

文章编号:1672-3961(2025)04-0127-11

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.315

# 基于 GB-RAR 技术的特大跨径桥梁动态变形规律监测

张国建<sup>1</sup>,付连龙<sup>1</sup>,张庆松<sup>2\*</sup>,桑文刚<sup>1</sup>,李建强<sup>3</sup>,周鲁<sup>3</sup>,付涛<sup>4</sup>,刘胜震<sup>5</sup>

(1.山东建筑大学测绘地理信息学院,山东 济南 250101; 2.山东大学土建与水利学院,山东 济南 250061; 3.山东省路桥集团有限公司,山东 济南 250013; 4.山东建筑大学交通工程学院,山东 济南 250101; 5.自然资源部第一大地测量队,陕西 西安 710054)

**摘要:**随着桥梁跨径的增大,桥梁柔性增强,桥梁动态挠度变形成为衡量桥梁是否健康运营的重要指标。传感器、测量机器人和 GPS 等常规监测技术由于自身的局限性,无法实现大跨径桥梁的无接触、高频和整体动态变形监测。本研究以黄河凤凰大桥为研究对象,采用 GB-RAR 技术监测车辆动荷载作用下的桥梁整体变形规律,并利用小波函数提升数据质量。研究成果表明,经小波去噪后,GB-RAR 技术的测量中误差为 0.016 5 mm,能够满足变形监测精度的要求。在车辆动荷载作用下,桥梁变形呈 Wave-Sin-sqr 模型演化,在跨中产生 131.61 mm 的最大挠度变形量,小于《公路桥涵设计通用规范》中桥梁变形容许值。本研究成果为黄河凤凰大桥等特大跨径桥梁的安全监测和加固设计提供了技术支持和数据支撑。

**关键词:**地基雷达;动荷载;变形监测;特大跨径桥梁

**中图分类号:**P237 **文献标志码:**A

**引用格式:**张国建,付连龙,张庆松,等. 基于 GB-RAR 技术的特大跨径桥梁动态变形规律监测[J]. 山东大学学报(工学版),2025,55(4):127-137.

ZHANG Guojian, FU Lianlong, ZHANG Qingsong, et al. Dynamic deformation law monitoring of extra-long span bridges based on GB-RAR technology[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(4):127-137.

## Dynamic deformation law monitoring of extra-long span bridges based on GB-RAR technology

ZHANG Guojian<sup>1</sup>, FU Lianlong<sup>1</sup>, ZHANG Qingsong<sup>2\*</sup>, SANG Wengang<sup>1</sup>, LI Jianqiang<sup>3</sup>, ZHOU Lu<sup>3</sup>, FU Tao<sup>4</sup>, LIU Shengzhen<sup>5</sup>

(1. School of Surveying and Geo-Informatics, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 3. Shandong Hi-Speed Road and Bridge Group Co., Ltd., Jinan 250013, Shandong, China; 4. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China; 5. First Geodetic Survey Team, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** As bridge spans increase, bridge flexibility is enhanced, making dynamic deflection deformation a critical indicator for assessing bridge health. Traditional monitoring methods, including sensors, measurement robots, and GPS, are limited in their ability to provide non-contact, high-frequency, and comprehensive dynamic deformation monitoring for large-span bridges. This research aimed to monitor the overall deformation patterns of the Yellow River Phoenix Bridge under dynamic vehicle loads using ground-based real aperture radar (GB-RAR) technology, with data quality enhanced through wavelet function analysis. The research results indicated that after wavelet denoising, the measurement error of GB-RAR was reduced to 0.016 5 mm, meeting the required accuracy for deformation monitoring. Under dynamic vehicle loads, bridge deformation followed the wave-sin-sqr model, with a maximum mid-span deflection deformation of 131.61 mm, which was within the tolerance specified by the *General Codes for*

收稿日期:2024-11-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52204097, 42374049);山东省教育厅青年导师访学研修资助项目;山东省高等学校优秀青年创新团队资助项目(2024KJH087);山东省自然科学基金面上资助项目(ZR2022MD103);山东省大学生创新创业训练计划资助项目

第一作者简介:张国建(1989—),男,山东济宁人,副教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为工程测量与变形监测。

E-mail:24155@sdjzu.edu.cn

\*通信作者简介:张庆松(1970—),男,山东费县人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为隧道及桥梁工程。

E-mail:zhangqingsong@sdu.edu.cn

*Highway Bridges and Culverts*. These findings offered technological and data support for safety monitoring and reinforcement design of ultra-large-span bridges, such as the Yellow River Phoenix Bridge.

**Keywords:** ground-based radar; dynamic load; deformation monitoring; ultra-large-span bridge

## 0 引言

在风化腐蚀、空气氧化等环境因素的长期作用下,桥梁强度和刚度逐渐下降。加之车辆、列车等动荷载的附加作用,桥梁尤其特大跨径桥梁易发生瞬间的异常变形,弱化桥梁局部构件的稳定性,从而导致桥梁发生坍塌事故<sup>[1]</sup>。因此,实时监测桥梁在车辆、列车等动荷载作用下瞬间整体动态变形,对于及时掌握桥梁的健康状况,预警桥梁安全有重要意义<sup>[2]</sup>。

