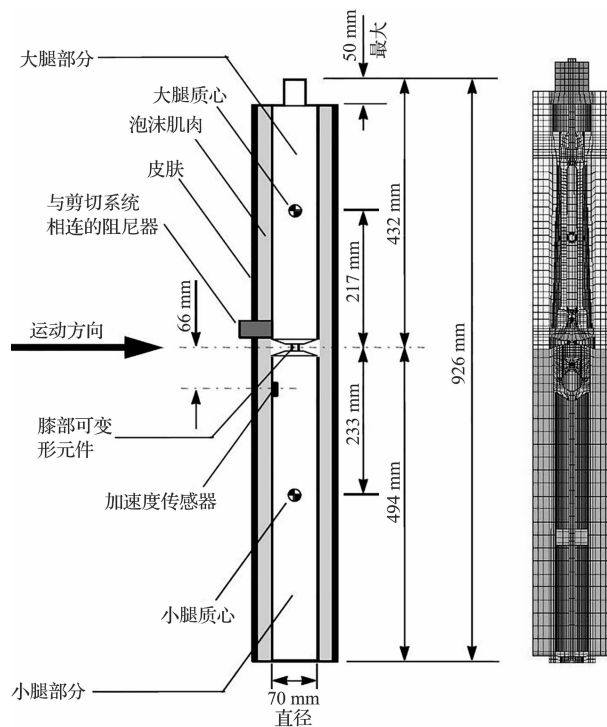


图 2 LSTC-LFI 腿型几何模型及有限元模型

1.2 车辆简化模型建立

行人下肢-车辆碰撞与整车高速碰撞不同,行人下肢-车辆碰撞的动能较小,碰撞的总能量远小于高速正碰实验。在碰撞中子系统部件只接触车体的前部结构,车体 A 柱之后部件在碰撞中基本没有变形,同时由于行人保护碰撞点较多,计算效率是仿真建模时必须考虑的因数之一,故行人保护中车体模型只选取车体的前部结构建模^[8]。本研究中简化模型主要选取了蒙皮、横梁、横梁加强板、前纵梁、冷凝器及支架、翼子板等。对 A 柱之后的结构去除并计算去除部分的质量 (1.29 t) 及质心点的坐标,使用 RBE2 刚性连接单元以集中质量的形式与简化模型后端进行完全约束连接。本研究所建立的简化模型的单元模型采用单点积分 BT 薄壳单元为主,为保证计算精度碰撞中接触部分网格大小一般控制 4 mm ~ 8 mm,其他非接触部分的部件网格控制在 10 mm,一共包含 284 630 个节点,280 451 个单元。因为车辆在碰撞过程中保持静止状态,要完全约束该点的 6 个自由度,简化后的微

型客车有限元模型如图3所示。



图3 简化后的微型客车有限元模型

1.3 碰撞模型的建立

本研究根据 Euro-NCAP 中对行人保护的工况要求建立行人下肢-车辆有限元模型,该法规要求碰撞点为车辆的纵向对称中心位置,小腿的速度为 40 km/h (11.1 m/s),方向的偏差为 $\pm 2^\circ$,该位置设为 Y0 位置。为保证研究全面性,本研究还设置了离中心位置 400 mm 处为第二碰撞点,此处位置后边为纵梁,刚度较大,该位置设为 Y400 位置,两位置的碰撞模型如图4所示。为保证仿真的可靠性,车辆和下肢冲击器之间的仿真接触设置尤为重要,车辆和下肢冲击器之间设有自动面面接触,并且下肢冲击器有限元模型本身设有自动面面接触,其他部分设为自动自身接触。时间控制卡片设置计算时间为 30 ms。

