

文章编号: 1674—8247(2024)05—0072—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.05.012

# 高速铁路斜拉桥健康监测系统应用与分析

颜永逸

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

**摘 要:**昌赣客运专线赣江特大桥是我国首座 300 m 级跨度的无砟轨道高速铁路斜拉桥。为了掌握高速铁路斜拉桥的服役性能,验算设计理论,对该桥设计并实施了健康监测系统,并对大桥的挠度、支座位移、振动和应变参数进行了分析,并对结构状态开展评估。结果表明:(1)主梁挠度变化和梁端位移变化均小于安全限值,结构变形正常;(2)主跨跨中竖向振动加速度幅值最大值为  $0.121\text{ m/s}^2$ ,小于车桥耦合分析的竖向加速度幅值  $0.125\text{ m/s}^2$ ,梁体的振动性能及运营舒适度较好,结构基频与设计相符;(3)主梁应变受温度影响,总体变化幅值约  $64\text{ }\mu\text{ε}$ ,转换应力为  $13.44\text{ MPa}$ ,小于设计限值,结构受力安全。赣江特大桥目前整体状态正常,服役性能良好。

**关键词:**高速铁路;斜拉桥;健康监测

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

## Application and Data Analysis of Health Monitoring System for High-speed Railway Cable-stayed Bridges

YAN Yongyi

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

**Abstract:** Ganjiang Super-large Bridge on Nanchang-Ganzhou Passenger Dedicated Line, with a span of over 300 m, is the first ballastless track high-speed railway cable-stayed bridge in China. To investigate the service performance of high-speed railway cable-stayed bridges and verify its design theory, a structural health monitoring system was designed and implemented for the bridge. The deflection, support displacement, vibration, and strain parameters of the bridge were analyzed, and the structural state was evaluated by the system. The results demonstrate that: (1) the deflection change of the main beam and the displacement change of the beam end are both less than the safety limit, indicating that the structural deformation is normal. (2) The maximum vertical vibration acceleration amplitude in the main span is  $0.121\text{ m/s}^2$ , which is smaller than that in the vehicle bridge coupling analysis of  $0.125\text{ m/s}^2$ . The beam is of good vibration performance and operational comfort, and its structural fundamental frequency is consistent with the design. (3) The strain of the main beam is affected by the temperature, and the overall amplitude of the change is about  $64\text{ }\mu\text{ε}$ . The conversion stress is  $13.44\text{ MPa}$ , which is less than the design limit, indicating structural stress safety. The above results indicate that the overall condition of the Ganjiang Grand Bridge is in normal health and good service performance condition.

**Key words:** high-speed railway; cable-stayed bridge; health monitoring

收稿日期:2024-05-14

作者简介:颜永逸,(1993-),男,工程师。

基金项目:中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研究开发计划课题(2022K086;KY20230145)

引文格式:颜永逸. 高速铁路斜拉桥健康监测系统应用与分析[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(5): 72-77.

YAN Yongyi. Application and Data Analysis of Health Monitoring System for High-speed Railway Cable-stayed Bridges[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(5): 72-77.

近年来,我国桥梁建设取得了飞速发展,桥梁设计和建造技术取得突破<sup>[1-2]</sup>,在公路、铁路领域建设了一大批具有代表性的桥梁,诸如港珠澳大桥、舟山跨海大桥、大胜关大桥、五峰山大桥等。随着桥梁运营年限增长,结构性能逐渐退化,服役过程中结构安全性和耐久性问题日益突出<sup>[3]</sup>。

为确保桥梁的服役安全性和耐久性,桥梁管理人员需要对桥梁开展专业检测,以获取结构关键构件或部位的状态信息和数据,进而对结构整体状态做出评价,提出管养维护的建议<sup>[4]</sup>,如开展的索力检测<sup>[5]</sup>、结构动态特性检测<sup>[6]</sup>等。然而,这些检测通常是间歇性进行,需耗费大量人力、物力,有时甚至要中断交通,对于铁路桥还需要在短暂的天窗期进行检测,并且需要复杂的流程和手续。为此,健康监测系统被应用到桥梁运维中,以实现连续自动化对结构关键参数的监测和评估<sup>[7]</sup>。

