

文章编号: 1674—8247(2024)03—0045—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.03.009

## 高速铁路箱梁伸缩缝位移传感器研究

陈基松<sup>1</sup> 刘涛<sup>1</sup> 耿滕川<sup>2</sup> 郭静静<sup>1</sup> 张平磊<sup>1</sup> 孙长森<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300251)

**摘要:** 高速铁路箱梁状态对轨道平顺性和行车安全具有决定性作用。由于箱梁滑移变化缓慢且微小,同时需克服电力牵引产生的强电磁干扰,实现自动化监测面临较大挑战。该问题的难点在于箱梁伸缩缝的起始缝宽不同,只有实现等精度测量,才能使不同箱梁伸缩缝的变化具备可比性。本文设计了一种光学低相干高速铁路箱梁伸缩缝位移传感器,在实验室条件下进行了抗振动性能测试,验证了传感器在常见低频振动工况下的性能,并在京津城际高速铁路简支箱梁伸缩缝的监测中应用。结果表明:受日照和温度的影响,箱梁伸缩缝上下表面的位移差异可达 150  $\mu\text{m}$ ,传感器的实测长期监测精度可达 50  $\mu\text{m}$ 。研究成果为实现高速铁路箱梁伸缩缝自动化监测提供了参考借鉴。

**关键词:** 高速铁路; 箱梁伸缩缝; 抗振动位移传感器; 抗电磁干扰位移传感器; 光纤位移传感器

中图分类号: TP212 文献标志码: A

## Study on Displacement Sensor for Expansion Joint of High-speed Railway Box Girder

CHEN Jisong<sup>1</sup> LIU Tao<sup>1</sup> GENG Tengchuan<sup>2</sup> GUO Jingjing<sup>1</sup> ZHANG Pinglei<sup>1</sup> SUN Changsen<sup>1</sup>

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. China Railway Design Corporation, Tianjin 300251, China)

**Abstract:** The condition of box girders in high-speed railways directly determines track smoothness and operational safety. Slow and minute variations in girder displacement pose challenges for monitoring, particularly in overcoming strong electromagnetic interference generated by electric traction systems and achieving automated monitoring. A key difficulty lies in the varying initial widths of expansion joints among different box girders, necessitating equal-precision measurement for comparative analysis of their changes. This study proposed an optical low-coherence expansion joint displacement sensor for high-speed railway box girders, which was subjected to vibration resistance testing under laboratory conditions. The sensor's performance under common low-frequency vibration scenarios was verified, followed by its application in monitoring the expansion joints of simply-supported box girders on the Beijing-Tianjin Intercity High-speed Railway. Results show that, influenced by sunlight and temperature, the difference in displacement between the top and bottom surfaces of expansion joints can reach 150  $\mu\text{m}$ , with the sensor demonstrating a long-term monitoring accuracy of 50  $\mu\text{m}$ . These findings provide valuable reference for the implementation of automated monitoring of expansion joints in high-speed railway box girders.

**Key words:** high-speed railway; box girder expansion joint; vibration-resistant displacement sensor; electromagnetic-interference-resistant displacement sensor; fiber-optic displacement sensor

收稿日期: 2022-09-13

作者简介: 陈基松(1992-),男,硕士研究生。

基金项目: 中国铁路设计集团有限公司校企合作项目(2020YY340517)

引文格式: 陈基松,刘涛,耿滕川,等. 高速铁路箱梁伸缩缝位移传感器研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(3): 45-49.

CHEN Jisong, LIU Tao, GENG Tengchuan, et al. Study on Displacement Sensor for Expansion Joint of High-speed Railway Box Girder [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(3): 45-49.