目前,常用的变形测量技术在桥梁的动态变形监测方面还存在一些不足,以水准仪、经纬仪为代表的传统测量方法只能进行周期较长的静态变形监测<sup>[3]</sup>。自动全站仪适用于单点的动态跟踪测量<sup>[4]</sup>。GPS(global positioning system)技术用于高频的动态变形监测时,其测量误差较大,且需要在每个点位布设接收机/GPS信号接收天线<sup>[5]</sup>。三维激光扫描技术监测频率太低,还有一些传感器技术往往需要与桥梁接触,对于传感器的封装技术、补偿技术、安装要求都比较严格,需要较高的成本<sup>[6-8]</sup>。所以,要想更好地实现桥梁的动态变形监测必须探寻新的技术方法。

文献[9]提出了一种基于地面干涉雷达监测数据特点的桥体局部相对变形分析方法,并利用IBIS-S(image by interferometric survey of structures)对某长江大桥的动态变形进行监测,验证了GB-RAR(ground-based real aperture radar)技术在实际桥梁动态健康监测中的可行性。文献[10]利用GB-RAR技术获取了铁路桥梁动态影响因素的信息,为桥梁评估提供了数据参考。文献[11]通过EMD(empirical mode decomposition)与小波阈值相结合的方法,对GB-RAR桥梁监测信号进行去噪,提高了监测数据的精度。文献[12]提出了考虑有色噪声影响的GB-RAR形变信息估计方法,并推导出桥梁在监测期内的准确沉降监测结果。文献[13]应用GB-RAR提取白沙洲长江大桥的运行模式,将其与GPS测量进行比较,得出使用非接触式GB-RAR技术可以获得运行状态下桥梁的精确挠度和模态参数。文献[14]通过摄影测量与GB-RAR结合对桥梁动态变形进行监测,并表

明精度满足要求。文献[15]通过GB-RAR与SAR(synthetic aperture radar)协同对大型高架桥振动频率进行监测,并获取到车辆通过导致的桥面位移。文献[16]通过极化GB-RAR系统对大跨度金属铁路桥和一座钢筋混凝土新干线桥的垂直变形特性进行研究,结果揭示了两座桥在不同载荷条件下的动态响应,指出GB-RAR是监测桥梁结构的有效方法。另外,文献[17]也采用GB-RAR技术对公路桥各段进行了挠度和振动试验,取得了良好的效果。

综上所述,本研究拟利用GB-RAR技术监测黄河凤凰大桥在车辆动荷载作用下的动态形变规律,从而为其健康状况评估及加固设计提供数据支撑。

## 1 研究方法

GB-RAR获取的是相对形变,即其他时刻相对于初始时刻的形变。多个时刻的形变数据构成了具有加速度、位移、振幅等形变特性的时间序列。核心原理如下所示。

### 1.1 微分干涉处理

与星载SAR相比,GB-RAR属于零基线观测。假设在未发生形变的情况下,GB-RAR与目标点的距离为 $R_1$ ,则雷达测量后该点的相位组成可表示为

$$\varphi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda}R_1 + \varphi_{\text{atm}1} + \varphi_{\text{noise}1}, \quad (1)$$

式中, $\lambda$ 为波长, $\varphi_{\text{atm}1}$ 为无形变情况测量时的大气延迟相位, $\varphi_{\text{noise}1}$ 为无形变情况测量时的噪声相位。

形变发生后,GB-RAR与测量目标点的距离为 $R_2$ ,雷达测量后该点的相位组成可表示为

$$S_f(m-1, b) = S_f(m, b) \times h(m, b) \times W_f(m, b) \times g(m, b), \quad (2)$$

$$\varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}R_2 + \varphi_{\text{atm}2} + \varphi_{\text{noise}2}, \quad (3)$$

式中, $\lambda$ 为波长, $\varphi_{\text{atm}2}$ 为形变后测量时的大气延迟相位, $\varphi_{\text{noise}2}$ 为形变后测量时的噪声相位。对两次测量的数据进行干涉,目标点的干涉相位可表为

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda}(R_2 - R_1) + (\varphi_{\text{atm}2} - \varphi_{\text{atm}1}) + (\varphi_{\text{noise}2} - \varphi_{\text{noise}1}). \quad (4)$$

考虑到本次试验的采样频率较高,在信噪比较高的情况下,一般认为大气状态是一致的,故有  $\varphi_{atm1} = \varphi_{atm2}$ ,  $\varphi_{noise1} = \varphi_{noise2}$ , 视线方向上的形变量可表示为  $d_{disp} = R_2 - R_1$ , 即

$$d_{disp} = -\frac{4\pi}{\lambda} \varphi_0 \quad (5)$$

本研究变形监测试验的目的是获取桥梁的挠度变形,但是仪器直接测量得到的是视线方向的位

移量。所以需要视线方向上的位移量进行转换处理,从而计算得到其在桥梁竖直方向的变形量。转换模型如图1所示,目标与雷达的距离为  $R$ , 视线上的位移量为  $d_{disp}$ , 水平方向与雷达视线向间夹角为  $\alpha$ , 由此可求出桥梁的挠度变形

