

高速铁路动车组受电弓区域气动噪声 降噪优化设计方案

余永革¹ 王成涛¹ 高 阳¹ 于婉艺² 马常付¹ 张国芹¹

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春;

2. 长春广播电视台制作部, 130062, 长春)

摘 要 [目的] 随着列车运行速度的提高, 列车噪声指标逐渐成为制约高速铁路发展的重要因素。应进一步挖掘受电弓区域的气动声学正向优化设计潜力, 提出受电弓区域气动噪声的优化设计方案。[方法] 以复兴号标准动车组(型号为 CR400BF)为研究对象, 阐述了研究内容、技术路线及研究方法。采用 LES(大涡模拟)算法及 FW-H 方程, 对高速铁路动车组受电弓区域的气动噪声展开研究。对既有高速铁路 CRH380BL 型动车组受电弓区域的气动声学性能进行研究, 针对受电弓中上部本体结构和底部导流结构的优化措施, 设计了 6 个组合优化方案, 评价了各优化方案的气动噪声优化效果。将最佳优化方案应用在 CR400BF 型动车组上, 进一步测试其优化效果。[结果及结论] 方案 4 为最佳优化方案。将方案 4 应用于 CR400BF 型动车组, 在列车运行速度为 350 km/h 的工况下, 在距离受电弓最近的标准测点处, 整车的辐射噪声声压级减少了 0.99 dB(A), 受电弓区域的辐射噪声声压级减少了 1.70 dB(A)。方案 4 作为受电弓新的降噪方法, 技术要求较低, 具有较大的市场应用空间。**关键词** 高速铁路; 动车组; 受电弓; 气动噪声; 降噪设计中图分类号 U266

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.013

Optimization Design Scheme for Aerodynamic Noise Reduction in Pantograph Area of High-speed Railway EMU

YU Yongge¹, WANG Chengtao¹, GAO Yang¹, YU Wanyi², MA Changfu¹, ZHANG Guoqin¹

(1. National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. Changchun Radio and Television Production Department, 130062, Changchun, China)

Abstract [Objective] With the increase of train operating speed, noise levels have gradually become a critical factor restricting the development of high-speed railways. It is essential to explore the potential for positive aerodynamic acoustic optimization in the pantograph area and propose an optimized design scheme for reducing the aerodynamic noise in this region.

[Method] Using the Fuxing Standard EMU (model CR400BF) as the research object, the research content, technical approach, and methodology are expounded. The LES (large eddy simulation) algorithm and FW-H (Ffowcs Williams-Hawkings) equation are employed to investigate the aerodynamic noise in the pantograph area of high-speed railway EMU. Additionally, the aerodynamic acoustic performance of the pantograph area in existing high-speed railway CRH380BL EMU is studied. Six combined optimization schemes are designed, focusing on the upper body structure and the bottom diversion structure of the pantograph. The aerodynamic noise reduction effectiveness of each scheme is evaluated, and the optimal scheme is applied to the CR400BF EMU to further test its noise reduction performance. [Result & Conclusion] Scheme 4 is identified as the optimal solution. When applied to the CR400BF EMU operating at a speed of 350 km/h, the overall train radiated noise sound pressure level at the nearest standard measuring point to the pantograph is reduced by 0.99 dB(A), while the radiated noise sound pressure level in the pantograph area is reduced by 1.70 dB(A). As a novel noise reduction method for pantographs, Scheme 4 has low technical requirements and larger potential for market application.

