

基于灵敏度分析的动车组车体结构模态提升研究*

杜彦品 廖平 赵景忠 徐志鹏

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

摘要 [目的]为全面了解车体零件尺寸参数对车体模态的影响,对动车组车体模态灵敏度进行分析,以提升车体主要振动频率。[方法]根据灵敏度计算结果,制定了8种单变量厚度提升方案,进行车体结构主要模态对比分析;在此基础上,对主要振动模态影响最大的零件进行两两组合,在质量增加不大的前提下,制定了3种提升方案来研究多变量厚度变化对车体主要振动模态的影响。[结果及结论]侧顶板、圆顶板、侧墙板、侧墙梁柱、车顶弯梁、波纹地板和底架边梁的厚度对车体主要振动模态的灵敏度较高;增加以上单变量影响因素的厚度和多变量影响因素的厚度,车体结构主要振动模态频率相对于原结构均有一定提升;与单变量厚度影响因素方案相比,多变量厚度提升方案的各振动模态频率均有所上升,但变化幅值较小,大大低于2个单变量厚度影响因素单独对车体模态影响的叠加。

关键词 动车组;车体结构;灵敏度;模态

中图分类号 U266;U263.32

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.010

Research on Modal Enhancement of EMU Vehicle Carbody Structure Based on Sensitivity Analysis

DU Yanpin, LIAO Ping, ZHAO Jingzhong, XU Zhipeng

(CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

Abstract [Objective] To comprehensively understand the influence of carbody component dimensions on carbody modal characteristics, a sensitivity analysis of EMU (electric multiple units) body modal is conducted to enhance the main vibration frequency of carbody. [Method] Based on sensitivity calculation results, eight univariate thickness enhancement schemes are developed for comparison analysis of the main carbody modal. Subsequently, by pairing up components with the greatest impact on major vibration modal, three enhancement schemes are formulated to investigate the effects of multivariate thickness vibrations on the main carbody vibration modal while minimizing mass increase. [Result & Conclusion] The thickness of side top plates, circular top plates, side wall panels, side

wall beams/columns, roof bending beams, corrugated floors and chassis edge beams exhibits high sensitivity to the main carbody vibration modal. Increasing the thickness of these univariate and multivariate influencing factors results in a noticeable improvement in the main carbody vibration modal frequencies compared to the original structure. Compared to the scheme of univariate thickness influencing factors, the impact of multivariate thickness enhancement schemes on individual vibration modal frequencies shows a slight increase. However, its smaller amplitude variations are significantly lower than the stacked effects of two individual univariate thickness factors on the carbody modal.

Key words EMU; carbody structure; sensitivity; modal

随着列车运行速度的提高,车辆的振动也随之加剧。优化车体固有振动模态频率,避免车体与转向架振动频率接近引起耦合振动,有利于提升列车运行安全性、平稳性和乘坐舒适性^[1-3]。车体的固有频率受多种因素影响,如车体主要参数、门窗尺寸及位置和设备布置^[4-7]等。文献[8]分析了轿车白车身对整车刚度的贡献情况,其结果表明白车体对整车刚度的贡献达到60%以上。鉴于车体结构对整备状态车体模态有较大的影响,本文主要从车体结构振动模态的角度,研究模态提升的对策。已有文献从不同角度进行了车体结构振动模态相关研究:文献[9]以25型客车为研究对象,研究了底架边梁、底架横梁、车顶上边梁、侧墙立柱和车顶弯梁板厚和断面对车体自振频率的影响;文献[10]以25G型客车为研究对象,研究了底架边梁及上弦梁的刚度对车体结构的一阶垂弯和一阶横弯频率的影响;文献[11]以某速度为200 km/h客车不锈钢车体为研究对象,研究了上弦梁的板厚对车体结构模态的影响;文献[12]研究了铁路客车底架边梁、侧墙上边梁和侧墙纵向梁断面对车体结构模态的影响。基于以上研究,本文以某动车组碳钢车体为

