

The Application of Concept Design and FE Simulation Assessment in the Design of Pedestrian-friendly Vehicle

Miao Qiang¹, Wang Dazhi², Ma Meilin², Liu Junyong²

1. Tongji University, 2. SAIC Technical Center.

Abstract: The optimization of contact characteristics of impact areas of pedestrian lower leg was carried out with the software of mode FRONTIER and MADYMO, aiming to make the researched vehicle design not only can meet the requirements of 2003/102/EC Directive Phase I, but also can minimize the required deformation space. Then the FE simulation assessment was carried out to further assess the pedestrian protection performance of the researched vehicle, and some amendments were made to improve its pedestrian protection performance. The combination of concept design and FE simulation assessment is innovative and useful for the design of pedestrian-friendly vehicle.

Keywords: Pedestrian protection, Lower leg impact, Concept design, Simulation assessment

概念设计与有限元仿真评估方法在行人腿部保护车身设计中的应用

苗强¹, 王大志², 马美林², 刘军勇²

1. 同济大学 2. 上汽集团技术中心

摘要: 综合运用 mode FRONTIER 和 MADYMO 软件, 以上汽自主研发的某车型为研究对象, 对小腿碰撞区域的接触刚度进行优化设计, 在满足 2003/102/EC 第一阶段法规要求的前提下, 获得腿部碰撞区域所需的最小变形空间, 初步检查研究车型的行人保护性能; 然后结合有限元仿真分析, 进一步评估该车该车型的小腿保护性能, 并进行了适当改进, 仿真评估结果表明改进后的车身能够满足 2003/102/EC 第一阶段法规要求。本文综合使用概念设计与有限元分析方法评估车身的行人保护性能, 具有一定的理论创新性和工程实用价值。

关键词: 行人保护, 腿部碰撞, 概念设计, 仿真评估

1 前言

行人碰撞保护已经成为当今汽车被动安全研究领域的新热点。车身前端造型及碰撞区域的接触刚度直接影响行人腿部碰撞保护性能。合理设计车身前端造型, 合理分布碰撞区域的接触刚度是行人腿部碰撞保护研究的关键技术。

欧盟在 2003 年 11 月颁布了行人碰撞法规 2003/102/EC, 该法规分两阶段执行, 第一阶段始于 2005 年 10 月 1 日, 第二阶段始于 2010 年 9 月 1 日。两阶段法规中小腿碰撞试验均采用 EEVC 小腿冲击器, 实验条件相同, 评价指标有差异^[1], 见图 1。

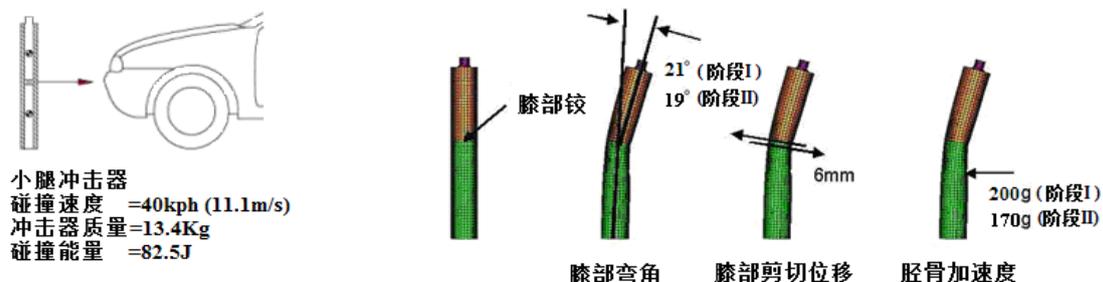


图 1 2003/102/EC 指令小腿碰撞试验及伤害值要求

2 行人腿部伤害机理及车身设计原则

2.1 行人腿部伤害机理

在行人与车辆的碰撞过程中，小腿受伤主要是因为小腿和前保险杠相撞产生弯曲力矩，受伤形式主要表现为骨折；而膝关节受伤主要由于膝关节直接与保险杠相撞或由小腿与保险杠相撞，而大腿运动相对滞后引起的，受伤的形式主要表现为韧带拉伤和骨骼骨折。小腿和膝盖的伤害主要和前保险杠、引擎罩前沿和小腿支撑区域的形状和接触刚度有关^[2]。

2.2 有利于行人小腿碰撞保护的车身设计原则

- (1) 保证保险杠横梁前部有足够的变形空间，可以有效缓冲腿部冲击载荷，吸收能量。
- (2) 在保险杠横梁前部添加泡沫或吸能结构，优化其刚度，可以达到较好的保护效果。
- (3) 通过合理设计保险杠横梁的高度，可以减小膝部的剪切位移；通过在扰流板位置增加小腿支撑并合理设计其刚度，可以很好地控制小腿的运动姿态。

