

DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2022.02.19

# 基于灵敏度的新型宽轮距转向架构架结构优化

杜子学,王 奥,杨 震

(重庆交通大学 轨道交通研究院,重庆 400074)

**摘要:**针对新型宽轮距跨座式单轨转向架构架端梁刚度不足、模态频率低的问题,建立了构架的有限元模型,进行自由/约束模态的灵敏度分析;提出在构架端梁中增加减重孔和采用铝合金材料这两种优化方案,并进行自由/约束模态灵敏度分析;最后对优化后的构架端梁进行静强度和疲劳强度分析。研究结果显示:在静强度工况下,优化后的构架端梁最大应力位于构架齿轮箱体上,且小于材料的屈服极限强度;在疲劳强度工况下,与原有的构架端梁相比,优化后的危险节点循环次数较低,但仍满足工程要求。

**关键词:**车辆工程;转向架构架;结构优化;有限元;灵敏度分析

中图分类号:U239.5

文献标志码:A

文章编号:1674-0696(2022)02-131-06

## Structural Optimization of a New Bogie Frame with Wide Track Width Based on Sensitivity

DU Zixue<sup>1</sup>, WANG Ao<sup>2</sup>, YANG Zhen<sup>1</sup>

(Institute of Urban Rail, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of insufficient stiffness and low modal frequency of the frame end beam of the new wide-track straddle type monorail bogie, a finite element model of the frame was established and the sensitivity analysis of free/constrained modes was carried out. Two optimization schemes of adding weight-reducing holes and using aluminum alloy materials in the end beams were carried out, free/constrained modal sensitivity analysis was carried out; finally, the static strength and fatigue strength analysis of the optimized frame end beams were carried out. The results show that: under the static strength condition, the maximum stress of the optimized frame end beam is located on the frame gear box, and is less than the yield strength of the material; under the fatigue strength condition, compared with the original frame end beam, the optimized dangerous node cycle times are less, but still meet the engineering requirements.

**Key words:** vehicle engineering; bogie frame; structural optimization; finite element; sensitivity analysis

跨座式单轨由转向架、车体、走行部分等部分组成,国内以重庆轻轨二号线、三号线为代表<sup>[1]</sup>。走行部分采用橡胶轮胎骑行在轨道梁上,其独特的走形机理具有稳定性强、转弯半径小、噪声低、爬坡能力优良等特点<sup>[2]</sup>。转向架构架是承载列车车体和连接走行部分的重要中介,构架的强度、寿命、可靠性等已成为研究中关注的重要指标。

传统的转向架存在换轮不便、走行轮磨损大、维修不便等问题。针对这些问题,笔者所在团队研发出一种新型的双轴宽轮距转向架。该研究中转向架构架与齿轮箱一体,具有 4 个走行轮和 4 个水平轮,

采用宽轮距走行轮,构架为脊梁式王字型结构,具有更好的稳定性。笔者通过对构架的灵敏度进行分析,得到了影响构架刚度的主要构件<sup>[3-5]</sup>,并对这些构件进行优化和轻量化设计<sup>[6]</sup>。

## 1 理论模型与分析方法

结构分析最常用的是有限元方法,利用网格划分将模型离散化并进行相应研究。有限元法方法和优化技术相结合可对机械产品及零件进行更加精确的求解分析<sup>[7]</sup>。

收稿日期:2020-06-04; 修订日期:2020-07-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51475062)

第一作者:杜子学(1962—),男,河北邯郸人,教授,博士,主要从事车辆设计方法与理论方面的研究。E-mail: aadzx@163.com

通信作者:王 奥(1994—),男,四川会东人,硕士研究生,主要从事车辆工程方面的研究。E-mail: 695400585@qq.com

## 1.1 结构优化理论模型

结构优化理论模型如式(1):

$$\begin{cases} \text{Minimize: } f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{Subject to: } g_j(x) \leq 0 \quad (j=1, 2, \dots, n) \\ h_k(x) = 0 \quad (k=1, 2, \dots, n) \\ x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad (i=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $f(x)$  为优化目标函数最小值;  $x, x_1, \dots, x_n$  分别设计变量;  $g_j(x)$  为约束不等式函数;  $h_k(x)$  为约束等式函数;  $x_i^L$  与  $x_i^U$  分别为自变量的上下限取值范围。

