

Parametric section optimization of rear-end of engine room side rail based on crashworthiness

Zhongcai QIU^{1,2}, Zhouquan Lv², Yu Zhang^{1,2}, Bo Dian^{1,2}, Taisong Cui^{1,2},

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

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

Email: qzc0797@foxmail.com

Abstract: A sub-model of cashworthiness analysis of a rear-end of engine room side rail is established based on its force environment under MPDB (i.e. mobile progressive deformable barrier) crashing. On this basis, an explicit parametric model of the rear-end of engine room side rail is built by SFE_Concept to generate FEM models for cashworthiness analysis and optimization of the sub-model. After that, an automated optimization process is set up, where cashworthiness(i.e. section fove magnitude) is selected as constraints and section dimension¶meter is set as variables based on multi load path concept. Besides, lightweight is set as optimization target.And then, the optimization process is executed by direct method. After optimization, the mass of engine room side rail by 430g, while the crassworthiness is improved.Finally, the optimized section dimension¶meter is validated by whole vehicle FEM cash model. The results show that all main indexes are improved,which proves validity and availability of the optimization of the sub-model.

Keywords: sub-model,explicit parametric model,crassworthiness,automated optimization

基于耐撞性的某车型发动机舱边梁后段截面参数化优化

邱忠财^{1,2}, 吕周泉^{1,2}, 张钰^{1,2}, 冀波^{1,2}, 崔泰松^{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重庆长安汽车股份有限公司, 重庆, 中国, 400023

Email: qzc0797@foxmail.com

摘要: 根据正面可移动壁障 (MPDB) 碰撞工况下发动机舱边梁的主要受力情况, 建立某车型耐撞性分析的子模型。在此基础上建立机舱边梁隐式参数化模型 (SFE_Concept), 并以耐撞性为约束, 以重量为目标, 以多边受力原则设置机舱边梁截面尺寸的形状参数, 搭建全自动优化流程。采用直接优化算法, 机舱边梁单侧减重 430g, 子模型耐撞性提升。将优化的机舱边梁代入整车模型进行验证, 主要指标均得到改善, 证明了子模型优化结果的正确性及有效性。

关键词: 子模型; 隐式参数化; 耐撞性; 全自动优化

1 引言

汽车耐撞安全性是一项重要的整车性能指标。为了更好得保护车内乘员及车外行人, 全球各大评测机构制定了越来越严苛的车辆耐撞安全规程。在国内, 中汽研C-NCAP 2021版已经开始实施, 引入了正面可移动壁障 (MPDB) 碰撞工况, 考虑本车安全性的同时还要考虑两碰撞车之间的兼容性 (如图1所示)。MPD工况给正面碰撞结构设计带来了更大的性能与重量成本挑战。与此同时, 随着国六的实施, 对结构轻量化设计提出了更高的要求。

为了解决性能与重量成本的矛盾, 多目标参数化优化设计 (Multidisciplinary design optimization, MDO) 是可行的路径之一。MDO 以最优的参数组合设计达成性能目标及实现轻量化。多目标优化的数学表达式如 (1) 所示^[1]:

$$\begin{cases} \min f(x, u(x)) \\ \text{s.t. } h_j(x, u(x)) = 0, j = 1, 2, \dots, m \\ g_i(x, x(u)) \leq 0, i = 1, 2 \dots n \end{cases} \quad (1)$$

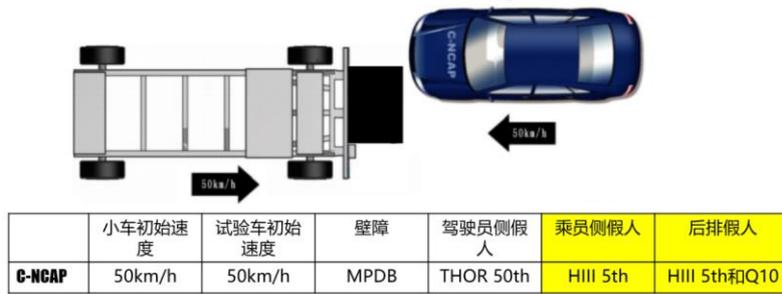


Figure 1. Diagram of MPDB

图 1. MPDB 工况示意图

式中, x 为设计变量 (可以是结构件厚度、材料、几何形状、尺寸等参数); $f(x, u(x))$ 为目标函数, $h_j(x, u(x))$ 为等式约束, $g_i(x, u(x))$ 为不等式约束, j 为等式约束个数, i 为不等约束个数。目标和约束可以是性能、重量、成本等。