* 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(N2022J051)

研究对象,采用基于灵敏度的数值分析方法^[13],全面分析各零件尺寸对模态的灵敏度。根据灵敏度分析的结果,增加灵敏度较高的零件的厚度尺寸以提升车体结构模态,减小灵敏度较低零件的厚度尺寸以降低车体质量。本文可为今后车体结构模态提升和改善提供设计指导。

1 车体结构及主要技术参数

某动车组碳钢车体结构为无中梁薄壁筒形整体承载结构,除牵引梁和枕梁材质为低合金高强度结构钢外,其余主要材质为耐候钢。车体断面为鼓形,底架边梁和横梁断面为槽型,侧墙和端墙梁柱断面为乙型,车顶边梁和风挡框立柱断面为 C 型,车顶弯梁断面为帽型,车顶纵梁断面为角型,端角柱断面为方型。侧墙和端墙梁柱与墙板采用塞焊连接,车顶弯梁和纵梁与侧顶板和中顶板采用塞焊连接,车体主要技术参数如表 1 所示。

表 1 车体主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of carbody

车体 长度/mm	车体 宽度/mm	车体高度 (距轨面)/mm	车辆 定距/mm
25 500	3 330	4 433	18 000

2 原车体结构模态分析

对原车体结构进行模态分析,提取出一阶主要振动模态,其中一阶菱形振动频率和一阶呼吸振动频率较低,一阶垂弯振动频率和一阶横弯振动频率稍高,一阶扭转振动频率最高,具体模态振型和固有振动频率如表 2 所示。

表 2 原车体结构主要振动模态

Tab. 2 Main vibration modal of original carbody structure

一阶 菱形模态 频率/Hz	一阶 呼吸模态 频率/Hz	一阶 垂弯模态 频率/Hz	一阶 横弯模态 频率/Hz	一阶 扭转模态 频率/Hz
9.876	13.693	17.005	18.967	22.378

3 车体结构灵敏度分析

本文采用 Optistrust 软件,基于灵敏度的结构参数优化方法,研究车体零件厚度对车体结构主要振动模态的影响。通过修改零件的厚度尺寸计算主要振动模态的灵敏度,从而找出对车体振动模态影

响最大零件,并对其进行优化。以某动车组中间车碳钢车体结构为研究对象,以质量最小为目标函数,设置 50 个设计变量,主要研究设计变量对一阶菱形振动频率,一阶呼吸振动频率,一阶垂弯振动频率,一阶横弯振动频率和一阶扭转振动频率的灵敏度。图 1—图 5 为车体结构主要振动模态灵敏度影响较大的零部件柱状图。

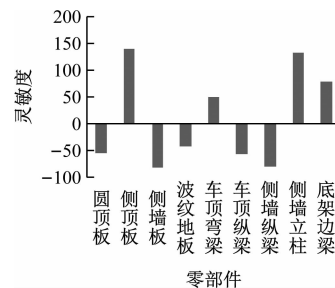


图 1 车体结构一阶菱形振动频率灵敏度影响柱状图

Fig. 1 Histogram of influence on carbody structure first-order rhombic vibration frequency sensitivity

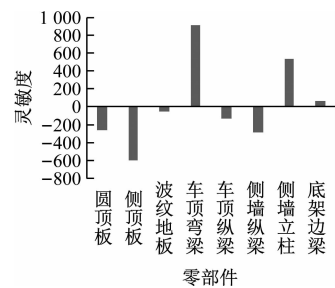


图 2 车体结构一阶呼吸振动频率灵敏度影响柱状图

Fig. 2 Histogram of influence on carbody structure first-order respiration vibration frequency sensitivity

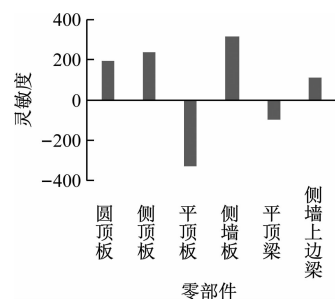


图 3 车体结构一阶垂弯振动频率灵敏度影响柱状图

Fig. 3 Histogram of influence on carbody first-order vertical bending vibration frequency sensitivity

