

基于吸能率的车辆碰撞相容性分析及优化设计

詹振飞^{1,2}, 王杰¹, 付月², 路高辉¹, 周桂林¹, 陈崇², 李洁²

(1. 重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆, 400064; 2. 汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室, 重庆 401122)

摘要: 开展了车辆防撞性和碰撞相容性的设计分析, 提出了一种新型相容性指标——吸能率 r_E 并验证其合理性, 该指标可望解决现有评价指标对车辆侵入程度的量化缺乏连续性和普适性的问题。然后对参数化模型进行自动更新, 从而进行设计变量优化求解, 最终形成一套集成设计方法。工程实例显示, 提出的吸能率指标 r_E 可实现对目标车辆攻击性程度的连续量化评估, 参数化优化策略可有效提升车辆碰撞相容性和设计优化效率。

关键词: 碰撞相容性; C-NCAP 试验规程; 吸能率; 参数化优化

中图分类号: U461.91 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2021.05.03

Design Optimization of Vehicle Impact Compatibility Based on Energy Absorption Rate

ZHAN Zhenfei^{1,2}, WANG Jie¹, FU Yue², LU Gaohui¹, ZHOU Guilin¹, CHEN Chong², LI Jie²

(1. Chongqing Jiaotong University of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing 400064, China

2. State Key Laboratory of Automobile Noise Vibration and Safety Technology, Chongqing 401122, China)

Abstract: In this paper, the design and analysis of vehicle compatibility between self-protection and aggressiveness were carried out. A new compatibility index, the energy absorption rate r_E , was proposed and verified since the existing evaluation indexes were lack of continuity and universality in the quantification of damages to the opponent cars. Then the parametric model was updated automatically to optimize the design variables, and finally a set of integrated design method was formed. Its engineering applications show that by using the energy absorption rate r_E , the aggressiveness of the target vehicle can be assessed continuously and quantitatively. And the proposed parameterized optimization strategy improves the efficiency of optimizing the vehicle impact compatibility.

Keywords: impact compatibility; C-NCAP test procedure; energy absorption rate; parametric optimization

随着我国汽车保有量的不断提升和道路交通环境的不断复杂化, 道路交通安全的提升也备受重视。一方面, 由于近年来国内较大尺寸车型如 SUV 车

型销量的急剧增加, 导致大尺寸车辆与轿车等小尺寸车辆之间的交通事故也随之增加; 另一方面, 道路上也陆续出现新能源汽车、老年代步车以及智能

收稿日期: 2021-08-04 改稿日期: 2021-08-16

基金项目: 重庆技术创新与应用项目 (cstc2020jscx-msxm1763), 汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室开放课题 (NVHSL-202108)

参考文献引用格式:

詹振飞, 王杰, 付月, 等. 基于吸能率的车辆碰撞相容性分析及优化设计 [J]. 汽车工程学报, 2021, 11 (5): 330-337.

ZHAN Zhenfei, WANG Jie, FU Yue, et al. Design Optimization of Vehicle Impact Compatibility Based on Energy Absorption Rate [J].

Chinese Journal of Automotive Engineering, 2021, 11 (5): 330-337. (in Chinese)