$$d_{defo} = \frac{d_{disp}}{\sin \alpha} \quad (6)$$

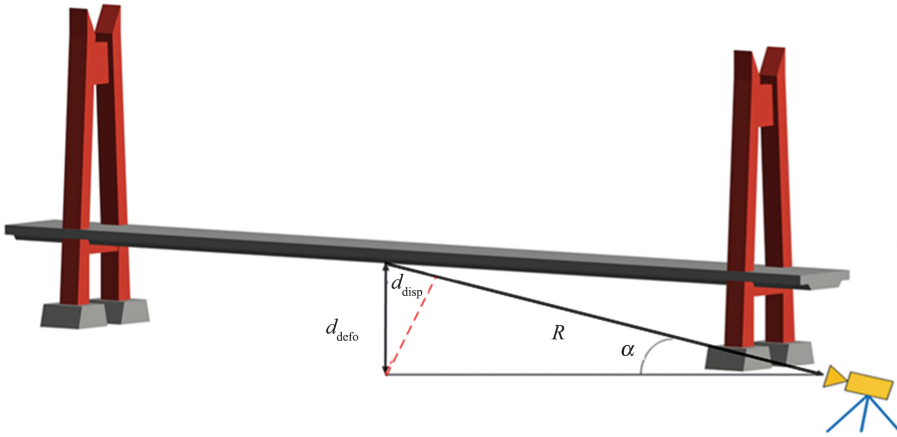


图1 视线向位移与挠度变形之间的关系

Fig.1 The relationship between line-of-sight displacement and deflection deformation

### 1.2 小波去噪

为了减少噪声的影响,提高信噪比,本研究采用小波分析对观测数据进行去噪处理。小波阈值去噪的实质是使含有噪声函数  $S(t)$  经过小波处理后获得真实信号  $f(t)$  的近似值  $\tilde{f}(t)$ , 即在一定的条件下  $\tilde{f}(t)$  是  $f(t)$  的最佳估值。具体算法如下。

假设含有噪声的函数  $S(t)$  表达形式为

$$S(t) = f(t) + \sigma \times e(t), \quad (7)$$

式中,  $f(t)$  为真实信号,  $e(t)$  为噪声,  $\sigma$  为噪声水平,  $t$  为等效时间间隔。

对  $f(t)$  进行离散采样,得到  $n$  点的离散信号  $f(n)$ ,  $t = 1, 2, \dots, n-1$ , 其小波变换为

$$W_f(m, b) = 2^{-\frac{m}{2}} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \psi(2^{-m} - b), \quad (m, b \in Z), \quad (8)$$

式中,  $W_f(m, b)$  为经过小波变换后得到的系数,实际计算中,式(8)计算非常复杂,并且小波函数  $\psi(t)$  没有具体的表达式,由此,小波变换的递归可以采取以下方式实现:

$$\begin{cases} S_f(m+1, b) = S_f(m, b) \times h(m, b) \\ S_f(m+1, b) = S_f(m, b) \times g(m, b) \end{cases}, \quad (9)$$

式中,  $S_f(m-1, b)$  为信号分量,  $h(m, b)$  和  $g(m, b)$  为小波变换中的两个滤波器,对应的重构公式为

$$S_f(m-1, b) = S_f(m, b) \times h(m, b) + W_f(m, b) \times g(m, b). \quad (10)$$

为了选取最适用于线型建(构)筑物动态变形滤波的小波参数,本研究分别选取 heursure, sqtwolog, Rigrsure 3种阈值准则进行调试,通过改变定义阈值重缩放类型、小波分解层数和小波基来大致观查降噪效果。具体调试结果如表1所示。

表1 小波去噪调试结果  
Table 1 Results of wavelet denoising debugging

阈值选取	阈值函数类型, 定义阈值重缩放类型, 小波分解层数, 小波基	$R$ ( $\times 10^{-3}$ )	$E_{RMS}$ ( $\times 10^{-1}$ )
heursure	s, sln, lev7, sym3	9.25	1.40
	s, sln, lev7, sym8	6.89	1.41
	s, sln, lev7, sym10	7.01	1.41
	s, sln, lev1, sym3	251.94	0.80
	s, sln, lev5, sym3	10.33	1.34
	s, sln, lev6, sym7	9.26	1.40
	s, sln, lev7, sym1	97.23	1.50
	s, sln, lev7, sym2	12.80	1.45
	s, sln, lev7, sym4	7.81	1.41
	h, sln, lev7, sym3	29.81	1.24
	h, mln, lev7, sym3	6.21	3.50
	h, one, lev7, sym3	6.05	2.26
	s, mln, lev7, sym3	0.69	3.51
	s, one, lev7, sym3	1.38	2.91

表1(续)

阈值选取	阈值函数类型, 定义阈值重缩放类型, 小波分解层数, 小波基	$R$ ( $\times 10^{-3}$ )	$E_{RMS}$ ( $\times 10^{-1}$ )
sqtwolog	s, sln, lev7, sym3	7.12	1.53
	h, sln, lev7, sym3	22.77	1.30
	mln, lev7, sym3	0.53	3.51
	s, one, lev7, sym3	0.66	3.28
Rigrsure	s, sln, lev7, sym3	51.24	1.01
	h, sln, lev7, sym3	355.72	0.84
	s, mln, lev7, sym3	16.66	3.43
	s, one, lev7, sym3	5.40	2.00

由调试结果可得,当阈值函数类型,定义阈值重缩放类型,小波分解层数,小波基相同时,Rigrsure 阈值与 heursure 阈值、sqtwolog 阈值相比,虽均方根误差( $E_{RMS}$ )略小,但平滑度指数却成倍增大,易导致信号细节丢失。而 heursure 阈值与 sqtwolog 阈值相比,虽平滑度指数略大,但  $E_{RMS}$  均小于 sqtwolog 阈值。所以认为 heursure 阈值处理效果相对较优。

基于此,继而通过控制唯一变量法对阈值 heursure 规则中各参数影响进行分析,得出阈值函数  $h$  较  $s$  降噪后  $E_{RMS}$  较小, $r$  显著增大。阈值重缩放类型 one 和 mln 与 sln 相比  $r$  大大降低, $E_{RMS}$  大幅度增大。小波分解层数越大, $r$  逐渐减小, $E_{RMS}$  明显

