

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201703003



# 多学科与多材料匹配的客车车身轻量化优化设计

徐翔, 张勇, 林继铭, 曾意, 葛平政

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 提出基于多材料匹配与模块化设计的客车车身轻量化设计方法. 基于车身轻量化设计的多学科特性, 结合 Kriging 近似技术与协同优化设计方法, 建立基于侧翻安全性、顶部抗压学科的客车车身多学科优化设计模型, 并采用遗传算法进行多学科数值寻优. 优化结果表明: 基于灵敏度分析的模块化设计能较好地降低车身设计维度, 并获得具有较好力学性能的多材料匹配客车车身; 多材料车身不仅改善车身的安全特性, 而且提高车身顶部的抗压强度, 并较好地达到轻量化设计的要求.

**关键词:** 客车车身; 材料匹配; 模块化; 轻量化

**中图分类号:** U 271.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2017)03-0294-06

## Lightweight Design of Bus Body Based on Multidisciplinary Optimization and Materials Compatibility

XU Xiang, ZHANG Yong, LIN Jiming,  
ZENG Yi, GE Pingzheng

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** A lightweight design method for bus body based on materials compatibility and modular design was proposed in this paper. Considering the multidisciplinary characteristics of bus body about lightweight design, multidisciplinary design optimization models of rollover safety and roof crush resistance were established based on the Kriging approximate technology and collaborative optimization method. Then, numerical optimal design was performed using the genetic algorithm. The results show that modular design method based on sensitive analysis can reduce design dimension of bus body with excellent mechanical performance and, the materials compatibility of bus body can improve its safety by increasing the crush resistance strength of bus roof. As a result, the requirements of the lightweight design were well fulfilled.

**Keywords:** bus body; material matching; modularization; lightweight

研究显示, 客车车身的轻量化设计对提高燃油效率、降低尾气排放及减少环境污染至关重要<sup>[1]</sup>. 然而, 车身轻量化设计是一个多学科设计优化(MDO)问题, 涉及到结构力学特性、空气动力学及安全性等多个学科, 各学科间相互关联又相互耦合, 需同时考虑多个学科对客车整体性能的影响. 国外已有一些企业将 MDO 应用在汽车优化设计中<sup>[2-4]</sup>, 国内则主要集中在航天航空领域<sup>[5]</sup>. 在汽车领域, 苏瑞意等<sup>[6]</sup>采用协同优化方法, 展开基于单一材料客车车身结构的多学科优化设计; 王平等<sup>[7]</sup>基于协同优化和多目

**收稿日期:** 2016-06-23  
**通信作者:** 张勇(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事汽车碰撞安全性的研究. E-mail: flashzy1980@163.com.  
**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51675190); 福建省自然科学基金资助项目(2015J01204); 华侨大学中青年教师培养计划项目(ZQN-PY202); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(2015 年度)

标算法,开展车身结构的多学科多目标优化设计.然而,以前的研究主要集中于单一材料或局部结构车身优化,易造成车身力学性能的冗余设计.并且,客车车身杆系结构(设计变量)的设计维度较高,常导致优化设计难于执行.因此,本文结合模块化参数设计降维度的方法,开展客车车身的多学科轻量化协同优化设计,并在近似模型的基础上进行寻优,以获得更高安全性的轻量化车身.

## 1 模块化设计的客车车身

### 1.1 车身有限元模型及验证

基于 ECE R66 法规,建立客车侧翻模型,如图 1 所示.图 1 中:模型组成部分主要包括车身、翻转平台和地面.整车有限元模型由 412 967 个单元和 419 535 个节点组成,初始车身材料为 Q345 钢,弹性模量为 210 GPa,密度为  $7\,800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,泊松比为 0.3,屈服极限为 345 MPa.在侧翻碰撞过程中,车身任何部件不能侵入生存空间,即各立柱与生存空间的距离  $D_i$  应大于 0,其中, $i$  表示从车身前门开始所对应的第  $i$  根立柱.

