

基于差分进化算法的 CPS 车辆孪生模型安全性能优化

郝玉庭, 金钰, 梁浩, 王跃建
国汽(北京)智能网联汽车研究院有限公司

【摘要】本文建立了某皮卡车型的虚拟孪生模型并合理简化,采用简化模型搭建了联合仿真工作流,进行了关键零部件与车辆顶部强度安全性能的相关性分析。然后使用差分进化算法对车辆顶部强度安全性能进行了优化。最终车辆顶部抗压强度安全性能满足了最新版 GB 26134《乘用车顶部抗压强度》标准中,加载载荷为车辆整备质量的 3 倍但不超过 60kN 的要求。

【关键词】虚拟孪生, 车辆安全, 仿真优化, 差分进化

Optimization of Safety Performance of CPS Vehicle Virtual Twin Model Based on the Difference Evolution Algorithm

Hao Yuting, Jin Yu, Liang Hao, Wang Yuejian

China Automotive (Being) intelligent network union Automotive Research Institute Co., Ltd.

Abstract: This article has established a virtual twin model of a pickup truck model, and simplify the model appropriately. This simplified model was used to build a co-simulation workflow, then analyzed the correlation between the key components and the vehicle safety performance of roof strength. After this, differential evolution algorithm was used to optimize the vehicle safety performance of roof strength. Finally, the vehicle safety performance of roof strength compliance with the requirements of the new regulations of GB26134, in which the load is 3 times of the unladen kerb mass but not exceed 60kN.

Key words: virtual twin, vehicle safety, simulating optimization, differential evolution

引言

汽车在高速行驶中失控,容易造成车辆翻滚的交通事故。多项国内外的调查研究显示,车辆翻滚事故的致死率非常高。据美国交通部下属的运输统计局公布的统计数据,翻滚事故的死亡率比车辆正碰和侧碰事故约高 6 倍^[1]。研究表明,车辆在翻滚过程中,车顶受冲击载荷作用发生大变形侵入乘员生存空间,直接对乘员头部和颈部造成伤害,是导致翻滚事故致死率高的直接原因。所以车顶强度性能对汽车翻滚事故中乘员的生存率至关重要^[2-3]。

国家强制性标准 GB 26134—2010《乘用车顶部抗压强度》规定了当加载载荷为车辆整备质量的 1.5 倍但不超过 22.24kN 时,加载装置下表面的移动量不应大于 127mm^[4]。该标准十余年未升级,已不满足行业现状和交通安全需求,汽标委拟对 GB 26134 进行修订:当加载载荷提升到车辆整备质量的 3 倍但不超过 60kN,加载装置下表面的移动量不应大于 127mm。

本文以某皮卡车型作为研究对象,借助联合仿真优化平台搭建车辆虚拟模型的优化流程,以车顶强度最大化作为优化目标,对关键结构件料厚分布进行优化设计。并且评价优化后车身能否满足 GB 26134 新版草案规定。

1 车身抗压强度有限元模型

1.1 车身抗压强度模型搭建

标准 GB 26134 对试验方法的规定如下:加载装置为

刚性块,其下表面为 1829mm×762mm 的平整矩形表面。将车辆刚性地固定在刚性水平面上,并将其固定住,关闭所有车窗,关闭并锁死所有车门,按图 1 所示定位加载装置,使其纵轴前倾角为水平面向下 5°,并且纵轴平行于穿过车辆纵向中心线的垂直面;横轴外倾角为水平面向下 25°。