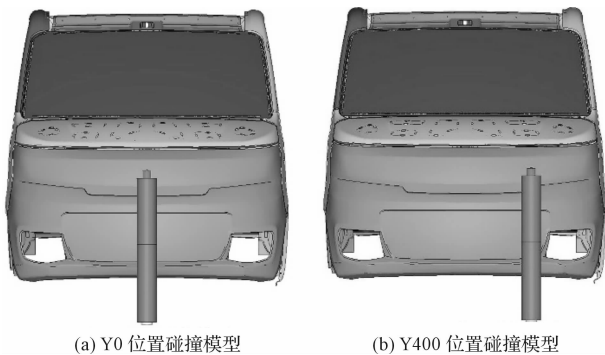


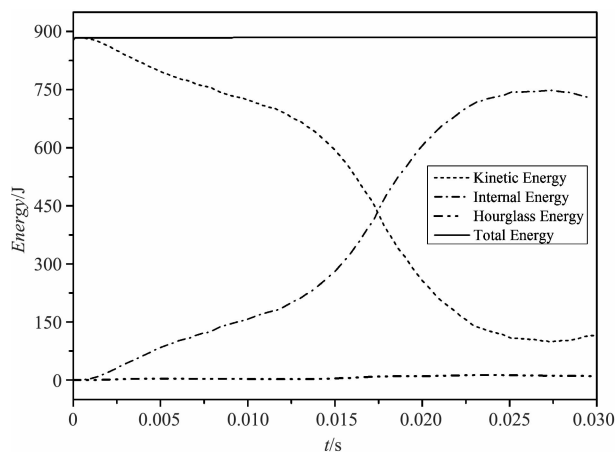
图4 碰撞模型

2 微型客车下肢碰撞分析

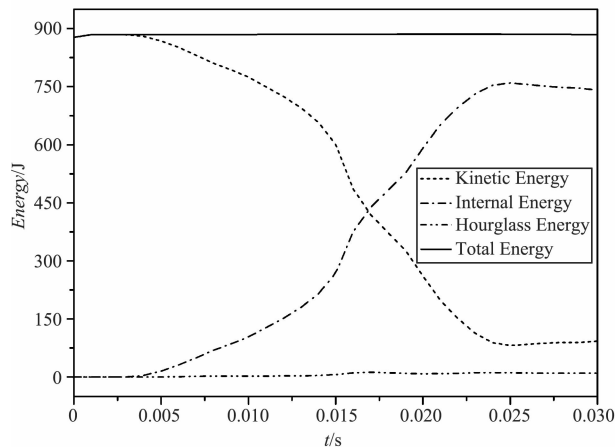
2.1 碰撞能量分析

本研究通过所建好的模型输出 K 文件,再分别通过 LS-DYNA 求解器进行求解,所得到的结果通过 Hy-

perview 进行观察分析,两个位置的碰撞能量随时间变化的曲线图如图5所示。



(a) Y0 位置系统能量变化曲线



(b) Y400 位置系统能量变化曲线

图5 两位置系统能量变化曲线

其中,两图的总能量曲线几乎都是水平,说明碰撞前后的能量守恒,并且沙漏能均未超过总能量的 5%,仿真可靠性高。随着碰撞的进行,系统动能逐渐减小,不断转换为内能,都在 0.025 s 左右趋于平衡。

2.2 碰撞变形分析

Y0 位置的行人下肢-车辆的碰撞时序图如图6所示,在时间 2 ms 的时候小腿开始接触微型客车的蒙皮,随着碰撞的进行,蒙皮不断变形;在 16 ms 的时候开始接触到横梁钢板,小腿的膝关节弯曲角度开始变大,并在 24 ms 左右的时候弯曲角度达到最大。Y400 位置的行人下肢-车辆的碰撞的时序图如图7所示,由于 Y400 位置在蒙皮的侧边,蒙皮凹陷,在 4 ms 的时候小腿开始接触蒙皮,随后蒙皮开始变形;在 16 ms 的时候开始接触横梁,膝关节开始弯曲,在时间 24 ms 左右的时候小腿达到最大弯曲角度。