高速铁路桥梁结构约占我国高速铁路总里程的70%,为保证高速列车的平稳性、舒适性及安全性,须严格控制轨道变形,保证轨道的高平顺性。高速铁路箱梁等结构因温度、日照、自然灾害等因素导致的差异变形直接影响桥梁的轨道平顺性,轻则影响乘客舒适度、重则影响行车安全<sup>[1-3]</sup>。

高速铁路箱梁结构滑移变化缓慢且微小,且环境存在强电磁干扰、振动,实现高稳定性的自动位移传感系统仍是一个亟待解决的问题。箱梁伸缩缝是直接反映桥墩沉降等因素的测量点,实现高精度在线检测的难点在于其起始缝宽不同。只有实现等精度测量,才能使不同箱梁伸缩缝的变化具备可比性。目前实际工程中大多采用电阻式位移传感器、光栅式位移传感器等对箱梁伸缩缝进行测量。电阻式位移传感器具有线性好、分辨率高、结构简单和使用方便等特点,线性度可达99.7%,但易受高温、湿度影响,不适合远距离传输,且抗电磁干扰能力差<sup>[4-5]</sup>;光栅式位移传感器具有安装调试方便、大量程、高精度等优点,测量精度在3 μm/m,但价格昂贵、工艺复杂且抗冲击和抗振动能力不强,易受油污和尘埃的影响<sup>[6-9]</sup>。

此外,光纤传感器具有耐腐蚀、灵敏度高、抗电磁干扰等优势<sup>[10-11]</sup>。为验证日照、温度等因素对简支梁伸缩缝的影响,量化上下表面的伸缩位移差异性,本文基于光学低相干原理,设计了高速铁路箱梁伸缩缝传感器。在实验室条件下检验了传感器抗振动性、稳定性和分辨率,并在工程实践中验证了其稳定性和可行性。

## 1 传感器的原理

### 1.1 光学原理

光纤迈克尔逊干涉仪的基本结构如图1所示,SLED(Super Luminescent Emitting Diode)光源的出射光经由3 dB耦合器在反射镜和扫描镜反射后,出射到PD(Photodiode Detector)探测器。

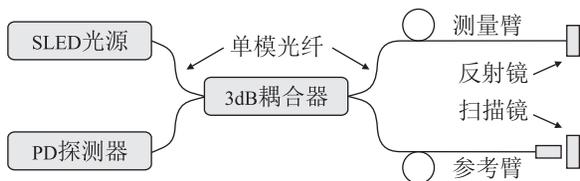


图1 光纤迈克尔逊干涉仪基本结构图

利用扫描镜位置的变化,改变参考臂和测量臂的光程差,当光程差小于SLED光源的相干长度时,可解算得到干涉峰值,理论上该峰值对应测量臂和参考臂

的光程差为0<sup>[12]</sup>。

光纤迈克尔逊干涉仪可通过光程变化监测温度、应变等外界物理量。假设测量臂的光程为 $S_1 = 2nL_1$ ,假设参考臂的光程 $S_2 = 2nL_2 + 2X$ ,且设 $L_2 < L_1$ 。

通过扫描镜位置的变化,满足参考臂与传感臂光程差为0的光程条件,表达为:

$$2nL_1 = 2nL_2 + 2X \quad (1)$$

式中: $L_1$ ——测量臂的光纤长度(μm);

$L_2$ ——参考臂的光纤长度(μm);

$X$ ——光纤端面和扫描镜间的空气间隙(μm);

$n$ ——光纤折射率。

此时可得低相干干涉图样<sup>[13]</sup>,且该图样峰值位置与两臂光程差为0的位置一致。当测量臂光程在温度、应变等因素影响下改变时,通过扫描镜的运动,重新获得干涉峰值位置。被测物理量的波动,通过测量臂与参考臂的光程变化实现监测,表达为:

$$\Delta S = \Delta X \pm \delta X \quad (2)$$

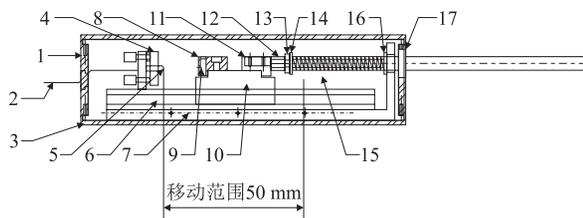
式中: $\Delta S$ ——测量臂的光程变化量(μm);

$\Delta X$ ——扫描镜对应干涉峰值的位置变化量(μm);

$\delta X$ ——系统测量误差(μm)。

### 1.2 机械结构

针对高速铁路振动工况下的位移监测,为实现低频振动下的长期稳定测量,设计了传感器的机械结构,如图2所示。该传感器主要由导轨,反射镜和透镜棒组成,测量时外壳和顶块分别与对被测对象的两端固定。