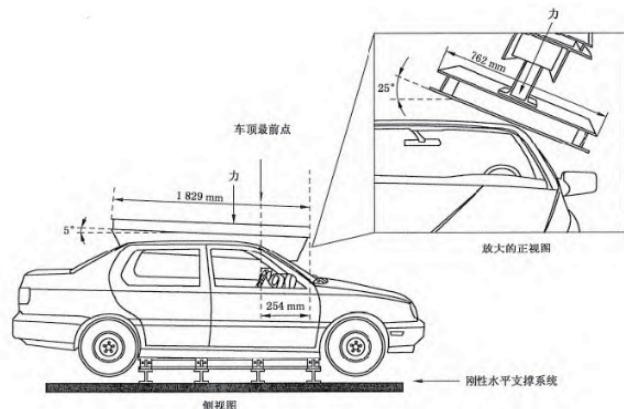


图 1 试验装置及定位

根据标准搭建 Ls-Dyna 车身顶部抗压强度有限元模型。采用 Ls-Dyna 的强制速度命令,对压力板施加一个纵轴前倾角为水平面向下 5°,并且纵轴平行于穿过车辆纵向中心线的垂直面,横轴外倾角为水平面向下 25°的强制速度。驾驶舱在压力变形的过程当中,产生的反作用力就是驾驶舱的抗压力,在 Ls-Dyna 当中通过接触力输出如图 2 所示。

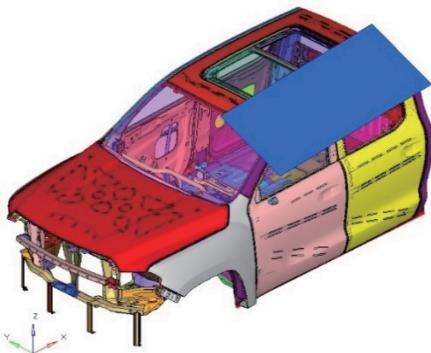


图 2 顶部抗压强度有限元模型

1.2 初始模型计算结果

图 3 为顶部抗压强度初始模型的顶部承载力曲线，压板与驾驶舱的接触力在整个历程中最大值为 42.84kN。

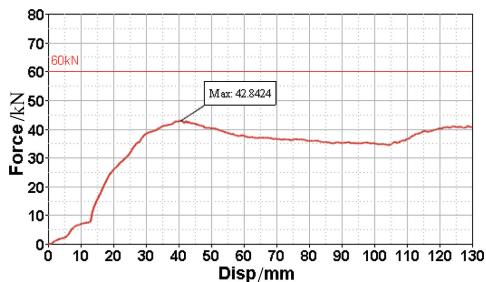


图 3 顶部承载力曲线

1.3 模型简化及验证

因为在整个优化过程中，往往需要进行成百上千次求解计算，若采用完整的顶部抗压强度有限元模型，优化效率会非常低下，因此在保证模型精度在可接受的前提下，必须对模型进行适当简化。

对 Ls-Dyna 计算时间有显著影响的因素通常有以下三个方面^[5]：

- 1) 模型规模：通常为网格划分大小和包含的零件数量。
- 2) 时间步长：影响求解精度，必须控制在合理范围内。
- 3) 计算结束时间：仿真模型整个加载历程完成的时间。

本次简化模型通过以上三种手段进行，如图 4 所示，即删除于顶部强度无关的部件，重新约束模型；增加时间步

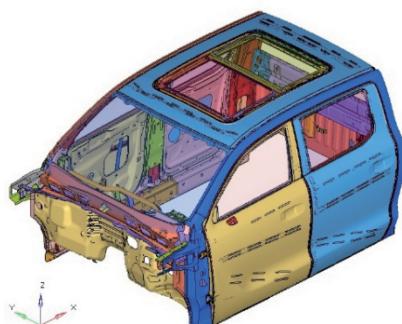


图 4 顶部抗压强度简化有限元模型

长，将质量增加控制在 5% 以内；提升加载速度，缩短整个模型的计算时间，将完整模型 1mm/ms 的加载速度提升至 2mm/ms，加载速度太大则会由于引入的动态效应影响结果准确性^[6]。简化后单个模型计算时间缩短至约 1/4。