汽车等车身结构形式有别于传统汽车的新型车辆。这些不同尺寸车辆的加入将直接导致基于传统汽车安全技术的车辆安全可靠有所下降,亟需引起重视并开展针对性研究。

正面偏置碰撞是交通事故中常见的碰撞类型^[1],而在 Euro NCAP 成立时便通过引入正面 40% 碰撞试验^[2]来模拟两车迎面偏置碰撞情形,最终只是片面地对车身的耐撞性能提出了较高的要求,但实际情况是相撞两车之间质量和结构上的差异导致能量不能被有效吸收,给对方车辆和乘员造成巨大伤害。该碰撞试验暴露出其忽略受击车辆的速度、质量对碰撞响应的影响和忽视目标车辆过高的防撞性能对受击车辆侵入性的影响等弊端。汽车防撞性是车辆自我保护特性的一种体现,侵入性是指目标车辆对受击车辆及其乘员的潜在威胁性^[3],碰撞相容性则是两者结合的一种概念,旨在找寻车辆防撞性和侵入性的平衡点,使之达到既能依靠车身结构防撞性保护本车乘客,又能降低其侵入性从而减小对受击车辆及乘员的威胁。为了实现车辆具备碰撞相容性,国内外汽车研究机构先后展开了相关试验和研究,1970 年 EVS 会议上首次提出车辆相容性概念^[4-6]。而后 IIHS^[7]为增强车辆碰撞相容性提出增加轿车和轻型卡车的前端吸能结构几何重叠的建议。2013 年,CHRISTOPH 等^[8]开发了与车型组成相关的衡量车辆本质安全的指标 SPI,并用该指标来评判欧洲国家交通相容性的好坏程度。2014 年 SADEGHIPOUR 等^[9]针对当前安全法规对微型汽车相容性评估的局限性,比较了测试标准和研究项目的当前评估方法,基于 AE-MDB 进一步研究开发出评估微型汽车正面碰撞相容性的方案。国内,朱西产等^[10]率先指出正面碰撞试验未考虑碰撞相容性问题,并为改善市场现有车型的相容性做了相关研究^[11]。2010 年,张金换等^[12]指出车辆设计中,互逆地影响碰撞过程中两车乘员受伤几率的设计差异和相似之处会导致碰撞不相容性,并呼吁研究人员重视汽车结构刚度和几何外形之间的相容性。2016 年,胡志远等^[13]指出碰撞相容性 3 个主要因素并结合有限元技术对其进行验证,还针对车辆前部刚度和几何特征提出改进方案。结合国内外研究

状况,国外学者基于碰撞事故数据统计特征对相容性问题展开了其普遍性、解决措施、评价标准等较为全面的研究,但国内只做了对部分国外研究成果的深入研究,对初具雏形的碰撞相容性法规和安全标准体系缺乏思考和理解,有待进一步探索和完善。

本文拟就车辆碰撞相容性的分析及优化展开研究,主要内容如下:首先总结了在 C-NCAP 试验规程下针对 MPDB 工况有关碰撞相容性指标的分析计算过程,提出并验证了新型评价指标——吸能率;然后详细阐述了基于参数化模型自动更新的方案,以及基于参数化模型的车辆碰撞相容性的优化设计;最后通过工程实例验证了提出方法的可靠性。

1 车辆碰撞相容性评价指标分析

本节基于 C-NCAP 试验规程,对前端壁障变形量标准偏差及乘员载荷准则进行解析。

1.1 前端壁障变形量标准偏差

前端壁障变形量标准偏差 SD 用于衡量在壁障表面规定的评估区域内,样本单元侵入深度偏离平均值的程度。SD 越大,数据离散程度越高,反映了试验车辆前端结构的几何形状以及均匀性。其分析流程如下:

(1) 定义壁障评估区域。为了评估试验车辆纵梁及纵梁周边的区域,在前端障碍正面定义了一个与车辆宽度相关的评估区域。

(2) 创建基准面及等距网格节点。在壁障正前表面上创建以 20 mm 为边长的等距网格节点(总共 $50 \times 28 = 1\,400$ 个节点)和基准面。

(3) 通过扫描试验后的铝蜂窝壁障 3D 表面点云数据获取坐标值。

(4) 通过统计各节点碰撞时的投影距离得到侵入深度,利用标准偏差公式求得 SD 值。

(5) 结合侵入深度分布云图分析试验车前端造型结构尺寸等参数,发现壁障右下部分区域为侵入严重区域。

1.2 乘员载荷准则

乘员载荷准则(OLC)是衡量试验车辆对受击车辆车内乘员造成的动态冲击响应的指标,其分析流程如下:

(1) 建立模型。在台车上设置具有安全带约束的虚拟乘员, 设立碰撞过程各阶段的速度、位移、加速度等物理量。

(2) 分析计算。根据所建立的模型测得 x 向加速度曲线 A_x , 滤波后利用积分求得速度曲线。

$$\int_{t=0}^{t=t_1} V_0 dt - \int_{t=0}^{t=t_1} V(t) dt = x_1,$$

$$\int_{t=t_1}^{t=t_2} [V_0 - \text{OLC}_{\text{SI-unit}} \cdot (t - t_1)] dt -$$

$$\int_{t=t_1}^{t=t_2} V(t) dt - V_0 - \text{OLC}_{\text{SI-unit}} \cdot (t_2 - t_1) = V(t_2)。(1)$$

