

Parametric design and optimization method of vehicle front end structure based on pedestrian lower limb injury analysis

Qiang He^{1,2}, Yue Fu^{1,3}, Huijie Xu^{1,3}, Ruyi Chen^{1,2}, Ju Wang^{1,2}, Huili YU^{1,2}, Taisong CUI^{1,2}
Hui ZHAO^{1,2}

¹State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Technology, Chongqing, China, 401120

²Chongqing Changan Automobile Co Ltd, Chongqing, China, 401120

³Chongqing University, Chongqing, China, 400044

Email:329117120@qq.com

Abstract: As pedestrian protection tests and evaluations have been officially incorporated into new C-NCAP, more stringent requirements have been placed on pedestrian protection performance. In order to reduce the injury of the front end structure of the vehicle to the pedestrian's lower extremity during the collision, this paper selected the key components which have significant influences on the pedestrian's leg protection performance based on the existing CAE half-vehicle model, including front bumper, front-cover plate, upper impact pillar, impact beam and lower support plate, to form a simplified model and conducted parametric modeling based on it. Then, an integrated process including the design of experiment (DOE), the approximate model technology and the optimization algorithm was proposed. The pedestrian lower extremity injuries were used as the optimization target, and match and optimize the front end structure parameters. Finally, an optimal configuration for parameter matching of key components of the front end structure for pedestrian protection was established, which effectively reduced the pedestrian lower extremity injuries.

Keywords: parametric modeling; pedestrian protection; approximate model; optimization design

面向行人下肢损伤分析的汽车前端结构参数化设计和优化方法

何强^{1,2}, 付月^{1,3}, 许慧杰^{1,3}, 陈如意^{1,2}, 王菊^{1,2}, 禹慧丽^{1,2}, 崔泰松^{1,2}, 赵会^{1,2}

¹汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室, 重庆, 中国, 401120

²重庆长安汽车股份公司, 重庆, 中国, 401120

³重庆大学, 重庆, 中国, 400044

Email:329117120@qq.com

摘要: 自从行人保护测试及评价标准正式纳入 C-NCAP 中, 汽车行人保护性能面临更加严苛的设计要求。本文为减小正面碰撞 (Y=0) 中汽车前端结构对行人下肢的伤害, 在已有的 CAE 半车模型基础上, 选择对行人腿部保护性能影响显著的关键部件——前罩板、上部防撞杆、防撞横梁和下支撑板, 以构成简化模型, 并基于简化模型进行参数化建模。然后, 提出了一套整合集成试验设计方法, 代理模型技术, 全局优化算法的一体化流程, 以减小行人下肢损伤为优化目标, 对关键部件的空间相对布置进行匹配优化。最终, 建立了一个汽车前端关键部件的布置参数匹配的最优构型, 有效地降低了行人下肢损伤指标。

关键词: 参数化建模; 行人保护; 代理模型; 优化设计

1 引言

所有道路交通死亡者中半数是人、骑自行车者和骑摩托车者, 而行人是最脆弱的道路使用者之一, 占世界道路交通事故相关死亡的 22%^[1]。在中国, 行人与汽车的碰撞事故占有所有交通事故的 27%^[2]。在碰撞过程中, 行人的

下肢受到剪切和弯曲作用,可能会导致膝关节脱位,韧带撕裂,骨折和其他伤害,甚至导致永久性残疾^[3-5]。

汽车行人保护性能的设计开发已经逐渐受到各国汽车行业和测试法规的强烈关注,并且已经被纳入 C-NCAP 测试规程中。目前, C-NCAP 中对行人保护的评价包括车辆头型试验区域和腿型试验区域。可得到的最高分数为 15 分,其中头型试验区域最高得分为 12 分,腿型试验区域最高得分为 3 分^[4-5]。C-NCAP 中增加了行人保护性能评价,给国内市场的车辆前部形状和设计提出了新的挑战。

行人保护设计是一项综合设计,需要考虑前端造型,发动机机舱的总体布置,结构设计,材料选择和测试方法等各种因素。主要影响行人腿部保护性能的车辆前端部件包括前保险杠,前大灯,防撞横梁,吸能装置,下部支撑件和发动机罩^[6]。参数化设计,作为仿真分析的重要组成部分之一,通过修改定义的几何,材料和尺寸等参数来自动完成对模型相关部分的更改,从而实现对模型的驱动更新^[7-8]。参数化设计极大地提高了设计速度,同时使用户易于修改和重新设计。利用试验设计以及插值和回归理论建立性能指标的近似模型,并在各种参数值下快速获得给定设计方案的性能指标值,是实现多目标优化的有效方法^[9-11]。

HARRIS, J^[12-14]等对评估行人保护的测试方法进行了一般性描述,讨论了其对汽车设计的重要性,并开发一些测试方法,探索更先进的技术来保护行人并评估碰撞安全性能。Bose D^[15-16]等通过实验数据和数值模拟结果的对比,讨论了人车碰撞中的胫骨损伤的耐受性能,以及膝关节外翻弯曲和剪切损伤机理。Yukou T^[17-18]等在开发试验腿型的过程中对小腿损伤测量值的关键影响因子进行了探索,并实现与前腿型在生物仿真度方面的性能提升。Bingyu Wang^[19]通过对 404 例行人下肢损伤的事故数据分析,对影响行人下肢 AIS2+损伤风险的汽车前端结构设计变量进行了探究。