在式(1)中,目标表达式  $f(x)$ 、约束函数  $g(x)$  与  $h_k(x)$  分别来自有限元结构设计中得到的结构响应。主流结构优化大致可分为拓扑优化、形状优化和尺寸优化。其中,优化类型决定了设计变量  $x$ , 优化变量通常定义为钣金件厚度分布或梁的横截面面积等。

## 1.2 灵敏度分析方法

初始点在可行域内可通过灵敏度分析方法获得。此分析方法不但可扩大优化方法选择面,而且一般都接近于模型分析的最优点,能明显提高计算过程中的优化效率。同时还可加快收敛速度,为主体结构改进提供正确依据<sup>[8]</sup>。

灵敏度分析方法可用于分析其个系统(模型)输入状态变化对其他系统参数影响的敏感程度,通常采用半解析法、差分法、解析法。有限元分析中,结构相对于设计变量的一阶偏导数即为灵敏度。有限元刚度方程如式(2):

$$P = KU \quad (2)$$

式中:  $P$  为单节点载荷矢量;  $K$  为刚度矩阵;  $U$  为单元节点位移矢量。

对式(2)左右两边的设计变量  $x_i$  求偏导数,即可得出关于位移的灵敏度,如式(3):

$$\frac{\partial U}{\partial x_i} = K^{-1} \left( \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial K}{\partial x_i} U \right) \quad (3)$$

针对类似的形状优化,在多个设计变量约束较少的情况下,通常无法采用直接灵敏度分析方法。因此在计算过程中引入伴随向量  $\bar{U}_j$ , 如式(4):

$$\bar{U}_j = Q_j \quad (4)$$

式中:  $\bar{U}_j$  为伴随位移向量;  $Q_j$  为伴随负载向量。

在形状变量的灵敏度分析中,通常使用不完全分析方法。采用中心有限差分法对式(2)求导,有式(5):

$$\frac{\partial K}{\partial x_i} = \frac{K(x_i + \Delta x_i) - K(x_i - \Delta x_i)}{2\Delta x_i} \quad (5)$$

## 2 转向架结构分析

### 2.1 有限元模型

新型宽轮距跨座式单轨转向架构架的整体设计流程如图1。有限元分析板块分为网格划分、单元分析、整体分析几个部分。利用 Altair HyperMesh 前处理软件,对构架模型进行简化和几何清理<sup>[9]</sup>。

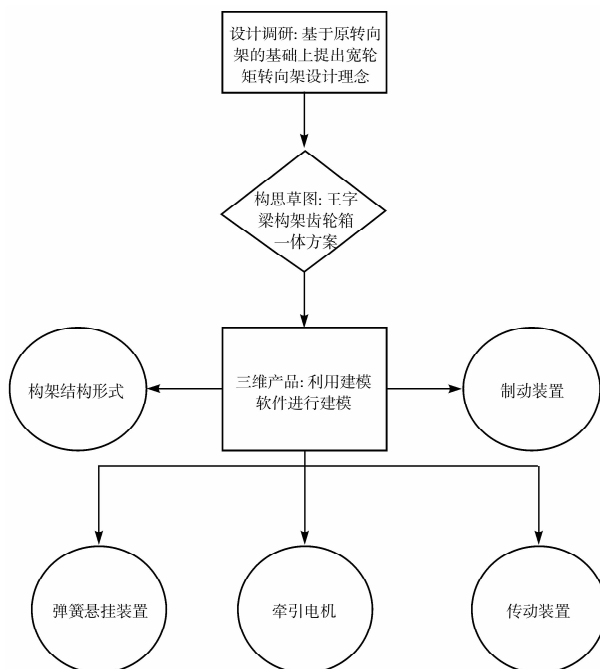


图1 转向架整体设计流程

Fig. 1 Overall design flow of bogie

构架两侧端梁钣金件可采用 10 mm 的面网格划分,中部电机箱与齿轮箱则采用六面体网格,螺栓连接采用梁单元模拟,利用 Altair Hyperworks 软件进行应力计算<sup>[10]</sup>。转向架构架的 FEA 模型,如图2。