基于结构健康监测系统,众多学者对桥梁结构的关键指标和性能开展了评价研究。曹阳梅<sup>[8]</sup>基于桥梁健康监测系统的索力监测,提出了一种考虑斜拉索抗弯刚度的索力快速识别方法;颜永逸<sup>[9]</sup>等基于健康监测系统的挠度变形数据,开展了大跨度铁路拱桥的变形监测和残余变形分析计算方法,并在北盘江大桥的变形监测中得到了验证和应用;吴俐滢<sup>[10]</sup>等提出了层次分析法结合变权综合法和灰色关联法的评估模型,并以昌赣铁路赣江特大桥的实测数据进行了验证;单德山<sup>[11]</sup>等对2019年桥梁监测领域的决策设计、信号处理、参数识别、模型修正、损伤识别和状态预测与评估等做出了总结综述;孙利民<sup>[12]</sup>等总结了大数据技术在桥梁健康监测中的应用,梳理了桥梁SHM中大数据在处理技术和分析中的应用现状,并对大数据技术在健康监测中的应用进行展望。此外,翁顺<sup>[13]</sup>等基于桥梁振动数据提出了一种结合时间序列分析和模糊聚类分析的高速列车车速识别方法,并进行了实测数据验证分析,进一步拓展了健康监测系统的应用。

尽管已有众多学者在桥梁监测领域开展了广泛研究,但目前主要集中在公路桥梁领域,铁路桥梁健康监测由于起步较晚,现有研究仍然较少。此外,目前高速铁路大跨度桥梁建设逐渐增多,但健康监测系统还未广泛开展,特别是高速铁路无砟轨道斜拉桥健康监测系统的应用和系统性研究仍是空白。因此,本文基于国内首座高速铁路无砟轨道斜拉桥(昌赣高速铁路赣江特大桥)的健康监测系统展开系统论述,并重点介绍监测数据的关键指标分析和应用结果,进而对结构性能开展分析评价。

1 工程概况

昌赣客运专线是京九高速铁路的重要组成部分,设计行车速度250 km/h,预留行车速度350 km/h,全线按无砟轨道设计。赣州赣江特大桥主桥结构采用(35+40+60+300+60+40+35)m混合梁斜拉桥,结构体系为塔梁分离的形式,半漂浮体系,其桥式立面如图1所示。边跨及部分中跨主梁采用整体式预应力混凝土箱梁,其余中跨主梁采用箱形钢-混凝土结合梁,是国内首座按时速350 km设计并铺设无砟轨道的高速铁路斜拉桥。



图1 桥式立面图

为掌握昌赣高速铁路赣江特大桥的服役性能和验算设计理论,在大桥设计和建造中,对该桥设计和实施了符合其结构特点的健康监测系统。根据赣江特大桥主桥受力特点,结合大桥的结构计算分析、危险性分析及桥轨一体化的要求,开展了对桥梁工作环境、关键截面的挠度、应力、位移和振动、无砟轨道和视频监控等方面的结构监测工作,设计安装各类传感器共398个(含高清摄像头21个),健康监测系统的主要测点布置方案如图2所示。为从理论层面掌握该桥的结构特性,采用Midas建立了该桥的计算模型。通过模型分析了该桥的前5阶模态结果,如表1所示,结构主要静力结果如表2所示。单辆CRH3在350 km/h的速度下通过时,梁体的最大竖向加速度为0.125 m/s<sup>2</sup>,横向最大加速度为0.071 m/s<sup>2</sup>,桥梁整体舒适性良好。

表1 前5阶模态表

阶次	频率/Hz	阵型描述
1	0.145 5	主梁纵飘
2	0.537 1	主梁对称竖弯
3	0.603 4	主梁对称横弯
4	0.806 0	主梁反对称竖弯
5	1.206 9	主梁反对称横弯

表2 主要静力计算结果表

序号	项目	数值
1	中跨跨中静活载挠度/mm	332
2	中跨跨中竖向挠跨比	1/904
3	混凝土跨跨中静活载挠度/mm	14
4	混凝土跨跨中竖向挠跨比	1/4 412
5	中跨跨中横向变形/mm	31
6	中跨跨中横向挠跨比	1/9 677