由图 1—图 5 可知:侧顶板、侧墙立柱、侧墙板,侧墙纵梁和底架边梁的厚度对车体一阶菱形振动频率影响较大;车顶弯梁、侧墙板、侧墙立柱、侧墙纵梁和圆顶板的厚度对车体一阶呼吸振动频率影响较大;平顶板、侧墙板、侧顶板、圆顶板和侧墙上

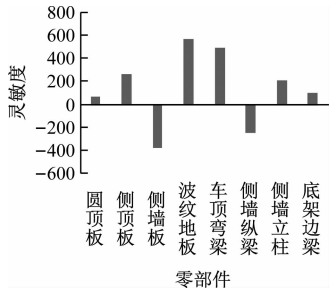


图 4 车体结构一阶横弯振动频率灵敏度影响柱状图

Fig. 4 Histogram of influence on carbody structure first-order transverse bending vibration frequency sensitivity

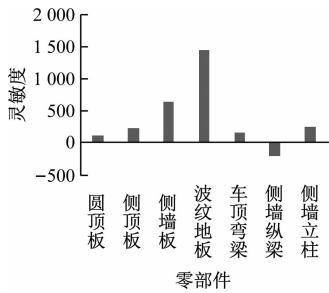


图 5 车体结构一阶扭转振动频率灵敏度影响柱状图

Fig. 5 Histogram of influence on carbody structure first-order torsional vibration frequency sensitivity

边梁的厚度对车体一阶垂弯振动频率影响较大;波纹地板、车顶弯梁、侧墙板、侧顶板、侧墙纵梁和侧

墙立柱的厚度对车体一阶横弯振动频率影响较大;波纹地板、侧墙板、侧墙立柱、侧顶板、侧墙纵梁和车顶弯梁的厚度对车体一阶扭转振动频率影响较大。

4 车体结构模态提升方案

4.1 单变量厚度影响因素提升方案

根据灵敏度分析结果,增加对主要振动模态灵敏度影响较大的车体零件厚度尺寸,同时减小对主要振动模态灵敏度影响较小的车体零件厚度,以平衡优化带来的质量增加。

结合不同零件的主要振动模态灵敏度数据,选出侧顶板、圆顶板、平顶板、侧墙板、侧墙梁柱、车顶弯梁、波纹地板和底架边梁等 8 种灵敏度较高的零件,逐一增加其板厚;从灵敏度分析结果可知,端墙板、风挡立柱的板厚对主要振动频率的影响都很小,因此减小端墙板、风挡立柱等质量较大的零件厚度,不仅不会影响这 5 种主要振动模态的频率,而且还会减轻端墙的质量;组合对主要振动模态灵敏度较高的零件和灵敏度较低的零件,改变零件板厚,在车体结构质量基本不变的前提下制定了 8 种优化方案,并与原结构方案进行对比,如表 3 所示。

表 3 单变量厚度提升方案

Tab. 3 Univariate thickness enhancement schemes

名称	侧顶板 厚度/ mm	圆顶板 厚度/ mm	平顶板 厚度/ mm	侧墙板 厚度/ mm	侧墙梁柱 厚度/ mm	车顶弯梁 厚度/ mm	波纹地板 厚度/ mm	底架边梁 厚度/ mm	端墙板 厚度/ mm	风挡立柱 厚度/ mm	车体结构 质量减少 量/kg
原结构方案	2.0	2.0	2.0	2.5	3.0	2.0	1.5	10.0 或 8.0	2.5	8.0	
方案 1	2.3								1.8	5.0	10
方案 2		2.3							1.8	6.0	15
方案 3			4.0						1.8	6.0	11
方案 4				2.8					1.8	4.0	19
方案 5					3.2				1.8	6.0	3
方案 6						2.5			1.8	5.0	8
方案 7							1.8		1.8	5.0	36
方案 8								10.5 或 8.5	1.8	5.5	7