式中: t_1 为虚拟乘员相对于台车自由移动 $x_1=0.065$ m 的时刻; t_2 是指在 t_1 时刻之后, 虚拟乘员的移动开始受到抑制, 相对于台车向前移动 $x_2=0.235$ m 的时刻; $\text{OLC}_{\text{SI-unit}}$ 为从 t_1 到 t_2 时刻虚拟乘员的碰撞减速度, 即该时间段内速度曲线的斜率 (假设虚拟乘员受到抑制的减速度是恒定的), 单位转换为 SI 单位制 ($1 \text{ g}=9.81 \text{ m/s}^2$); $V(t_2)$ 为虚拟乘员在 t_2 时刻的速度。根据式 (1) 可解得 $\text{OLC}_{\text{SI-unit}}$ 。

1.3 基于 C-NCAP 规程综合分析评价指标

SD 指标最高罚分为 2 分, 若 SD 值小于 50 mm, 不扣分; 大于 150 mm, 则罚 2 分。处于两者之间采用线性插值的方法计算出相应扣分。计算公式为:

$$M_c = \begin{cases} 0, \text{SD} \leq 50 \\ 2 \left(\frac{\text{SD} - 50}{100} \right), 50 < \text{SD} < 150 \\ 2, \text{SD} > 150 \end{cases}。(2)$$

而对于 OLC 指标, 若 OLC 值小于 245.25 m/s^2 , 不扣分; 大于 392.40 m/s^2 , 则罚 2 分。处于两者之间采用线性插值的方法得出相应扣分。基于 C-NCAP 规程, 综合考虑 SD 和 OLC 两项指标, 在同样的 SD 水平上, 随着 OLC 的增大, OLC 修正扣分线性增加, SD 修正扣分不变。

2 基于吸能率的相容性评价指标

目前相容性指标对目标车辆侵入性的量化严重缺乏连续性和普适性, 本节提出了一个新型相容性评价指标——吸能率。

2.1 吸能率的定义及优势

吸能率是指壁障评估区域所吸收的能量或试验车辆对壁障评估区域造成的能量冲击, 与壁障评估区域所能承受的最大吸能量的比率。

一方面, 评估区域能量吸收率 r_E 反映了试验车辆对壁障评估区域造成的能量冲击与其所能承受的最大吸能量的比率。其取值范围为 $[0, 1]$, 可直接量化试验车辆的攻击性。该值离 1 越近表示壁障评估区域所吸能量越大, 试验车辆对评估区域的能量冲击越强。

另一方面, 由于目前渐进式可变性壁障处于研发初始阶段, 模型参数单一, 很难满足不同前端结构造型和不同质量车辆的试验要求。该研究成果通过壁障评估区域能量吸收率可以量化 MPDB 试验中, 试验车辆对壁障评估区域造成的能量冲击与其所能承受的最大吸能量的比率, 为后续研究中壁障模型的修正和更新, 以及新型壁障的开发和应用提供参考和借鉴。

2.2 吸能率指标的验证分析

(1) 基于初始模型设置了 15 组不同速度的目标车辆有限元算例进行仿真计算。具体验证工况设置为: 台车静止, 目标车辆质量不变, 改变其速度。分别进行仿真计算, 提取壁障加速度峰值, 计算壁障评估区域基于动能转换的吸能量和能量吸收率。结果见表 1。