1. 后盖;2. 光纤;3. 外壳;4. 光学调整架;5. 自聚焦透镜棒;6. 导轨;7. L型固定架;8. 镜反射镜连接块;9. 反射镜;10. 滑块;11. 滑杆连接块;12. 滑杆;13. 螺母;14. 垫片;15. 弹簧;16. 垫片;17. 前盖

图2 低相干干涉位移传感器结构图

滑杆、滑块和反射镜之间刚性连接,透镜棒与外壳之间刚性连接,且两部分分别固定于伸缩缝两侧。当伸缩缝位移变化时,可通过光程变化得到干涉信号,并由此计算伸缩缝的位移。

### 1.3 系统集成

为实现不同箱梁伸缩缝之间的等精度测量,采用系统光路如图3所示,通过光路设计实现导引光纤公共部分的长度及所受干扰(如振动、温度影响等)均不

会对测量造成影响。同时,各通道之间利用同一步进电机,实现位移传感系统在不同伸缩缝间的等精度测量,并保证长期、稳定及远距离的测量效果,提高了安装与调试效率<sup>[14]</sup>。

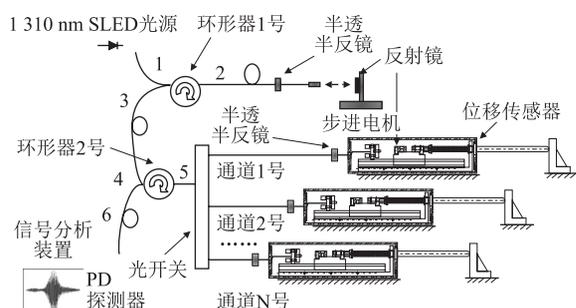


图3 光纤低相干干涉位移传感系统光路图

假设  $M_0$  和  $M_1$  为被测位移的初始状态和变化后的干涉信号所对应的步进电机移动平台的位置。被测位移变化时,  $L_n$  改变,对应的发生干涉信号的步进电机移动平台的位置同步改变,且两段变化均为空气光程,因此所测点位移的变化量可表示为:

$$\Delta L_n = M_1 - M_0 \quad (3)$$

式中:  $\Delta L_n$ ——被测点位移的变化量 ( $\mu\text{m}$ );

$M_0$ ——被测位移初始状态的干涉信号所对应的步进电机移动平台的位置 ( $\mu\text{m}$ );

$M_1$ ——被测位移变化后的干涉信号所对应的步进电机移动平台的位置 ( $\mu\text{m}$ )。

## 2 试验研究

### 2.1 位移传感器稳定性试验

传感器的稳定性是重要性能指标。在标定台固定位置进行了传感器 24 h 连续测量试验,试验环境的昼夜温差达到  $10\text{ }^\circ\text{C}$ 。在试验室条件下,传感器的稳定性良好,24 h 稳定性试验结果如图 4 所示,波动范围不超过  $3\text{ }\mu\text{m}$ ,验证了光路设计中,导引光纤温度干扰的不敏感化。

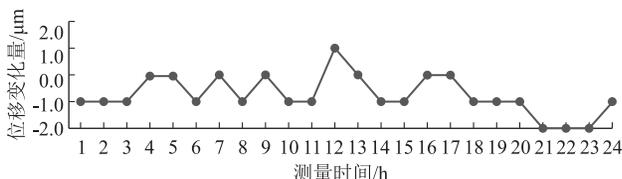


图4 传感器 24 h 稳定性试验结果图

由图 4 可知,数据波动主要来源于干涉峰信号峰值判断误差和标定台本身轻微热胀冷缩的影响。

### 2.2 位移传感器多通道等精度测量试验

为验证本系统中多通道位移传感器的精度一致性,选取 3 个通道的传感器在固定状态下进行 12 h 连续多次测量,结果如图 5 所示。

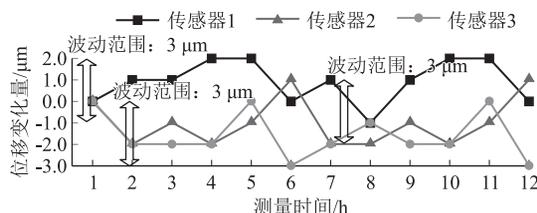


图5 传感器多通道等精度测量试验图

由图 5 可知,基于各通道导引光纤长度不一致情况下,波动范围均不超过  $3\text{ }\mu\text{m}$ ,表明提出的位移传感系统可实现多通道等精度测量。