分别按这 8 种方案进行车体结构主要振动模态分析,如图 6—图 10 所示。由图 6—图 10 可知:除方案 3 的一阶垂弯振动频率降低外,其余车体结构一阶菱形、一阶呼吸、一阶垂弯、一阶横弯、一阶扭转等 5 种振动频率均有一定程度的提升;方案 8(增加底架边梁的厚度)对车体一阶菱形振动频率影响

最大,车体一阶菱形振动频率增大了 0.226 Hz;方案 6 增加车顶弯梁的厚度对车体一阶呼吸和一阶横弯振动频率影响最大,车体一阶呼吸振动频率增大了 0.607 Hz,车体一阶横弯振动频率增大了 0.424 Hz;方案 3(增加平顶板厚度)对车体一阶垂弯振动频率影响最大,但为负影响,一阶垂弯振动频率降

低;方案4(增加侧墙板的厚度)对车体一阶垂弯振动频率影响较大,车体一阶垂弯振动频率增大了0.316 Hz;方案1(增加侧顶板的厚度)对车体一阶垂弯振动频率的影响比方案4略小一些;方案7(增加波纹地板厚度)对一阶扭转振动频率影响最大,车体一阶扭转振动频率增大了0.61 Hz。

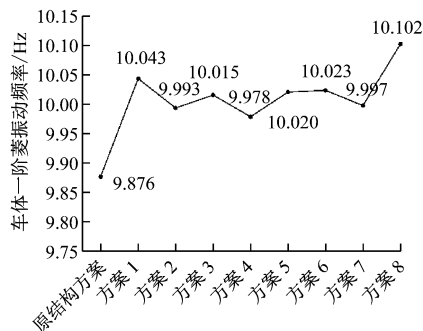


图6 车体结构一阶菱形振动频率对比图

Fig. 6 Comparison diagram of carbody structure first-order rhombic vibration frequency

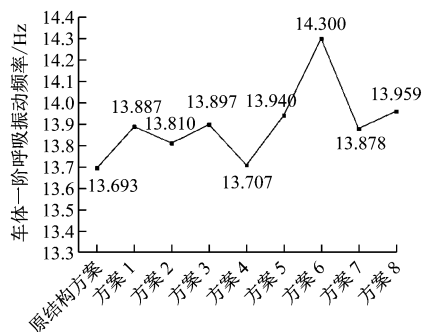


图7 车体结构一阶呼吸振动频率对比图

Fig. 7 Comparison diagram of carbody structure first-order respiration vibration frequency

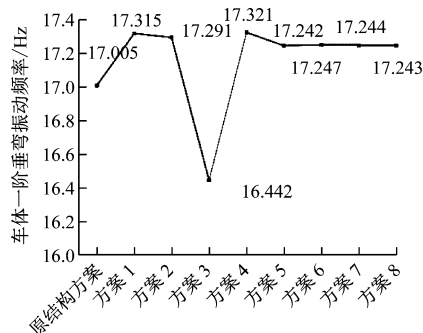


图8 车体结构一阶垂弯振动频率对比图

Fig. 8 Comparison diagram of carbody structure first-order vertical bending vibration frequency

4.2 多变量厚度影响因素提升方案

由单变量厚度影响因素对主要振动模态的影响分析可知,侧墙板、车顶弯梁、波纹地板和底架边

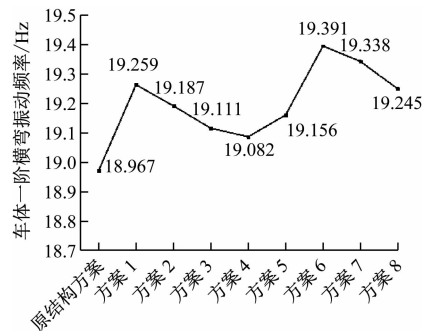


图9 车体结构一阶横弯振动频率对比图

Fig. 9 Comparison diagram of carbody structure first-order transverse bending vibration frequency