由以上研究可知,研究者已经在寻求行人保护效果最大化的探索中积累了丰富经验。行人保护设计具有相当的技术挑战,在汽车工业界的车型设计开发实践中,面向下肢模块碰撞保护的车辆前端结构设计主要依赖于工程经验和计算仿真。本文深入分析了车前端结构设计参数对下肢模块损伤指标的影响机理,建立了一个参数化分析模型,为车型前期设计中协调车辆前端结构的部件布置的矛盾关系提供依据,为车型开发后期设计改进提供了高效的优化方法参考。本文面向 SUV 车型,对其前端结构进行参数化设计和布置,结合柔性腿冲击器模型,利用一系列 CAE 软件工具研究了车辆前端不同的结构参数对下肢损伤的影响,建立了一套行人下肢保护汽车前端结构参数匹配的最优构型,有效地降低了行人下肢损伤指标。

本文的后续部分组织如下:第二章,介绍提出的方法理论和技术路线,第三章,分析仿真结果,第四章,讨论总结并指出未来的工作。

2 模型参数化设计与优化

图 1 为本文提出的针对行人下肢损伤分析的参数优化技术路线,具体步骤为:

- 1) 简化仿真模型并验证其仿真精度;
- 2) 分析车辆前端部件参数特征,确定设计变量及其取值上下限,选定优化目标并以损伤测量值的法规高性能限值为约束条件;
- 3) 利用拉丁超立方试验设计方法对设计空间进行采样,批处理调用仿真模型计算获取 60 组设计变量匹配组合及损伤测量值;
- 4) 利用所获得的数据样本建立近似模型,并用确定性系数 R^2 评价指标检验模型的预测精度;
- 5) 选择 Multi-Island Genetic Algorithm 对优化问题进行迭代计算,并对近似模型预测的优化结果进行了仿真和验证。最后,分析优化结果并得出结论。

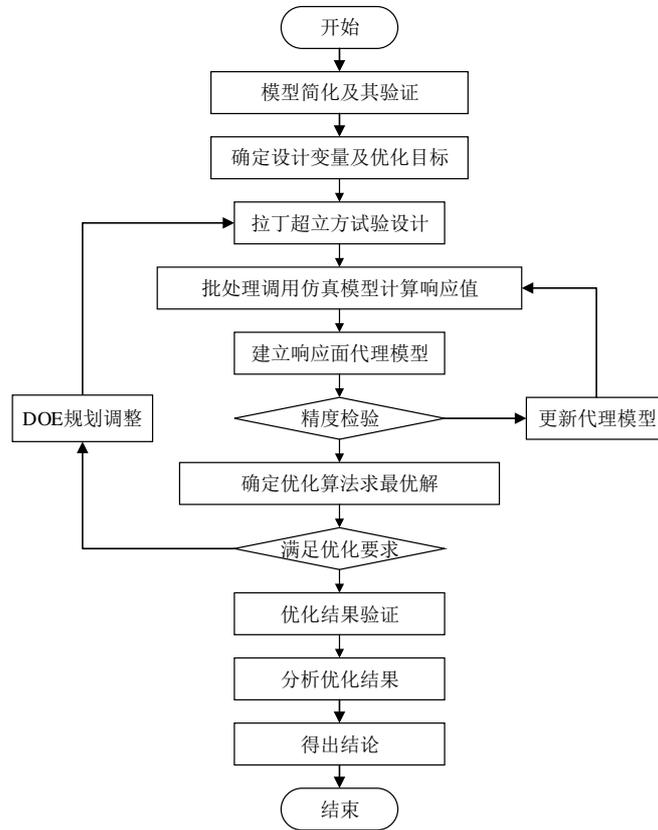


Figure 1. The proposed technical route for parameter optimization

图 1. 参数优化技术路线

2.1 模型简化及验证

本文选择如图 2 (a) 所示的 SUV 有限元模型来研究碰撞过程中汽车对行人下肢的伤害。为了便于前端结构的参数化研究和节省计算时间和资源，主要选取了前保险杠、前罩板、上部防撞杆、防撞横梁、下支撑板等来构成简化模型（图 2 (b)）。