Key words high speed railway; EMU; pantograph; aerodynamic noise; noise reduction design

经过多年发展,我国现有高速铁路动车组已经实现运行速度 300 km/h 等级的成熟运营,高速铁路动车组最高试验速度已超过 450 km/h。随着列车运行速度 v 的提高,高速铁路动车组的噪声指标逐渐成为制约高速铁路发展的重要因素。当 $v = 300$ km/h 时,气动噪声源能量在总噪声源能量的占比约为 50%^[1]。随着 v 的进一步提高,气动噪声将超过轮轨噪声,成为主要噪声源。高速铁路动车组气动噪声源主要集中在转向架、受电弓、列车头尾部、风挡及空调等部位。 $v = 330$ km/h 等级的实车试验

表明,受电弓引起的噪声在高速铁路动车组辐射噪声中的占比超过10%^[2]。随着 v 的持续提高(如 $v=400\text{ km/h}$),有必要进一步挖掘受电弓的气动声学正向优化设计潜力。

了解受电弓本体气动发声特征及其规律,是受电弓气动声学正向优化设计的前提和基础。受电弓处于雷诺数区域的圆柱流场包含了很多复杂的流场现象,如层流/湍流边界层分离、涡街、流动转捩、大分离湍流等,且可能会同时存在上述2个及以上的流场现象,以及跟这些流场现象相干涉的其他流场现象^[3]。

目前,风洞试验、实车试验、数值仿真是研究受电弓气动噪声的主要手段。由于声源成像技术^[4,5]逐步趋于成熟,受电弓的声学风洞试验及实车试验已逐渐成为研究的热点,相关研究已经取得了许多具有实际应用价值的结论。在文献[5]中,德国学者 Andreas Lauterbach 在德国布伦瑞克声学风洞及科隆低温风洞试验场内对受电弓开展了气动噪声雷诺数效应研究,发现受电弓具有明显的风吹声特性,其远场辐射噪声具有与斯特劳哈尔数相似的特性。文献[6]利用声阵列试验数据,构建了某型号车辆的气动噪声等效预测模型,但该研究缺乏对发声机理的解释。文献[7-8]利用 LES(大涡模拟)算法、声学边界元算法与 FW-H(Ffowcs Williams-Hawkins)方程,研究了受电弓的流场与声场特征,得到了受电弓高频噪声主要来源于弓头,以及开口受电弓产生的噪声比闭口受电弓产生的噪声少3.4 dB(A)等结论。

目前对受电弓区域气动噪声的研究大多集中在受电弓区域气动发声特征、机理及声学优化措施等方面,其中,气流分离、周期性脱落涡,以及二者间相互干涉,是受电弓区域气动发声的主要因素。受电弓区域气动噪声的优化措施则主要集中在对杆件打孔、开槽等工艺,以及对杆件气动外形、加装导流结构等方面进行优化。

1 研究内容、技术路线及研究方法

1.1 研究内容、技术路线

本文用数值仿真方法进行以下研究:①既有高速铁路动车组车型的受电弓区域气动声学特性研究;②受电弓中上部外形优化降噪研究;③受电弓

区域底部导流结构优化研究;④低噪声受电弓区域结构优化方案研究。

以复兴号标准动车组(型号为 CR400BF)为基准,在本文数值仿真研究基础上,优化该型动车组受电弓区域降噪设计方案,计算并对比优化前后该型动车组受电弓区域的气动噪声特性,以验证优化后受电弓区域能否实现气动噪声降低2~3 dB(A)的设计目标。

1.2 物理模型和数值计算方法

与列车相关的流动现象绝大多数为湍流流动。在模拟列车湍流稳态计算时,采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,以获取列车气动阻力;在模拟列车湍流非稳态计算时,则采用 LES + FW-H 方法,得到列车辐射气动噪声。

本研究采用 Lilly-LES 湍流模型,应用声类比 FW-H 声学模型,并以声源声功率为参数进行气动声学计算。将车辆远场某监测点计算得到的噪声仿真结果与试验结果进行对比,其结果如图1所示。由图1可知:仿真结果总声压级与试验结果总声压级之间的误差小于5%;仿真结果的声压级经量纲一化后,其频率(斯特劳哈尔数)峰值具有较高的准确度;在低频(0~0.2 Hz)区域,仿真结果和试验结果有较大差异,这主要是受圆柱绕流试验现场条件影响所致。