利用上表数据绘制吸能率与车速平方和壁障加速度峰值的相关性散点图, 如图 1 ~ 2 所示。

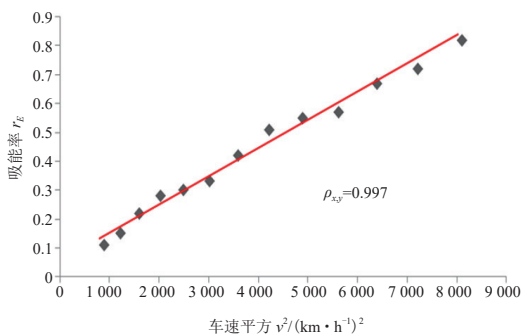


图 1 吸能率与车速平方的相关性

表 1 对应 15 组不同速度的目标车辆的壁障评估区域吸能情况

关注参数	值														
目标车辆初始速度 $v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
车速平方 $v^2/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})^2$	400	625	900	1 225	1 600	2 052	2500	3 025	3 600	4 225	4 900	5 625	6 400	7 225	8 100
评估区域吸能量 E/kJ	8.79	12.17	13.61	18.9	28.12	34.58	37.26	42.03	52.59	64.26	68.94	72.16	84.65	90.23	102.41
壁障加速度峰值 $a_{\max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	77.5	108.8	136.2	162.8	188.2	213.9	238.4	257	285.5	308	335.5	358.1	384.6	402.2	418.9
吸能率 r_E	0.07	0.10	0.11	0.15	0.22	0.28	0.30	0.33	0.42	0.51	0.55	0.57	0.67	0.72	0.82

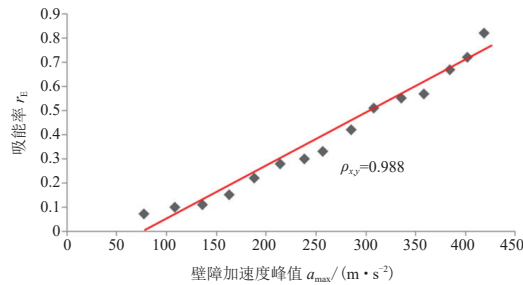


图 2 吸能率与壁障加速度峰值的相关性

由图可知，吸能率与车速平方和壁障加速度峰值之间的相关系数均在 0.9 以上，表现为极强相关。

(2) 基于初始模型另外设置了 15 组不同质量

的目标车辆有限元算例进行仿真计算。具体验证工况设置如下：台车静止，目标车辆初始速度均为 65 km/h，改变其质量。利用有限元前处理工具获取整车模型的质心坐标，新建 component，定位至质心处，通过 mass 单元对该 component 赋予需要增加的质量，以实现变质量操作。进而分别进行仿真计算，提取壁障加速度峰值，计算壁障评估区域基于动能转换的吸能量和能量吸收率，结果见表 2。

利用表 2 中的数据绘制吸能率与整车质量和壁障加速度峰值的相关性散点图，如图 3 ~ 4 所示。

表 2 对应 15 组不同质量的目标车辆的壁障评估区域吸能情况

关注参数	值														
目标车辆质量 m/kg	1 300	1 350	1 400	1 450	1 500	1 550	1 600	1 650	1 700	1 750	1 800	1 850	1 900	1 950	2 000
评估区域吸能量 E/kJ	43.1	46.9	48.5	49.6	53.4	55.5	55.9	58.1	60.2	62	62.9	63.5	72.6	74.2	75.2
壁障加速度峰值 $a_{\max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	125.6	143.2	155	181.5	211.9	233.5	249.2	273.7	306.1	295.3	320.8	347.3	362	379.6	400.2
吸能率 r_E	0.34	0.37	0.39	0.39	0.43	0.44	0.45	0.46	0.48	0.49	0.50	0.51	0.58	0.59	0.60

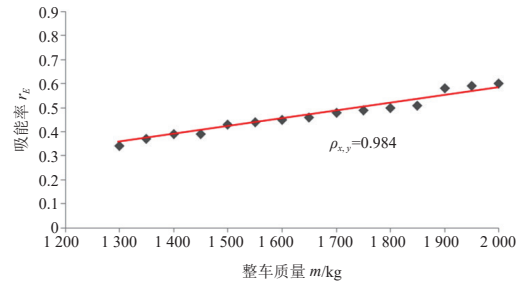


图 3 吸能率与整车质量的相关性

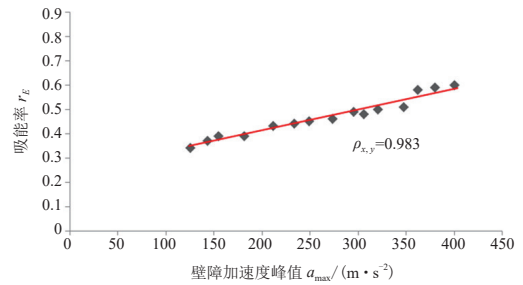


图 4 吸能率与壁障加速度峰值的相关性

由图可知，吸能率与质量和壁障加速度峰值之间的相关系数均在 0.9 以上，表现为极强相关。

综上所述，通过采用控制变量法，分别探究了质量一定时，吸能率与目标车辆的不同初速度之间的线性相关程度；车速一定时，吸能率与目标车辆的不同质量之间的线性相关程度。并同时对比两组仿真数据中吸能率与壁障加速度峰值之间的线性相关程度，结果均表现出极强的相关性。说明吸能率指标能够有效衡量目标车辆在一定且较宽泛的能量转换范围内的攻击性程度，可以作为新型相容性评价指标。