图 5 展示了完整模型和简化模型顶部承载力曲线的对比，可以看出简化模型与完整模型曲线峰值基本吻合，误差小于 5%，模型简化后能够保证模型的精度在可接受范围。

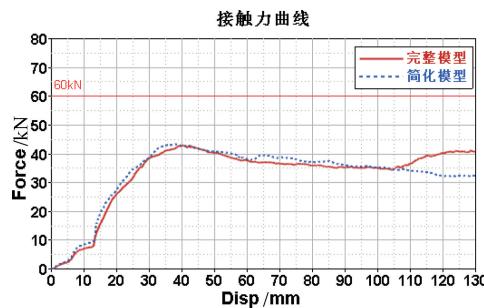


图 5 完整-简化模型顶部承载力曲线对比

2 关键零件相关性分析

2.1 仿真工作流搭建

使用联合仿真优化平台搭建优化流程，实现了求解器与后处理的联合仿真，串联了仿真工作流。InputVariables 定义了输入变量，包含各零件的厚度；Requirement 是一个文件集合，包含所需脚本文件和求解输入文件等；Ls-dyna Solver 定义了整个求解计算过程；Result post 定义了自动化后处理对仿真结果的提取；顶部最大承载力 MaxForce 和模型总质量 Mass 作为输出变量，如图 6 所示，其中 MaxForce 为优化目标。

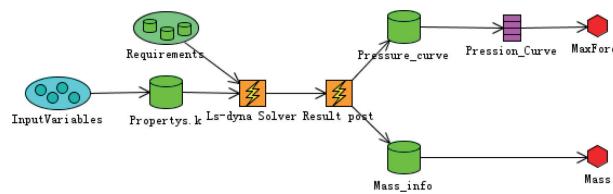


图 6 仿真工作流

2.2 相关性分析

为了研究 17 个结构件厚度的输入变量与 2 个输出变量 MaxForce、Mass 之间的相关性，使用 Optimus 进行田口试验设计，并通过后处理得到输入、输出变量间的相关性分析，如图 8 所示。

相关性系数介于 $-1 \sim +1$ 之间，相关性最高的零件 P150A00001068 相关性系数为 0.561，该零件为 B 柱加强板，为承载车顶载荷的关键结构件，如图 7 所示，这也符合工程经验，表明相关性分析结果合理。

根据相关性排序，筛选出与 MaxForce 强相关的 10 个零部件作为后续优化的输入变量，见表 1。

(续)

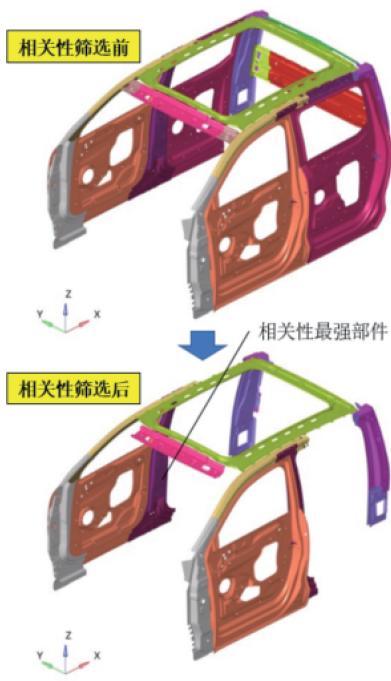


图 7 设计变量筛选示意图

表 1 与 MaxForce 强相关的零部件

相关度排名	零部件编号	初始厚度 /mm	与抗压强度相关度
1	P150A00001068	1.2	0.561
2	P150A00001070	0.8	0.293
3	P150A00001078	0.8	0.245
4	P150A00001547	1.5	0.216
5	P150A00001054	1.2	0.198
5	P150A00001060	1.2	0.198
7	P150A00001085	0.8	0.195