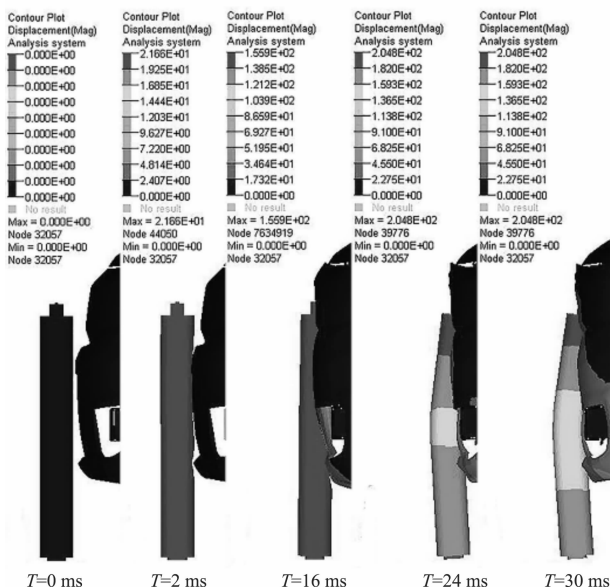


图 6 Y0 位置碰撞时序图

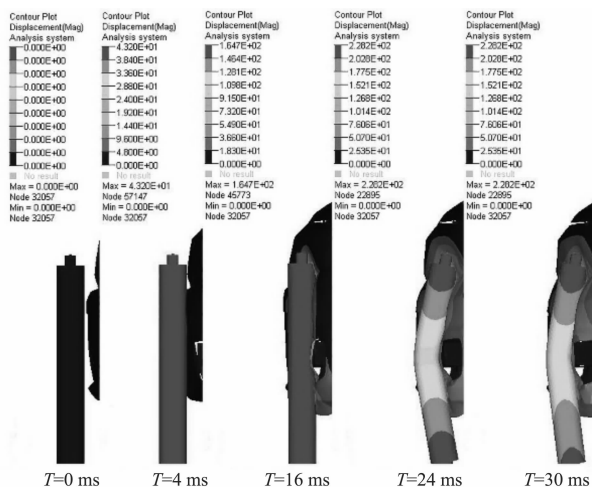
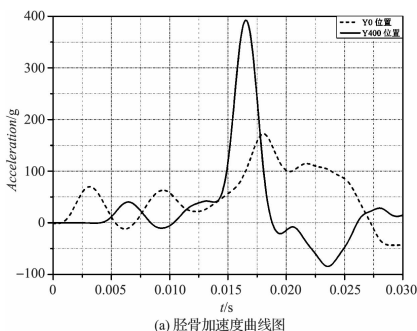
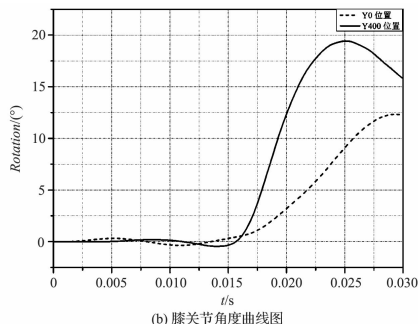