3 基于相容性的参数化设计与优化

3.1 参数化设计

结合前端结构设计参数对相容性指标的影响机

理,在整车模型的基础上选取前端结构中对碰撞相容性能影响显著的关键部件的材料参数和厚度属性进行参数化赋值。配合移动渐进式可变性壁障,利用一系列有限元软件工具研究车辆前端不同的结构参数对相容性指标的影响,以提高碰撞相容性能为优化目标,对前端结构关键参数进行匹配优化,建立一套面向碰撞相容性的前端结构参数匹配最优构型,有效地提高碰撞相容性能。

本文面向某乘用车车型,基于 Accord 2014 整车有限元模型,依据企业级建模标准,设定单元目标尺寸为 8 mm,网格尺寸范围为 4 ~ 10 mm,根据几何特征差异性选取合理的单元类型对整车模型进行网格划分,并选取其保险杠防撞梁、防撞横梁等对碰撞相容性能产生影响的部件,在此基础上展开对碰撞相容性能的优化分析。具体的参数化优化技术路线步骤如下:

(1) 确定以降低各相容性指标壁障变形量标准差 SD (取碰撞结束时刻)、乘员载荷准则 OLC 与吸能率 r_E 为优化目标,并把车辆耐撞性能和对乘员的保护性能法规限值作为约束条件。

(2) 分析车辆前端部件参数特点,选择设计变量并确定取值范围。

(3) 由于初始有限元模型零部件繁多,结构复杂,计算资源需求较高,直接通过有限元分析开展优化很难满足参数化优化的设计要求。因此,需要简化初始模型,将对关注参数和输出指标影响较小的零部件进行改形或删减,得到计算精度仍满足需求但求解效率显著提升的简化模型。

(4) 在简化模型的基础上对所关注的前端构件进行参数化赋值。

(5) 采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相容性指标测量值。

(6) 利用获得的设计变量和相容性指标测量值搭建满足预测精度标准的近似模型,选择 NSGA-II 遗传算法对优化问题进行迭代计算,并对近似模型拟合预测的优化结果进行仿真和验证。最后,分析优化结果并得出结论。

3.2 优化目标确定和设计变量选取

在对碰撞相容性指标进行优化设计前,首先需要选定合理的设计变量及其取值上下限,并确定约束条件。结合目前研究的试验结果和本文的仿真结果可知,对碰撞相容性指标影响最为显著的零部件集中在车辆前部。保险杠防撞梁和横梁缓冲件是车身上典型的高强度薄壁安全件,是影响汽车碰撞安全性的关键零部件。前纵梁是 MPDB 偏置碰撞中最主要的吸能部件,担负总碰撞能量的 60% 左右。因此,选取防撞横梁、横梁缓冲件以及前纵梁等的材料参数和厚度作为设计变量。

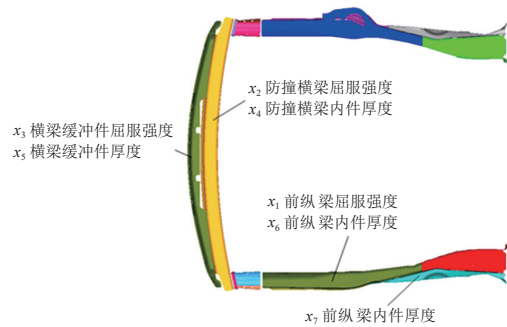


图 5 设计变量分布

表 3 设计变量初始值及其取值范围

变量编号	设计变量描述	初始值	下限值	上限值
x_1	前纵梁屈服强度 σ_{s1}/MPa	285	200	500
x_2	防撞梁屈服强度 σ_{s2}/MPa	1 050	800	1 200
x_3	横梁缓冲件屈服强度 σ_{s3}/MPa	90	50	250
x_4	防撞横梁厚度 δ_1/mm	2	1	4
x_5	横梁缓冲件厚度 δ_2/mm	7	5	9
x_6	前纵梁内件厚度 δ_3/mm	1.63	1	2
x_7	前纵梁外件厚度 δ_4/mm	1.4	1	2