3 小腿碰撞区域接触刚度优化设计

小腿碰撞区域的接触刚度是影响小腿伤害程度的关键因素。下文综合运用 mode FRONTIER 和 MADYMO 软件，以 2003/102/EC 第一阶段法规相关要求为约束条件，以小腿碰撞区域变形空间最小为设计目标，对小腿碰撞区域接触刚度进行优化设计。

3.1 小腿伤害的主要影响因素

在小腿碰撞区域，与小腿发生接触的车身区域主要有引擎罩前沿 (BL)、保险杠 (BU) 和小腿支撑 (SP)，把这三个区域的接触刚度曲线作为研究对象。为了便于分析，将刚度曲线进行适当简化，如图 2 所示，简化后的曲线只含有两个变量，即屈服力 F 和最大变形量 S ，其变化范围列于表 1 中。

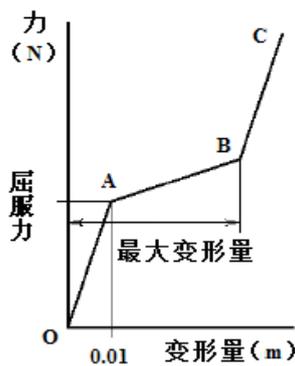


图 2 接触刚度曲线（简化）

变量	简写	下限	上限
引擎罩前沿屈服力 (N)	BLF	1000	9000
引擎罩前沿最大变形 (m)	BLS	0.01	0.25
保险杠屈服力 (N)	BUF	1000	9000
保险杠最大变形 (m)	BUS	0.01	0.15
小腿支撑屈服力 (N)	SPF	1000	9000
小腿支撑最大变形 (m)	SPS	0.01	0.15

表 1 刚度曲线变量及变化范围

3.2 概念设计模型

选取两个车身纵向截面为例进行分析：中心纵向截面 ($Y=0$) 和侧边纵向截面 ($Y=-530$)。将车身上前端结构简化成引擎罩前沿、保险杠和小腿支撑三个区域的椭球体，椭球体的大小及位置与车身上前端造型和结构基本吻合，见图 3。

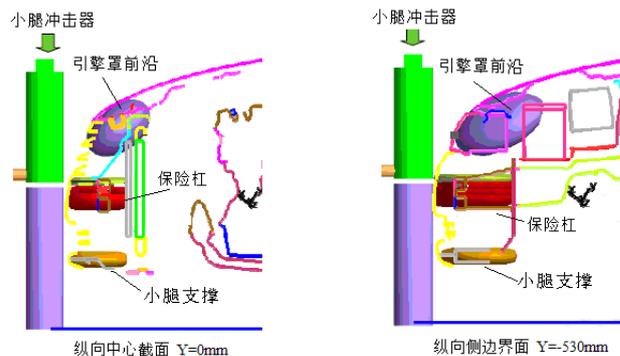


图 3 行人小腿碰撞概念设计模型

2.3 参数敏感度分析



图 4 参数灵敏度分析结果

参数敏感度分析结果如图 4 所示。影响膝部弯曲角的参数主要是保险杠和小腿支撑屈服力 (BUF 和 SPF); 影响膝部剪切位移的参数主要是保险杠屈服力 (BUF); 影响胫骨加速度的参数主要是保险杠最大变形量和 (BUS) 和小腿支撑屈服力 (SPF)。

2.4 参数优化设计

(1) 优化设计的约束条件

优化设计的约束条件为 2003/102/EC 第一阶段法规允许的最大伤害值的 80%。

表 2 优化设计的约束条件

伤害指标	2003/102/EC 第一阶段指标 80%
胫骨加速度	160g
膝部弯曲角	16.8°
膝部剪切位移	4.8mm

(2) 优化设计目标

优化设计目标是把碰撞所需的吸能空间最小化。

(3) 优化设计结果

对参数进行敏感度分析之后, 在 80% 伤害指标的约束条件下, 以最小化碰撞吸能空间为设计目标, 使用 mode FRONTIER 和 MADYMO 软件对所选参数进行优化设计。优化设计结果如图 5 和表 3 所示。