此外,基于法规 FMVSS 220 建立的客车顶部抗压模型,如图 2 所示.在该模型中,车顶部用一个水平的刚性板进行静态加载,以板和车顶的接触力评价车身抗压强度,当接触力达到 1.5 倍整车整备质量时,车顶下降位移  $L$  应小于 130 mm.为了验证该客车有限元模型的准确性,将其与该车型对应的车身段模型进行侧翻试验对比,结果如图 3 所示.由图 3 可知:试验与仿真分析的车身变形效果基本一致.

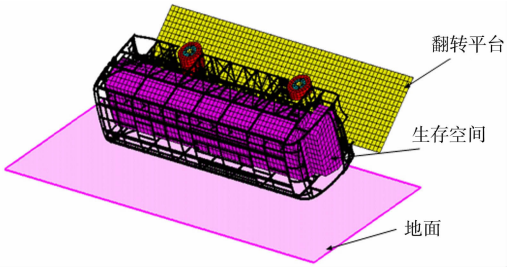


图 1 客车侧翻模型  
Fig. 1 Bus rollover model

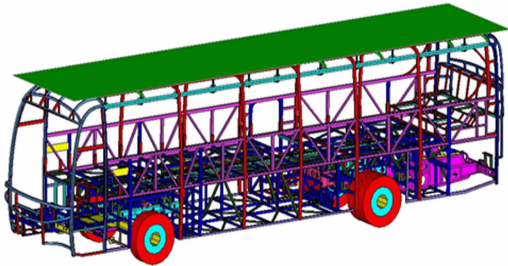


图 2 客车顶部抗压模型

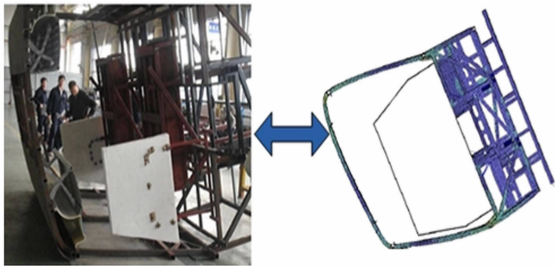


图 3 车身段侧翻试验和仿真对比分析图

Fig. 2 Compression model of bus-roof      Fig. 3 Comparison of body rollover test and simulation analysis

两种模型的侧翻入侵对比,如表 1 所示.由表 1 可知:二者的侧翻入侵量数据较为吻合.因此,可确认其客车有限元模型的合理可靠性.

表 1 模型的侧翻入侵对比

### 1.2 车身模块化参数设计

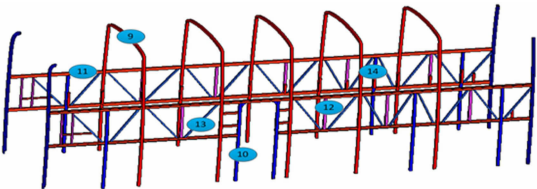
为了降低客车车身的设计维度,使数值优化设计易于开展,基于客车车身结构的对称性与功能相似性原则,开展了客车车身的模块化参数设计.

Tab. 1 Comparison of rollover invasion

模型	$D_3/\text{mm}$	$D_4/\text{mm}$	$D_5/\text{mm}$
仿真模型	-30.63	-22.70	-19.15
试验模型	-30.33	-23.23	-20.75

客车车身由前围、后围、左右侧围及顶棚 5 个部分组成,其模块如图 4 所示.其中,左、右侧围高度对称且功能相近.因此,可把左、右侧围中处于对称位置的结构杆件作为同一模块.同时,根据车身的结构特性,把每个部分中对应的横轴、纵轴和斜轴分别作为一个模块,定义为设计变量.将车身侧围划分成了 6 个子模块,如图 4(a)所示.