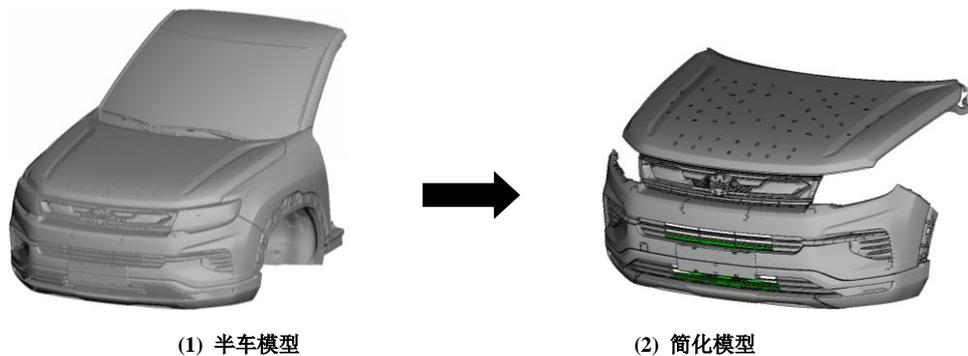


Figure 2. The SUV finite element model

图 2. SUV 有限元模型

柔性腿冲击器模型主要由预应力加载的肌肉、氯丁橡胶质皮肤、股骨、膝盖、胫骨、韧带等部分组成。整个腿部模型的各个关键部位设置了相应的传感器，其中，上、下膝盖骨之间分布了四个位移传感器用于测量膝部前后交叉韧带（ACL 和 PCL）、内侧副韧带（MCL）和外侧副韧带（LCL）的伸长量，胫骨上分布四个弯矩传

感器用于胫骨上弯矩，中上弯矩，中下弯矩和下弯矩值 T1，T2，T3 和 T4。柔性腿冲击器模型的结构及传感器位置分布如图 3 所示^[20]。

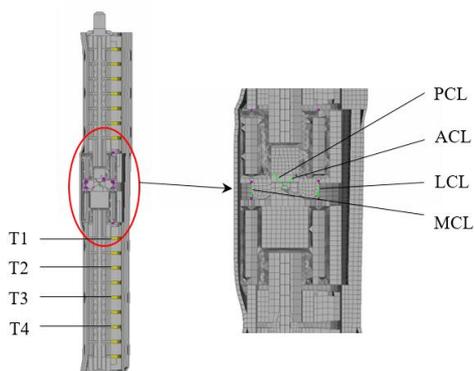


Figure 3. The structure and sensor position distributions of the Flex pedestrian legform impactor model
图 3. 柔性腿冲击器的结构及传感器布置

结合柔性腿冲击器模型和简化的有限元车体前端模型，以形成完整的行人下肢保护仿真系统，如图 4 所示。本研究的碰撞工况是全局坐标系中 $Y = 0$ 位置的正面碰撞。并赋予车辆模型初始速度为 11.1 m/s 。

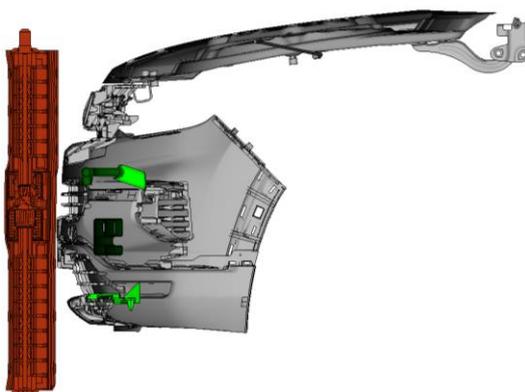


Figure 4. The split view of the complete simulation model and initial position of the front end components ($Y=0$)
图 4. 仿真模型剖视图和前端部件的初始位置 ($Y=0$)

为了验证模型的准确性和有效性，进行了一个碰撞实验（图 5）以校准仿真输出和实验输出数据之间的匹配。在实验中，将车辆固定在地面上，基于使用 BIA 测试系统提供的创新弹射器系统，将柔性腿冲击器模型垂直放置在活塞盘上，并通过液压驱动使其加速。并在碰撞点之前 1 米处以精确的目标速度释放，然后与测试车辆的前端结构发生碰撞，输出碰撞过程中韧带伸长量和胫骨弯矩值等损伤测量值。



Figure 5. Experimental setup

图 5. 实验设置

对比实验中高速摄像机捕获的碰撞状态和有限元模型输出状态，结构变形情况和腿部运动姿态的对比如图 6 所示。从比较中可以看出，有限元模型在各个时刻的结构变形趋势和程度以及腿型的运动姿态均与实验图像基本一致。