3.3 训练样本获取及相关性分析

图 6 为搭建的一套基于 Bat 文件调用功能的集参数化设计、仿真计算和后处理为一体的相容性指标样本获取自动化流程。

通过拉丁超立方采样生成设计变量 DOE 矩阵,通过参数化接口调用各组设计变量以驱动有限元模型更新;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相容性指标曲线

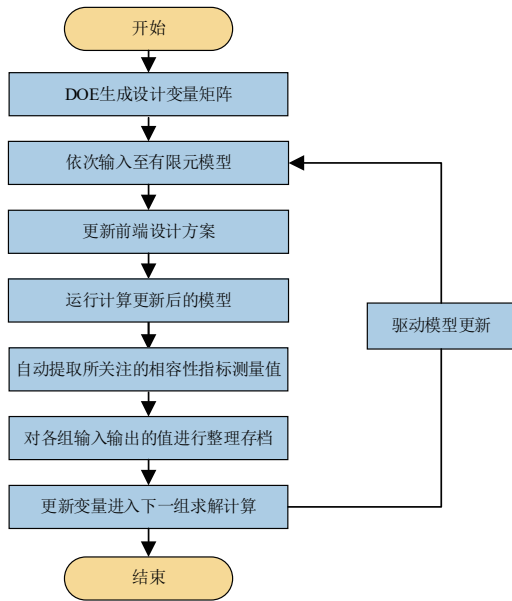


图6 自动化流程

和数据。进而更新变量以驱动有限元模型自动更新前端结构方案，运行计算，直到最终获得60组样本数据。分析有限元模型求解获得的60组样本数据，计算出各个相容性指标和设计变量之间的相关系数，如图7所示。由图7可知，前端壁障变形量标准偏差与防撞横梁和横梁缓冲件的屈服强度和厚度属性呈显著正相关。由图8可知，乘员载荷准则与前纵梁设计参数呈显著负相关。由图9可知，吸能率与横梁缓冲件设计参数相关性并不高，与防撞横梁和前纵梁设计参数呈显著负相关。综上所述，各相容性指标与前端结构设计参数之间的相关性存在较大差异，各相容性指标之间也存在一定的矛盾和制约关系，如防撞横梁设计参数对前端壁障变形量标准偏差和吸能率的影响规律几乎是相反的，因此，有必要提出一种权衡机制来对设计参数进行折中考虑。

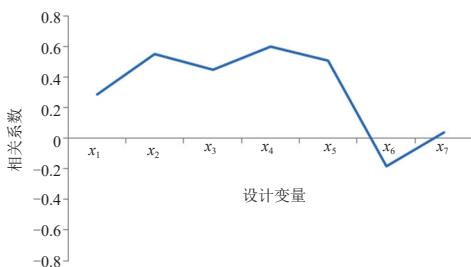


图7 前端壁障变形量标准偏差 SD

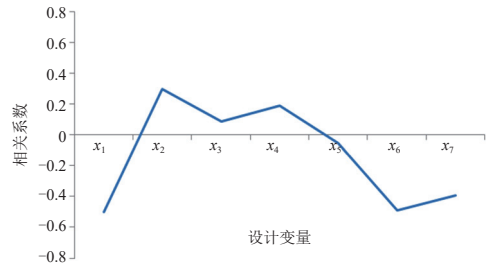
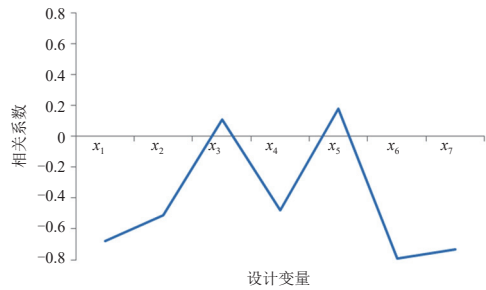


图8 乘员载荷准则 OLC

图9 吸能率 r_E

3.4 近似模型的搭建和精度评价

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与开发的要求。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，代理模型代理方法主要包括多项式响应面（PR），Kriging 模型（KR），高斯过程（GP）和径向基函数（RBF）等。