根据车身受力的传递路径,分别把前、后围中所有的横梁作为一个子模块,所有纵梁作为一个子模块,如图 4(b)所示.图 4(b)中:前围分成了 3 个子模块,后围分成了 2 个子模块.考虑到顶棚由很多排布规则的横梁和纵梁组成,依据结构对称性原则,分别相应的把所有



(a) 左右侧围分块

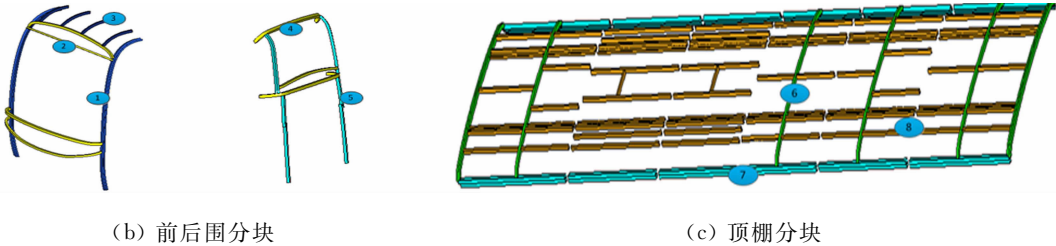


图 4 车身模块化示意图  
Fig. 4 Body modular diagram

横梁作为一个子模块,所有纵梁作为一个子模块.顶棚分成了 3 个子模块,如图 4(c)所示.

整个客车车身被分成 14 个具有对称结构与力学性能相似的模块(每一模块对应一个设计参数),并使这些子模块具有相同的材料与几何参数.为了方便参数设计,文中将各子模块中的材料、厚度作为设计变量,分别编号: $M_1, M_2, \dots, M_{14}; t_1, t_2, \dots, t_{14}$ . 其中,材料编号  $M_i$  所对应的参数范围主要包括 4 种高强度钢(Mart 1250, Mart 950, DP 700, DP 500)和一种铝合金(T7050)材料.

## 2 客车车身多学科协同优化设计

MDO 是一种通过探索各子系统之间相互协同工作的机理,并通过利用它们之间的协同效应来提高系统综合性能的优化方法.协同优化方法(CO)是多学科设计优化中的一种,它可将复杂系统优化划分为一个系统级优化和各学科间独立的优化,使优化过程变得相对简单.因此,文中采用协同优化方法探索客车车身侧翻安全性与车顶抗压结构特性的多学科最优解.