### 2.3 位移传感器抗振动性试验

基于高速铁路箱梁伸缩缝处于振动工况的考虑,进行了抗振动性试验。试验采用上海一华仪器振动台(ZD/YH-F),将传感器与振动面固定,振动频率设置为  $20\text{ Hz}$ ,振幅为  $0.04\text{ mm}$ <sup>[15]</sup>。模拟振动工况下的测量信号如图 6 所示,其信噪比  $SNR$  表达为:

$$SNR = 20\lg(V_s/V_n) \quad (4)$$

式中:  $SNR$ ——信噪比 ( $\text{dB}$ );

$V_s$ ——信号峰值 ( $\text{V}$ );

$V_n$ ——噪声峰值 ( $\text{V}$ )。

将  $V_s = 0.130\text{ }952\text{ V}$ ,  $V_n = 0.005\text{ }039\text{ V}$  代入可得  $SNR$  为  $29\text{ dB}$ ,表明传感器满足常见低频振动工况下的测量。

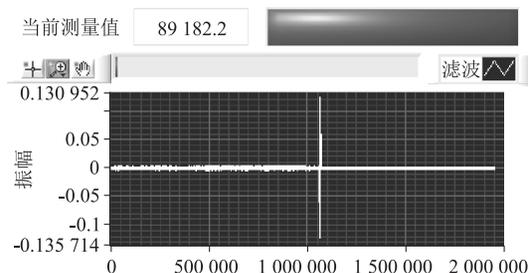


图6 测量信号界面图

## 3 工程应用

### 3.1 工程概况

本次工程应用针对京津城际高速铁路简支箱梁伸缩缝,重点监测温度变化和日照对高速铁路简支箱梁伸缩缝的影响。施工段温度和日照对简支箱梁的

直接作用时间较长,简支箱梁的伸缩缝位移受气候影响较大,工程环境对仪器的运行稳定性和抗振动性要求较高。

作为结构健康监测系统的关键,传感器系统安装意义重大<sup>[16]</sup>。综合考虑整体监测、施工难度、现场具体情况以及监测结果的灵敏度和鲁棒性等因素,选取以下布置方案:为验证本系统在不同箱梁伸缩缝的等精度监测的可行性,在连续2个箱梁伸缩缝上铺设光纤位移传感器;同时,为量化简支箱梁上下表面阳光直射的差异性,在简支箱梁上、下表面各安装1个位移传感器。现场安装示意如图7所示。