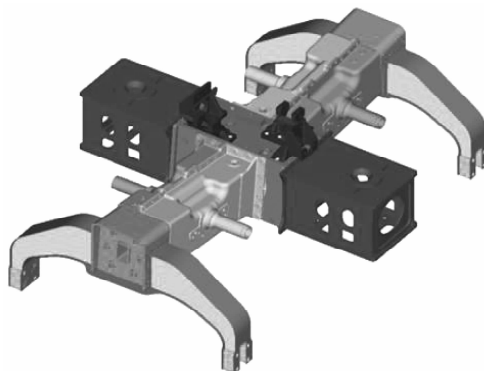


图2 转向架构架的 FEM 模型

Fig. 2 FEM model of bogie frame

### 2.2 结构模态分析

模态分析是一种在工程振动领域中研究结构动

力特性的方法,其最终目的是通过识别系统的模态参数,为整个系统故障分析、诊断和振动特性分析提供参考依据。对整个转向架,考虑到转向架构架、驱动电机、走行轮轮轴、道岔梁等系统之间发生共振耦合频率的可能性,应回避以上系统的共振频率,一般期望构架的一阶模态频率越高越好<sup>[11]</sup>。

在约束模态分析中,结合构架运营工况对构架进行约束:空气弹簧垂向自由度和走行轮轮轴横向、纵向、垂向自由度,并将模型导入到求解器中。笔者重点考虑前 4 阶的模态振型和频率,计算结果如图 3。

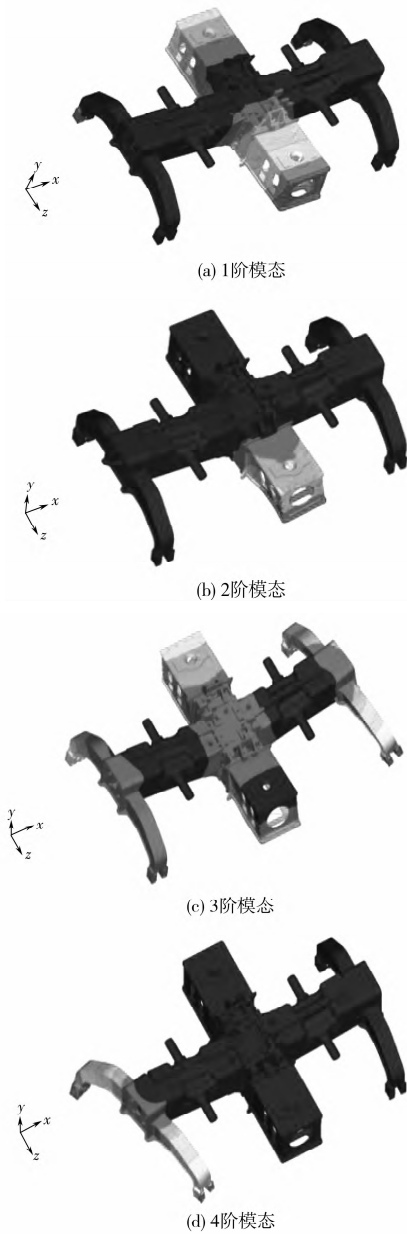


图 3 转向架构架的模态云图  
Fig. 3 Modal cloud diagram of bogie frame

原构架模态频率值及其振型如表 1。由表 1 可

知:原转向架构架的前 4 阶模态频率均较低,结构刚度较小;第 4 阶频率振型为单侧端梁前后摆动,主要破坏来自构架弯曲变形,且对构架的疲劳破坏影响较大。故应提高构架刚度,增加构架的低阶频率<sup>[12]</sup>。

表 1 原构架模态频率值及其振型

Table 1 Modal frequency value and mode shape of the original frame

振 型	频率/Hz
电机箱绕纵梁扭转(第 1 阶)	25.97
单侧电机箱绕一级箱体前后摆动(第 2 阶)	33.21
整个箱体中央下沉弯曲(第 3 阶)	64.09
单侧端梁前后摆动(第 4 阶)	64.80