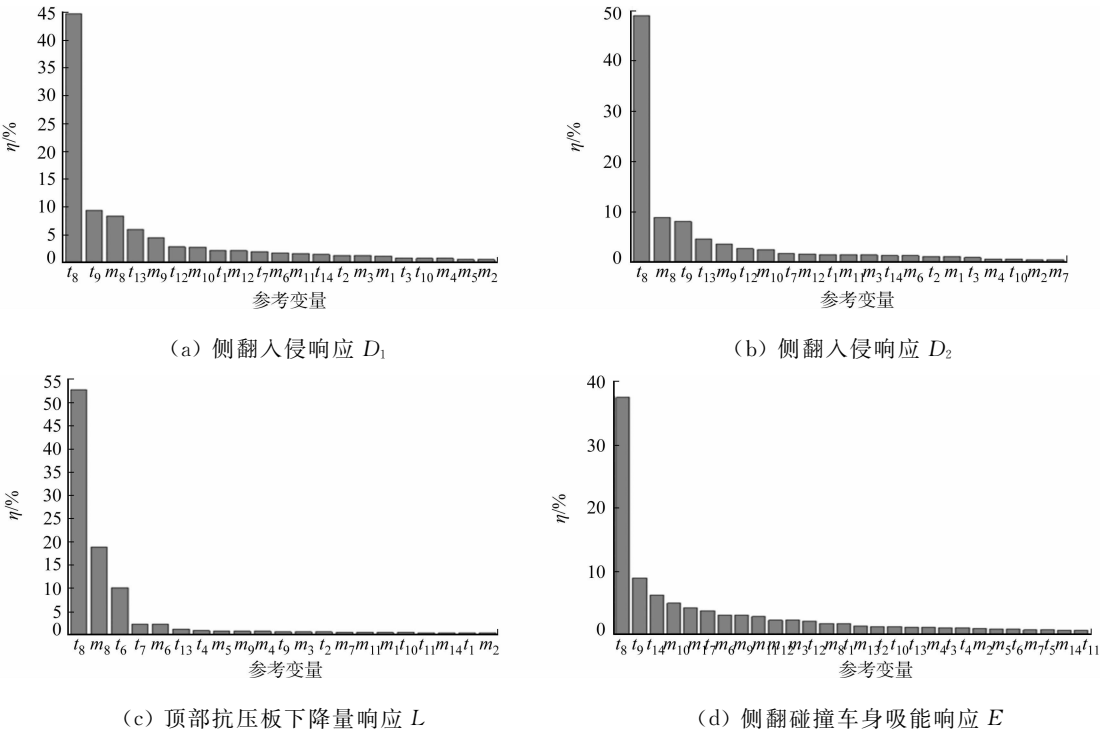


图 5 部分设计响应的灵敏度分析图

Fig. 5 Sensitivity analysis diagram of partial design response

为了研究多学科设计中各学科之间的耦合变量与独立变量,开展了 14 个模块设计参数对各学科设计响应(侧翻侵入量、顶部抗压及质量)的一阶敏度分析.其中,侧翻安全学科和顶部抗压学科对应的部分设计响应的灵敏度系数( $\eta$ ),如图 5 所示.由图 5 可知:模块的厚度参数比材料参数对各个学科的设计性能的影响更大.

为了进一步降低车身多学科设计的设计维度,综合各学科参数的灵敏度系数,获得了各学科独立变量与学科间的耦合变量,如表 2 所示.表 2 中: $t$  为厚度变量; $M$  为选材变量; $n$  为变量个数.

表 2 各学科优化变量统计

Tab. 2 Statistical variables of multidisciplinary design optimization

学科	$t$	$M$	$n$
侧翻碰撞	$t_1-t_3, t_7-t_{14}$	$M_1-M_6, M_8-M_{12}$	21
顶部抗压	$t_1, t_2, t_4, t_6-t_{14}$	$M_1-M_{11}, M_{14}$	24
系统级耦合变量	$t_1, t_2, t_7-t_{14}$	$M_1-M_6, M_8-M_{11}$	20

建立基于车身侧翻、车顶抗压及质量学科的多学科系统级优化模型,可表述为

$$\left. \begin{aligned} \min U, \\ \text{s. t. } J_1 = 0, \quad J_2 = 0, \quad Z = [t_i^s, M_j^s, D_k^s, L^s], \\ i = 1, 2, 7 \sim 14, \quad j = 1 \sim 6, 8 \sim 11, \quad k = 1 \sim 7. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中: $Z$ 为系统级优化变量; $[t_i^s, M_j^s]$ 为两个学科的耦合变量; $[D_k^s, L^s]$ 为两学科的状态变量; $J_1, J_2$ 为系统级变量和两个子学科变量之间的一致性约束,也是两个子学科优化设计的目标函数。

对应侧翻安全性子学科优化问题的数学模型可以表述为

$$\left. \begin{aligned} \min J_1 = (t_{i,1} - t_i^s)^2 + (M_{j,2} - M_j^s)^2 + (D_k - D_k^s)^2, \\ i = 1 \sim 3, 7 \sim 14, \quad j = 1 \sim 6, 8 \sim 12, \\ \text{s. t. } D_k > 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中: $t_{i,1}$ 与  $M_{j,1}$ 为侧翻子系统的优化变量,分别表示为模块材料的厚度及模块所对应材料的类型; $D_k$ 为侧围立柱对生存空间的入侵量。

同理,车身顶部抗压安全性子学科的优化问题,可表述为

$$\left. \begin{aligned} \min J_1 = (t_{i,2} - t_i^s)^2 + (M_{j,2} - M_j^s)^2 + (L - L^s)^2, \\ i = 1, 2, 4, 6 \sim 14, \quad j = 1 \sim 11, 14, \\ \text{s. t. } L \leqslant 130 \text{ mm.} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)中: $t_{i,2}$ 与  $M_{j,2}$ 为顶部抗压子系统优化中的优化变量; $L$ 为顶部抗压时车身顶部的变形位移。

3 近似模型

针对客车侧翻安全性和顶部抗压这类高度非线性力学分析问题,对其进行数值优化设计的计算成本高昂,且效率低下。因此,需采用工程近似模型对其进行数值近似。Kriging 近似技术能较好的获得高度非线性力学响应近似模型,而且还能去除数值噪音和光滑目标响应,提高优化设计效率<sup>[8-10]</sup>。因此,基于 Kriging 近似技术,构建了各学科响应的近似模型,并建立了车身 MDO 设计流程图,如图 6 所示。