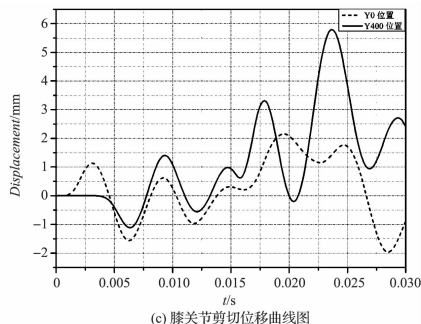
图 7 Y400 位置碰撞时序图



(a) 胫骨加速度曲线图



(b) 膝关节角度曲线图



(c) 膝关节剪切位移曲线图

图 8 实验结果指标曲线图

2.3 保护性能分析

本研究输出的 3 个评价指标分别在 LS-DYNA 计算结果中的 nodout 文件和 deforce 文件中提取,通过数据滤波等处理方式得到了胫骨加速度曲线图、膝关节弯曲角度曲线图和膝关节剪切位移曲线图,相关曲线图如图 8 所示。在原微型客车的 Y0 位置碰撞中,最大胫骨加速度为 172.6 g,膝关节最大弯曲角度为 12.8°,最大关节剪切位移为 2.3 mm。但是在 Y400 位置碰撞中,最大胫骨加速度为 386.4 g,膝关节最大弯曲角度为 19.2°,膝关节最大剪切位移为 5.7 mm。本研究将数据和 Euro-NCAP 规定的指标对比,可以发现 Y0 位置的数据未超过规定要求但是十分接近规定值,而 Y400 位置的数据远超过规定值。上述情况的主要原因为 Y0 位置的蒙皮凸出,蒙皮到横梁的距离较远,小腿碰撞蒙皮时,蒙皮的变形范围较大,起到了一定的缓冲作用,吸收了部分能量。而 Y400 位置的蒙皮凹陷,离横梁的距离较近,碰撞的过程中蒙皮变形范围较小,缓冲距离较小,碰撞过程中蒙皮吸收的能量比 Y0 位置的能量少,同时此处的后端是车辆的纵梁结构,刚度较横梁中部大很多,所以 Y400 位置的胫骨加速度比 Y0 位置大的多。碰撞过程中蒙皮下端支撑小腿的刚度不足,对小腿的支撑作用不明显,从而导致两位置的膝关节弯曲角度分别接近和超过了法规要求。由于微型客车的前部保险杠系统高度较高,蒙皮尺寸较大且圆滑过度,可以很好地减小膝关节剪切位移,在各工况碰撞过程中膝关节剪切位移值均未超过法规要求。

3 保险杠系统结构优化

行人保护的结构设计核心之一是变形空间的设计^[9],由于该微型客车在设计过程中并未考虑行人保

护,在蒙皮和横梁之间未设置任何的吸能结构来吸收碰撞过程中的能量来减小碰撞过程中对行人腿部的伤害;同时也未设置小腿支撑结构来减小碰撞过程中的膝关节弯曲角度。为了使该微型客车的前保险杠系统达到法规要求,笔者通过观察发现该款微型客车前部

蒙皮离横梁结构有一定的距离,该空间的设置为保护行人下肢对前保险杠系统重新设计优化奠定了一定的空间基础。根据文献[10],能够满足胫骨加速度峰值和膝关节弯曲角度峰值要求的车前端结构,一般都能满足膝关节剪切位移峰值的要求。

考虑不改变车辆的原有造型与结构布置,本研究将在蒙皮和横梁之间布置缓冲泡沫和可压溃的薄壁吸能板结构来吸收碰撞过程中的一部分能量以减小对膝关节的伤害;同时根据蒙皮下部曲面造型,通过 CATIA 创成式设计技术设计出与蒙皮相匹配的曲面小腿支撑结构,增加下部支撑刚度,防止小腿过度弯曲从而有效的保护行人下肢。

方案一如图 9 所示,采用吸能泡沫和曲面小腿支撑钣金结构,泡沫材料为 EPP 泡沫^[11],其密度为 $3 \times 10^{-8} \text{ kg/mm}^3$,以粘结的方式固定在横梁上;小腿支撑结构采用 2 mm 厚的钣金材料,其密度为 $7.8 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$,前部以卡扣的方式与蒙皮下部结构连接固定,后部通过螺栓连接的方式与水箱下横梁底部实现固定。

方案二如图 10 所示,采用薄壁吸能钢板和曲面小腿支撑钣金结构,薄壁吸能钢板厚度为 1 mm,材料屈服强度为 195 MP,密度为 $7.8 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$,薄壁吸能板上加以一定数量的圆孔,工程中可以调整圆孔尺寸和距离从而获得与小腿相匹配的刚度。吸能钢板通