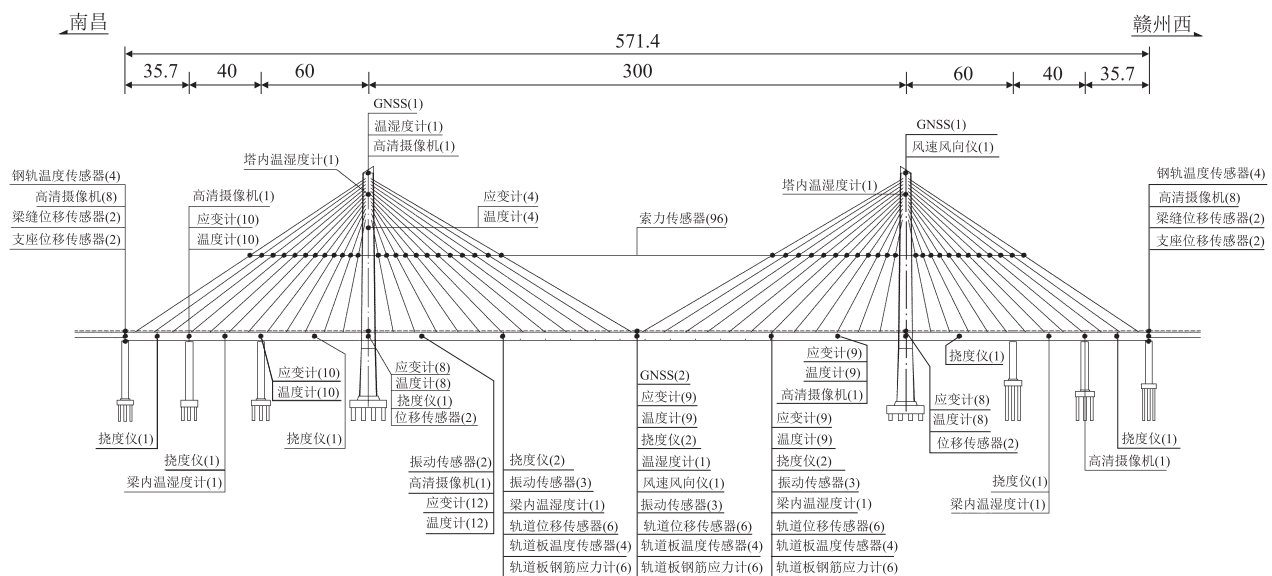


图 2 测点布置图 (m)

为更全面了解大桥的结构特性,2022 年对健康监测系统的主梁挠度进行了设备升级和更新,采用了精度更高,效果更好的新型传感器。基于此,本文以 2024 年 2 月份的数据对主梁挠度、梁端位移和结构动力特性开展分析和研究。

2 主梁挠度监测

挠度是反映高速铁路桥梁平顺性的重要指标,主梁挠度采用光电挠度仪进行监测,布置在主梁中跨1/8位置、2/8位置、3/8位置、4/8位置截面,共 4 个测点,采样频率为 32 Hz。各测点月度数据的主要统计指标如表 3 所示。

表 3 主要挠度监测结果表

截面	上挠最大值/mm	下挠最大值/mm	幅值/mm
中跨 1/8 截面	31.7	-30.8	-62.4
中跨 2/8 截面	56.9	-84.7	-141.7
中跨 3/8 截面	61.1	-92.5	-153.6
中跨 4/8 截面	65.6	-91.0	-156.5

由表 3 可知,各测点下挠幅值和变化幅值均未超过 332 mm,结构变形处于安全状态。以跨中测点进行深入分析,其月度数据的时程曲线如图 3 所示。

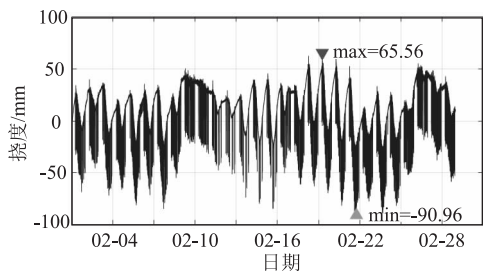


图 3 挠度时程曲线图

由图 3 可知,跨中测点的结构挠度的最大值为 65.56 mm,最小值为 -90.96 mm;挠度变形曲线呈现周期波动变化规律,且每 d 夜晚曲线较为平滑,在白天出现较多尖峰线;进一步分析可知,结构挠度曲线包含了温度影响和列车作用的影响,温度造成其周期性变化,列车作用造成其尖峰。2 月 21 日跨中位置下挠达到最大,挠度时程曲线如图 4 所示。