3 车身抗压强度优化过程

3.1 优化变量与目标

根据第 2 节相关性分析筛选出 10 个相关性较强的零件作为优化的输入变量，最大化 MaxForce 作为优化目标，Mass 作为参考输出变量，如图 8 所示。

根据每个零件初始厚度且考虑制造工艺的问题，定义每个零件厚度变量在优化时的可变范围，即为输入变量设置上下限，且数值只能取小数点后一位精度，见表 2。

表 2 变量取值范围及步长

零件号	initial /mm	min /mm	max /mm	Step /mm
P161000000297	0.7	0.5	1	0.1
P150A00001068	1.2	0.5	2	0.1
P150A00001070	0.8	0.5	1.5	0.1
P150A00001060	1.2	0.5	2.0	0.1
P150A00001054	1.2	0.5	2.0	0.1
P150A00001547	1.5	0.5	2.5	0.1
P150A00001030	0.7	0.5	2.5	0.1
P150A00001046	1.0	0.5	1.5	0.1
P150A00001078	0.8	0.5	1.5	0.1
P150A00001085	0.8	0.5	1.5	0.1
P150A00001031	1.0	0.5	1.5	0.1
P150A00001074	0.8	0.5	1.5	0.1
P150A00001089	0.8	0.5	1.5	0.1
P150A00001058	0.8	0.5	1.5	0.1
P150A00001036	0.8	0.5	1.5	0.1

Pearson (Spearman)	P162000000205	P150A00001683	P150A00001547	P150A00001054	P150A00001060	P150A00001070	P150A00001068	P150A00000297	P150A00001030	P150A00001031	P150A00001046	P150A00001078	P150A00001085	P150A00001074	P150A00001089	P150A00001058	P150A00001036	MaxForce	Mass	
P162000000205	1.000 (1.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.085 (0.054)	0.391 (0.440)	
P150A00001683	0.000 (0.000)	1.000 (1.000)	0.000 0.000	0.933 (0.129)	0.024 (-0.223)															
P150A00001547	0.000 (0.000)	0.000 0.000	1.000 (1.000)	0.000 0.000	0.216 (0.061)	0.461 (0.535)														
P150A00001054	0.000 (0.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	1.000 (1.000)	0.000 0.000	0.198 (0.156)	0.157 (0.054)													
P150A00001060	0.000 (0.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	1.000 (1.000)	0.000 0.000	0.198 (0.156)	0.157 (0.054)												
P150A00001070	0.000 (0.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	1.000 (1.000)	0.000 0.000	0.171 (0.122)	0.047 (0.047)											
P150A00001078	0.000 (0.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	1.000 (1.000)	0.000 0.000	0.293 (0.257)	0.159 (0.077)										
P150A00001068	0.000 (0.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	1.000 (1.000)	0.000 0.000	0.561 (0.041)	0.419 (0.386)									
P161000000297	0.000 (0.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	1.000 (1.000)	0.000 0.000	0.561 (0.041)	0.419 (0.386)								
P150A00001030	0.000 (0.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	1.000 (1.000)	0.000 0.000	0.190 (0.129)	0.117 (-0.047)							
P150A00001031	0.000 (0.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	1.000 (1.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.086 (0.054)	0.129 (0.077)	
P150A00001046	0.000 (0.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	1.000 (1.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.156 (0.102)	0.281 (0.203)	
P150A00001078	0.000 (0.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.245 (0.217)	0.186 (0.041)		
P150A00001085	0.000 (0.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.195 (0.123)	0.148 (0.068)		
P150A00001074	0.000 (0.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.070 (0.068)	0.093 (0.095)	
P150A00001089	0.000 (0.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.049 (0.061)	0.040 (0.054)	
P150A00001058	0.000 (0.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.049 (0.031)	0.043 (0.031)	
P150A00001036	0.000 (0.000)	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	
MaxForce	0.083 (0.054)	0.033 (0.129)	0.216 (0.061)	0.198 (0.150)	0.293 (0.122)	0.561 (0.041)	0.159 (0.129)	0.190 (0.129)	0.086 (0.041)	0.156 (0.129)	0.245 (0.129)	0.195 (0.129)	0.064 (0.041)	0.013 (0.041)	0.049 (0.041)	0.013 (0.041)	0.049 (0.041)	0.110 (0.115)	0.147 (0.115)	0.685 (0.190)
Mass	0.391 (0.440)	0.024 (-0.223)	0.461 (0.535)	0.157 (0.054)	0.171 (0.047)	0.159 (0.047)	0.419 (0.440)	0.429 (0.440)	0.117 (0.047)	0.129 (0.047)	0.281 (0.047)	0.186 (0.047)	0.148 (0.047)	0.070 (0.047)	0.040 (0.047)	0.043 (0.047)	0.147 (0.047)	0.685 (0.047)	1.000 (0.000)	