采用确定性系数 R^2 作为代理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，则代理模型的有效性越高。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3)$$

式中： Y_i 为测试样本点的实际响应值； $\hat{Y}_i$ 为代理模型的预测值； $\bar{Y}$ 为测试样本点的实际响应值的均值； n 为测试样本的数量^[14]。在选择代理模型时，选用预测精度高的模型来做相容性指标的参数优化设计。

考虑到计算结果的线性程度，对各相容性指标壁障变形量标准差 SD、乘员载荷准则 OLC 和吸能率 r_E 分别建立多项式响应面拟合模型（PR）、Kriging（KR）、高斯过程（GP）和径向基函数（RBF）

4 种代理模型。分别计算近似模型的不确定性系数 R^2 来表征近似模型的预测精度。

根据近似模型预测精度,选取径向基函数(RBF)作为壁障变形量标准差(SD)的近似模型,选取 Kriging(KR)作为乘员载荷准则(OLC)和吸能率 r_E 的近似模型。

Find $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$

Minimize SD, OLC, r_E

Subject to

耐撞性 $\begin{cases} x_F \leq 150 \text{ mm}, x_{Lt} \leq 150 \text{ mm}, x_{Ct} \leq 150 \text{ mm}, x_{Rt} \leq 150 \text{ mm}, x_{Bp} \leq 150 \text{ mm}, x_{L_IP} \leq 50 \text{ mm}, \\ x_{R_IP} \leq 50 \text{ mm}, x_{AB_P} \leq 50 \text{ mm}; \end{cases}$

损伤性 $\begin{cases} HIC_{15} \leq 700, H_{acc} \leq 784.8 \text{ m/s}^2, F_x \leq 3.1 \text{ kN}, F_z \leq 3.3 \text{ kN}, M_y \leq 57 \text{ Nm}, \\ T_{comp} \leq 60 \text{ mm}, A_{comp} \leq 88 \text{ mm}, F_p \leq 4.1 \text{ kN}, F_f \leq 9.07 \text{ kN}, L_k \leq 15 \text{ mm}, F_t \leq 8 \text{ kN}; \end{cases}$

相容性 $\{SD \leq 150 \text{ mm}, OLC \leq 392.4 \text{ m/s}^2, r_E \leq 0.65\}$ 。

确定优化问题之后,利用 modeFRONTIER 优化平台,搭建面向碰撞相容性的参数化优化框架。

采用 DEB 等^[15]开发的 NSGA-II 遗传算法,基于构建好的近似模型进行碰撞相容性优化设计。选取 R^2 最大的近似模型组合之后,利用均匀拉丁超立方抽样方法随机产生 30 组样本数据作为初始种群,再利用 NSGA-II 遗传算法进行 50 次遗传迭代,一共进行 1 500 次搜索寻优。各目标在 600 次迭代(20 代)左右开始收敛,并于 50 代左右收敛于全局最优,最后采用理想点法选取最终优化解。

根据有限元输出结果,实际优化后的壁障变形量标准差 SD 在碰撞结束时刻的值为 84.8 mm,降低了 20.6%。实际优化后的乘员载荷准则 OLC 的值为 263.889 m/s^2 ,降低了 9.7%。实际优化后的吸能率指标 r_E 的值为 0.459,降低了 7.6%。

3.5 优化求解及结果验证分析

根据 IIHS 对车辆耐撞性能安全等级的评定标准和 C-NCAP 试验规程要求,以耐撞性侵入量表征值、乘员损伤指标和相容性指标三个方面的相关性能限值作为约束条件。优化问题的数学表达式如下:

4 结论

本文针对车辆碰撞相容性的分析及优化设计开展研究,基于 C-NCAP 试验规程的 MPDB 工况碰撞相容性指标进行剖析计算,随后提出了新型评价指标吸能率并验证其合理性。并以提高车辆碰撞相容性能为目的,更新了参数化模型,并进行优化求解,形成一套集成试验设计方法、近似模型技术、全局优化算法的参数化模型驱动的高效优化策略。最后通过实例验证,本文提出的设计方案在满足结构耐撞性能和乘员损伤性能标准的同时,能显著提升车辆碰撞相容性能。

致谢

本研究为汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室开放课题(NVHSL-202108),重庆技术创新与应用项目(cstc2020jscx-msxm1763)资助项目,特此感谢。