增大。随着小波基的增大, $r$  和  $E_{RMS}$  均呈现出先减小后增大的趋势,小波基为 sym3 时  $E_{RMS}$  最小。因此,本研究最终决定采用 heursure 准则,结合 sqtwolog 软阈值函数,选用 sln 阈值重缩放类型,在第 7 分解层运用 sym3 小波基,对监测数据进行去噪处理。

## 2 精度检定试验

微变形监测系统 (image by interferometric survey, IBIS) 是本研究的主要监测设备。在进行野外工程试验之前,有必要对其测量精度进行检定。本次检定试验采用的设备有千分表、反射器、IBIS 微变形监测系统和 TCA2003 测量机器人等(见图 2(a))。

IBIS 仪器标称位移监测精度为 0.1~0.01 mm,试验中采用动态数据采集模式,采样频率为 100 Hz,仪器架设方向正对观测目标(前端反射装置)。前端反射装置为铝合金材质圆形平板装置,厚度为 3 mm,半径为 22 cm(见图 2(b))。TCA2003 测量机器人距离测量标称精度为 1 mm+1 ppm,在精度检测试验中,测量机器人读取数值能达到 0.1 mm。仪器精度检测环境为封闭的地下室,该环境不通风,且温度较为稳定,一定程度上减少了人为和自然环境的扰动影响,试验现场如图 2(c)所示。



图2 IBIS 系统精度检定试验

Fig.2 IBIS system accuracy verification experiment

本研究检定试验原理为将前端反射装置作为观测目标。观测目标和千分表相连,微小调节千分表使观测目标发生相应的微小移动,用 IBIS 系统和 TCA 2003 同步观测目标的位移变化量,对比分析千分表微调数据、IBIS 系统位移监测数据与 TCA2003 位移监测结果。

通过数据处理,分别得到 IBIS 微变形监测系统和 TCA2003 测量机器人在试验 1~6 中的位移监测结果。因为千分表的精度达到  $\pm 0.004$  mm,本次试验中以千分表的调节距离作为真实的位移数据,部分测量精度表征数据如表 2 所示。

由表 2 可知:在试验 1 中,IBIS 位移监测误差最大值为 0.050 2 mm,TCA2003 位移监测误差最大值为  $\pm 0.02$  mm;在试验 2 中,IBIS 位移监测误差最大值为  $-0.036 6$  mm,TCA2003 位移监测误差最大值为  $-0.10$  mm;在试验 3 中,IBIS 位移监测误差最大值为 0.023 4 mm,TCA2003 位移监测误差最大值为 0.05 mm;在试验 4 中,IBIS 位移监测误差最大值为  $-0.028 9$  mm,TCA2003 位移监测误差最大值为  $-0.08$  mm;在试验 5 和 6 中,IBIS 位移监测误差最大值分别为 0.005 8 mm 和 0.007 2 mm(试验 4~6 由于篇幅限制,未给出具体数据)。

表 2 千分表和 IBIS 系统、TCA2003 监测结果对比  
Table 2 Micrometer and IBIS system, TCA2003 monitoring result comparison

名称	调节次数	IBIS 监测/mm	TCA2003 监测/mm	千分表调节/mm	IBIS 误差/mm	TCA2003 误差/mm
试验 1	1	1.027 4	1.00	1.0	0.027 4	0
	2	0.978 6	1.02	1.0	-0.021 4	0.02
	3	-0.987 6	-1.02	-1.0	-0.012 4	0.02
	4	-1.050 2	-0.98	-1.0	0.050 2	-0.02
试验 2	1	0.465 2	0.40	0.5	-0.034 8	-0.10
	2	0.518 7	0.47	0.5	0.018 7	-0.03
	3	0.463 4	0.58	0.5	-0.036 6	0.08
	4	-0.487 5	-0.48	-0.5	-0.012 5	-0.02
	5	-0.524 8	-0.50	-0.5	0.024 8	0.00
	6	-0.534 7	-0.50	-0.5	0.034 7	0
试验 3	1	0.215 7	0.17	0.2	0.015 7	-0.03
	2	0.203 4	0.18	0.2	0.003 4	-0.02
	3	0.098 2	0.15	0.2	0.002 2	0
	4	0.204 8	0.25	0.2	0.004 8	0.05
	5	-0.188 5	-0.20	-0.2	-0.011 5	0
	6	-0.191 8	-0.18	-0.2	-0.008 2	-0.02
	7	-0.209 0	-0.22	-0.2	0.009 0	0.02
	8	-0.223 4	-0.18	-0.2	0.023 4	-0.02

由上述可知,基于本次精度检测试验,IBIS 位移监测误差最大值为 0.05 mm,中误差为 0.016 5 mm,且位移监测结果稳定性较好,IBIS 系统位移监测精度优于 TCA2003 测量机器人位移监测精度。

### 3 特大跨径桥梁动态变形监测试验

济南黄河凤凰大桥位于山东省济南市,全长 6 659.2 m,主桥长 1 332 m,两个主跨均为 428 m,整幅全宽 61.7 m,三塔(钢塔)自锚式悬索桥结构。桥梁建造标准为一级公路建设标准,双向 8 车道,设计时速 60 km,是世界范围内最大跨度的连续组合钢箱梁桥。