由图 6 可知:为了建立不同学科响应的近似模型,使用拉丁方实验设计,对模块化客车车身的结构和材料参数空间进行了 90 次数据采样,并基于 LS-DYNA 的数值分析获取各学科的设计响应值,建立各设计响应的 Kriging 近似模型。然而,近似模型的精度决定了最优结果的准确性。因此,必须开展近似模型精度的验证。文中采用复相关系数  $R^2$  检测精度的验证方法,其数学表达式为<sup>[11]</sup>

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}. \quad (4)$$

式(4)中: $n$ 为样本个数; $\hat{y}_i$ 为第  $i$  个样本点的近似模型预测值; $y_i$ 为第  $i$  个样本点的有限元计算值; $\bar{y}_i$ 为样本均值; $R^2$ 表示拟合度,其值越接近 1,表示 Kriging 模型近似预测精度越高。随机采取 10 次样本点的有限元计算值与 Kriging 近似模型的预测值,分析其近似精度。侧围立柱侵入量  $D_k$ ,车顶下降位移  $L$ ,侧翻吸能  $E$  及质量  $m$  的  $R^2$  值,如表 3 所示。由表 3 可

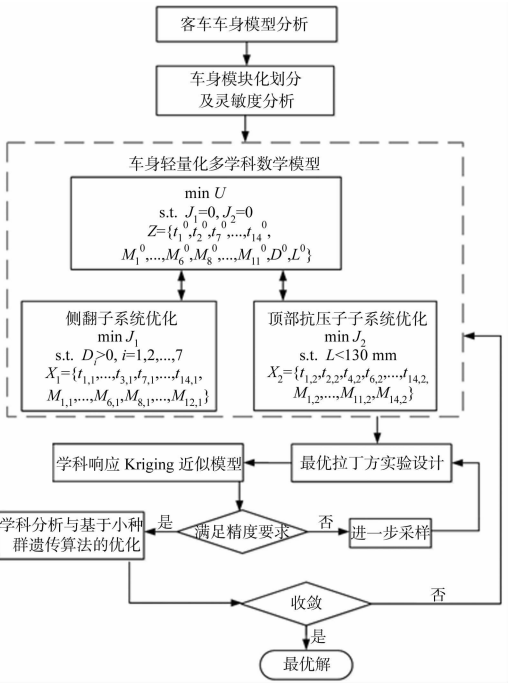


图 6 车身 MDO 基本框架图

Fig. 6 Basic frame diagram of vehicle MDO

知:各设计响应近似模型的  $R^2$  都接近 1,表明所建 Kriging 近似模型具有较高的预测精度<sup>[12]</sup>.

表 3 各设计响应的  $R^2$  值

Tab. 3  $R^2$  value of different design response

近似模型	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$D_6$	$D_7$	$E$	$m$	$L$
$R^2$	0.969	0.965	0.958	0.972	0.967	0.964	0.962	0.945	0.999	0.953

4 优化结果与分析

基于 MDO 设计流程,采用小种群遗传算法<sup>[13-14]</sup>对各设计响应的高精度近似模型进行寻优,设计目标  $F_w$  及车顶下降位移  $L$  迭代过程,如图 7 所示.图 7 中: $U$  为系统目标值; $N$  为迭代次数.由图 7 可知:设计响应在经过 18 次的迭代寻优后,趋于收敛.各设计响应值初始值及最优优化结果,如表 4 所示.各设计响应从第 13 次迭代开始收敛,直到第 18 次迭代时,系统目标值达到最小值,此时为多学科优化设计的最优解.