借助灵敏度分析法能找出对构架刚度影响明显的参数变量。通过相应参数合理设定,再对构架进一步结构优化,并在此基础上进行重构,最后在增强构架刚度基础上提高其动力学性能。

2.3 灵敏度分析

灵敏度分析方法反映了结构参数与设计变量对目标函数影响的变化梯度,通过该方法可分析出各关注变量对于目标函数的贡献程度及敏感性参数值。灵敏度分析方法通过寻找最优搜索路径,建立准则方程,构造对应迭代公式。目前常采用改变不同钣金件厚度,求出目标函数对厚度的导函数,并进行排序,找出导函数值下的最大零件,该零件即为重点关注的零件。

在灵敏度分析理论中,若灵敏度值为负时,降低板件厚度或降低质量会降低车身模态频率;若灵敏度值为正时,则表明该板件对于某阶模态频率灵敏度越高。提高板件厚度或质量对增加对该阶模态频率有着更突出的作用<sup>[13]</sup>。

将构架两端梁钣金件厚度作为设计变量,目标函数分别为质量和 1 阶频率值,不同板厚的灵敏度云图如图 4。由图 4 可知:转向架构架两端梁部分不同厚度板件对构架 1 阶频率影响各不相同。

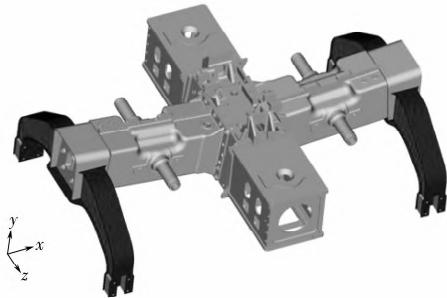


图 4 转向架构架端梁的灵敏度云图  
Fig. 4 Sensitivity cloud chart of bogie frame end beam

对两侧端梁,不同厚度板件的质量和 1 阶频率

敏感度如图 5。就模态灵敏度而言,端梁厚度为 10 mm 的两侧板灵敏度比厚为 12 mm 的上下板高,而两者灵敏度贡献量均为负值,因此改进厚度为 10 mm 的板更有利于提高 1 阶固有频率。对整体结构而言,转向架构架大致分为两端端梁连接稳定轮、中间纵梁通过走形轮轮轴连接走形轮、横梁通过空气弹簧连接车体。中间纵梁和横梁通过整体铸造而成,由于工艺因素不便对其进行优化改动;两侧端梁由板金件焊接而成,可在加工生产中改变钣金件的厚度与形貌。

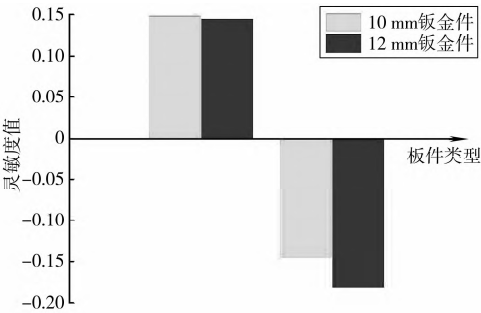


图 5 变量的灵敏度  
Fig. 5 Sensitivity of variables

3 转向架结构优化与分析

3.1 结构优化

利用灵敏度分析对结构进行优化,以提高整体结构的 1 阶固有频率,设计方案有以下几种<sup>[14]</sup>。

- ① 选用高杨氏模量,低密度材料,以便减轻构建质量;
- ② 通过采用压延筋、加强筋以及各种关键部位连接方式,能够提高关键钣金件的抗弯模量;
- ③ 增加灵敏度较为敏感的结构件厚度,使结构总体得到加强;
- ④ 调整安装孔位置<sup>[12]</sup>。

新型宽轮距跨座式转向架构架结构,笔者提出两种构架结构优化方案。① 参照灵敏度分析结果,对灵敏度值较大的板金件采用低密度铝合金材料,钣金件材料参数如表 2;② 根据端梁静强度分析结果,对两端梁受力较小部位调整几何形状,在板件上冲压减重孔。图 6(a) 为原始端梁结构;图 6(b) 为增加减重孔之后的端梁结构。