整车碰撞属于大变形、强几何非线性和物理非线性的动态过程, 采用直接优化法几乎不可能。即使建立近似模型代替整车碰撞模型, 要建立精度较高的近似模型, 样本点数量要选择变量数量的 8 倍及以上^[2], 计算量仍然比较大。为提升优化效率, 针对需要优化的局部结构, 根据其在所分析的碰撞工况下受力, 建立子模型来替代整车碰撞模型, 效率将大幅提升。杨济匡等^[3]建立了副车架侧边纵梁的碰撞子模型并进行了耐撞性优化设计, 优化设计后的副车架侧边纵梁能在提高耐撞性能的同时, 保持较好的轻量化水平。姚再起等^[4]建立了某电动汽车铝合金门槛的碰撞子模型, 相对于基于整车模型的优化, 局部模型参数优化可节约计算时间约 90%, 且经整车仿真和实车验证, 轻量化后车身各项性能均达到车型开发目标。但文件[4]中仅选取了铝合金门槛截面厚度作为参数, 未选择几何参数。而文献[3]虽然选择了截面形状最为参数, 但生成每个计算样本点时是手动生成的几个模型然后再划分网格, 未实现自动化优化。

目前几何形状参数化方式主要分为两大类: 一类是以 CAE 模型为中心的参数化方法, 根据所采用的网格变形方法设定形状的控制体 (参数化表示), 并通过网格变形获得可直接用于仿真的有限元模型, 避免从 CAD 到有限元网格的转化过程; 另一类是以 CAD 模型为中心的参数化方法基于参数化的 CAD 模型实现目标形状的编辑[5]。SFE-Concept 是车身结构设计领域常用的参数化 CAD 建模软件。它通过点的位置、线的曲率和截面形状 3 种参数来控制几何形状, 通过映射关系建立零件之间的参数化装配关系^[6]。因为所有参数在逻辑上相互关联, 所以每一个参数的改变都会使它周边与之关联的参数发生相应变化, 同时自动划分用于 CAE 分析的网格, 在 CAD 和 CAE 两个层面上能够同步实现复杂结构的参数化变化。

本文建立了 MPDB 工况下发动机舱边梁后段的 CAE 子模型, 并建立了机舱边梁的 SFE-Concept 参数化模型, 选取截面形状几何参数作为变量, 搭建全自动优化流程, 以耐撞性为目标, 实现机舱边梁后段的截面参数化优化。

2 CAE 子模型的建立

MPDB 工况下, 发动机舱边梁主要受力是前端沿轴向的挤压力。建立其 CAE 分析子模型, 如图 (2) 所示。后段边界将其全约束限制模型运动, 前端刚性壁障施加恒定的强制平移速度。用峰值接触力来代表边梁根部耐撞性, 接触力越大, 前端刚性比壁障就需要施加更大的力, 边梁根部耐撞性就越好, 前壁板侵入量更小, 乘员舱变形越小, 更好得保护了车内乘员。采用简化后的子模型, 可在单机上运行, 无需采用高性能服务器, 计算时间缩短为整车模型的 1/20, 计算效率大幅提升。

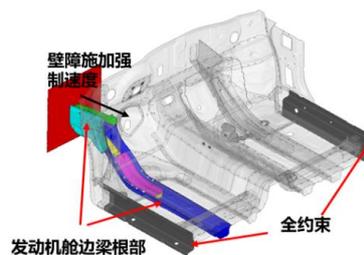


Figure 2. CAE sub-model of engine room side rail

图 2. 发动机舱边梁 CAE 子模型

3 参数化建模及变量选取

除壁障外，建立图（2）子模型参数化模型。模型所有参数是相互关联的，且模型里零部件之间是通过映射关系装配起来的，因此改变每一个参数的改变都会使它周边与之关联的参数发生相应变化，同时自动划分用于 CAE 分析的网格。图 3 是机舱边梁根部的 SFE_Concept 参数化模型。