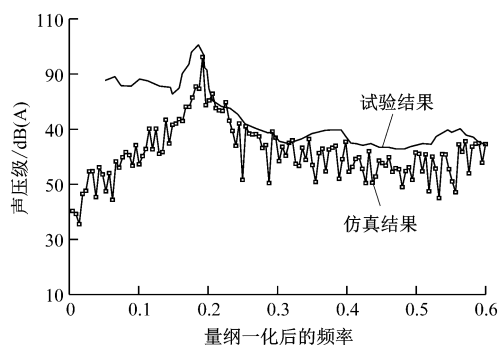


图1 监测点声场噪声仿真计算结果与试验结果对比

Fig. 1 Comparison between simulation calculation and experimental results of sound field noise at monitoring points

2 既有高速铁路动车组受电弓区域气动声学性能研究

对既有高速铁路动车组受电弓区域的气动声学性能进行研究,采用带有转向架、风挡、受电弓的3节编组 CRH380BL 型动车组为研究对象,其缩尺

模型比例为 1:8。该计算模型的网格数为 2.1 亿个,达到 LES 算法的计算要求,可以保证计算结果的准确性。

Q 准则是一种用于识别涡旋结构的数学工具,常用于流场可视化。该准则可以帮助识别流场中的涡旋结构,这对于理解列车周围气流的复杂流动现象非常重要。通过 Q 准则中 Q 值(共振频率下储能与每周期内能量损耗的比值)的分析,可以直观地展示流场中的涡旋分布和演化过程,从而为列车设计提供依据。计算得到列车纵向对称面 Q 值的等值线分布云图如图 2 所示。由图 2 可知:受电弓区域是列车的主要气动扰动区,气动噪声较强,该区域形成的声场决定了列车上部的声学性能。

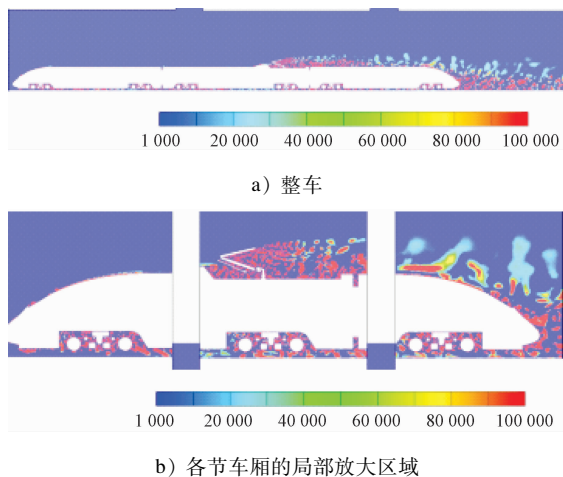
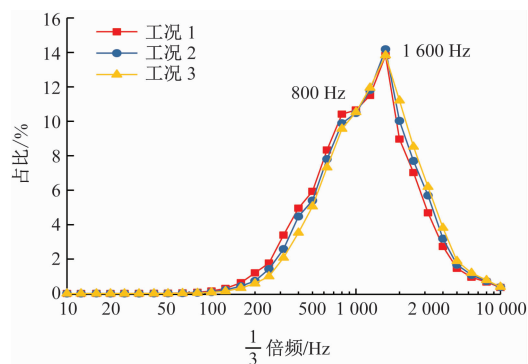


图 2 Q 值的等值线分布云图

Fig. 2 Nephogram of Q value contour distribution

设 3 个速度工况:工况 1 ($v = 250$ km/h)、工况 2 ($v = 300$ km/h)、工况 3 ($v = 350$ km/h)。3 种速度工况下整车激振频率对应等效声源声功率的占比情况如图 3 所示。由图 3 可知:随着 v 的增加,车体表面的声功率、偶极子声源强度逐渐增加。对于整车远

场辐射噪声而言,最大辐射噪声声压级位于受电弓安装位置的下游区域。受电弓区域对整车频率峰值(1 600 Hz)对应的等效声源声功率贡献显著,其主要频率分布范围为 200 ~ 5 000 Hz,该频率范围内等效声源声功率约占总等效声源声功率的 97%。



注:占比指整车激振频率对应的等效声源声功率与总等效声源声功率的比值。

图 3 3 种速度工况下整车激振频率对应等效声源声功率的占比情况

Fig. 3 Proportion of equivalent sound source power corresponding to the excitation frequency of the entire vehicle under three speed working conditions

