

# 纯电动城市客车侧围骨架结构轻量化设计

刘佳森<sup>1</sup>, 何 锋<sup>1</sup>, 刘定一<sup>2</sup>, 边东生<sup>2</sup>

<sup>1</sup>贵州大学机械工程学院, 贵州 贵阳

<sup>2</sup>奇瑞万达贵州客车股份有限公司, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年10月8日; 录用日期: 2023年11月16日; 发布日期: 2023年11月22日

## 摘 要

针对纯电动城市客车侧围骨架结构沿用传统燃油城市客车侧围骨架结构设计导致载荷传递不合理、构件冗余的问题, 对纯电动城市客车侧围骨架结构重新进行轻量化设计。以某款纯电动城市客车侧围骨架为研究对象, 基于Hypermesh软件建立有限元模型, 在紧急转弯工况下, 采用拓扑优化的方法对客车侧围骨架结构进行轻量化设计, 并对设计结果进行静力学分析和模态分析。结果表明, 与原结构相比, 侧围骨架质量降低9.74%, 实现了纯电动城市客车侧围骨架结构轻量化设计, 同时避免了共振现象的产生。

## 关键词

纯电动客车, 侧围结构, 拓扑优化, 轻量化

# Lightweight Design of Side Frame Structure of Pure Electric City Bus

Jiasen Liu<sup>1</sup>, Feng He<sup>1</sup>, Dingyi Liu<sup>2</sup>, Dongsheng Bian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

<sup>2</sup>Chery Wanda Guizhou Bus Co. Ltd., Guiyang Guizhou

Received: Oct. 8<sup>th</sup>, 2023; accepted: Nov. 16<sup>th</sup>, 2023; published: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2023

## Abstract

For pure electric city bus side scarf skeleton structure side of traditional fuel city bus frame structure design leads to unreasonable load transfer, the problem of redundant components, the pure electric city bus side around the skeleton structure lightweight design again. Taking the side

frame of a pure electric city bus as the research object, the finite element model is established based on Hypermesh software. Under the emergency turning condition, the light weight design of the side frame structure of the bus is carried out by topological optimization method, and the design results are analyzed statically and modal. The results show that, compared with the original structure, the side frame mass is reduced by 9.74%, and the lightweight design of the side frame structure of pure electric city bus is realized, and the resonance phenomenon is avoided.

## Keywords

Pure Electric Bus, Side Enclosure Structure, Topology Optimization, Light Weight

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 概述

与传统燃油城市客车相比,纯电动城市客车不再设置发动机,增加了驱动电机和动力电池等,其整体受力及其载荷分布都发生了较大的变化。车身侧围骨架连接着车顶骨架及其底盘机构,其载荷分布也会出现较大的改变,因此对侧围骨架结构重新进行轻量化设计具有重大意义[1]。侧围骨架结构轻量化设计一般指侧围骨架在满足其他各项性能指标的约束条件下,对结构空间进行重新设计并使其质量降低[2]。在侧围骨架结构轻量化设计过程中,侧围骨架结构的屈服强度和模态性能都会受到影响,进而影响纯电动城市客车安全性、耐久性和力学性能[3]。

目前结构设计优化常用的方法是拓扑优化[4]。丁卯[5]等提出了一种基于变密度法的结构强度拓扑优化以达到在迭代过程中密度单元比例不断下降,提出了先结构拓扑优化,后近似形状优化的新方法,保证了优化结构的稳定性;彭娅楠[6]等人通过使用 ANSYS 软件将低合金钢材材料替换为铝合金材料对某中型电动客车进行改进,骨架质量减少了 397 kg,达到了轻量化的目的;罗宾[7]等人采用灵敏度分析的方法对灵敏度较低的部件进行轻量化处理,质量降低了 4.1 kg。赖坤城[8]等人对发动机悬置左侧连接点进行局部拓扑优化,提高了车辆的乘坐舒适性;Junyang Zhang [9]等人将 LFT 成型工艺、吸能模型和拓扑优化相结合对乘用车座椅靠背骨架结构进行优化,与钢板框架相比,减重效果达到了 13.21%。