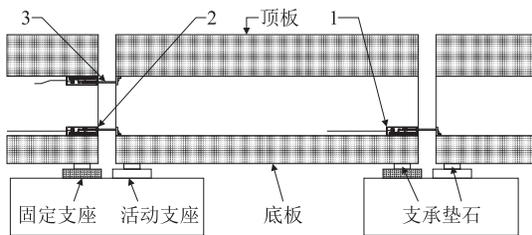


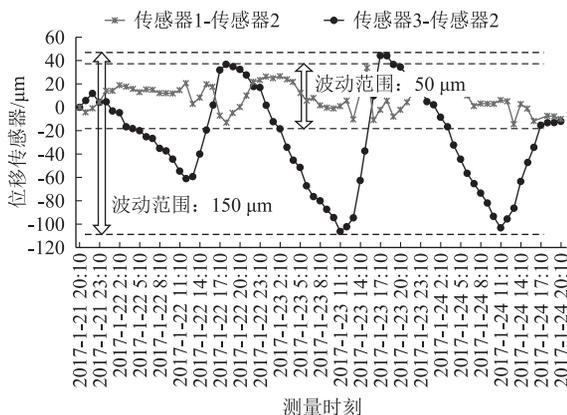
图7 位移传感器安装示意图

### 3.2 运行数据分析

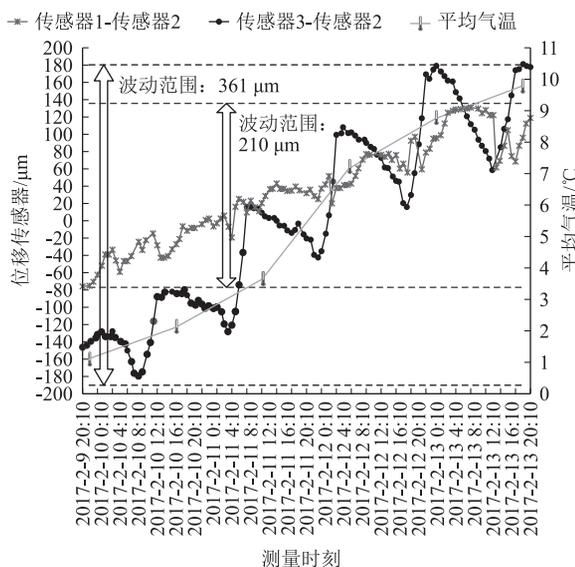
本项目实际测试时间为1年。气温波动平稳条件下(即最高气温和最低气温波动均在 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内)的监测数据如图8(a)所示,气温波动剧烈条件下(即最高气温和最低气温波动达到 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且该时段最高气温和最低气温差达到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的监测数据如图8(b)所示。为方便分析,排除降雨等因素的影响,上述监测数据对应的天气均为晴天。由图8可知,该数据运行平稳,周期性特征明显。

取传感器2为系统参考,分析图8(a)可知:高速铁路简支箱梁伸缩缝上下部分受日照与温度因素的影响,出现周期性变化;测量的3d内简支箱梁上下表面伸缩缝的测量值的差值,均在正午 $12:00$ 太阳直射左右位于波谷, $18:00$ 太阳落山左右位于波峰,波动范围在 $150\text{ }\mu\text{m}$ 以内;该特征与日照和气温变化的周期有较强的对应关系,验证并量化了温度和阳光直射对简支箱梁伸缩缝上下部分影响的差异性。同时,通过分析简支箱梁下部分的传感器测量数据的差值,传感器1与传感器2所测伸缩缝变化同步性好,波动范围在 $50\text{ }\mu\text{m}$ 以内,即工程长期检测精度可达 $50\text{ }\mu\text{m}$ ,验证了光学低相干方法在不同箱梁伸缩缝进行等精度测量的可行性。

由图8(b)可知:在最高气温和最低气温波动达到 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工况下,高速铁路简支箱梁伸缩缝上下部分同样具备日照的周期性变化,波动范围达到 $361\text{ }\mu\text{m}$ ;



(a) 气温波动平稳条件下的监测数据



(b) 气温波动剧烈条件下的监测数据

图8 传感器监测数据图

对比图8(a)数据可得,高速铁路简支箱梁伸缩缝上下部分波动范围与温度波动大小之间存在比例关系,比例系数范围: $36\sim 50$ ;高速铁路简支箱梁伸缩缝上下部分差值数据与日平均气温变化趋势相近,进一步验证了温度对高速铁路简支箱梁伸缩缝上下部分的差异性的影响;通过分析简支箱梁下部分的传感器测量数据的差值,可得在极端天气条件下,不同简支箱梁伸缩缝固有的差异性开始凸显,且差异的放大效应和环境温度变化趋势一致。

## 4 结论

本文基于光学低相干原理提出并实现了一种高速铁路箱梁伸缩缝传感器,在此基础上进行了试验验证和工程应用。实际应用表明:基于低相干光纤传感技术,可以实现长期稳定的位移监测,实测长期检测精度可达 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。在高速铁路箱梁伸缩缝监测方面,

量化了箱梁伸缩缝上下表面受日照和温度影响存在的  $150\ \mu\text{m}$  的位移差异。研究成果为实现高速铁路箱梁伸缩缝自动化监测提供了一种可供选择的技术。