3 受电弓区域气动声学优化研究

在 CRH380BL 型动车组气动发声特征研究的基础上,本文采用 LES + FW-H 的研究方法,重点研究受电弓区域的气动声学外形优化方案,并对对比分析优化前后的降噪性能。

3.1 受电弓中上部结构优化措施

受电弓中上部结构的优化措施如图 4 所示。根据受电弓中上部几何与流场结构特征,采取 3 个降噪措施(开孔、开槽、翼型化)对列车中上部结构进行降噪优化。

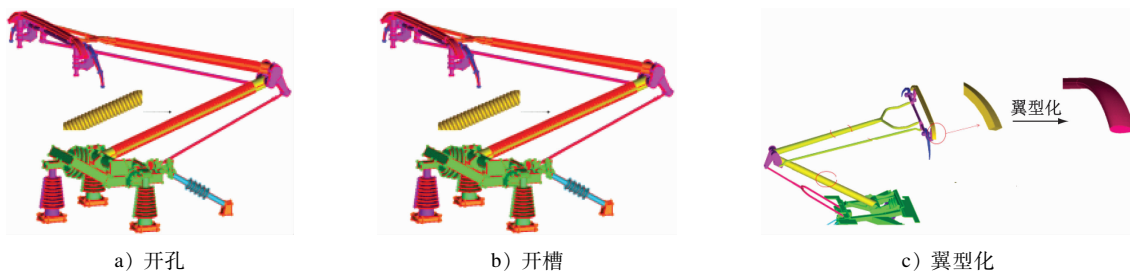


图 4 受电弓中上部优化措施示意图

Fig. 4 Diagram optimization measures for pantograph middle-upper parts

3.2 受电弓底部导流结构优化措施

对受电弓底部导流结构进行降噪,主要为优化导流角 θ 的取值。导流角优化前后受电弓底部导流结构截图如图5所示。其中:图5 a)为原始导流角(即 $\theta_0 = 129.4^\circ$)时受电弓底部导流结构截图;图

5 b)为在原始导流角基础上减少 15° (即 $\theta_1 = 114.4^\circ$)时受电弓底部导流结构截图;图5 c)为在原始导流角基础上增加 15° (即 $\theta_2 = 144.4^\circ$)时受电弓底部导流结构截图;图5 d)为在原始导流角基础上增加 31° (即 $\theta_3 = 160.4^\circ$)时受电弓底部导流结构截图。

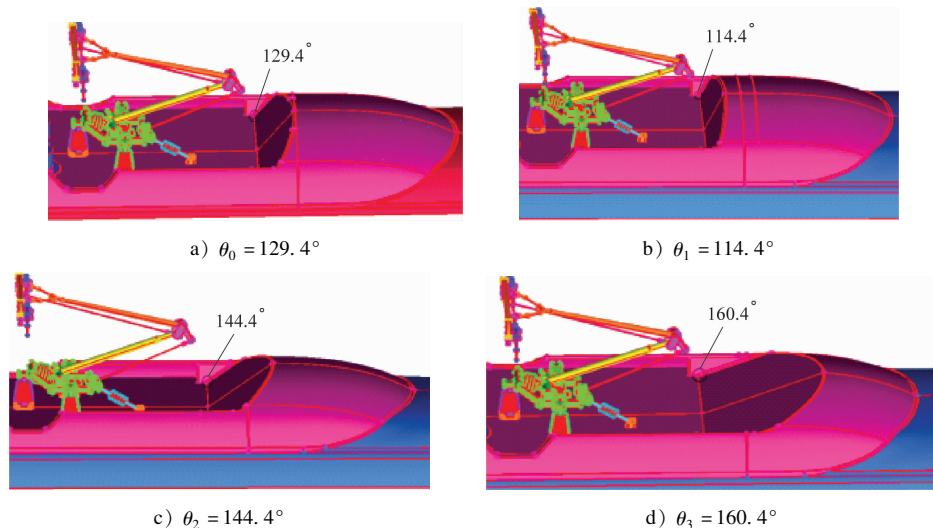


图5 导流角优化前后受电弓底部导流结构截图

Fig. 5 Screenshot of pantograph bottom diversion structure before and after guiding angle optimization