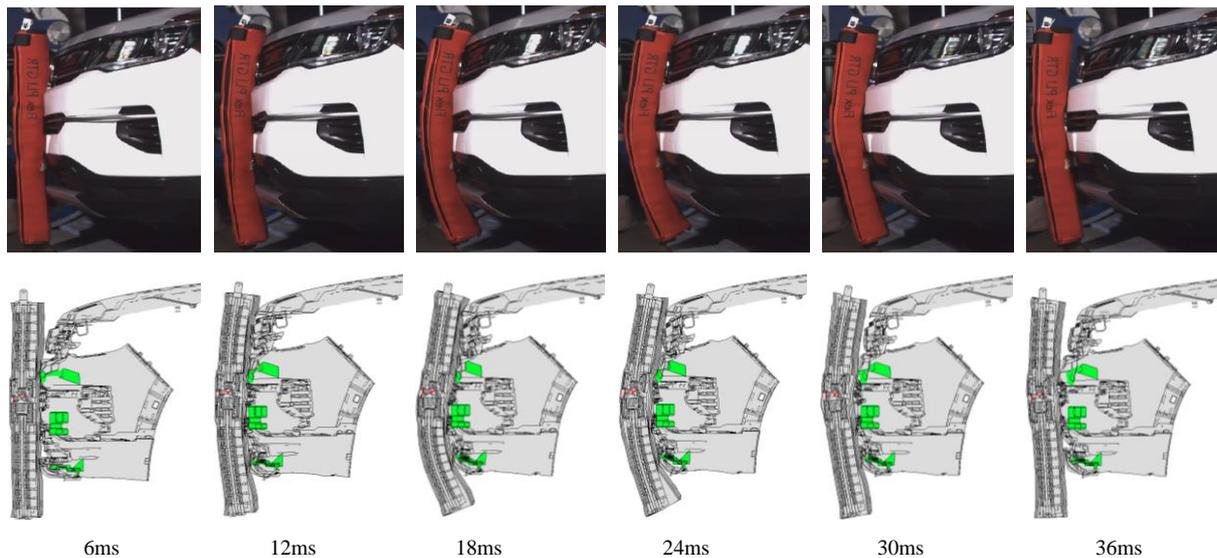


Figure 6. Test (up) and FE (down) model deformation and legform kinematics comparison

图 6. 实验（上）和有限元（下）模型的结构变形情况和腿部运动姿态对比

将仿真模型输出的腿部损伤测量值的时间历程曲线与实验数据进行对比。需要验证的曲线属性包括：曲线的波峰波谷对应时刻、峰值大小、曲线走势等特征。主要在于校准简化有限元模型中各部件的属性设置以及其与柔性腿冲击器模型的相互作用关系，提取 PCL, ACL, MCL 的拉伸量和 4 个腿部弯矩 T1, T2, T3, T4 等主要损伤测量指标进行验证。实验和仿真损伤测量值的时间历程曲线对比见图 7。

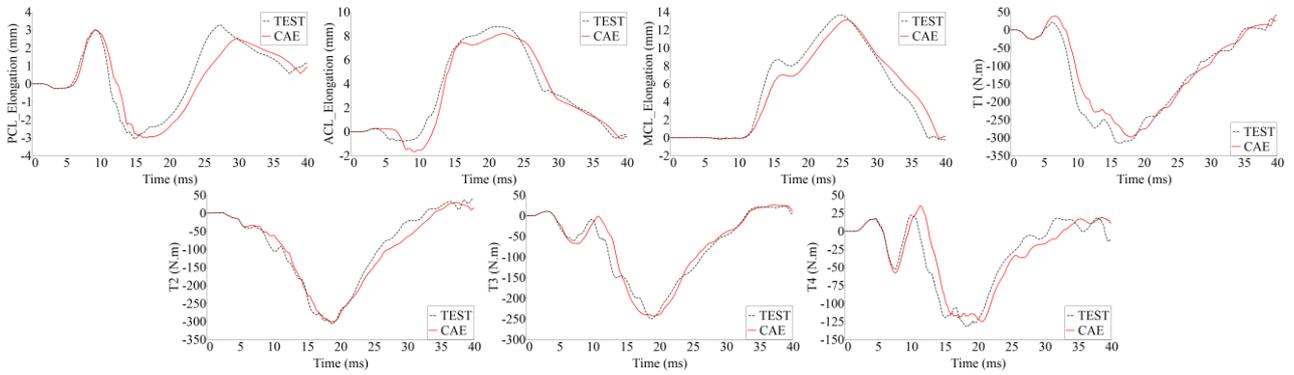


Figure 7. Comparison of test and simulation injury measures-time history curves
图 7. 实验和仿真损伤测量值的时间历程曲线对比

观察所有损伤测量值，可以发现仿真模型的峰值都稍低于实验数据。这可能是由于简化的有限元模型相比于真实车辆，其前端空间中缺少某些中间部件，拥有更大的缓冲空间，从而使前保险杠发挥更强的吸能作用。但总体来看，各损伤测量值的时间历程曲线仿真结果与实验结果的走势基本一致，捕捉到的主要峰值出现的时刻也一致。同时结合表 1，仿真模型计算出的损伤测量值相比于实验结果误差均控制在 10% 以内，故所建立的行人保护系统仿真模型模拟精度高，很可靠，可用于后续研究。

Table 1. Comparison of simulation and test data
表 1. 仿真和实验数据对比

测量值 类型	PCL	ACL	MCL	T1	T2	T3	T4
实验值	3.28	8.77	13.66	-316.0	-307.1	-250.0	-132.0
仿真值	3.02	8.19	13.12	-298.4	-301.5	-243.1	-125.1
误差	7.9%	6.6%	4.0%	5.6%	1.8%	2.8%	5.2%