表 2 端梁参数修改

Table 2 Modification of end beam parameters

端梁参数	端 梁	
	初始端梁	铝合金端梁
弹性模量 /MPa	$2.06 \times 10^5$	$7 \times 10^4$
泊松比	0.28	0.33
密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	7.85E-9	2.70E-9

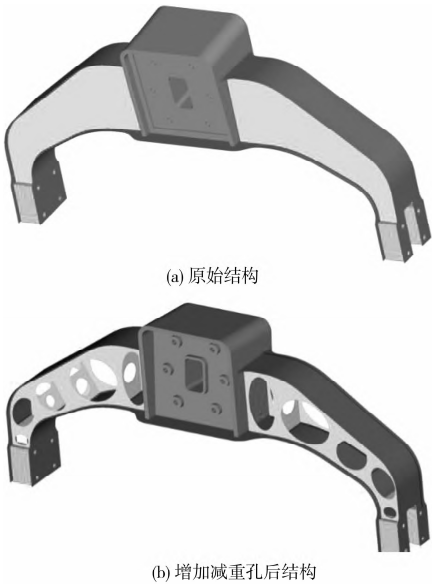


图 6 端梁结构  
Fig. 6 End beam structure

3.2 结果分析

分别对两种方案(相同边界条件)进行约束模态求解。设定目标函数为最小化质量和 1 阶模态,计算结果如图 7,3 种构架模态频率和振型分别如表 3、表 4。

表 3 3 种构架模态频率对比

Table 3 Comparison of modal frequencies of three kinds of frames

模态	频率 Hz		
	初始端梁	铝合金端梁	减重孔端梁
1 阶	25.97	64.60	69.19
2 阶	33.21	64.73	73.14
3 阶	64.09	77.92	73.95
4 阶	64.80	80.43	74.39

表 4 3 种构架模态振型对比

Table 4 Comparison of modal shape of three kinds of frames

模态	振型		
	初始端梁	铝合金端梁	减重孔端梁
1 阶	电机箱绕纵梁扭转	两侧端梁同向摆动	两侧端梁向下同侧反转
2 阶	单侧电机箱绕一级箱体前后摆动	一侧端梁绕齿轮箱横向扭转	两侧端梁同向摆动
3 阶	整个箱体中央下沉弯曲	另一侧端梁绕齿轮箱横向扭转	一侧端梁绕齿轮箱横向扭转
4 阶	单侧端梁前后摆动	中部电机箱绕齿轮箱扭动	另一侧端梁绕齿轮箱横向扭转