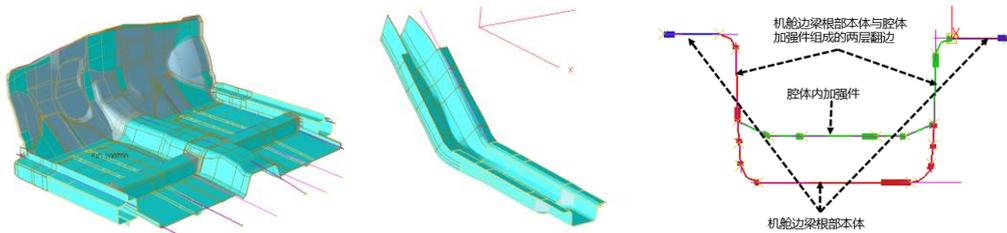


Figure 3. SFE model of engine room side rail

图 3.机舱边梁根部 SFE_Concept 参数化模型

根据多边传力路径设计理念（如图 4 所示），设计机舱边梁根部截面几何参数变量。如图 5 所示，构成截面的节点进行编号，通过改变节点坐标来实现截面的变化。为了保证机舱边梁与前地板、前壁板的贴合，节点 1/2/3/12/13/14 坐标保持不动；通过同时改变节点 4/11/15/16/17/18 的 Z 向坐标来构成边梁加强件高度 H，其步长为 1，即 1 步变动 1mm；通过同时改变节点 4/5/6/7/8/9/10/11 的 Y 向坐标来构成边梁下端宽度 W（4/5/6/7 和 8/9/10/11Y 向相反移动），步长为 1，即 1 步变动 2mm。录制这两个变量，可以形成多传力路径截面，且能保证与纵梁根部搭接的其它部件改动尽可能小，且不影响整车空间布置。

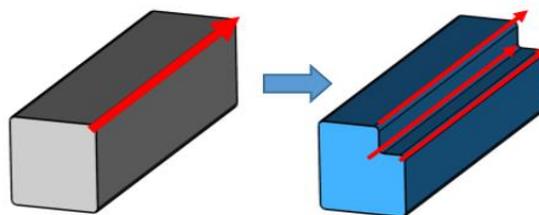


Figure 4. Diagram of multi-loadpath

图 4.多边传力路径示意图

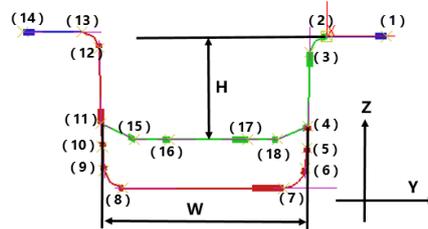


Figure 5. Shape variables of engine room side rail

图 5.机舱边梁根部截面几何参数变量

4 优化平台搭建及优化结果

采用商业优化软件 isight 搭建优化流程，如图（6）所示。优化组件负责优化决策，如当前结果无法满足目标

要求，则生成一个新的样本点；由 SFE 组件驱动模型变化，并生成新的 CAE 网格；由 DYNA 组件计算得到模型质量及相关结果文件；由 META 组件从 DYNA 计算结果文件中提取；由计算组件计算峰值接触力与质量的比值 Rf/m ，并返回给优化组件判断决策。

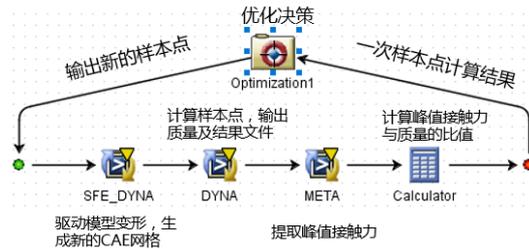


Figure 6. Diagram of optimization process

图 6.优化流程示意图

变量 H 的范围为 $(-1,10)$ ，负表示加强件下移，正则表示上移；变量 W 的取值范围为 $(-5, 10)$ ，负表示截面下端变宽，正则表示变窄；优化目标是 Rf/m 最大化，即表示性能最大化；优化算法选用直接搜索法中的下降单纯形法 (DownhillSimplex)。下降单纯形法的基本原理是，在 n 为空间中以 $n+1$ 个顶点构成一个多面体，求出各顶点的拟合优度值，并确定其中的最优点、次优点和最差点，然后通过反射、扩张、收缩等策略找出一个较好点，取代最差点，从而构成新的多面体，这样重复迭代，直至所设定次数或拟合优度的预定界限为止，最终找到或逼近一个最优值点^[7]。优化控制参数如图 7 所示。