2.2 参数化建模及样本获取

图 8 所示为搭建的一套基于 Bat 文件调用功能的腿部保护关键部件布置方案的集参数化设计、仿真计算、后处理结果提取为一体的自动化流程。

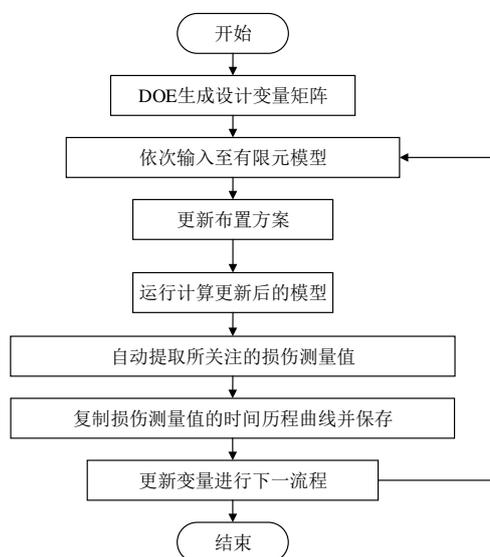


Figure 8. Automatic computing process
图 8. 自动化计算流程

首先进行模型的前处理。对各部件的所有安装点添加 6 自由度全约束，并设置其相对于柔性腿冲击器模型的接触类型。固定前罩板，选取与设计变量相关的上部防撞杆、防撞横梁、下支撑板构成一个模型文件。建立防撞杆、防撞梁、下支撑三个部件的 X 向和 Z 向的位置参数。在全局坐标系下创建为 pillar_x, pillar_z, beam_x, beam_z, low_x 和 low_z 等 6 个设计变量，设置各个变量的初始值及其取值范围（如表 2 所示），并添加至优化任务中。（如图 9 所示）

Table 2. Design variables and their ranges (mm)

表 2. 设计变量及其变化范围 (mm)

设计变量	初始值	下限	上限
pillar_x	0	-20	20
pillar_z	0	-40	0
beam_x	0	-20	20
beam_z	0	-20	20
low_x	0	-20	20
low_z	0	0	40

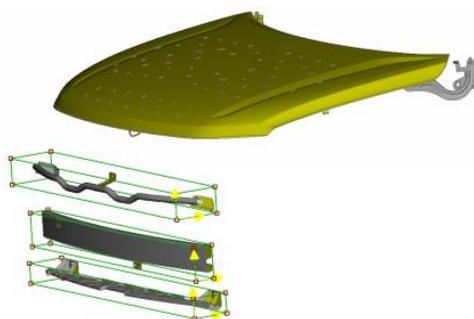


Figure 9. Variables setting
图 9. 变量设置

通过拉丁超立方体采样生成设计变量 DOE 矩阵，然后将其顺序输入到有限元模型中以更新前端部件布置方案。运行更新的模型并保存该模型和变量以进行此轮计算。然后从输出结果中提取并保存所关注的损伤测量指标曲线和数据。更新变量以驱动有限元模型自动更新布置方案，运行计算，直到最终获得 60 组样本数据。

2.3 构建近似模型多目标优化

随着有限元模型精度的提升和模型复杂程度的增加，直接通过有限元分析开展优化很难满足现代车身设计的要求^[21]。利用试验设计方法及插值与回归理论建立结构性能指标的近似模型，快速获取给定设计方案在各种参数取值情况下的性能指标值，是实现多目标优化的有效途径。近似模型是利用已知的数据样本对输入变量和输出变量进行拟合，得到的输入变量与输出变量的映射关系^[22]。近似模型可以用来预测未知点处的响应，在优化设计中，用近似模型来代替仿真模型进行优化设计，加快了计算速度，节约了计算成本。根据响应逼近函数形式的不同，近似模型近似方法主要包括响应面模型（RSM），Kriging 模型（KR）和径向基函数（RBF）等。

采用确定性系数 R^2 作为近似模型预测精度的评价指标， R^2 表明了模型对设计空间内样本数据的逼近程度， R^2 的取值范围为 0~1，其值越接近 1，逼近程度越高，则近似模型的有效性越高^[23]。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (1)$$

式中， y_i 为测试样本点的实际响应值， \hat{y}_i 为近似模型的预测值， \bar{y}_i 为测试样本点的实际响应值的均值， n 为测试样本的数量^[24]。在选择近似模型时，选用预测精度高的模型来进行行人保护系统的参数优化设计。

通过样本变量和响应来构造近似模型，利用交叉验证的方法选择 10 组样本数据来验证近似模型的预测精度。对各损伤测量指标分别建立 kriging（KR），响应面模型（RSM）和径向基函数（RBF）近似模型，采用 R^2 评价指标来衡量近似模型的预测精度。表 4 为各近似模型对各响应值的 R^2 值。表 5 为最终选取的各损伤测量指标的近似模型。

Table 3. R-squared prediction accuracy of each response corresponding to the approximate model