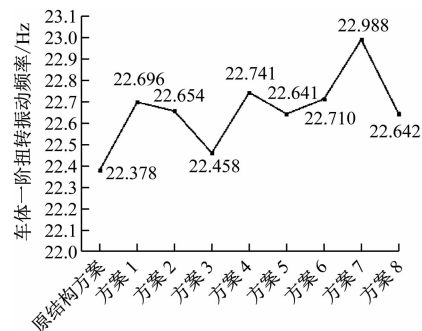


图10 车体结构一阶扭转振动频率对比图

Fig. 10 Comparison diagram of carbody structure first-order torsional vibration frequency

梁对车体主要振动模态影响最大;对以上4种零件进行两两组合,即增加侧墙板、车顶弯梁、波纹地板和底架边梁的厚度,同时减小对主要振动模态灵敏度影响较小的端墙板和风档立柱的厚度,避免车体质量增加过多,6种提升方案如表4所示。分别按6种方案对车体结构主要模态进行分析,分析结果如图11—图15所示。由图11—图15可知:车体结构主要模态振动频率相对于原结构均有一定程度的提升;方案一(增加车顶弯梁和底架边梁的厚度)对车体一阶菱形和一阶呼吸振动频率影响最大,车体一阶菱形振动频率增大了0.227 Hz,车体一阶呼吸振动频率增大了0.657 Hz,车体结构质量增大了19 kg;方案三(增加波纹地板和侧墙板的厚度)对车体的一阶垂弯振动频率影响最大,车体一阶垂弯振动频率增大了0.355 Hz,车体结构质量增大了160 kg;方案四(增加车顶弯梁和波纹地板的厚度)对车体的一阶横弯和一阶扭转振动频率影响最大,车体一阶横弯振动频率增大了0.522 Hz,车体一阶扭转振动频率增大了0.679 Hz,车体结构质量增大了117 kg。

表4 多变量厚度提升方案

Tab.4 Multivariate thickness enhancement schemes

名称	侧顶板 厚度/mm	圆顶板 厚度/mm	车顶弯梁 厚度/mm	侧墙板 厚度/mm	侧墙梁 厚度/mm	波纹地板 厚度/mm	底架边梁 厚度/mm	端墙板 厚度/mm	风挡立柱 厚度/mm	车体结构质 量增加量/kg
原结构方案	2.0	2.0	2.0	2.5	3.0	1.5	10.0 或 8.0	2.5	8	
方案一			2.5				10.5 或 8.5	1.8	5	19
方案二						1.8	10.5 或 8.5	1.8	5	101
方案三				2.8		1.8		1.8	5	160
方案四			2.5			1.8		1.8	5	117
方案五			2.5	2.8				1.8	5	175
方案六				2.8		1.8		1.8	5	258

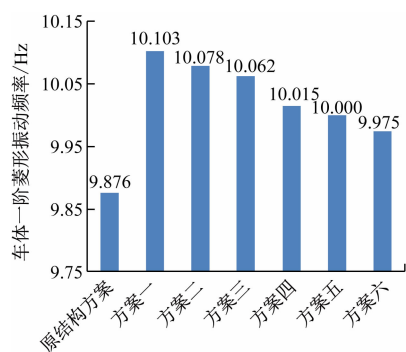


图11 车体结构一阶菱形振动频率对比图

Fig. 11 Comparison diagram of carbody structure first-order rhombic vibration frequency

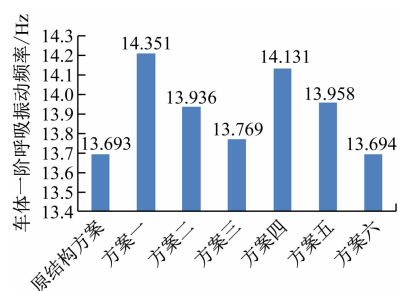


图12 车体结构一阶呼吸振动频率对比图

Fig. 12 Comparison diagram of carbody structure first-order respiration vibration frequency