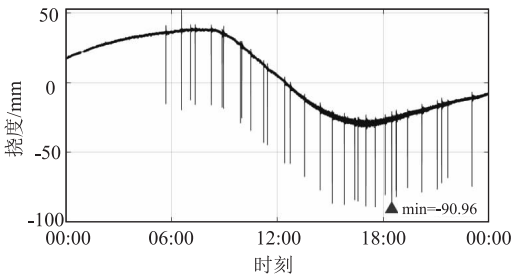


图 4 2 月 21 日挠度时程曲线图

由图 4 可知,受温度影响主梁挠度时程曲线总体表现为“类正弦”变化趋势,同时受列车荷载影响在列车经过时产生不同时刻的突变。对温度效应和列车荷载效应进行分离,温度下挠度与环境温度关系和列车效应下挠度结果分别如图 5、图 6 所示。由图 5、图 6 可知,温度下挠度曲线与环境温度呈现强相关性:白天温度升高,挠度逐渐增大,夜晚温度降低,挠度逐渐减小,且与环境温度的变化相比存在滞后性。

结合图 6 分析,2 月 21 日内共计 31 辆车过桥,列车荷载引起桥梁最大竖向挠度为 -64.68 mm,活载最大挠跨比为 1/4 638,表明结构刚度满足规范要求。

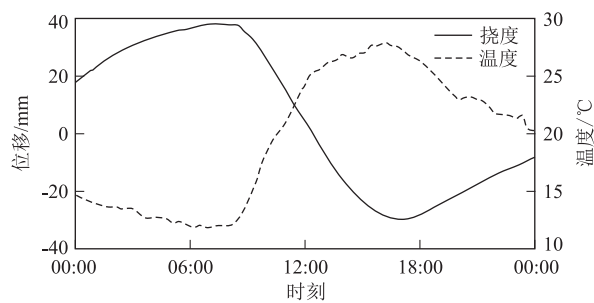


图5 挠度与温度曲线图

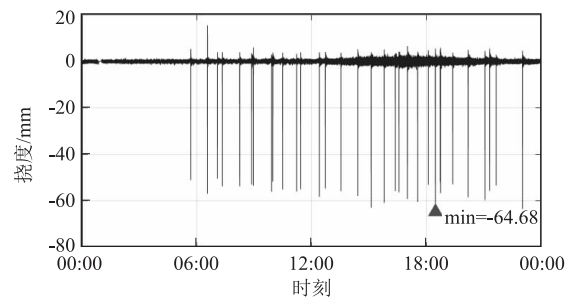


图6 列车效应挠度曲线图

3 支座位移监测

支座是结构重要的支撑构件,其位移反映了梁部伸缩状态。桥梁支座纵向位移采用磁致伸缩位移传感器进行测量,全桥支座位移监测测点共8个,分别布置于桥梁大小里程侧边跨桥墩的支座处和两个主塔支座处,采样频率为15 s/次。南昌侧梁端测点的月度时程曲线如图7所示。

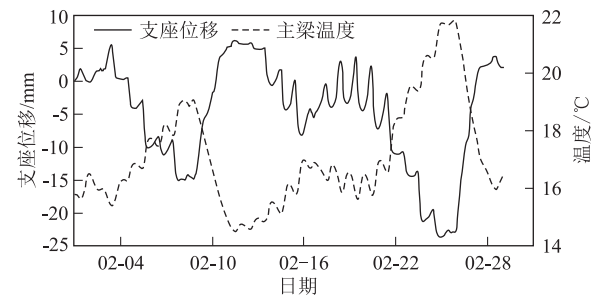


图7 支座位移曲线图

由图7可知,支座位移变化与主梁温度存在明显的相关性,随着主梁温度的升高,支座位移绝对值增大(负号表示位移方向),而随温度降低时,支座位移减小,表明二者为负相关关系。支座测点的变化统计结果如表4所示。由表4可知,监测周期内,各支座位移变化幅值均在±193 mm的设计允许范围内,支座位移监测子系统监测周期内整体运行情况良好,结构状态安全。