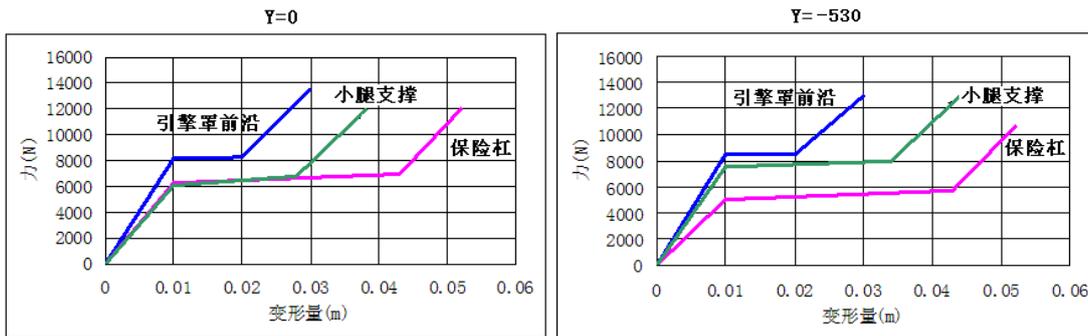


图 5 中心纵向截面 (Y=0) 和侧边纵向截面 (Y=-530) 上的最优接触刚度曲线

表 3 优化设计后各区域所需最小变形空间

	保险杠区域		小腿支撑区域		引擎罩前沿
	中心截面	侧边截面	中心截面	侧边截面	
最小变形空间	41.5mm	42mm	28 mm	35 mm	25mm

2.5 研究车型行人腿部保护变形空间检查

研究车型处于工程化初期阶段, 造型已基本确定, 利用上述优化结果检查其行人保护变形空间。假设保险杠吸

能泡沫被压缩 70%，在中心纵向截面，蒙皮与保险杠横梁间距为 79mm，可用变形空间 56mm（大于 41.5mm）；在侧边纵向截面，间距为 40mm，可用变形空间 28mm（小于 42mm），所以保险杠中心区域变形空间充足，而两侧变形空间不足。

在小腿支撑区域，由于小腿支撑只有两端被固定，其中间部分在受到撞击时，没有足够的支撑，导致不仅材料被压缩，形状也会发生较大变化，所以较难判断该区域吸能空间是否符合要求。引擎罩前沿要求的变形空间较小（25mm），而且该区域对腿部伤害程度影响很小，在此不做考虑。

通过与概念设计结果的对比，研究车型的车身设计不能完全满足概念设计最小变形空间的要求，需要进行有限元仿真评估，进一步检查该车型的行人保护性能。

4 有限元仿真评估及改进

3.1 有限元仿真评估

研究车型造型已经基本确定，材料也已初步选定，建立该车型前端车身的有限元模型，如图 6 所示，按照 2003/102/EC 法规的试验条件进行仿真计算，仿真结果如表 4 所示。

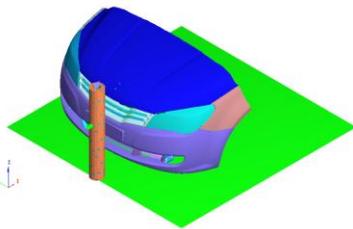


图 6 仿真模型

表 4 仿真结果

	胫骨加速度 (g)	膝部弯角 (°)	剪切位移 (mm)
Y=0mm	164	31.4	2.4
Y=-530mm	175	25.4	3.0

红色:超过法规值; 黄色:超过目标值; 绿色:符合目标

仿真结果表明，在中心纵向截面和侧边纵向截面两个位置，胫骨加速度都超过目标值（160），膝部弯角剪切位移超过法规值（21°），只有膝部剪切位移符合目标要求。

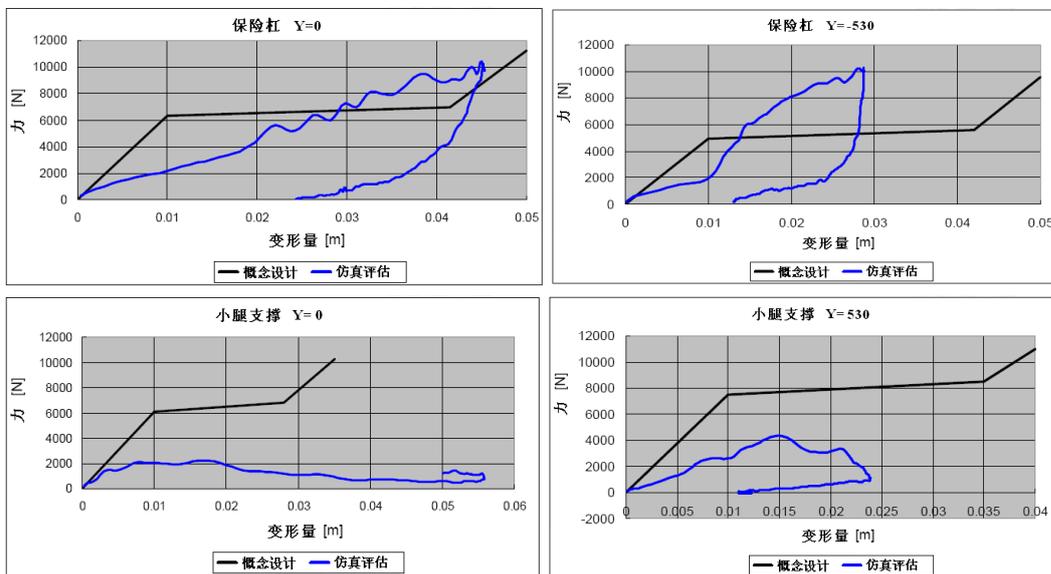


图 7 仿真结果刚度曲线与概念设计最优刚度曲线的对比

把保险杠和小腿支撑区域的刚度曲线与概念设计最优刚度曲线相比（见图 7），可以看出保险杠区域没有明显的屈服阶段，表明刚度过大，应减小其刚度；小腿支撑区域尤其是中心区域的屈服力过低，吸能过程缓慢，应提高其刚度。