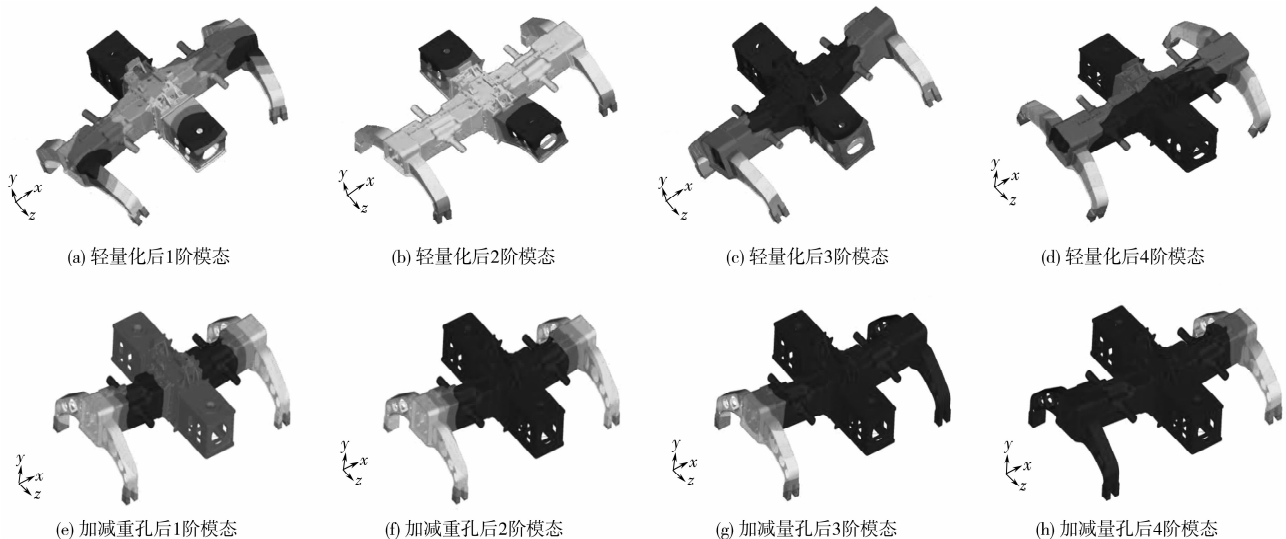


图7 新转向架构架的模式云图

Fig. 7 The modal cloud of the new bogie frame

从图8和表3可看出:采用两种方法优化后构架的低阶频率均有所提高。从构架整体而言,中部构架电机箱齿轮箱为一体,两端梁通过螺栓与之连接,端梁部分主要承受来自导向轮横向作用力,铝合金端梁和减重孔在减轻端梁重量同时也降低了端梁部位在整个构架的重量占比,因此来自导向轮的振动能量也相应减小,从而构架整体频率提高,采用减重孔之后的构架频率提高比铝合金端梁更明显,两者结果正好错开一个频率范围值,模态分析对应振型均回避了构架的弯曲扭转疲劳损坏。

### 3.3 强度验证

对转向架构架强度进行分析,得出构架在几种实际营运工况下的应力和应变分布情况。静强度最

大的应力和位移均出现在中部齿轮箱位置,新构架并未改边齿轮箱结构,故在外载荷不变情况下,其静强度应力值和位移值均不发生改变。

参照疲劳损伤累计学说对构架进行疲劳强度分析<sup>[15]</sup>。将构架受力位置的载荷时间历程导入疲劳分析软件中,得到新构架疲劳强度结果,如图8。最危险节点编号及循环次数为:节点编号78 170的循环次数为 $7.125 \times 10^7$ 次(端梁加减重孔);节点编号781 740的循环次数为 $6.60 \times 10^7$ 次(铝合金端梁)。这两种方案循环次数分别为 $7.125 \times 10^7$ 、 $6.604 \times 10^7$ ,相对于原构架的 $7.704 \times 10^7$ ,循环次数稍低,仍满足实际服役要求。