在黄河南岸桥梁下方安置 IBIS 微变形测量系统,拟监测范围为 A 点(距离测量位置约 100 m)至 G 点(距离测量位置约 700 m)处,如图 3 所示。根据测量目标设置监测竖直角为 5°,监测时间为 2022 年 9 月 24 日 11 时—13 时,获取试验数据过程及相关参数如下所示。

(1) 设置微变形监测系统采样频率为 60 Hz,共获取 3 组数据,各组监测时间分别为 745、745 和 399 s。

(2) 设置微变形监测系统采样频率为 40 Hz,共采集 2 组数据,监测时间分别为 600 s 和 648 s。

(3) 设置微变形监测系统采样频率为 20 Hz,共采集 1 组数据,监测时间为 1 000 s。



图 3 现场试验  
Fig.3 Field experiment

### 4 特大跨径桥梁动态变形规律分析

为了便于描述,本研究提取了桥梁 A、B、C、D、E、F 和 G 点的部分监测数据分析车辆荷载作用下桥梁局部位置和整体变形规律。

#### 4.1 不同时段桥梁局部位置变形规律分析

首先,对采样频率 60 Hz 下桥梁监测数据进行可视化整理,如图 4 所示。显然,当频率为 60 Hz 进行监测时,共有两个时段变化较为明显。由时段一分析可知:A 点在 599 s 时向下运动偏离原位置 90.91 mm,在 621 s 时向上运动偏离原位置 63.00 mm,振幅为 153.91 mm,振动周期为 44 s,振

动频率为 0.023 Hz; B 点在 602 s 时向下运动偏离原位置 39.32 mm, 在 620 s 时向上运动偏离原位置

31.03 mm, 振幅为 70.35 mm, 振动周期为 36 s, 振动频率为 0.028 Hz。

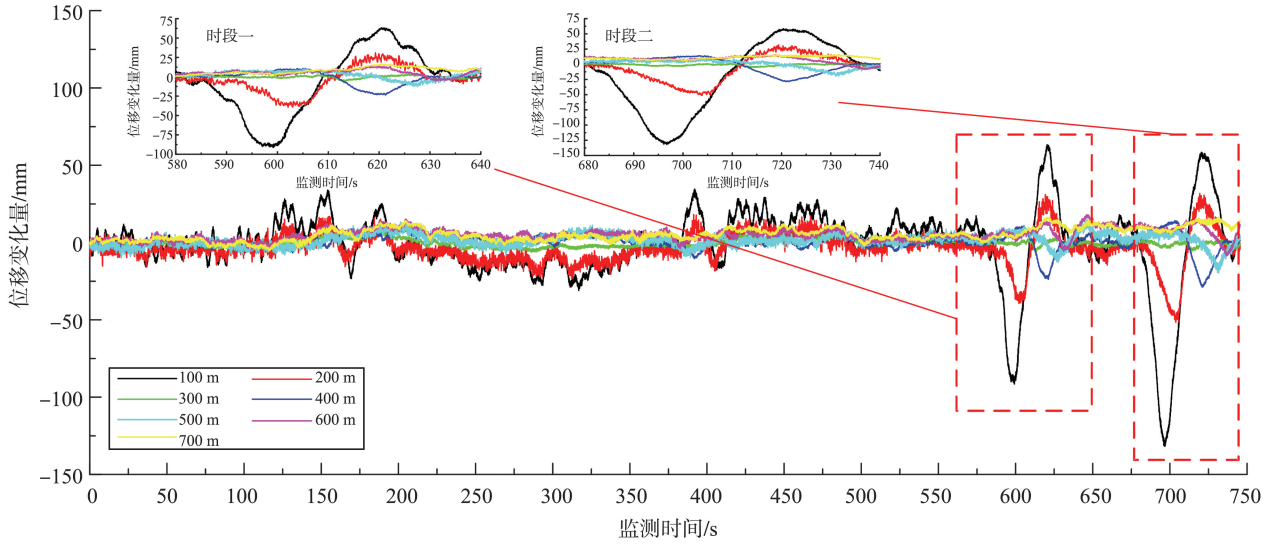


图 4 采样频率 60 Hz 下桥梁局部变形示意图

Fig.4 Schematic diagram of bridge local deformation at sampling frequency of 60 Hz

分析时段二可知: A 点向下偏离原位置 131.61 mm, 向上偏离原位置 58.38 mm, 振幅为 189.99 mm, 振动周期为 44 s, 振动频率为 0.023 Hz; B 点振幅为 82.02 mm, 振动周期为 28 s, 振动频率为 0.036 Hz。

为进一步量化分析位移变化量随时间的关系, 对变化较为明显的 A、B、D 点规律着重分析, 提取其在一、二时段内的波峰、波谷以及正弦振动交越点数据, 并将开始出现大变形的时间点定义为 0 时刻, 如图 5 所示。