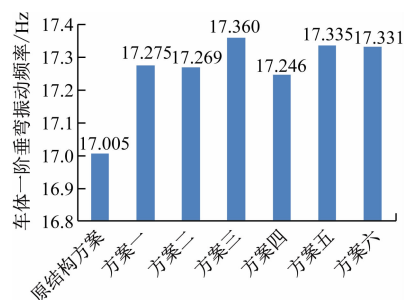


图13 车体结构一阶垂弯振动频率对比图

Fig. 13 Comparison diagram of carbody structure first-order vertical bending vibration frequency

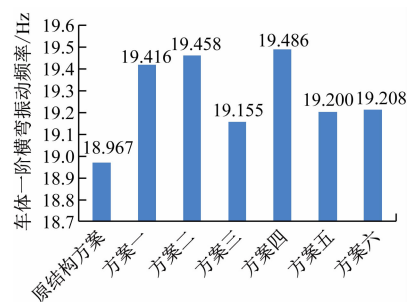


图14 车体结构一阶横弯振动频率对比图

Fig. 14 Comparison diagram of carbody structure first-order transverse bending vibration frequency

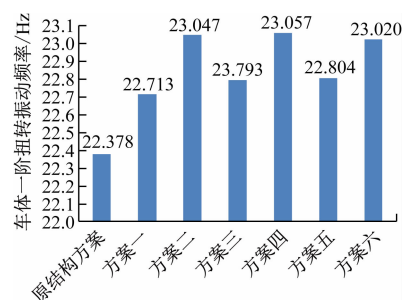


图15 车体结构一阶扭转振动频率对比图

Fig. 15 Comparison diagram of carbody structure first-order torsional vibration frequency

4.3 单变量和多变量厚度影响因素提升方案对比

与单变量厚度影响因素提升方案相比,多变量厚度影响因素提升方案的车体结构主要振动模式中,受其影响较大的单个振动模式频率有所上升,但变化幅值较小,大大低于2个单变量厚度影响因素单独对车体模式影响的叠加,而且车体结构质量增加也较多,具体数值见表5。

5 结语

1) 通过对动车组车体结构主要振动模式灵敏度分析可知,侧顶板、圆顶板、平顶板、车顶弯梁、侧墙板、侧墙梁柱、波纹地板和底架边梁的厚度对主

表 5 单变量和多变量影响因素提升方案模态对比

Tab.5 Modal comparison of univariate and multivariate influencing factor enhancement schemes

振型	单变量厚度影响因素提升方案			多变量厚度影响因素提升方案		
	方案编号	主要模态振动频率增加量/Hz	车体结构质量增加量/kg	方案编号	主要模态振动频率增加量/Hz	车体结构质量增加量/kg
一阶菱形	方案 8(底架边梁)	0.226	7	方案一(底架边梁和车顶弯梁)	0.227	19
一阶呼吸	方案 6(车顶弯梁)	0.607	8	方案一(底架边梁和车顶弯梁)	0.658	19
一阶垂弯	方案 4(侧墙板)	0.316	19	方案三(侧墙板和波纹地板)	0.355	160
一阶横弯	方案 6(车顶弯梁)	0.424	8	方案四(车顶弯梁和波纹地板)	0.519	117

要振动模态的影响较大,其余车体零件的厚度对主要振动模态影响较小。

2) 通过对车体零件单变量厚度影响因素分析可知:增加平顶板厚度,车体结构的一阶垂弯振动频率相对原结构有所下降,其他 4 种模态振动频率均有一定提升。单独增加其他灵敏度较高的单变量厚度,受其影响较大的单个振动模态频率提升明显,其他振动模态频率均有一定提升。