3.3 受电弓区域气动噪声降噪优化方案

根据上文受电弓中上部结构、导流角的优化措施,本文共设计了受电弓区域气动噪声降噪的6个组合优化方案,如表1所示。

表1 受电弓区域气动噪声降噪优化方案

Tab.1 Optimization scheme for aerodynamic noise reduction in pantograph area

组合优化方案 序号	受电弓中上部 优化措施	受电弓底部导流角优化措施
方案1	开孔	不优化,仍为 $\theta_0 = 129.4^\circ$
方案2	开槽	不优化,仍为 $\theta_0 = 129.4^\circ$
方案3	翼型化	不优化,仍为 $\theta_0 = 129.4^\circ$
方案4	开孔、翼型化	$\theta_1 = 114.4^\circ$
方案5	开孔、翼型化	$\theta_2 = 144.4^\circ$
方案6	开孔、翼型化	$\theta_3 = 160.4^\circ$

注:模型采用3节编组、缩比为1:8的CRH380BL型动车组;仿真时 v 取350 km/h。

方案1—方案3下受电弓区域远场辐射噪声声压级的对比曲线如图6所示。方案4—方案6下受电弓区域远场辐射噪声声压级的对比曲线如图7所示。图6、图7中:横轴等于0处为列车运行方向车头外壳的端点;“位置”为远场噪声测试点与车头外壳端点的距离,其中,受电弓区域有3个测点,分别

距离车头外壳端点49 m、56 m、63 m。

由图6、图7可知,采用方案4,可降低受电弓区域在标准测点处的辐射噪声,其中靠近受电弓的噪声声压级降幅最大,约为1.6 dB(A);也可降低整车在标准测点处的辐射噪声,其中靠近受电弓的噪声声压级降幅最大,约为1.0 dB(A)。

4 优化方案在标准动车组上的应用

采用LES + FW-H相结合的方法,分析方案4下CR400BF型动车组受电弓区域的气动声学特征。优化后受电弓区域的气动声学特征主要表现为:受电弓中上部频率为1 000 ~ 5 000 Hz的气动噪声源能量有所降低; v 越大,噪声的抑制效果越强,与优化前相比,工况3($v = 350$ km/h)下整车噪声源能量的降幅约为9.6%,受电弓区域噪声源能量的降幅约为21.8%。

计算发现,与优化前的原方案相比,采用方案4后,整车辐射噪声声压级最大差值的测点及受电弓区域辐射噪声声压级最大差值的测点为同一个测点(均在距离受电弓最近的标准测点处)。进一步对该测点进行分析,得到优化后不同 v 下整车辐射噪声声压级最大差值及受电弓区域辐射噪声声压

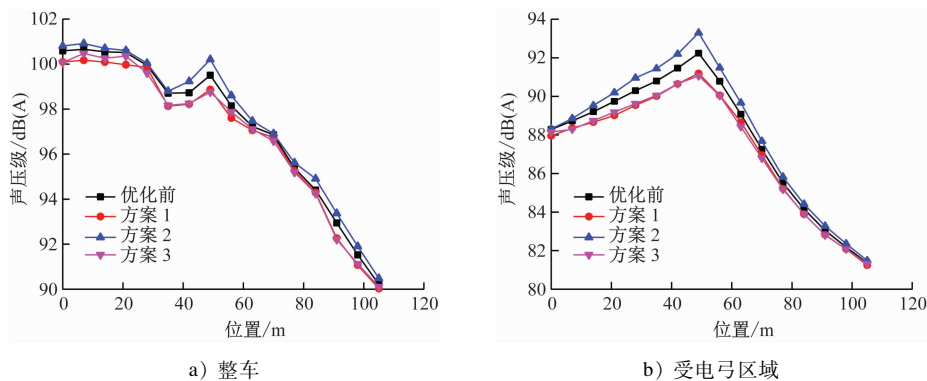


图6 方案1—方案3下受电弓区域远场辐射噪声声压级的对比曲线

Fig. 6 Comparison curves of pantograph area far-field radiated noise sound pressure level in optimization Schemes 1, 2, and 3