表4 支座位移监测结果表

截面	最大值/mm	最小值/mm	幅值/mm
南昌侧梁端	6.3	-23.7	-30.0
南昌侧桥塔	5.1	-13.9	-19.0
赣州侧桥塔	8.4	-7.3	-15.7
赣州侧梁端	11.3	-21.7	-33.0

4 振动监测

结构振动反映了全桥的整体运营舒适性和安全性,也可以衡量全桥刚度状态,全桥动力特性监测测点共11个,分别布置于主跨2分点、4分点及钢混结合段处,采样频率为32 Hz。

跨中截面竖向加速度时程曲线如图8所示,加速度时程曲线反映了行车经过时的主梁振动,加速度时程包络图显示日幅值较稳定,表明桥梁运营平稳,整体舒适性较好。2月份最大振动发生在26日,时程曲线如图9所示。

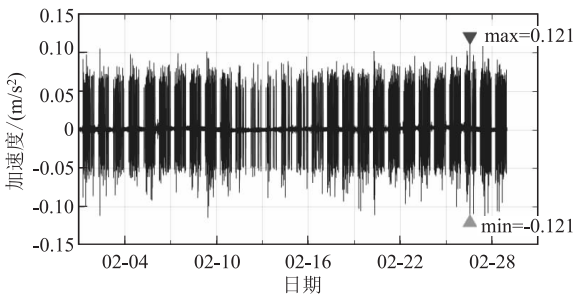


图8 振动时程曲线图

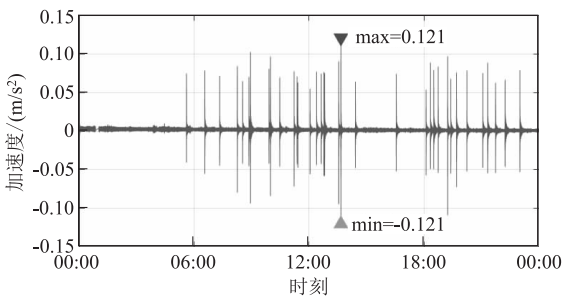


图9 2月26日振动时程曲线图

由图8、图9可知,振动时程数据均值平稳,且在列车经过时准确拾取了梁体振动,振动衰减过程较为合理,结果表明:

(1) 主跨跨中竖向振动加速度幅值最大值为0.121 m/s²,小于车桥耦合分析计算的单车行驶速度为350 km/h时的竖向加速度幅值0.125 m/s²,且小于规范5.0 m/s²的限值,表明梁体的振动性能及运营舒适度较好。

(2) 结合振动尖峰统计,2月26日内共计31辆



车过桥,与基于动挠度的结果吻合,列车经过的时间也与动挠度设备一致。

对不同时刻车辆过桥时的竖向振动加速度采用功率谱进行频域分析,结果如图10所示,分析得到桥梁在列车作用下的竖向1阶振动频率平均值为0.546 Hz,与桥梁有限元计算的理论竖向振动基频0.537 Hz基本相同,表明桥梁的整体刚度满足设计要求。

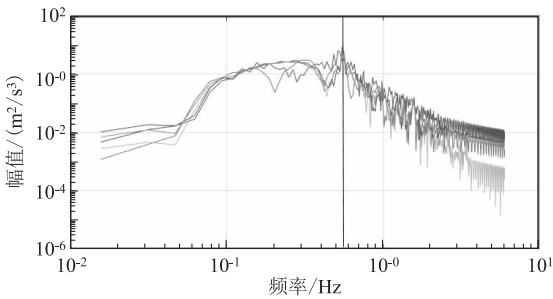


图10 加速度功率谱图

5 应变监测

应变是衡量结构受力状态安全与否的重要监测指标,赣江特大桥全桥共布置83个应变测点,采样频率为1 Hz。各截面应变统计值如表5所示。由表5可知,最大应变幅值为64  $\mu\epsilon$ ,转换应力为13.44 MPa,小于设计限值,结构主梁受力状态安全。