3) 通过对车体零件多变量厚度影响因素的分析可知,对车体主要振动模态影响最大的单变量两两组合,车体结构的一阶菱形、一阶呼吸、一阶垂弯、一阶横弯、一阶扭转等 5 种振动频率相对于原结构有一定提升,车体结构质量增幅较大。

4) 与车体零件单变量厚度影响因素相比,同时增加多个变量影响因素厚度,各振动模态频率有所上升,但变化幅值较小,大大低于 2 个单变量厚度影响因素单独对车体模态影响的叠加。

5) 通过车体模态灵敏度分析的方法提升车体结构主要模态,建议采用改变灵敏度较高的单变量影响因素的厚度,既可以使车体结构质量增加较小,又可以显著提升主要模态的振动频率。

参考文献

- [1] 贾尚帅,韩铁礼. 铁路车辆模态参数灵敏度分析及结构优化研究[J]. 机电一体化, 2015, 21(12): 33.
JIA Shangshuai, HAN Tieli. Modal sensitivity analysis and structural optimization of railway vehicle[J]. Mechatronics, 2015, 21(12): 33.
- [2] 宫岛,周劲松,孙文静,等. 高速列车弹性车体与转向架耦合振动分析[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(4): 41.
GONG Dao, ZHOU Jinsong, SUN Wenjing, et al. Coupled vibration analysis of flexible car body and bogie for high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(4): 41.
- [3] 宫岛,周劲松,孙文静,等. 高速列车车下设备模态匹配及试验研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(10): 13.
GONG Dao, ZHOU Jinsong, SUN Wenjing, et al. Modal matching between suspended equipment and car body of a high-speed railway vehicle and in-situ experiment[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(10): 13.
- [4] 王长科,阳光武,朱涛,等. 车体设计参数对车体垂向弯曲振动频率的灵敏度分析[J]. 中国机械工程, 2016, 27(16): 2267.
WANG Changke, YANG Guangwu, ZHU Tao, et al. Sensitivity analysis about design parameters for car-body vertical bending vibration frequencies[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(16): 2267.
- [5] 王长科,阳光武,朱涛,等. 列车车体结构一阶垂向振动参数研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(8): 1259.
WANG Changke, YANG Guangwu, ZHU Tao, et al. Research of first order vertical parameter for car-body structure[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(8): 1259.
- [6] 于庆斌,邵晴,何玲利. 侧墙窗户对动车组铝合金车体模态的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(2): 68.
YU Qingbin, SHAO Qing, HE Lingli. Influence of sidewall windows on EMU alu-minum alloy car body modal[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(2): 68.
- [7] 张军,王建华,兆文忠. 动车组车体车门设计及模态性能改进[J]. 大连交通大学学报, 2017, 38(1): 17.
ZHANG Jun, WANG Jianhua, ZHAO Wenzhong. Research on door modal performance promotion for EMU bodwork[J]. Journal Dalian Jiaotong University, 2017, 38(1): 17.
- [8] TAKAMATSU M, FUJITA H, INOUE H, et al. Development of lighter-weight, higher-stiffness body for new RX-7[J]. SAE Transactions, 1992, 101: 288.
- [9] 李华丽,邓锐,杜彦品. 梁柱对客车车体自振频率的影响分析[J]. 机车车辆工艺, 2016(6): 6.
LI Huali, DENG Rui, DU Yanpin. Analysis of the influence of beam and column on the natural vibration frequency of bus body[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2016(6): 6.
- [10] 孟飞,杨冰,阳光武,等. 底架边梁及上弦梁结构刚度对车体结构模态的影响[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(6): 28.