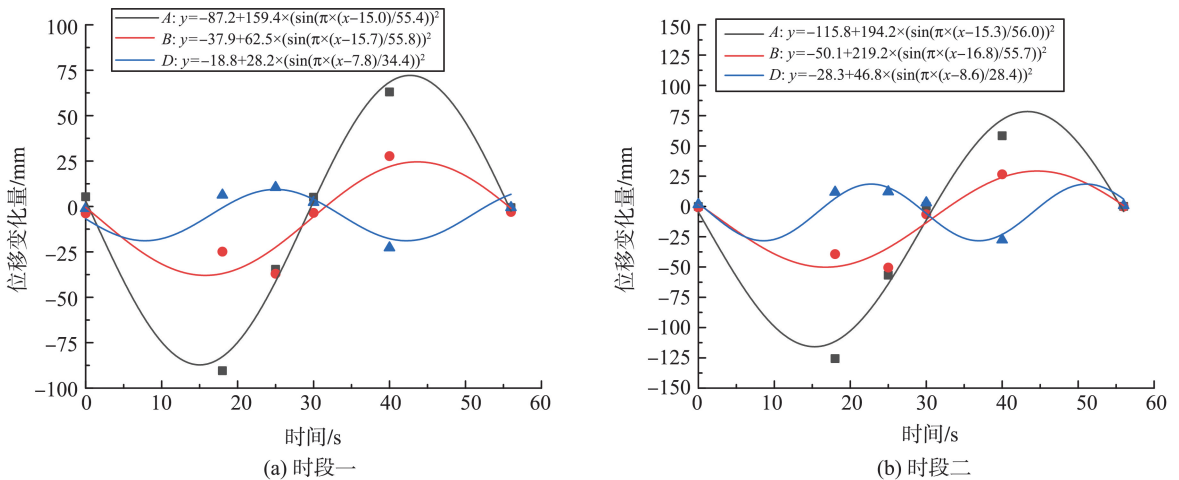


图 5 采样频率 60 Hz 下桥梁局部变形规律

Fig.5 Local deformation rule of bridge at sampling frequency of 60 Hz

由图 5 可知, 60 Hz 采样时各时段 A、B、D 点的变化量大小随监测时间的变化呈现出 Wave-Sin-sqr 函数关系, 最大相关系数  $R^2$  为 0.97。数学模型为

$$y = y_0 + 2a \sin^2 \frac{\pi(x - x_c)}{w}, \quad (11)$$

式中,  $y$  为位移变化量,  $x$  为变形时间,  $a$  为振幅,  $x_c$  为函数水平平移量,  $w$  为半周期时长。

其次, 对采样频率 40 Hz 下桥梁监测数据进行

可视化整理, 如图 6 所示。分析发现, 当采样频率为 40 Hz 进行监测时, 共有 3 个时段变化较为明显。由时段一分析可知: A 点在 113 s 时向上运动偏离原位置 23.23 mm, 在 129 s 时向下运动偏离原位置 34.92 mm, 振动周期为 32 s, 振动频率为 0.031 Hz; B 点在 114 s 时向上运动偏离原位置 13.06 mm, 在 128 s 时向上运动偏离原位置 35.63 mm, 振动周期为 28 s, 振动频率为 0.036 Hz。

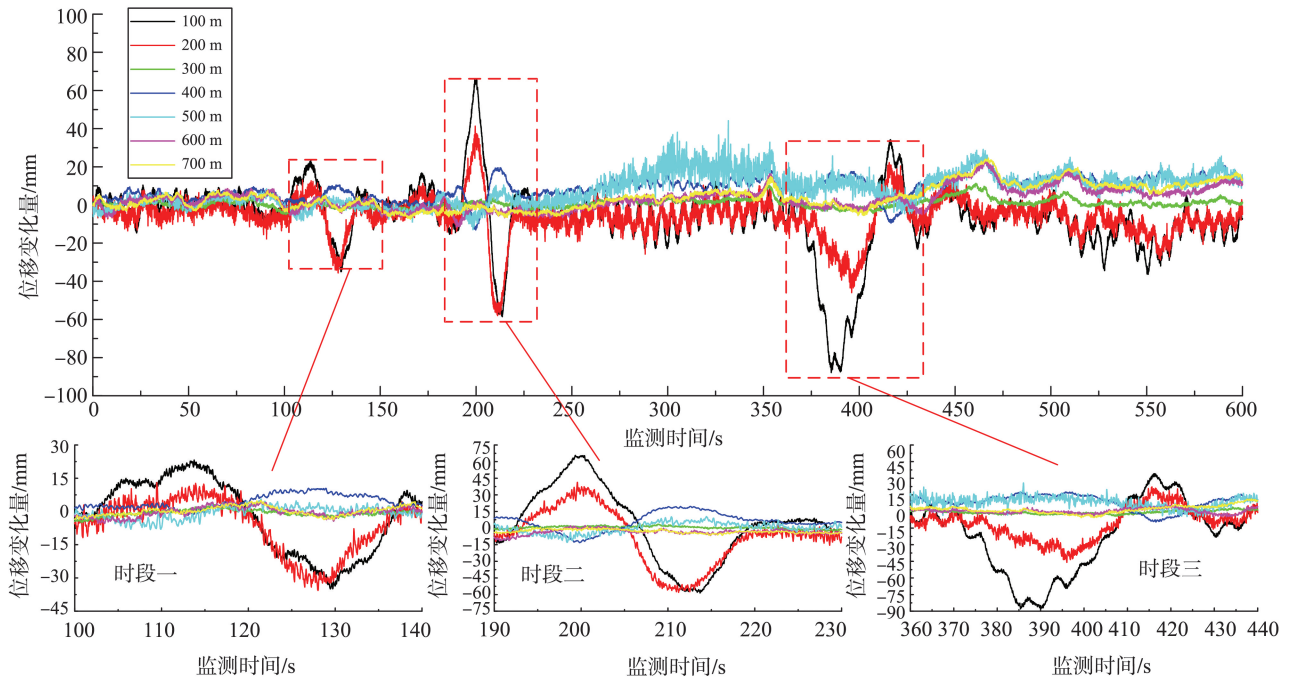


图6 采样频率 40 Hz 下桥梁局部变形示意图

Fig.6 Schematic diagram of bridge local deformation at sampling frequency of 40 Hz