表 3. 各个响应对应近似模型的 R^2 预测精度

测量值 近似模型	PCL	ACL	MCL	T1	T2	T3	T4
KR	0.66	0.84	0.71	0.93	0.78	0.63	0.81
RBF	0.58	0.72	0.69	0.88	0.82	0.74	0.62
RSM	0.81	0.78	0.88	0.85	0.87	0.88	0.55

Table 4. The selected approximate models

表 4. 所选择的近似模型

测量值 近似模型	PCL	ACL	MCL	T1	T2	T3	T4
Model	RSM	KR	RSM	KR	RSM	RSM	KR

以减小损伤测量指标为优化目标，以 C-NCAP 法规规定的行人腿型试验的高性能值作为优化问题的约束条件，整个优化问题的数学描述可表示为：

Find $x_i, i=1, 2, \dots, 6$

To minimize $PCL, ACL, MCL, T1, T2, T3, T4$

Subject to $PCL \leq 10mm$

$ACL \leq 10mm$

$MCL \leq 22mm$

$Max\{T1, T2, T3, T4\} \leq 340N.m$

3 结果分析

利用 Multi-Island Genetic Algorithm 对各优化目标展开优化，各设计变量和损伤测量指标逐渐收敛至一个定值，表 5 展示了设计变量最后的优化解。从该表格可以看出 beam_x 和 beam_z 这两个变量最终在优化过程中收敛到边界，说明当这两个变量取较大值时，对减少腿部伤害可能更为有益。

Table 5. Initial and optimum design variables (mm)

表 5. 设计变量初始值和优化值 (mm)

设计变量	初始值	优化值
pillar_x	0	10.4
pillar_z	0	-23.9
beam_x	0	20
beam_z,	0	20
low_x	0	6.3
low_z	0	14.5

将优化方案的设计变量输入到仿真模型中运行计算，并输出相应的损伤测量峰值，以验证近似模型的预测精度并证明优化结果的有效性。表 6 中展示了近似模型的预测值与仿真输出值之间的误差。从表中可以看出，腿部损伤测量的预测值与仿真输出值之间的误差控制在 5% 以内（除了 T3 以外。影响 T3 的主要因素是下支撑板，由于这是塑料支撑，因此其变形模式更加复杂且规则性不明显，其近似模型预测精度不是很高。但是，只需要关注 T1~T4 的最大值，该碰撞工况的最大值通常为 T1 或 T2，所以 T3 的影响不大），表明近似模型对每个损伤测量的拟合精度都很高，因此优化结果是有效的。

Table 6. Comparison between approximate model and simulation of optimum scheme

表 6. 优化方案中近似模型预测值与 CAE 输出值的对比

测量值 类型	测量值						
	PCL	ACL	MCL	T1	T2	T3	T4
仿真值	2.63	7.20	11.11	-204.2	-211.6	-183.5	-96.9
预测值	2.52	7.20	11.35	-200.8	-217.8	-197.4	-98.9
误差	4.2%	0%	2.2%	1.7%	2.9%	7.0%	2.1%

从表 5~表 7 可以看出，防撞横梁向后移动和向上移动对减轻腿部伤害有显著影响。由于实际车辆中部件的空间布置受到一定限制，因此在 x 方向和 z 方向上仅占据 -20 到 20 mm 的移动范围。该优化结果对其他车辆防撞横梁的空间布置方案具有一定的参考意义。

Table 7. Injury measures output by the initial and optimum scheme

表 7. 初始和优化方案的损伤测量值

测量值 类型	测量值						
	PCL	ACL	MCL	T1	T2	T3	T4
初始值	3.02	8.19	13.12	-298.4	-301.5	-243.1	-125.1
优化值	2.63	7.20	11.11	-204.2	-211.6	-183.5	-96.9
降幅	13%	12%	15%	32%	30%	25%	23%

初始和优化方案的损伤测量值的时间历程曲线对比如图 10 所示。可以看出，各个损伤测量指标的峰值都有不同程度的降幅。其中，可能超过法规限值风险最大的 T1 和 T2 的降幅最为明显，分别达到了 32% 和 30%。说明，前罩板、上部防撞杆、防撞横梁和下支撑板空间布置的最佳参数匹配方案对减轻行人下肢损伤有明显的效