过焊接的方式与横梁实现连接也可以以螺栓连接的方式与横梁相连,小腿支撑结构连接方式与方案一相同。

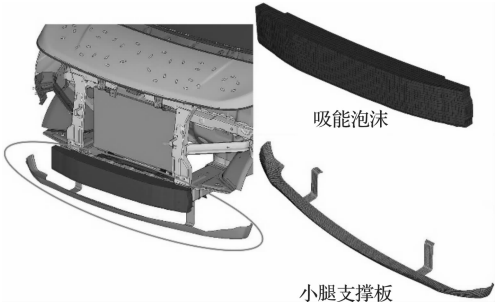


图9 优化方案一结构示意图

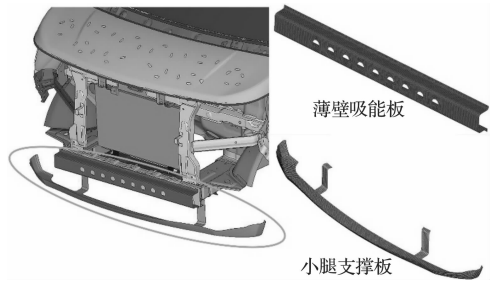


图10 优化方案二结构示意图

本研究将优化后的结构分别在 Y0 位置和 Y400 位置分别建立行人下肢-车辆有限元碰撞模型再通过 LS-DYNA 求解计算,然后用 Hyperview 后处理器提取计算结果。数据处理后得到的腿部损伤结果对比曲线图如图 11 所示,优化前、后峰值结果对比如表 1 所示。

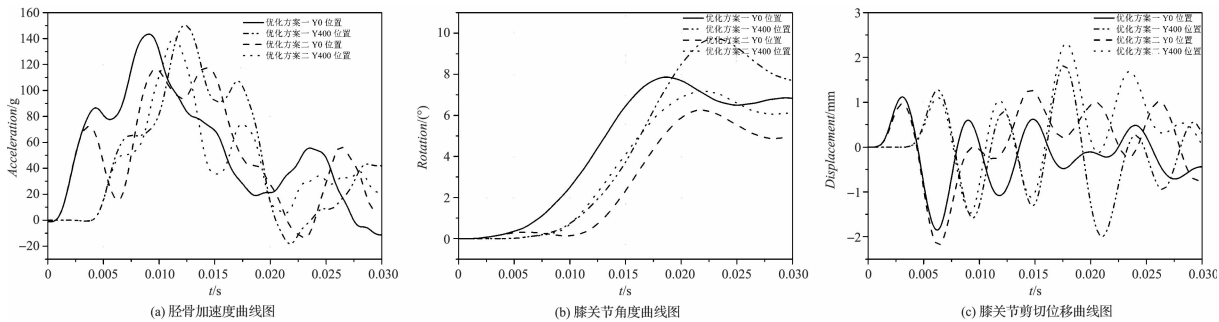


图11 腿部损伤结果对比曲线图

表1 优化前后峰值结果对比

工况	胫骨加速度/g	膝部弯曲 角度/(°)	膝部剪切 位移/mm	加速度改进 百分比/%	弯曲角度改进 百分比/%	剪切位移改进 百分比/%
原车 Y0 位置	172.6	12.8	2.3			
原车 Y400 位置	386.4	19.2	5.7			
方案一 Y0 位置	143.4	7.9	1.9	16.9	38.3	17.4
方案一 Y400 位置	149.2	9.7	2.0	61.4	49.5	64.9
方案二 Y0 位置	117.4	6.3	2.2	32.0	50.8	4.3
方案二 Y400 位置	140.7	7.2	1.9	63.6	62.5	66.7