由时段二分析可知:A 点在 200 s 的时向上运动偏离原位置 65.13 mm,在 213 s 时向下运动偏离原位置 58.57 mm,振动周期为 26 s,振动频率为 0.038 Hz;B 点在 199 s 时向上运动偏离原位置 41.24 mm,在 211 s 时向下运动偏离原位置 58.02 mm,振动周期为 24 s,振动频率为 0.42 Hz;D 点呈现出与 A、B 完全相反的运动趋势,表现为在 199 s 时向下运动偏离原位置 13.07 mm,随后在 211 s 时向上运动偏离原位置 19.54 mm,振动周期为 24 s,振动频率为 0.42 Hz。

由时段三分析可知:A 点位波动变化表现为先减小后增大,在 385 s 时达到最小值,偏离原位置 87.90 mm,在 416 s 达到最大值,偏离原位置 33.82 mm;B 点位变化也是先减小后增大,在 396 s 时达到最小值,偏离原位置 -45.51 mm,在 515 s 时达到了最大值,偏离原位置 21.88 mm。

为进一步量化位移变化量随时间的关系,提取 A、B、D 点在一、二、三时段内的波峰、波谷以及正弦振动交越点数据,并将开始出现大变形的时间点定义为 0 时刻,如图 7 所示。

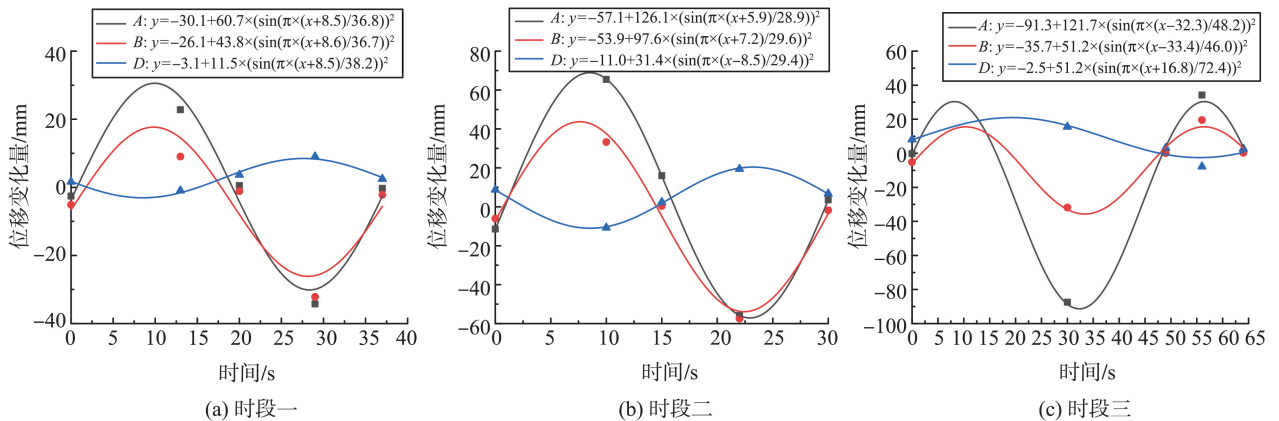


图7 采样频率 40 Hz 下桥梁局部变形规律

Fig.7 Local deformation rule of bridge at sampling frequency of 40 Hz

由图 7 分析可知,各时段 A、B、D 点位移变化量随时间变化关系仍呈现出 Wave-Sin-sqr 函数关系,最大相关系数  $R^2$  为 0.99。

最后,对采样频率 20 Hz 下桥梁监测数据进行可视化整理,如图 8 所示。

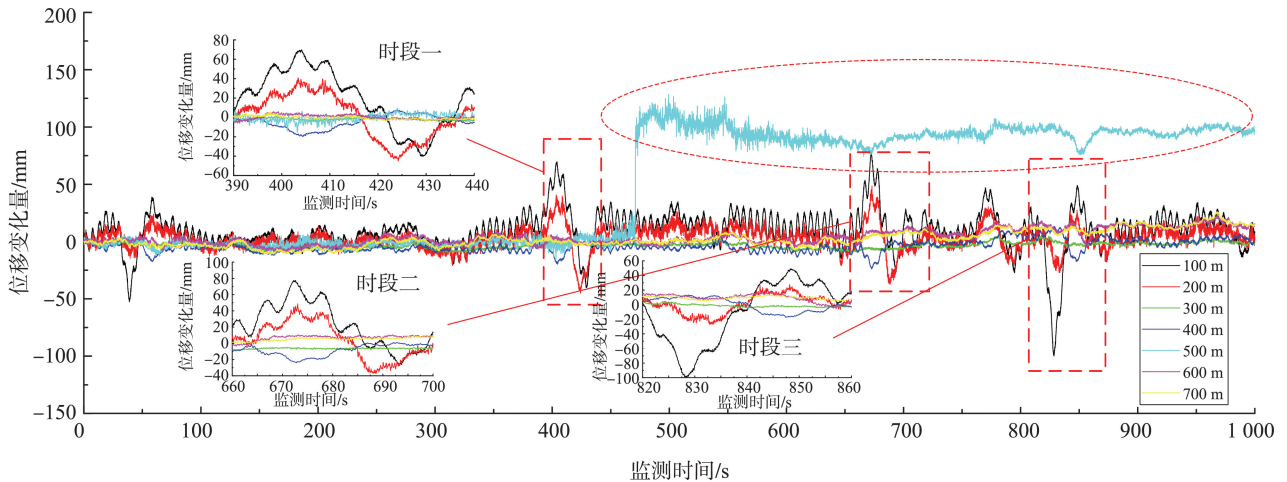


图8 采样频率 20 Hz 下桥梁局部变形示意图

Fig.8 Schematic diagram of bridge local deformation at sampling frequency of 20 Hz