果。该结果为整体布置设计和零部件结构设计提供了有价值的参考。

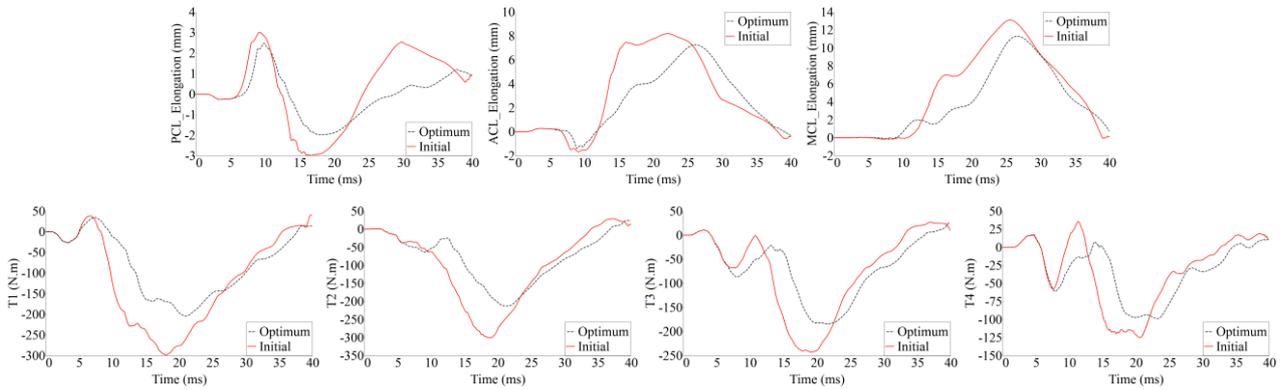


Figure 10. Comparison of initial and optimum injury measures-time history curves

图 10. 初始和优化方案的损伤测量值的时间历程曲线对比

图 11 是部分碰撞时刻的初始和优化方案的结构变形情况和腿部运动姿态对比。结果表明了腿部运动趋势和变形程度对损伤测量值的影响机理。防撞横梁向后的移动为汽车前部保险杠提供了更大的能量吸收空间，并且在碰撞过程中，保险杠的可变形距离变得更长。这种方案对减少胫骨的弯矩和韧带伸长量有很积极的作用。对于这种工况，腿型冲击器的膝盖在碰撞过程中的位置高于防撞横梁的位置，因此向上移动防撞横梁会减小其与膝盖之间的相对高度，改善膝部变形程度和损伤风险，从而大大减小膝盖韧带的伸长量。优化后的布置方案中腿部变形程度明显较小（特别是在第 18 毫秒），胫骨弯矩明显减小，这表明优化方案对腿部的保护效果有较明显的改善作用。

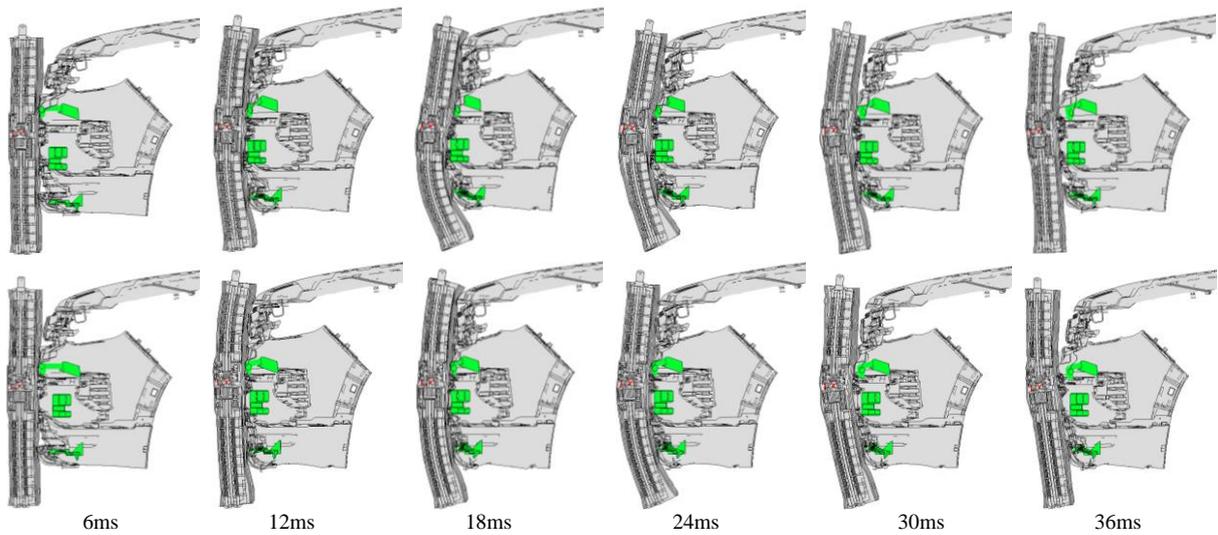


Figure 11. Initial (up) and optimum (down) model deformation and legform kinematics comparison

图 11. 初始（上）和优化（下）方案的结构变形情况和腿部运动姿态对比

4 不足和展望

本文仍有一些不足之处,其一是关于腿型与车体碰撞接触点的位置。这里只考虑了正面碰撞中腿部位于 $Y=0$ 的碰撞工况,在未来的工作中,对下肢损伤的评估应该更全面地考虑 $Y=100\text{mm}$, $Y=200\text{mm}$ 等位置的损伤测量值,以根据法规规程计算加权得分。另外,接下来应该尝试考虑更多的对行人下肢损伤影响较显著的变量因子,并深入分析各个损伤测量值对设计变量的敏感程度,将本文的研究方法拓展至更全面的前端结构设计及布置中。