表5 主要应变监测结果表

截面	最大值/ $\mu\epsilon$	最小值/ $\mu\epsilon$	幅值/ $\mu\epsilon$
辅助墩截面	26.6	-37.4	64.0
桥塔截面	15.7	-47.6	63.3
主跨1/4截面	13.3	-14.7	38.0
主跨跨中截面	23.9	-38.5	62.4

跨中截面应变部分测点的时程曲线如图11所示。应变时程随时间推移有较为明显的波动,表现为受温度影响明显。其次,数据在本周期内未发生明显温度漂移的趋势现象,表明传感器工作状态较好。

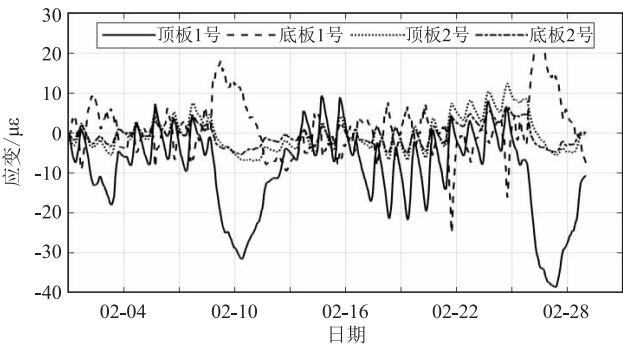


图11 应变时程曲线图

6 结论

本文对昌赣客专赣江特大桥的健康监测系统进行了介绍,并重点对主梁挠度、支座位移、结构振动和主梁应变的监测数据开展了深入分析,得到主要结论如下:

(1)主梁挠度变化均小于安全限值,结构挠度正常。受温度和列车影响,主梁挠度时程曲线表现为“类正弦”变化趋势和列车经过时不同时刻的突变叠加状态,分离后的列车效应可以准确统计出日行车量。

(2)结构实测支座位移数据小于设计限值,表明梁端变形安全。

(3)主跨跨中竖向振动加速度幅值最大值为0.121  $m/s^2$ ,小于车桥耦合分析计算的单车行驶速度为350 km/h时的竖向加速度幅值0.125  $m/s^2$ ,且结构基频与设计相符,表明梁体的刚度及运营舒适度较好。

(4)主梁应变受温度影响,总体变化幅值约64  $\mu\epsilon$ ,转换应力为13.44 MPa,小于设计限值,总体受力安全。

(5)综合以上分析结果,赣江特大桥目前受力和变形状态正常,服役性能良好。

参考文献:

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97.  
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's Bridge Engineering Research: 2021[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 1-97.

[2] 陈良江, 阎武通. 我国铁路桥梁建造技术的成就与展望[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(4): 1-7.  
CHEN Liangjiang, Yan Wutong. Achievements and Prospects of Railway Bridge Construction Technology in China[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4): 1-7.

[3] 吴刚, 陈志强, 党纪. 桥梁智慧运维[M]. 北京: 人民交通出版社, 2022.  
WU Gang, CHEN Zhiqiang, DANG Ji. Intelligent Maintenance of Bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2022.

[4] 贺拴海, 赵祥模, 马建, 等. 公路桥梁检测及评价技术综述[J]. 中国公路学报, 2017, 30(11): 63-80.  
HE Shuanhai, ZHAO Xiangmo, MA Jian, et al. Review of Highway Bridge Inspection and Condition Assessment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(11): 63-80.

[5] 李国强, 魏金波, 张开莹. 考虑抗弯刚度影响的弹性支索力动力检测理论与试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(3): 79-84.  
LI Guoqiang, WEI Jinbo, ZHANG Kaiying. Theoretical and Experimental Study for Cable Tension Estimation by Vibration Method Accounting for Flexural Stiffness and Flexibility Support[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(3): 79-84.