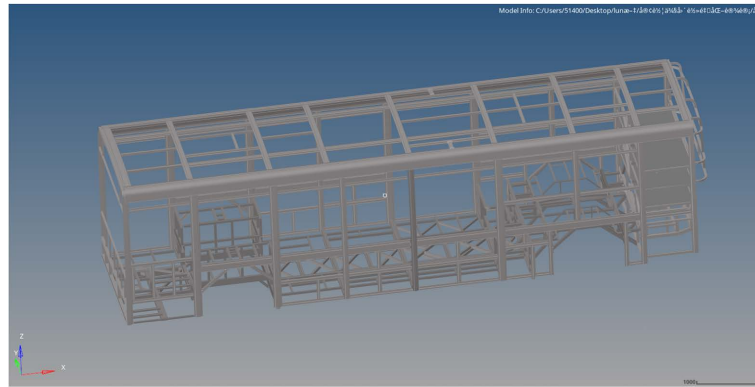
基于拓扑优化的结构设计方法,本文以某款纯电动城市客车为研究对象,以侧围区域体积分数为约束条件,以整车骨架柔度最小为目标函数,对某纯电动城市客车侧围骨架结构进行轻量化设计。

## 2. 纯电动城市客车模型有限元分析

纯电动城市客车模型车身长度为 10.49 m,宽为 2.5 m,高为 3.16 m,侧围骨架结构为传统燃油城市客车侧围骨架结构。为便于划分网格,对三维模型进行简化,去除了尺寸较小的倒角和圆角。在 Hypermesh 软件中,网格尺寸大小设置为 10 mm,车身各部件使用 RBE2 刚性单元模拟焊接。划分完毕后网格总数量为 1,367,231 个,如图 1 所示:

纯电动城市客车的底盘及电池架材料为 Q700 钢,其他部件材料均为 1v6061-T6,两种材料属性如表 1 所示。

纯电动城市客车主要承受载荷分布如表 2 所示:



**Figure 1.** Bus finite element model  
**图 1.** 客车有限元模型

**Table 1.** Material property  
**表 1.** 材料属性

材料名称	Q345	Lv6061-T6
屈服极限/MPa	345	270
弹性模量/MPa	2.06E+05	7.00E+04
密度(kg/m <sup>3</sup> )	7.85E-09	2.70E-09
泊松比	0.3	0.25

**Table 2.** Load mass distribution  
**表 2.** 载荷质量分布

名称	车门	乘客	电池组	侧窗玻璃	空调及其他附件
质量/kg	284	2120	800	250	330

### 2.1. 工况选择

在紧急转弯工况时，纯电动城市客车除了承受骨架自身及其他安装部件的重力、乘客的重力之外，还承受了由转向产生的侧向力，侧围骨架结构所受载荷会进行二次分配并改变各部件受力，因此选择紧急左转弯和紧急右转弯两种典型工况进行静力学分析并对侧围骨架结构进行轻量化设计。

### 2.2. 典型工况受力结果分析

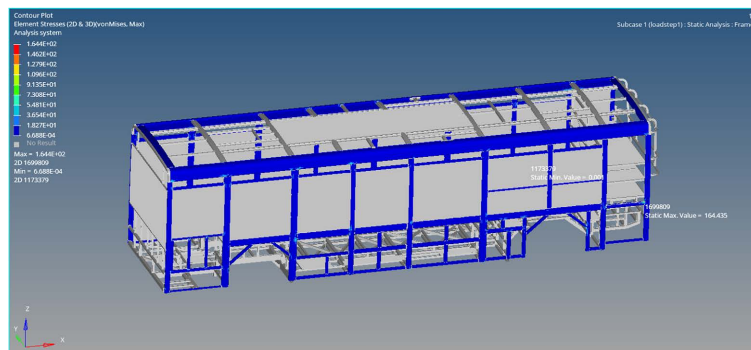
采用空间坐标系，X 轴方向指向客车尾部，Y 轴指向客车车门方向，Z 轴方向在质心处垂直向上，坐标原点 O 与车辆质心重合。

紧急转弯工况下前轮与后轮的约束情况如表 3 所示：

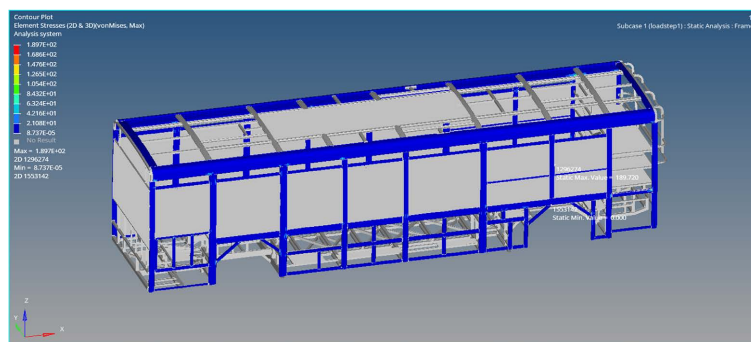
**Table 3.** Working condition constraint  
**表 3.** 工况约束