5 讨论与总结

本研究深入分析了车前端结构设计参数对行人下肢损伤的影响机理。基于 SUV 有限元模型,对前端结构进行了参数化设计和布置,建立了参数化分析模型。结合柔性腿冲击器模型,利用一系列 CAE 软件工具研究了车辆前端不同的结构参数对下肢损伤的影响。搭建了一套基于批处理调用功能的腿部保护关键部件布置方案的集参数化设计、仿真计算、后处理结果提取为一体的自动化流程。然后,将试验设计方法,近似模型技术,全局优化算法结合,以减小行人下肢损伤测量指标为优化目标,对关键部件的空间相对布置方案进行匹配优化。最终,建立了一套基于行人下肢保护的汽车前端结构参数匹配的最优构型,有效地降低了行人下肢损伤测量值。为车型前期设计中协调车前端结构的部件布置的矛盾关系提供了重要依据,为车型开发后期设计改进提供了高效的优化方法。

致谢 (Acknowledgement)

本研究为汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室 2019 年度开放基金资助项目。课题编号为 NVHSKL-201909,特此感谢。

参考文献 (References)

- [1] Organization, World Health. "Global status report on road safety 2015." Injury Prevention 15.4(2015):286-286.
- [2] Traffic Management Bureau of the Public Security Ministry. "Statistics of road traffic accidents in PR of China (2016)." Beijing, China Communication Press. 2017.
- [3] Altai Z, Viceconti M, Offiah A C, et al. Investigating the mechanical response of paediatric bone under bending and torsion using finite element analysis[J]. Biomechanics and Modeling in Mechanobiology, 2018.
- [4] Mo F, Jiang X, Duan S, et al. "Parametric analysis of occupant ankle and tibia injuries in frontal impact." Plos One, 2017, 12(9):e0184521.
- [5] C-NCAP 管理中心. "C-NCAP 管理规则 (2018 年版)." 天津: 中国汽车技术研究中心, 2017.
- [6] Feng X, Wang D, Ma Z, et al. Structure-material integrated multi-objective lightweight design of the front end structure of automobile body[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2017(9):1-19.
- [7] Eltaweel A, Yuehong S U. Parametric design and daylighting: A literature review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 73:1086-1103.
- [8] Herrema A J, Wiese N M, Darling C N, et al. A framework for parametric design optimization using isogeometric analysis[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2017, 316:944-965.
- [9] Chen C, Zhan Z, Yu H, et al. An efficient decision-making framework for hybrid metamodeling[J]. Engineering Optimization, 2019, 51(10):1761-1776.
- [10] Yang J, Zhan Z, Zheng K, et al. Enhanced similarity-based metamodel updating strategy for reliability-based design optimization[J]. Engineering Optimization, 2016, 48(12):1-20.
- [11] Lv X, Huang X, Gu X, et al. Reliability-based multiobjective optimisation of vehicle bumper structure holes for the pedestrian flexible legform impact[J]. International Journal of Crashworthiness, 2016:1-13.
- [12] Harris J. PROPOSALS FOR TEST METHODS TO EVALUATE PEDESTRIAN PROTECTION FOR CARS// Thirteenth International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles. 1993.
- [13] Maki T, Asai T. Development of pedestrian protection technologies for ASV[J]. JSAE Review, 2002, 23(3):353-356.
- [14] Ptak M. Pedestrian safety: A new method to assess pedestrian kinematics. Transport. 34. 41-51. 10.3846/transport.2019.7081.
- [15] Chakravarty A B, Martinez A A, Quenneville C E. The injury tolerance of the tibia under off-axis impact loading[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2017, 45(6):1-9.
- [16] Bose D, Bhalla K S, Untaroiu C D, et al. Injury Tolerance and Moment Response of the Knee Joint to Combined Valgus Bending and Shear Loading[J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2008, 130(3):031008.
- [17] Yukou T, Fumio M, Hiroyuki O, et al. Development of Injury Probability Functions for the Flexible Pedestrian Legform Impactor[J]. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 2012, 5(1):242-252.
- [18] Isshiki T, Antona-Makoshi J, Konosu A, et al. Optimal Specifications for the Advanced Pedestrian Legform Impactor[J]. Stapp car crash journal, 2017, 61:373-395.
- [19] Wang B, Wang F, Otte D, et al. Effects of passenger car front profile and human factors on pedestrian lower extremity injury risk using German in-depth accident data[J]. International Journal of Crashworthiness, 2018:1-8.
- [20] Wang M S, Huang T J, Wu C H. Design and Validation of a Structural Flexibility Pedestrian Lower Legform[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 163:196-200.
- [21] 胡斌. 现代设计方法在汽车设计中的应用[J]. 科技资讯, 2017, 15(5):105-106.
- [22] Liu C S, Zhang K, Yang R. The FEM analysis and approximate model for cylindrical joints with clearances.[J]. Mechanism & Machine Theory, 2007, 42(2):183-197.

- [23] Gelman A , Goodrich B , Gabry J , et al. R-squared for Bayesian regression models[J]. The American Statistician, 2018:1-6.
- [24] CAMERON, A. C, F. A G. An R-squared measure of goodness of fit for some common nonlinear regression models[J]. Journal of Econometrics, 1997, 77(2):329-342.