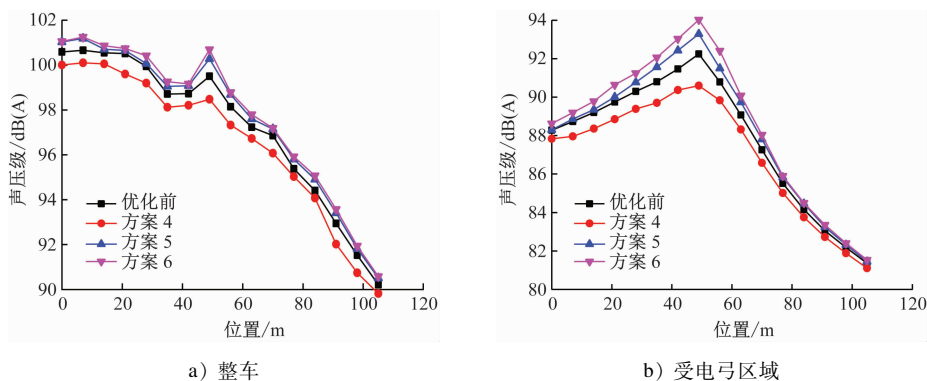


图7 方案4—方案6下受电弓区域远场辐射噪声声压级的对比曲线

Fig. 7 Comparison curves of pantograph area far-field radiated noise sound pressure level in optimization Schemes 4, 5, and 6

级最大差值的计算结果,如表2所示。由表2可知:在工况3下,整车的辐射噪声声压级减少了0.99 dB(A),受电弓区域的辐射噪声声压级减少了1.70 dB(A)。

表2 优化后不同 v 下整车辐射及受电弓区域辐射噪声声压级最大差值的计算结果

Tab. 2 Calculation results of the maximum difference between whole-vehicle noise radiation sound pressure level and pantograph area radiation sound pressure level with different v values after optimization

$v/(km/h)$	整车辐射噪声声压级最大差值/dB(A)	受电弓区域辐射噪声声压级最大差值/dB(A)
160	0.57	0.80
200	0.67	0.95
250(工况1)	0.77	1.17
300(工况2)	0.85	1.31
350(工况3)	0.99	1.70

注:整车辐射噪声声压级最大差值为方案4下整车辐射噪声声压级与优化前整车辐射噪声声压级之差的最大值;受电弓区域辐射噪声声压级最大差值为方案4下受电弓区域辐射噪声声压级与优化前受电弓区域辐射噪声声压级之差的最大值。

5 结语

本文构建了受电弓区域及整车的气动噪声LES+FW-H仿真计算方法,并对受电弓区域的气动激扰发声特征进行了深入分析。试验数据表明,本文提出的气动噪声仿真方法、气动发声机理分析、气动声学优化方向等内容均可为高速铁路动车组气动声学的后续优化设计提供重要参考。

臂杆开孔、弓头翼型化及调整导流罩角度这3个优化措施在我国轨道交通车辆受电弓区域上尚未有应用。方案4对这3个优化措施进行了组合,且对受电弓外形改变较小。相对于设计新型的低噪声受电弓,方案4在技术上的要求较低,能较快应用到现有的高速铁路动车组上,可以作为受电弓新的降噪方法。

我国现有高速铁路动车组数量多,且新一代高速铁路动车组正在技术研发中,本文提出的优化方案在减少高速铁路动车组噪声、改善铁路沿线噪声等方面具有一定成效,其在市场上的应用空间也较大。

(下转第71页)