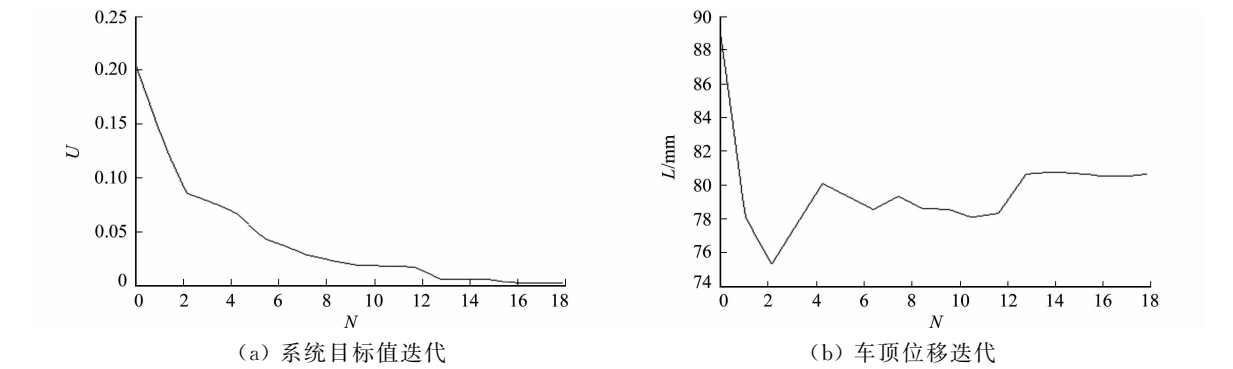


图 7 设计响应迭代过程曲线

Fig. 7 Iterative process curves of design response

表 4 设计响应值的初始值与最优优化值

Tab. 4 Initial value and optimal value

目标响应	初始值	优化值	目标响应	初始值	优化值	目标响应	初始值	优化值
$D_1$	-17.15	20.26	$D_5$	-19.15	7.43	$m/kg$	849.7	672.4
$D_2$	-38.19	0.91	$D_6$	-11.99	9.76	$L/mm$	96.3	80.8
$D_3$	-30.43	5.26	$D_7$	-14.76	29.01	$U$	0.154 9	0.008 8
$D_4$	-22.71	6.36	$E/kJ$	103.43	91.59			

由表 4 可知:整车车身经过多学科优化后,可减质量 177.3 kg,有效地达到了轻量化目的,并且车身侧围立柱没有入侵乘员的安全空间.优化前后车顶抗压曲线,如图 8 所示.图 8 中: $F_N$  表示顶部受力.由图 8 可知:当压缩力为 1.5 倍整车质量时,车顶下降位移减少了约 17%,从而使其抗压强度得到了较大的改善.初始设计和最优设计时,车身与地面接触的撞击力曲线,如图 9 所示.图 9 中: $F_C$  表