	左前轮	右前轮	左后轮	右后轮
紧急左转	1、2、3	1、3	3	3
紧急右转	1、3	1、2、3	3	3

1、2、3 分别代表约束 x、y、z 轴，在紧急左转弯时，施加一个加速度为 0.4 g 的侧向力；当紧急右转弯时，施加一个加速度为 -0.4 g 的侧向力。得到应力云图如图 2、图 3 所示：



**Figure 2.** Side confining stress nephogram under left limit turning condition  
**图 2.** 左极限转弯工况下侧围应力云图



**Figure 3.** Side confining stress nephogram under right limit turning condition  
**图 3.** 右极限转弯工况下侧围应力云图

由图 2、图 3 可见，左紧急转弯工况下最大应力为 164.435 MPa，右紧急转弯工况下最大应力为 189.720 MPa。侧围材料采用 Lv6061-T6，取安全系数为 1.25，材料许用应力为 216 MPa，最大应力在材料许用应力范围内。

由上述分析可得出，沿用传统燃料城市客车侧围骨架结构虽然可行，但在侧围骨架质量上仍有进一步优化空间。

### 3. 拓扑优化

拓扑优化是目前常用的一种结构设计手段，其主要原理是将结构最优拓扑问题转化为材料分布最优的问题[10]。本文将纯电动城市客车侧围区域质量分数设为约束条件、整车骨架柔度最小为目标函数对客车侧围结构进行拓扑优化设计，主要使用的是 SIMP 方法[11]。建立拓扑优化的数学模型如下[12]：

$$\begin{cases} X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T \\ \min C = F^T U \\ s.t. \\ V_1/V_0 \leq k, 0 \leq X_i \leq 1, F = KU \end{cases} \quad (1)$$

其中， $X_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) 为每个单元的相对密度， $C$  为结构的柔度矩阵； $F$  为载荷矢量； $U$  为位移矢量； $k$  为剩余材料的百分比； $V_1$  为优化后剩余材料的总体积； $V_0$  为设计区域的体积； $K$  为刚度矩阵。

拓扑区域如图 4、图 5 所示：



Figure 4. Topology optimization area on the left  
图 4. 左侧拓扑优化区域



Figure 5. Topology optimization area on the right  
图 5. 右侧拓扑优化区域

在拓扑优化过程中，计算区域会出现材料密度为 0 和 1 的单元，这些单元会呈现出形似棋盘格式的周期性分布状态，这就是棋盘格效应[13]。为解决这一问题，将侧围骨架结构的宽度最小值与最大值设为 30 mm 和 70 mm。在紧急转弯工况下，仿真结果如图 6~9 所示：

从图 6~9 可以看出，结果符合受力特性且载荷传递路径清晰，紧急左转时，左侧侧围载荷更为集中，紧急右转弯时，右侧侧围载荷更为集中。可结合两种工况对侧围骨架结构进行设计。选取紧急左转弯工况对左侧侧围进行设计，选取紧急右转弯工况对右侧侧围进行设计。

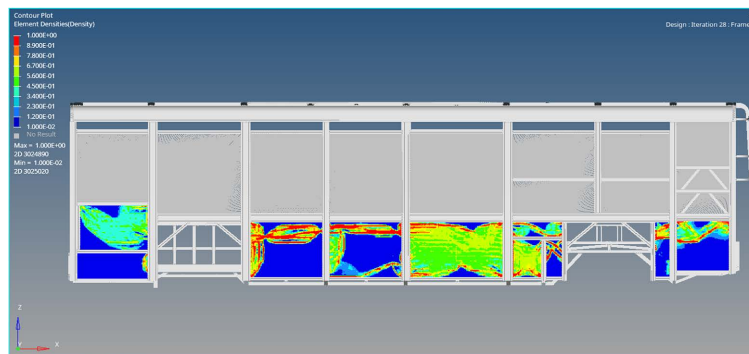


Figure 6. Left side confining stress nephogram under emergency left turn condition  
图 6. 紧急左转弯工况下左侧侧围应力云图