缩减,这在一定程度上对弹簧产品质量造成影响。

参考文献

- [1] 付国栋. HXD1D 型机车轴箱弹簧故障原因浅析[J]. 内燃机与配件, 2018(23): 157.
FU Guodong. Analysis on the causes of axle box spring failure of HXD1D locomotive[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018(23): 157.
- [2] 曾成, 陈忠明. 广州地铁某型车辆一系螺旋钢弹簧断裂问题分析[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(9): 145.
ZENG Cheng, CHEN Zhongming. Fracture problem analysis of series 1 suspension helical spring on a certain type vehicle in Guangzhou Metro[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(9): 145.
- [3] 贾洪龙, 况宇, 李文学. 铁道车辆轴箱钢弹簧断裂故障与安全性分析[J]. 铁道车辆, 2016, 54(9): 34.
JIA Honglong, KUANG Yu, LI Wenxue. The trouble of breaking of axle box steel springs on rolling stock and safety analysis[J]. Rolling Stock, 2016, 54(9): 34.
- [4] 沈豪. 上海轨道交通 03A01 型车辆轴箱弹簧断裂原因分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(5): 91.
SHEN Hao. Analysis of the axle-box spring fracture of 03A01 type train in Shanghai Metro[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(5): 91.
- [5] 张伟龙, 张志和, 刘辉, 等. 转向架轴箱弹簧断裂失效分析及预防[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(5): 104.
ZHANG Weilong, ZHANG Zhihe, LIU Hui, et al. Analysis and

precaution of the bogie axle-box springs fracture of high-power AC-drive and heavy haul locomotive[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(5): 104.

- [6] 王文静, 李广君, 唐薇, 等. 高速动车组轴箱弹簧疲劳失效机理研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(6): 41.
WANG Wenjing, LI Guangjun, TANG Wei, et al. Research on mechanism of fatigue crack of high speed train axle box spring[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(6): 41.
- [7] 尹太国. 轮轨中高频激励下一系钢弹簧动应力研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
YIN Taiguo. Study on dynamic stress of primary steel spring under high frequency excitation of wheel and rail[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [8] 张羽, 郑天锐, 李渊. 铁路客车轴箱钢弹簧断裂失效的分析研究[J]. 机车车辆工艺, 2018(4): 40.
ZHANG Yu, ZHENG Tianrui, LI Yuan. Fault analysis of crack on steel spring of journal box for passenger wagon[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2018(4): 40.

• 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
• 通信作者:舒友,正高级工程师,you365c@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

(上接第 66 页)

参考文献

- [1] 谭晓明, 杨志刚, 吴晓龙, 等. CIT500 车外噪声源频谱分解模型的试验研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(7): 32.
TAN Xiaoming, YANG Zhigang, WU Xiaolong, et al. Experimental study on frequency spectrum component model of noise source outside CIT500 train[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(7): 32.
- [2] TAN X M, YANG Z G, TAN X M, et al. Vortex structures and aeroacoustic performance of the flow field of the pantograph[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 432: 17.
- [3] TAN X M, XIE P P, YANG Z G, et al. Adaptability of turbulence models for pantograph aerodynamic noise simulation[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019(1): 6405809.
- [4] LAUTERBACH A, EHRENFRIED K, LOOSE S. Investigations of aeroacoustics of high-speed trains in wind tunnels by means of phased microphone array technique[C] // Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Cham: Springer International Publishing, 2015: 175.
- [5] LAUTERBACH A, EHRENFRIED K, LOOSE S, et al. Micro-

phone array wind tunnel measurements of Reynolds number effects in high-speed train aeroacoustics[J]. International Journal of Aeroacoustics, 2012, 11(3/4): 411.

- [6] DENG Y Q, XIAO X B, HE B, et al. Analysis of external noise spectrum of high-speed railway[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(12): 4753.
- [7] SUN X, XIAO H. Numerical modeling and investigation on aerodynamic noise characteristics of pantographs in high-speed trains[J]. Complexity, 2018, 2018(1): 6932596.
- [8] ZHANG Y, ZHANG J, LI T, et al. Investigation of the aeroacoustic behavior and aerodynamic noise of a high-speed train pantograph[J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(4): 561.

• 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
• 通信作者:余永革,正高级工程师,yuyongge@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