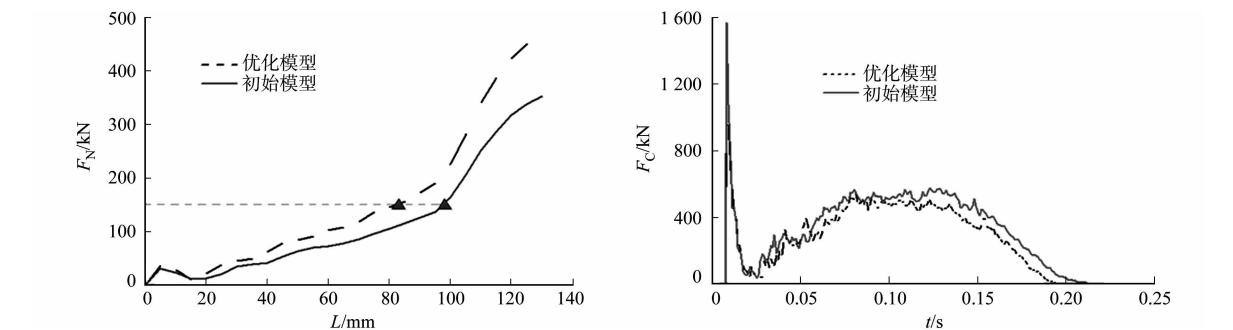


图 8 优化前后车顶顶部抗压对比

Fig. 8 Comparison of bus-top compressive strength before and after optimization

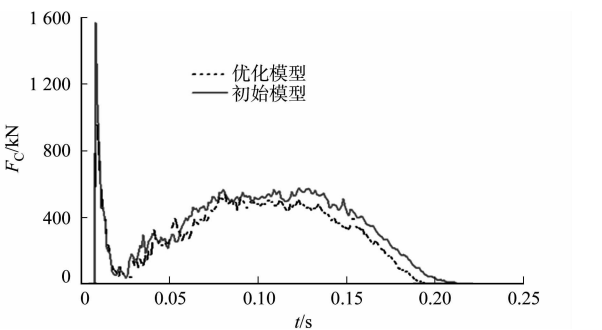


图 9 优化前后碰撞力曲线对比

Fig. 9 Comparison of impact force before and after optimization

示碰撞力.由图 9 可知:优化后,碰撞力峰值比初始模型降低约 23.6%,大大降低了二次碰撞对乘员的



伤害.综上所述,协同优化使车身的侧翻安全性与车顶强度等皆得到了较大的改善.

多材料混合车身示意图,如图10所示.由图10可知:迭代寻优后获得的多材料匹配混合车身各子模块的材料分布以铝合金 T7050 为主,并在一些关键的受力支撑部件搭配 MART1250 高强度钢;该优化结果在保障车身强度的基础上,有效降低了车身质量,综合兼顾了车身安全性与轻量化目的.

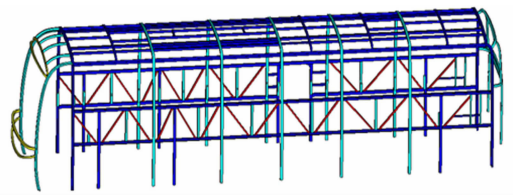


图10 多材料混合车身示意图

Fig. 10 Schematic diagram of blending materials vehicle body

## 5 结束语

基于车身合适材料应用于合适部位的多材料匹配理念,结合车身模块化设计方案降低车身结构的设计维度,以此开展车身结构的多学科轻量化优化设计.优化结果表明:1) 基于功能与相似性原则的客车车身模块化分区,能较大程度地降低设计变量,提高优化效率;2) 多学科优化设计不仅能较好地改善车身的侧翻安全及车顶抗压强度,而且能较大地减轻客车车身质量;3) 多材料车身的合理匹配使车身结构的力学性能得到更好地改善,为客车混合材料车身设计提供了一定的指导作用.

## 参考文献:

- [1] LONG Jiangqi. New technology of lightweight and steel-aluminum hybrid structure car body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 27-35.
- [2] 李奇,张勇,张成,等. 灵敏度分析的客车车身模块重构与结构轻量化优化设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 377-382.
- [3] CHEN Jianjiang, XIAO Renbin, ZHONG Yifang. A response surface based hierarchical approach to multidisciplinary robust optimization design[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26(4): 301-309.
- [4] KODIYALAM S, YANG R J, GU L, *et al.* Multidisciplinary design optimization of a vehicle system in a scalable, high performance computing environment[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 26(3): 256-263.
- [5] 胡婕,王如华,王稳江,等. 客机机翼气动/结构多学科优化方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(4): 459-463.
- [6] 苏瑞意,桂良进,吴章斌,等. 大客车车身骨架多学科协同优化设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 128-134.
- [7] 王平,郑松林,吴光强. 基于协同优化和多目标遗传算法的车身结构多学科优化设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 102-108.
- [9] 廖兴涛,张维刚,李青,等. 响应表面法在薄壁构件耐撞性优化设计中的应用研究[J]. 工程设计学报, 2006, 13(5): 298-302.
- [9] 周莎,张勇,张成,等. 基于梯度强度立柱的客车侧翻安全性多目标优化设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(3): 241-246.
- [10] 王锐,邓严,张俐. 客车侧翻试验及仿真分析[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(12): 87-90.
- [11] 高云凯,张朋,吴锦妍,等. 基于 Kriging 模型的大客车侧翻安全性多目标优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 1882-1887.
- [12] DONG Huachao, SONG Baowei, WANG Peng, *et al.* Multi-fidelity information fusion based on prediction of kriging [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2014, 51(6): 1267-1280.
- [13] 蔡明颀,么焕民. 基于小种群策略的并行遗传算法[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2013, 29(3): 13-15.
- [14] 张勇,陆勇. 基于序列响应面方法的高强度钢材材料参数反求[J]. 中国机械工程, 2010(18): 2255-2259.

(责任编辑:黄晓楠

英文审校:崔长彩)