Optimization Technique Options	
Option	Value
Initial Simplex Size	0.1
Max Iterations	40
Max Failed Runs	5
Failed Run Penalty Value	1.0E30
Failed Run Objective Value	1.0E30

Figure 7. Optimization control parameters

图 7.优化控制参数

经过优化之后，机舱边梁根部截面变化如图 8 所示：

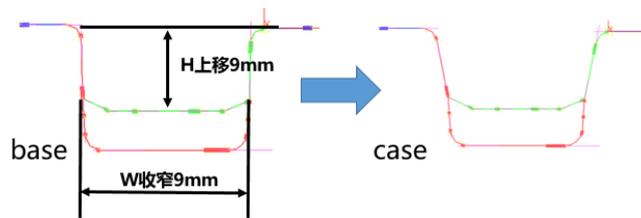


Figure 8. Shape changes before and after optimization

图 8.优化后截面变化

优化结果如表 1 所示：

Table 1. Optimization result

表 1. 优化结果

	子模型重量 (Kg)	峰值接触力 (KN)	R _{f/m}
Base	64.3	59.11	0.92
Case	63.87	64.8	1.01

截面优化后单侧减重 0.43kg，峰值接触力提升，Rf/m 增大，轻量化的同时性能增加。将子模型优化得到的截面结果替换整车模型机舱边梁，MPDB 工况其局部变形及截面力分别如图 9、10 所示：



Figure 9. Transform of engine room side rail(Gray-base, Green-case)

图 9.MPDB 工况下机舱边梁根部变形（灰色-base，绿色-case）

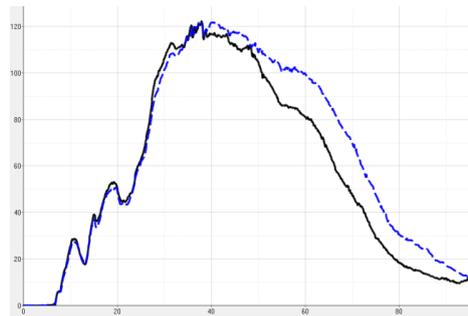


Figure 10. Section force comparison(Black-base,Blue-case)

图 10.机舱边梁根部截面力对比（黑色-base，蓝色-case）

从图 10 中可以看出，整车 MPDB 碰撞工况下，优化后的纵梁根部截面力峰值持续的时间比优化前更长，因此，能更好抵抗变形，减小前壁板侵入量，如图 9 所示。整车 MPDB 碰撞工况下，优化前后主要结构指标如表 2 所示：主要结构指标均变好，其中前壁板侵入量较为明显。

Table 2. Main structure index comparison

表 2. 优化前后主要结构对比

	左侧 B 柱及速度 (G)	前壁板侵入量 (mm)	壁障 SD 值 (mm)
Base	41.6	154	119.4
Case	41.2	121	112.2

5 结论

- 1、建立了 MPDB 碰撞工况下发动机舱边梁的 CAE 子模型，子模型计算效率大幅提升。
- 2、搭建了全自动几何形状参数化优化平台，对子模型参数化模型进行优化分析，模型减重 430g 的同时耐撞性得到提升。
- 3、将子模型优化结果带入整车分析模型中，主要结构指标得到优化，证明了子模型分析优化结果的可用性。

参考文献 (References)

- [1] 王登峰, 卢放. 基于多学科优化设计方法的白车身轻量化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(1): 29-37.
- [2] Chen C, Zhan Z, Yu H, et al. An efficient decision-making framework for hybrid metamodelling[J]. Engineering Optimization, 2019, 51(10):1761-1776.
- [3] 杨济匡, 华长星, 肖志. 副车架侧边纵梁耐撞性优化设计[J]. 中国机械工程, 2015, 26(1): 124-129.
- [4] 姚再起, 鲁慧才, 尹道志等. 基于局部碰撞模型的电动汽车铝合金门槛参数优化[J]. 2019, 第 15 届中国 CAE 工程分析技术年会论文集, 177-181.
- [5] 杨磊, 李宝军, 胡平. 横截面参数化网格变形算法及耐撞性优化应用[J]. 2019, 计算力学学报, 36(3): 324-331.
- [6] 李楠, 高卫民, 戴轶. 基于隐式参数化模型的车身结构优化设计[J]. 2008, 汽车工程, 30(10): 857-860.
- [7] Nelder J, Mead R. A simplex method for function minimization[J]. 1965, Computer Journal, (7): 308-310.