本研究将优化前后的结果进行对比分析,该微型客车安装吸能结构和小腿支撑结构后,小腿受到的伤害值明显小于优化前的伤害值,而且这两种优化方案的两个位置的 3 个行人腿部保护指标值均未超过法规指标。优化方案一的碰撞过程中,小腿在碰撞蒙皮之后,与蒙皮一起压缩吸能泡沫,吸能泡沫在压缩过程中吸收了一定的能量,同时在小腿支撑的作用下,有效地控制腿部运动状态,从而有效减小胫骨加速度和膝关节弯曲角度;在优化方案二碰撞过程中,蒙皮在小腿的碰撞下,随小腿一起压溃薄壁吸能板,从而吸收了大量的能量,并且在小腿支撑结构的作用下有效地保护了行人下肢。

其中,在 Y400 位置行人保护的性能大幅提高,优化方案一的工况下,胫骨加速度峰值减小了 61.4%,膝关节最大弯曲角度减小了 49.5%,膝关节最大剪切位移减小了 61.4%。优化方案二的工况下,胫骨加速度峰值减小了 63.6%,膝关节最大弯曲角度减小了 62.5%,膝关节最大剪切位移减小了 66.7%。

4 结束语

本研究首先通过建立某微型客车的行人下肢-车辆碰撞有限元模型,对微型客车的原保险杠系统进行行人下肢保护性能仿真,通过分析可知,该微型客车不符合法规对行人保护的要求。然后本研究基于减小胫骨加速度和膝关节最大弯曲角度的目标提出两种优化方案,最后将优化后的两个碰撞位置的 3 个行人下肢伤害值与改进前进行对比分析。结果表明,两种方案都能使伤害值减小到法规要求范围内,有效地提高了该微型客车的行人保护性能,同时对比发现方案二薄壁吸能板结构比方案一吸能泡沫结构更有利于保护行人下肢,为今后的微型客车考虑行人保护的前保险杠系统设计提供参考,具有重要的参考价值和

现实意义。

参考文献 (References):

- [1] 占 强. 行人保护刻不容缓 +《欧洲行人保护指令》实施二周年记[J]. 世界汽车, 2007(11): 44-47.
- [2] LAWRENCE G J L, HARDY B J. Pedestrian Safety Testing using the EEVC Pedestrian Impactors [C]. International Techhical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Washington: National Highway Traffic Safety Advnintistration, 1998: 2131-2144.
- [3] 黄 俊. 面向行人下肢碰撞保护的汽车前端结构快速优化设计研究[D]. 北京: 清华大学汽车工程系, 2013.
- [4] 许莹莹. 基于低速碰撞和行人腿部保护的前保险杠系统研究[D]. 长沙: 湖南大学机械与汽车工程学院, 2011.
- [5] 穆文浩. 基于行人下肢保护与低速碰撞的前保险杠系统优化设计[D]. 长沙: 湖南大学机械与运载工程学院, 2013.
- [6] 刘庭志, 陈吉清. 汽车行人保护开发与研究进展[J]. 汽车实用技术, 2012(1): 17-22.
- [7] VAN RATINGEN M, WILLIAMS A J. The european new car assesment programme[J]. The Journal of the Australasian College of road safety, 2014, 25(2): 52-55.
- [8] 钱立军, 宋 佳, 谷先广. 基于行人小腿保护的保险杠结构稳健性优化设计[J]. 中国机械工程, 2015(7): 982-987.
- [9] 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.
- [10] 张志飞, 李 勋, 徐中明, 等. 面向行人腿部保护的保险杠吸能结构优化[J]. 汽车工程, 2016(1): 42-46, 64.
- [11] 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:

倪士林, 袁廷辉, 刘会霞, 等. 基于行人保护的某微型客车前部结构设计[J]. 机电工程, 2017, 34(2): 125-130.

NI Shi-lin, YUAN Ting-hui, LIU Hui-xia, et al. Frontal structure design of a mini-bus based on pedestrian protection[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(2): 125-130.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>