## 参考文献:

- [1] 曾楚琦, 潘自立, 莫宏愿, 等. 基于光纤光栅的高速铁路钢轨损伤识别技术[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(5): 79–83, 95.  
ZENG Chuqi, PAN Zili, MO Hongyuan, et al. Technologies of Damage Identification for High-speed Rail Based on Fiber Grating[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(5): 79–83, 95.
- [2] 张秀芳. 高铁简支梁检测项目与桥上轨道病害分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2013: 1–29.  
ZHANG Xiufang. Testing Items of High-speed Railway Simply Supported Beam and Diseases Analysis of Track Upon Bridge[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2013: 1–29.
- [3] 刘晓光, 蔡超勋, 卢春芳. 中国高速铁路线路工程技术创新与发展[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 1–6, 17.  
LIU Xiaoguang, CAI Chaoxun, LU Chunfang. Technical Innovation and Development of High-speed Railway Line Engineering[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 1–6, 17.
- [4] 谭跃刚, 陈宇佳, 李瑞亚, 等. 高精度弓型光纤光栅微位移传感器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(3): 556–564.  
TAN Yuegang, CHEN Yujia, LI Ruiya, et al. High-precision Bow-shaped Fiber Bragg Grating Micro-displacement Sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(3): 556–564.
- [5] 李梦雪, 孙楠, 徐佳佳. 航天伺服电位计式位移传感器阻值影响分析[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(12): 269–272, 276.  
LI Mengxue, SUN Nan, XU Jiajia. Resistance Impact Analysis of Aerospace Servo Potentiometer Type Displacement Sensor[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(12): 269–272, 276.
- [6] CUI Zheng. Nanofabrication: Principles, Capabilities and Limits[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [7] GROTHJOHANN T, TESTA I, LEUTENEGGER M, et al. Diffraction-Unlimited All-optical Imaging and Writing with a Photochromic GFP[J]. Nature, 2011, 478: 204–208.
- [8] BAXTER J. Beyond the Limit[J]. Nature Photonics, 2012, 6(6): 342.
- [9] 仲志成, 赵斌, 林君, 等. 基于光纤传感技术的三维地应力传感器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 325–335.  
ZHONG Zhicheng, ZHAO Bin, LIN Jun, et al. Three Dimensional In-situ Stress Sensor Based on Optical Fiber Sensing Technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(2): 325–335.
- [10] 彭保进, 李连琴, 马倩倩, 等. 微纳光纤耦合应变传感器[J]. 光学精密工程, 2021, 29(5): 958–966.  
PENG Baojin, LI Lianqin, MA Qianqian, et al. Micro-nano Optical Fiber Coupled Strain Sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(5): 958–966.
- [11] JIAO Zhicheng, JIANG Yunfei, ZHAO Yuqian, et al. Extensive-dynamic-range and High-resolution Surface Profiling with Phase-sensitive Spectral-domain White-light Interferometry[J]. Applied Optics, 2021, 60(13): 3604–3608.
- [12] 陈基松. 光学低相干位移传感器的设计与优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2017: 4–24.  
CHEN Jisong. Design and Optimization of the Low Coherence Fiber-optic Displacement Sensor[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017: 4–24.
- [13] 魏鹤鸣, 张平磊, 崔砚军, 等. 钢筋混凝土锈蚀诱导的膨胀监测及评估: 低相干光纤应变传感器的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(3): 556–565.  
WEI Heming, ZHANG Pinglei, CUI Yanjun, et al. Monitoring and Evaluation of Corrosion-induced Expansion in the Reinforced Concrete Structures: The Applications of Fiber Optic Low Coherent Strain Sensors[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(3): 556–565.
- [14] GUO Jingjing, TAN Yanbin, PENG Li, et al. Performance of the Fiber-optic Low-coherent Ground Settlement Sensor: From Lab to Field[J]. The Review of Scientific Instruments, 2018, 89(4): 045008.
- [15] 杨林. 高速列车作用下周期性桥梁结构周围场地振动及反应谱分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2020: 115–132.  
YANG Lin. Field Vibrations and Its Response Spectrum Analysis around the Periodic Bridge Subjected to High-speed Trains[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020: 115–132.
- [16] WATTANA K, NISHIO M. Traffic Volume Estimation in a Cable-stayed Bridge Using Dynamic Responses Acquired in the Structural Health Monitoring[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24(4): e1890.