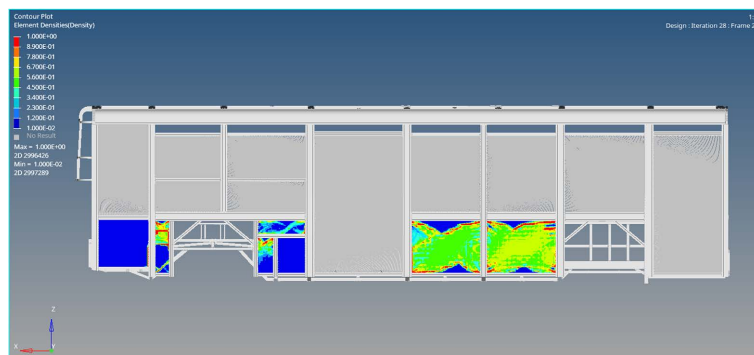


Figure 7. Right side confining stress nephogram under emergency left turn condition  
图 7. 紧急左转弯工况下右侧侧围应力云图

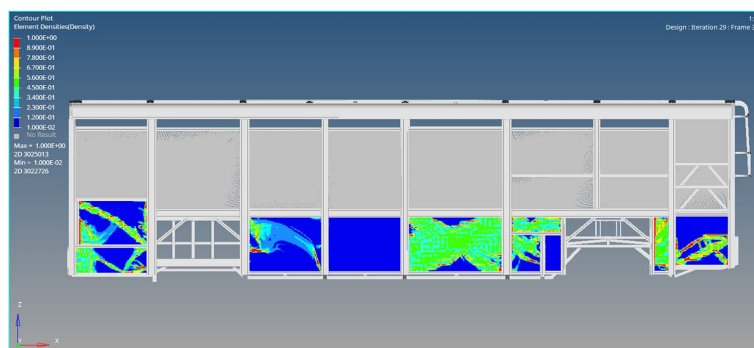


Figure 8. Left side confining stress nephogram under emergency right turn condition  
图 8. 紧急右转弯工况下左侧侧围应力云图

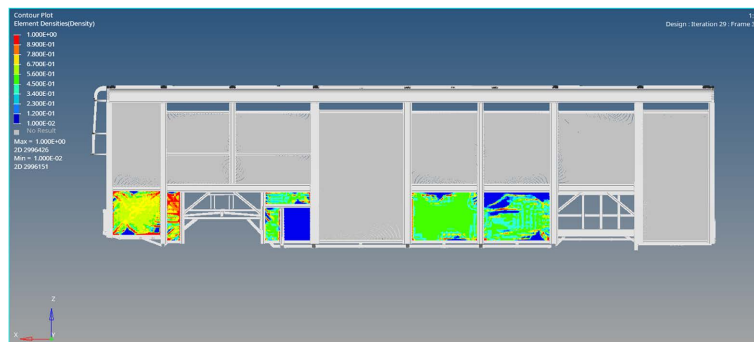


Figure 9. Right side confining stress nephogram under emergency right turn condition  
图 9. 紧急右转弯工况下右侧侧围应力云图

#### 4. 侧围骨架结构设计及模态分析

在满足总布置要求的前提下达到以下设计条件[14]:

- 1) 必须协调侧围强度和总布置之间的矛盾;
- 2) 保证加工难度较低;
- 3) 侧围结构要标准化、规范化。

在满足上述条件的情况下,根据拓扑优化结果对侧围骨架结构重新进行轻量化设计,在设计过程中,充分利用拓扑优化结果的载荷传递路径,忽略载荷较小部分,对载荷集中部分进行设计,多采用杆件结构来降低加工难度。设计结果如图 10、图 11 所示:

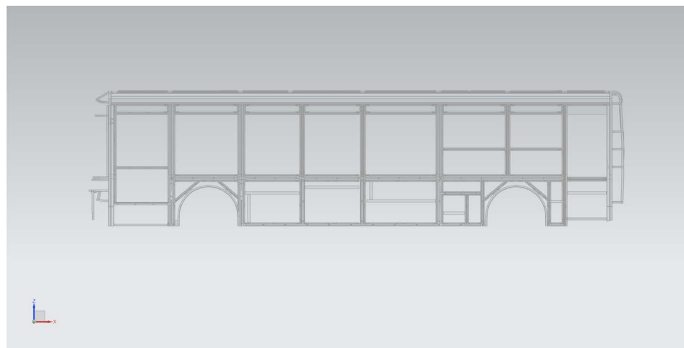


Figure 10. Topology design results on the left side

图 10. 左侧侧围拓扑设计结果

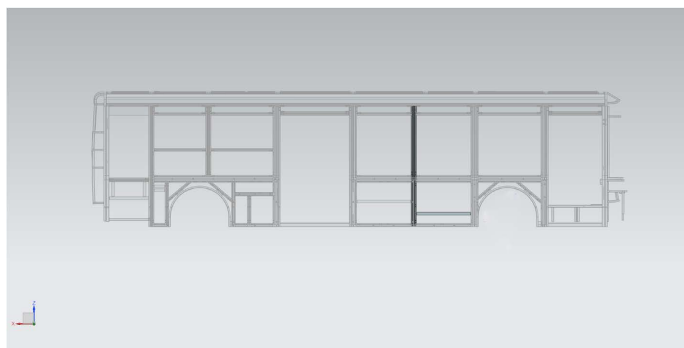


Figure 11. Topology design results on the right side

图 11. 右侧侧围拓扑设计结果

在设计的过程中，客车骨架结构不仅要满足强度和刚度要求，同时还需满足结构动态性能要求。为避免纯电动城市客车骨架在行驶过程中产生共振，采用自由模态分析方法分析车身估计模态振型特性，具体设置见表 4，前 20 阶模态频率如表 5 所示：

Table 4. Modal analysis settings

表 4. 模态分析设置

名称	数值
频率下限/V1	1 Hz
频率上限/V2	100 Hz
阶数/ND	20

Table 5. Body frame first 20 free mode frequencies

表 5. 车身骨架前 20 阶自由模态频率

模态阶次	模态频率(Hz)	模态阶次	模态频率(Hz)
1	7.481220E+00	11	2.080891E+01
2	7.764818E+00	12	2.140374E+01
3	9.532363E+00	13	2.174275E+01
4	1.247876E+01	14	2.249889E+01



Continued

5	1.333289E+01	15	2.384543E+01
6	1.504772E+01	16	2.408134E+01
7	1.562023E+01	17	2.475895E+01
8	1.650965E+01	18	2.589776E+01
9	1.876531E+01	19	2.669447E+01
10	2.030404E+01	20	2.713550E+01

客车在情况良好的路面上行驶时，路面对车身激励频率一般为 1~3 Hz；驱动电机频率一般为 127 Hz [15]；而车轮和传动轴引起的激励频率由于所占比例较小，可忽略不计。由表 5 可知，客车车身最低固有频率为 7.48122 Hz，与路面激励频率及电机激励频率不存在重合及倍数现象，可以在行驶过程中有效避免共振现象，符合设计要求。

## 5. 骨架结构有限元分析验证

使用与上述相同的约束条件，对设计后的模型进行静力学分析，分析结果如图 12、图 13 所示：

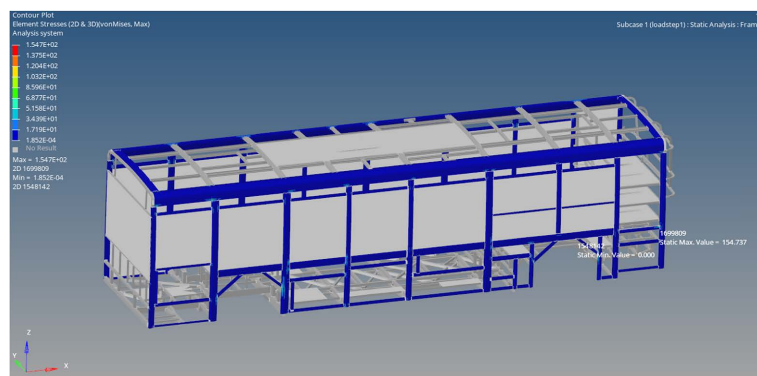


Figure 12. Stress cloud image under emergency left turn condition  
图 12. 紧急左转弯工况下应力云图

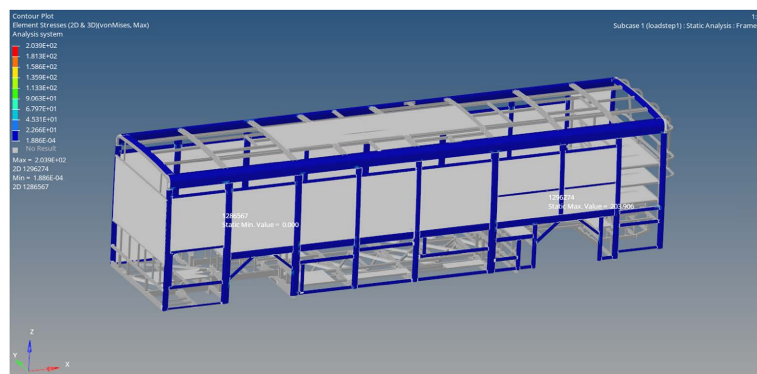


Figure 13. Stress cloud image under emergency right turn condition  
图 13. 紧急右转弯工况下应力云图