- [6] 朱宏平, 余璟, 张俊兵. 结构损伤动力检测与健康监测研究现状与展望[J]. 工程力学, 2011, 28(2): 1–11, 17.  
ZHU Hongping, YU Jing, ZHANG Junbing. A Summary Review and Advantages of Vibration-based Damage Identification Methods in Structural Health Monitoring [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(2): 1–11, 17.
- [7] 王凌波, 王秋玲, 朱钊, 等. 桥梁健康监测技术研究现状及展望[J]. 中国公路学报, 2021, 34(12): 25–45.  
WANG Lingbo, WANG Qiuling, ZHU Zhao, et al. Current Status and Prospects of Research on Bridge Health Monitoring Technology [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(12): 25–45.
- [8] 曹阳梅. 大跨度铁路斜拉桥索力快速识别方法研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(4): 116–122.  
CAO Yangmei. Research on Fast Identification Method of Cable Force of Long-span Railway Cable-stayed Bridge [J]. Railway Standard Design, 2024, 68(4): 116–122.
- [9] 颜永逸, 杨国静, 宋晓东, 等. 高速铁路大跨度混凝土拱桥变形监测与分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(3): 79–85.  
YAN Yongyi, YANG Guojing, SONG Xiaodong, et al. Deformation Monitoring and Analysis of Long Span High Speed Concrete Arch Railway Bridge[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(3): 79–85.
- [10] 吴俐滢, 杨涛远, 翁顺, 等. 基于综合层次分析法的赣江特大桥安全评估[J]. 土木工程与管理学报, 2022, 39(2): 133–140.  
WU Liying, YANG Taoyuan, WENG Shun, et al. Safety Assessment of Ganjiang Bridge of Chang Gan Railway Based on Comprehensive Analytic Hierarchy Process [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2022, 39(2): 133–140.
- [11] 单德山, 罗凌峰, 李乔. 桥梁健康监测 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(S1): 129–134.  
SHAN Deshan, LUO Lingfeng, LI Qiao. State-of-the-art Review of the Bridge Health Monitoring in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(S1): 129–134.
- [12] 孙利民, 尚志强, 夏烨. 大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 1–20.  
SUN Limin, SHANG Zhiqiang, XIA Ye. Development and Prospect of Bridge Structural Health Monitoring in the Context of Big Data[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 1–20.
- [13] 翁顺, 吴俐滢, 朱宏平, 等. 基于模糊聚类的高速列车车速识别[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(4): 13–23, 29.  
WENG Shun, WU Liying, ZHU Hongping, et al. Speed Recognition of High-speed Train Based on Fuzzy Clustering [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4): 13–23, 29.

(上接第34页)

- [19] 宋孔杰, 张蔚波, 牛军川. 功率流理论在柔性振动控制技术中的应用与发展[J]. 机械工程学报, 2003, 39(9): 23–28.  
SONG Kongjie, ZHANG WeiBo, NIU Junchuan. Application and Development of Power Flow Theories in the Field of the Vibration Control for Flexible Systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(9): 23–28.
- [20] LYON R H, MAIDANIK G. Power Flow between Linearly Coupled Oscillators[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1962, 34(5): 623–639.
- [21] GULIZIA C, PRICE A J. Power Flow between Strongly Coupled Oscillators[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1977, 61(6): 1511–1515.
- [22] 罗文俊, 雷晓燕, 练松良. 基于 FE-SEA 混合法的无砟轨道桥梁系统垂向振动分析[J]. 铁道学报, 2013, 35(8): 94–101.  
LUO Wenjun, LEI Xiaoyan, LIAN Songliang. Analysis on Vibration of Ballastless Track-bridge System Based on Hybrid FE-SEA Method [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(8): 94–101.
- [23] ZHANG Weiguo, WANG Aimin, VLAHOPOULOS N, et al. High-Frequency Vibration Analysis of Thin Elastic Plates under Heavy Fluid Loading by an Energy Finite Element Formulation [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 263(1): 21–46.
- [24] NAVAZI H M, NOKHBATOLFOGHAEI A, GHOBAD Y, et al. Experimental Measurement of Energy Density in a Vibrating Plate and Comparison with Energy Finite Element Analysis [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 375: 289–307.
- [25] ZHENG Xu, DAI Wenqiang, QIU Yi, et al. Prediction and Energy Contribution Analysis of Interior Noise in a High-speed Train Based on Modified Energy Finite Element Analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 126: 439–457.