图8 新转向架构架的疲劳损伤云图

Fig. 8 Fatigue damage cloud of the new bogie frame

## 4 结论

笔者基于新型宽轮距转向架构架灵敏度分析结

果,选取构架端梁灵敏度较大部位进行结构优化设计,计算出一端梁各板件的厚度参数,并以一阶频率为函数,以最小化质量为设计目标,对转向架结构进

行优化和验证。

1) 从灵敏度分析结果可知:端梁处不同厚度的板件对灵敏度贡献量不同,优化厚度为 10 mm 的板件对提高一阶频率更为有利。

2) 采用轻量化材料和冲压减重孔方式均能提高一阶频率,但采用轻量化材料需投入更多成本,冲压减重孔则会增加工序冗杂程度。

3) 笔者建议对后续新型宽轮距跨座式转向架构架优化过程中,若考虑轻量化则以铝合金材料为主,若考虑加工经济性则以冲压减重孔为主。

#### 参考文献(References):

- [1] 辛亮,杜子学,杨震,等.单轴转向架跨座式单轨车辆的主动控制研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(7):130-134.  
XIN Liang, DU Zixue, YANG Zhen, et al. Research on active control of the straddle-type monorail vehicle with single-axle bogie [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University( Natural Science )*, 2021, 40( 7 ): 130-134.
- [2] 沈晓阳.重庆市跨座式单轨交通的建设和运营[J].城市轨道交通研究,2006(10):8-13.  
SHEN Xiaoyang. Construction and operation of Chongqing monorail system [J]. *Urban Mass Transit*, 2006( 10 ): 8-13.
- [3] LAN F, CHEN J Q, LIN Jianguo. Comparative analysis for bus side structures and lightweight optimization [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2004, 218( 10 ): 1067-1075.
- [4] 白松,徐新喜,任旭东,等.驾驶室内部噪声分析与阻尼降噪[J].噪声与振动控制,2012,32(3):139-142.  
BAI Song, XU Xinxi, REN Xudong, et al. Analysis of interior noise in a cab and noise reduction with damping [J]. *Noise and Vibration Control*, 2012, 32( 3 ): 139-142.
- [5] KIM S H, LEE J M, SUNG M H. Structural-acoustic modal coupling analysis and application to noise reduction in a vehicle passenger compartment [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 225( 5 ): 989-999.
- [6] 罗朝云,杨建军,赵锦.基于有限元的结构优化分析方法-拓扑优化[J].电子世界,2014(14):96-96.  
LUO Chaoyun, YANG Jianjun, ZHAO Jin. Structural optimization analysis method based on finite element-topology optimization [J]. *Electronic World*, 2014( 14 ): 96-96.
- [7] ZHOU M, PAGALDIPTI N, THOMAS H L, et al. An integrated approach for topology, sizing and shape optimization [C] // 8th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization(AIAA). U.S.A.: AIAA, 2000.
- [8] 金格飞,魏海,陈丹蕾,等.基于 Hypermesh 软件的复杂尾矿坝有限元网格划分[J].中国水运(下半月),2019,19(8):96-97.  
JIN Gefei, WEI Hai, CHEN Danlei, et al. Mesh division of complex tailings dam based on Hypermesh software [J]. *China Water Transport*, 2019, 19( 8 ): 96-97.
- [9] 王钰栋,金磊,洪清泉.HyperMesh & HyperView 应用技巧与高级实例[M].北京:机械工业出版社,2012.  
WANG Yudong, JIN Lei, HONG Qingquan. *Application Skills and Advanced Examples of HyperMesh & HyperView* [M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [10] 杜子学,陈得意.基于灵敏度分析的单轨车辆转向架构架优化设计[J].城市轨道交通研究,2016,19(5):64-66.  
DU Zixue, CHEN Deyi. Optimization design of monorail bogie frame based on sensitivity analysis [J]. *Urban Mass Transit*, 2016, 19( 5 ): 64-66.
- [11] 卢立富,岳玲,黄雪涛.基于 Hypermesh 的车架结构模态分析[J].电脑知识与技术,2008,2(12):569-570.  
LU Lifu, YUE Ling, HUANG Xuetao. The modal analysis of mobile frame based on Hypermesh [J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2008, 2( 12 ): 183-184.
- [12] 文孝霞,孔得旭,杜子学.跨座式双轴宽轮距转向架构架焊缝参数敏感性分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(1):115-119.  
WEN Xiaoxia, KONG Dexu, DU Zixue. Sensitivity analysis of weld parameters for straddle-type double axle wide wheel bogie frame [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University( Natural Science )*, 2020, 39( 1 ): 115-119.
- [13] 辛勇,叶盛,鄢回洪.基于灵敏度分析的轿车车身轻量化[J].塑性工程学报,2013,20(6):117-121.  
XIN Yong, YE Sheng, YAN Huihong. Research on the lightweighting of automotive body based on sensitivity analysis [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2013, 20( 6 ): 117-121.
- [14] 杜子学,郭浩鑫,杨震.直线电机跨座式单轨车辆曲线通过能力分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(4):127-132.  
DU Zixue, WU Haoxin, YANG Zhen. Curve negotiation performance of linear motor straddle monorail vehicle [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University( Natural Science )*, 2021, 40( 4 ): 127-132.
- [15] 李耀华,刘洋,宋伟萍,等.基于行驶工况的零部件耐久性测试工况构建[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(4):141-146.  
LI Yaohua, LIU Yang, SONG Weiping, et al. Component's durability test conditions based on driving condition [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University( Natural Science )*, 2021, 40( 4 ): 141-146.

(责任编辑:刘 韬)