重新设计后，在紧急左转弯情况下，最大应力为 154.737 MPa，出现在左侧侧围后半部，紧急右转弯



情况下,最大应力为 203.906 MPa,出现在右侧侧围前半部,符合设计要求。

轻量化设计后侧围骨架结构总体质量为 184.4 kg,而该客车沿用传统侧围骨架结构时总体质量为 204.3 kg,与纯电动城市客车原侧围结构相比,质量降低了 9.74%,实现了轻量化设计,车身侧围骨架结构设计前后最大应力及质量对比见表 6。

**Table 6.** Body side frame structure design before and after comparison  
**表 6.** 车身侧围骨架结构设计前后对比

	最大应力(MPa)		许用应力(MPa)	质量(kg)
	紧急左转	紧急右转		
设计前	164.435	189.720	216	204.3
设计后	154.737	203.906	216	184.4

## 6. 结论

本文使用 Hypermesh 软件对某纯电动城市客车侧围骨架结构进行轻量化设计,具体结论如下:

1) 利用拓扑优化的方法,设计了全新纯电动客车侧围骨架结构。该结构满足静力学要求,模态分析结果良好,避免了共振现象的发生;

2) 设计后的侧围结构质量相比于设计前的侧围骨架结构降低了 9.74%,实现了客车侧围骨架结构的轻量化设计。

## 基金项目

黔科合成果[2023]一般 003。

## 参考文献

- [1] 邱欢. 某大型公路客车侧围结构设计与分析[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(6): 65-67.
- [2] 王雨臣. 混合动力城市客车侧围骨架结构的二次拓扑优化设计[J]. 客车技术与研究, 2015, 37(5): 22-25.
- [3] 时佩华. 乘用车侧围造型设计与结构轻量化研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春工业大学, 2022.
- [4] Nishiwaki, S. and Terada, K. (2018) Advanced Topology Optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **113**, 1145-1147. <https://doi.org/10.1002/nme.5703>
- [5] 丁卯, 耿达, 周明东, 等. 基于变密度法的结构强度拓扑优化策略[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(6): 764-773.
- [6] 彭娅楠, 白文龙. 纯电动客车车身骨架设计与优化[J]. 山东交通学院学报, 2019, 27(3): 7-12.
- [7] 罗宾, 马丽春, 李金龙. 基于灵敏度分析的某铝合金白车身轻量化研究[J]. 内燃机与配件, 2020(8): 13-15.
- [8] 赖坤城, 赵津, 刘东杰, 等. 某轿车车身关键连接点动刚度分析及优化设计[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(36): 337-342.
- [9] Zhang, J., Li, Z., Sang, T., et al. (2021) Structure Design of LFT Passenger Car Seat Structure Based on Topology Optimisation. *International Journal of Crashworthiness*, **26**, 617-627. <https://doi.org/10.1080/13588265.2020.1766399>
- [10] Zhang, J., Li, Z., Fang, Q., et al. (2019) Topological Optimisation Design of Passenger Car Seat Backrest Frame Based on Multiple-Loading Conditions. *International Journal of Crashworthiness*, **25**, 581-590. <https://doi.org/10.1080/13588265.2019.1634355>
- [11] Lee, D. and Shin, S. (2020) Topological Optimal Material Design of Structures with Moved and Regularized Heaviside Function. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, **44**, 103-117. <https://doi.org/10.1007/s40997-018-0241-2>
- [12] 王登峰, 毛爱华, 牛妍妍, 等. 基于拓扑优化的纯电动大客车车身骨架轻量化多目标优化设计[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 136-143.

- 
- [13] Zhang, J., Chen, Y., Zhai, J., *et al.* (2021) Topological Optimization design on Constrained Layer Damping Treatment for Vibration Suppression of Aircraft Panel via Improved Evolutionary Structural Optimization. *Aerospace Science and Technology*, **112**, 106619. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106619>
- [14] 黄天泽, 黄金陵. 汽车车身结构与[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [15] 王旭飞, 焦登宁, 谭飞, 等. 基于灵敏度分析的客车骨架轻量化设计[J]. 现代制造工程, 2021(9): 52-57.