(下转第 56 页)

- 化探索[J]. 中国标准化, 2021(13): 147.
- YU Zeren, WANG Xinli. Research on standardization of train ethernet communication and time sensitive network technology [J]. China Standardization, 2021(13): 147.
- [2] 李林锋. 基于交换式以太网的列车综合承载网络通信方案[J]. 城市轨道交通研究, 2022(增刊1): 27.
- LI Linfeng. A comprehensive train carrying network communication scheme based on switched ethernet [J]. Urban Mass Transit, 2022 (S1): 27.
- [3] 蔡志伟. 机车实时以太网 ETB 与 ECN 交换技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- CAI Zhiwei. Research on the exchange technology of locomotive real-time Ethernet ETB and ECN [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [4] 王欣立, 于泽人, 周钧, 等. 基于时间敏感网络的列车通信网络时间同步与流量整形技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 51.
- WANG Xinli, YU Zeren, ZHOU Jun, et al. Time synchronization and traffic shaping technique of train communication network based on time sensitive network [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(3): 51.
- [5] CHEN Y, HUANG X Y, ZHAO W Z, et al. Research on real-time Ethernet technology for metro vehicle multi-network integration [J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(7): 40.
- [6] 黄韬, 鲁京京, 朱海龙, 等. 车载时间敏感网: 现状与展望[J]. 北京邮电大学学报, 2023, 46(6): 46.
- HUANG Tao, LU Jingjing, ZHU Hailong, et al. Automotive in-vehicle time-sensitive network; the state of the art and prospect [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023, 46(6): 46.
- [7] 工业互联网联盟. 时间敏感网络 (TSN) 产业白皮书 [EB/OL]. (2020-08-01) [2021-01-25]. http://www.ai-alliance.org/up-load/202009/0901_165010_961.pdf.
- Industrial Internet Alliance. Time sensitive network (TSN) industry white paper [EB/OL]. (2020-08-01) [2021-01-25]. http://www.ai-alliance.org/up-load/202009/0901_165010_961.pdf.
- [8] 程顺岭, 赵科. 基于 IEEE 1588 标准的列车时间同步技术的研究[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(2): 28.
- CHENG Shunling, ZHAO Ke. Research on train time synchronization technology based on IEEE 1588 standard [J]. Industrial Control Computer, 2022, 35(2): 28.
- [9] 张旭, 马可. 基于时间敏感网络的列车以太网通信技术研究[J]. 铁道机车车辆, 2022, 42(3): 93.
- ZHANG Xu, MA Ke. Research on train network technology based on time-sensitive networking [J]. Railway Locomotive & Car, 2022, 42(3): 93.
- [10] 朱海龙, 严园园. TSN 网络中时钟同步可靠性提升方法[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(2): 20.
- ZHU Hailong, YAN Yuanyuan. Measures of reliability improvement of clock synchronization in time sensitive networking [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(2): 20.
- 收稿日期: 2024-02-02 修回日期: 2024-03-05 出版日期: 2024-05-10
Received: 2024-02-02 Revised: 2024-03-05 Published: 2024-05-10
• 第一作者: 张军贤, 正高级工程师, zjx0422@163.com
通信作者: 朱海龙, 讲师, zhuhl@bupt.edu.cn
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 50 页)

- MENG Fei, YANG Bing, YANG Guangwu, et al. Influence of the underframe side beam and the upper beam structure stiffness on car-body structure modal [J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(6): 28.
- [11] 李定南. 上弦梁结构刚度对车体结构模态的影响[J]. 机车电传动, 2017(3): 59.
- LI Dingnan. Influence of the upper beam structure stiffness on car-body structure modal [J]. Electric Drive for Locomotives, 2017(3): 59.
- [12] 王俊. 铁路客车车体结构振动模态提升研究[J]. 机车车辆工艺, 2021(4): 1.
- WANG Jun. Research of the enhancement of structural vibration mode for railway passenger car body [J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2021(4): 1.
- [13] 潘婷. 动车组车体灵敏度分析及优化设计[D]. 大连: 大连交通大学, 2013.
- PAN Ting. Sensitivity analysis and optimization design of EMU body [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2013.
- 收稿日期: 2023-11-02 修回日期: 2023-12-30 出版日期: 2024-05-10
Received: 2023-11-02 Revised: 2023-12-30 Published: 2024-05-10
• 通信作者: 杜彦品, 正高级工程师, dyp711522@163.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license