图 8 输入-输出变量相关性

3.2 差分进化算法介绍

差分进化算法 (Difference Evolution, DE) 是一种新兴的智能算法, 具有参数设置少、收敛速度快、结构简单、鲁棒性强等特点^[7]。差分进化算法用来解决实值多维优化的问题非常有效。作为典型的随机搜索算法, 差分进化不需要计算灵敏度。

差分进化算法的核心理论如下^[8]: 在优化过程中, 差分进化通过将前代种群中选取的一定数量的个体的加权差值加到另一个体上来生成新的参数向量。其策略的本质是两向量之差与第三个向量的求和运算:

$$\vec{V}_m^{(k+1)} = \vec{X}_{r1}^{(k)} + F \cdot (\vec{X}_{r2}^{(k)} - \vec{X}_{r3}^{(k)}) \quad (1)$$

式中, $m = 1 \dots$; λ 表示不同的索引; k 表示代数索引; $r1, r2, r3 \in [1, \lambda]$ 则表示随机选择的个体。

为了增加种群的多样性, 差分进化引入了交叉。而计算步长不是从适应性选定的个体集中选择, 而是从前代种群中随机选择一个个体。在交叉操作中, 新设计向量继承了前一设计向量的一部分特征, 然后根据一定的概率进行组合。

在选择过程中, 如果得到的设计具有更好的适应度值, 它将替换其父代。

差分进化算法优化步骤如下。

第一步: 初始化, 通常是一组随机的独立向量, 种群规模大小为 NP 。

第二步: 评估所有初始种群向量的适应度。

第三步: 重复循环 i 从 1 到 NP 。

1) 选择相互不同的向量 (通常为 3 个) $\vec{X}_{r1}^{(g)}$, $\vec{X}_{r2}^{(g)}$, $\vec{X}_{r3}^{(g)}$ 进行繁殖。

2) 构建加权差分向量并添加到第三个向量:

$$\vec{V}_i = \vec{X}_{r3}^{(g)} + F(\vec{X}_{r1}^{(g)} - \vec{X}_{r2}^{(g)}) \quad (2)$$

式中, F 是权重因子。

3) 随机选择目标向量 $\vec{X}_i^{(g)}$ 并与 \vec{V}_i 交叉以获得试验向量。

4) 循环 n 从 1 到 D :

$$t_{n,i} = \begin{cases} v_{n,i} & \text{rand} < CR \text{ or } n = \text{rand}(D) + 1 \\ x_{n,i}^{(g)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

式中, CR 是交叉率; D 是向量的维数; rand 是生成集合 $[0, 1)$ 中的随机自然数; $\text{rand}(D)$ 是生成集合中的随机整数。

5) 在试验向量 t_i 和目标向量 $\vec{X}_i^{(g)}$ 之间进行选择, 更合适的一个存活到下一代。

第四步: 检查终止条件 (时间、迭代次数、适应度), 满足则停止, 否则返回第三步。

$$\vec{X}_i^{(g+1)} = \begin{cases} \vec{v}_i & f(\vec{v}_i) < f(\vec{x}_i^{(g)}) \\ \vec{x}_i^{(g)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