参考文献(References)

- [1] KULLGREN A, AXELSSON A, STIGSON H, et al. Developments in Car Crash Safety and Comparisons Between Results from Euro NCAP Tests and Real-World Crashes [C]//26th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV): Technology: Enabling a Safer Tomorrow, 19-0291, Eindhoven, Netherlands, 2019.
- [2] HOBBS C A, MCDONOUGH P J. Development of the European New Car Assessment Programme (Euro NCAP) [C]//Proceedings of the 16th International Technical

- Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), May 31–June 4, 1998, Windsor Ontario, Canada.[S.l.]: [s.n.], 1998: 2439–2453.
- [3] MORADI R, SETPALLY R, LANKARANI H M. Use of Finite Element Analysis for the Prediction of Driver Fatality Ratio Based on Vehicle Intrusion Ratio in Head-on Collisions [J]. *Applied Mathematics*, 2013, 4(5A): 56–63.
- [4] HOBBS C A, WILLIAMS D A, COLEMAN D J. Compatibility of Cars in Frontal and Side Impact[C]//*Proceedings of the 15th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, May 13–16, 1996, Melbourne, Australia. [S.l.]: [s.n.], c1996: 1–8.
- [5] ERNST G, BRUEHNING E, GLAESER K P, et al. Compatibility Problems of Small and Large Passenger Cars in Head on Collisions [C]//*SAE Technical Papers*, 916010, 1991.
- [6] BARBATS. Status of Enhanced Front-to-Front Vehicle Compatibility Technical Working Group Research and Commitments[C]//*Proceedings of the 19th International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, June 6–9, 2005, Washington, DC. [S.l.]: [s.n.], c2005: 1–19.
- [7] SUMMERS S, HOLLOWELL W T, PRASAD A. NHTSA's Research Program for Vehicle Compatibility [C]//*Proceedings of the 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, May 19–22, 2003, Nagoya, Japan.[S.l.]: [s.n.], c2003: 1–9.
- [8] CHRISTOPH M, VIS M A, RACKLIFF L, et al. A Road Safety Performance Indicator for Vehicle Fleet Compatibility [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2013, 60: 396–401.
- [9] SADEGHIPOUR E, DUDDECK F, LIENKAMP M. Crash Compatibility of Microcars: A Study on Current Test Approaches [C]//*Crash. Tech*, 2014: 1–8.
- [10] 朱西产. 汽车正面碰撞试验法规及其发展趋势的分析 [J]. *汽车工程*, 2002, 24(1): 1–5, 14.
- Zhu Xichan. Analysis of Regulations and Development Trend of Automobile Frontal Crash Test [J]. *Automobile engineering*, 2002, 24(1): 1–5, 14. (in Chinese)
- [11] 朱西产, 程勇. 中国汽车被动安全法规现状的分析 [C]//*第一届国际汽车交通安全研讨会*, 长沙. 2000: 86–91, 120.
- ZHU Xichan, CHENG Yong. Analysis of the Status Quo of China's Automotive Passive Safety Regulations [C] // *First International Car Traffic Safety Seminar*, Changsha. 2000: 86–91, 120. (in Chinese)
- [12] 张金换, 杜汇良, 马春生. 汽车碰撞安全性设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- ZHANG Jinhuan, DU Huiliang, MA Chunsheng. *Vehicle Collision Safety Design* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. (in Chinese)
- [13] 胡远志, 黄杰, 刘西, 等. SUV与轿车正面碰撞相容性研究 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2016, 30(3): 1–8.
- HU Yuanzhi, HUANG Jie, LIU Xi, et al. Research on the Compatibility of SUV and Car Frontal Crash [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2016, 30(3): 1–8. (in Chinese)
- [14] LI Jin, MYERS S C. R-Squared Around the World: New Theory and New Tests [J]. *Journal of Financial Economics*, 2006, 79: 257–292.
- [15] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II[C]//*Proceedings of the International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, Sept. 18–20, 2000, Paris, France. Heidelberg: Springer, c2000: 849–858.

作者简介



詹振飞 (1983–), 男, 四川广元人, 博士, 教授, 主要研究方向为汽车智能安全、仿真与优化设计、汽车大数据分析。

Tel: 18323725576

E-mail: zhenfei_zhan@163.com