3.2 改进设计

基于上述分析结果，提出以下改进措施：把保险杠吸能泡沫的刚度减小为原来的 0.2 倍，小腿支撑的材料由 PP+EPDM+T15 替换为 ABS 材料。改进后的伤害值都符合目标要求。

表 5 改进前后的仿真结果对比

	胫骨加速度(g)		膝部弯角 (°)		膝部剪切位移(mm)	
	改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后
Y=0mm	164	126	31.4	14.6	2.4	1.4
Y=-530mm	175	131	25.4	15.1	3.0	2.1

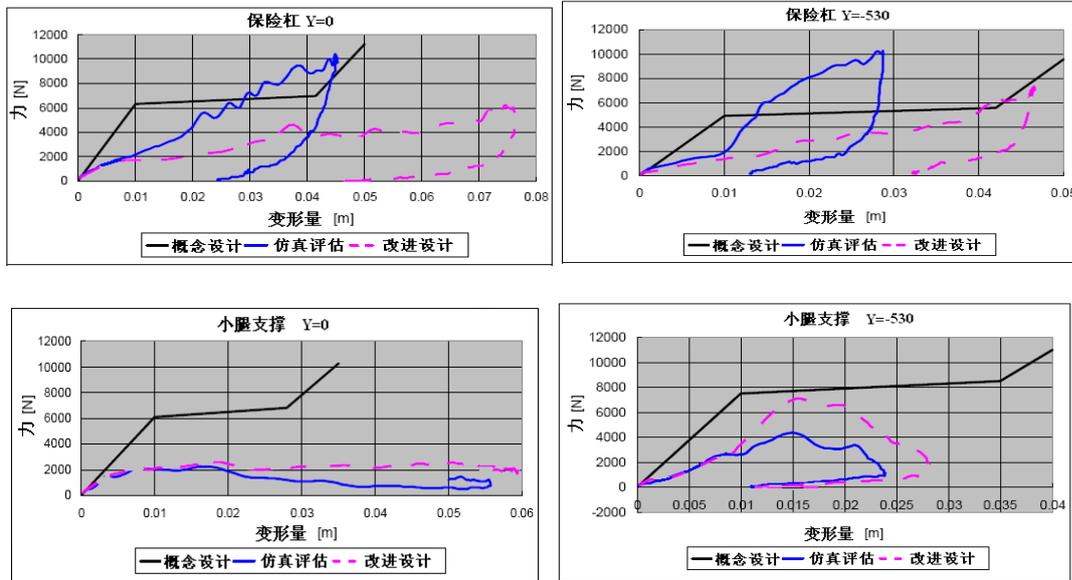


图 8 改进前后的仿真结果刚度曲线与概念设计最优刚度曲线的对比

由刚度曲线对比可知，改进设计后保险杠区域出现了较明显的屈服阶段，小腿支撑区域的刚度也有所提高。

5 结论

(1) 引擎罩前沿、保险杠和小腿支撑的接触刚度对行人腿部伤害程度有重要影响，其中影响行人膝部弯曲角度的参数主要是保险杠和小腿支撑的屈服力（BUF 和 SPF）；影响膝部剪切位移的参数主要是保险杠屈服力（BUF）；影响胫骨加速度的参数主要是保险杠最大变形量和（BUS）和小腿支撑屈服力（SPF）。

(2) 通过概念分析对接触刚度进行优化设计，可以在满足相关法规要求的约束条件下，寻求行人腿部碰撞区域各部件接触刚度的平衡，获得行人腿部碰撞区域的车身变形空间最小值，为基于行人腿部安全的车身设计提供重要参考。

(3) 由于车身结构复杂性和其他设计因素的制约，概念设计方法也存在一定的不足，尚不能准确评估车身的行人保护性能，还需要有限元仿真分析及工程经验作辅助。结合概念设计和有限元仿真分析，可以较好的完成行人保护车身的开发，该方法具有一定的理论价值和较高的工程使用价值。

参考文献

[1] DIRECTIVE 2003/102/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL OF 17 NOVEMBER 2003[S].Official Journal of the European Union.2003

[2] 龚燕尧,朱大勇.行人保护法规及有利于行人保护的车身结构[J].北京汽车. 2005 年 06 期.33-38