本文使用差分进化算法进行优化。在使用 10 个优化变量作为输入的前提下, 初始种群大小设置为 15 个样本, 种群规模为 30, 总共进行 10 代迭代进化。

3.3 优化结果

经过 10 代优化后, 结果逐渐向最大化 MaxForce 收敛,

最终在第 10 代种群中, 第 282 个样本点达到最大值 69.00kN, 比初始值提高了 25.84kN, 顶部承载力性能提高了约 60%。此时车身约增重 28.95kg。优化后料厚分布见表 3。

优化后, 承受顶部载荷的工况下, 料厚分布达到最优状态。主要承力结构件变形可以达到相互协调和配合的效果, 顶部载荷传递路径达到理想状态。

表 3 优化结果数据

	Start	End [282]	Low	High
Inputs				
P161000000297	0.7	0.9	0.5	1
P150A00001068	1.2	2	0.5	2
P150A00001070	0.8	1.5	0.5	1.5
P150A00001060	1.2	2	0.5	2
P150A00001054	1.2	2	0.5	2
P150A00001547	1.5	2.4	0.5	2.5
P150A00001030	0.7	1.7	0.5	2.5
P150A00001046	1	1.4	0.5	1.5
P150A00001078	0.8	1.3	0.5	1.5
P150A00001085	0.8	1.3	0.5	1.5
Outputs				
MaxForce	43.16	69.00		
Mass	322.96	351.91		

4 优化结果验证

该车型的 3 倍整备质量载荷大于 60kN, 所以承载力需达到 60kN, 方可满足 GB 26134 最新版的要求。

为了验证优化结果的准确性, 将优化结果带入完整模型进行验证, 优化结果顶部承载力曲线如图 9 所示。可以看出, 完整模型最大承载力为 65.00kN, 比初始值提高了 22.16kN, 顶部承载力性能提高了约 52%。该车型优化方案满足 GB 26134 新标准的要求。

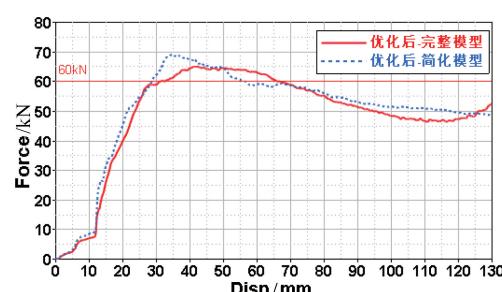


图 9 优化结果顶部承载力曲线

5 结论

本文通过搭建优化流程优化了某车型车身顶部抗压强度。优化后顶部抗压强度可达 69.00kN, 满足 GB 26134 最新版要求, 性能较基础车身提升了 80%。这为将来新标准实施时该车型车身的升级改款提供了方案。

同时，本文对模型简化、仿真工作流搭建及优化算法选择和参数设置的思路，对仿真工程师进行车辆性能优化工作具有参考和借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] Bureau Of Transportation Statistics Of US Department Of Table 1-11: Number of US Aircraft, Vehicle, Vessels, and Other Conveyances [EB/OL]. https://www.bts.gov/archive/publications/national_transportation_statistics/table_01_11.html.
- [2] OTTE D, KRETTEK C. Rollover accidents of cars in the German road traffic-an In-depth-analysis of injury and deformation pattern by GIDAS [C]//ESV conference in Washington DC, ESV paper. 2005 (05-0093) : 75-86.
- [3] 曹立波, 颜凌波. 汽车翻滚安全性研究及试验概览 [J]. 汽车工程学报, 2012, 2 (4) : 235-248.
- [4] 全国汽车标准化技术委员会. 乘用车顶部抗压强度: GB 26134—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [5] Livermore Software Technology Corporation. Manual L S D K U, Volume I. Version 971 [Z]. 2007.
- [6] 周迎娥, 邱忠财, 邵金华, 等. 乘用车顶部抗压强度有限元仿真方法研究 [C]// 国际汽车交通安全学术会议. 2018.
- [7] STORN R, PRICE K. Differential evolution-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11 (4) : 341-359.
- [8] RAINER S, PRICE K. Minimizing the real functions of the ICEC' 96 contest by differential evolution. [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. IEEE, 1996.