由图8分析可知,当采样频率为20 Hz时,共有3个时段发生明显变化,其中第一时段与第二时段各特征点变化规律相同。A点与B点均呈现出阶梯式上升和阶梯式下降趋势,其中A点分别在404 s和672 s时达到最高点,较原位置偏离69.26 mm和77.37 mm;在429 s和693 s时达到最低点,偏离原位置39.96 mm和27.23 mm,最终趋于稳定。而B点则分别在403 s和673 s时达到最高点,偏离原位置40.23 mm和48.61 mm;在424 s和688 s时下降到最低点,偏离原位置44.72 mm和36.90 mm。同时,D点变化幅度较小,且与A、B两点在同一时段呈现出完全相反的规律。

对于第三时段,A、B、D点的变化规律均呈现出与第一时段相反的规律。A点波动先是在828 s时达到最低点-99.30 mm,随后呈阶梯式上升,在848 s

时达到最高点48.43 mm。B点波动先是在832 s时达到最低点-27.10 mm,随后又在848 s时达到最高点27.38 mm。D点仍与上述两点呈现出相反的变化规律。

同时,相较于采样频率40、60 Hz的结果,当采样频率为20 Hz时,E点规律变化较大且与前两种频率结果差别明显,具体表现为在470 s之前的位移变化量变化较为平缓,在-5.23~25.65 mm的范围内波动,在470 s时呈井喷式上升,471 s时达到100.92 mm,之后变化再次稳定,在75.28~128.46 mm的范围内波动,其最大变形值为128.46 mm。

对变形较明显的A、B、D点在一、二、三时段内的波峰、波谷以及正弦振动交越点数据进行提取分析,同样将开始出现大变形的时间点定义为0时刻,如图9所示。

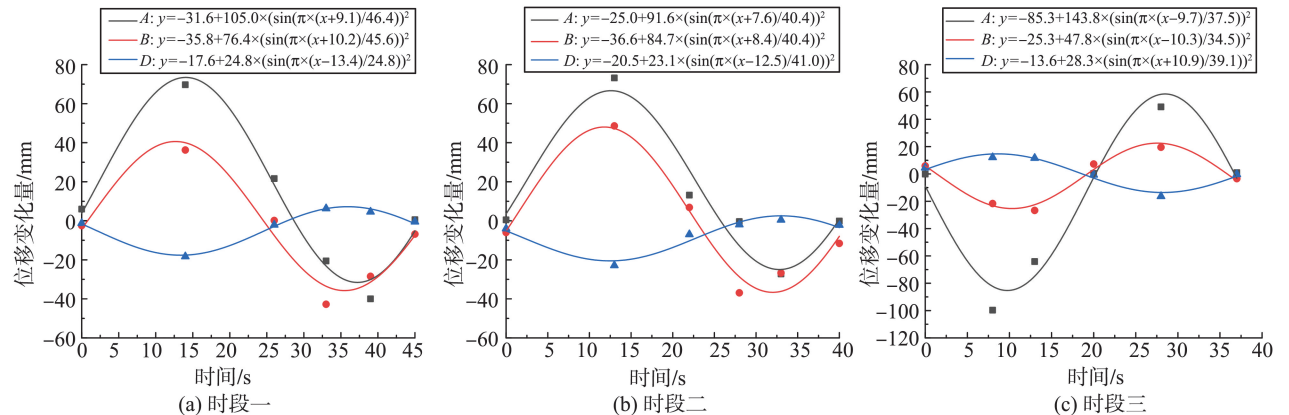


图9 采样频率 20 Hz 下桥梁局部变形规律

Fig.9 Local deformation rule of bridge at sampling frequency of 20 Hz

由图9分析可知,各时段A、B、D点位移变化量随时间变化关系仍呈现出 Wave-Sin-sqr 函数关系,最大相关系数  $R^2$  为0.97。

综上所述,通过对监测频率分别为60、40和20 Hz的桥梁动态形变时间序列曲线进行分析,得出最大挠度变形均发生在跨中(A点和E点),最

大变形值分别为 131.61 mm 和 128.46 mm,均小于文献[18-23]中定义的桥梁安全临界值(桥梁跨径的 1/600)。因此,可以认为黄河凤凰大桥是安全的。

#### 4.2 不同时段桥梁整体变形规律分析

为进一步分析桥梁在动荷载作用下变形规律,统计不同监测频率下各时段的桥梁整体变形数据,对各监测频率下不同时段桥梁整体变形

进行分析,如图 10 所示。分析发现,车辆动荷载形成的冲击动力波在桥梁 A 点处形成波峰,在 D 点处形成波谷,波长约为 600 m,周期约为 0.12 s,频率约为 8.3 Hz。桥梁整体运动规律呈 Wave-Sin-sqr 模型演化,最大相关系数  $R^2$  为 0.95。该数学模型以桥墩处(C 点)为平衡点,相邻跨径呈现出相反的偏离方向,同一跨径的相邻特征点,偏离方向一致。

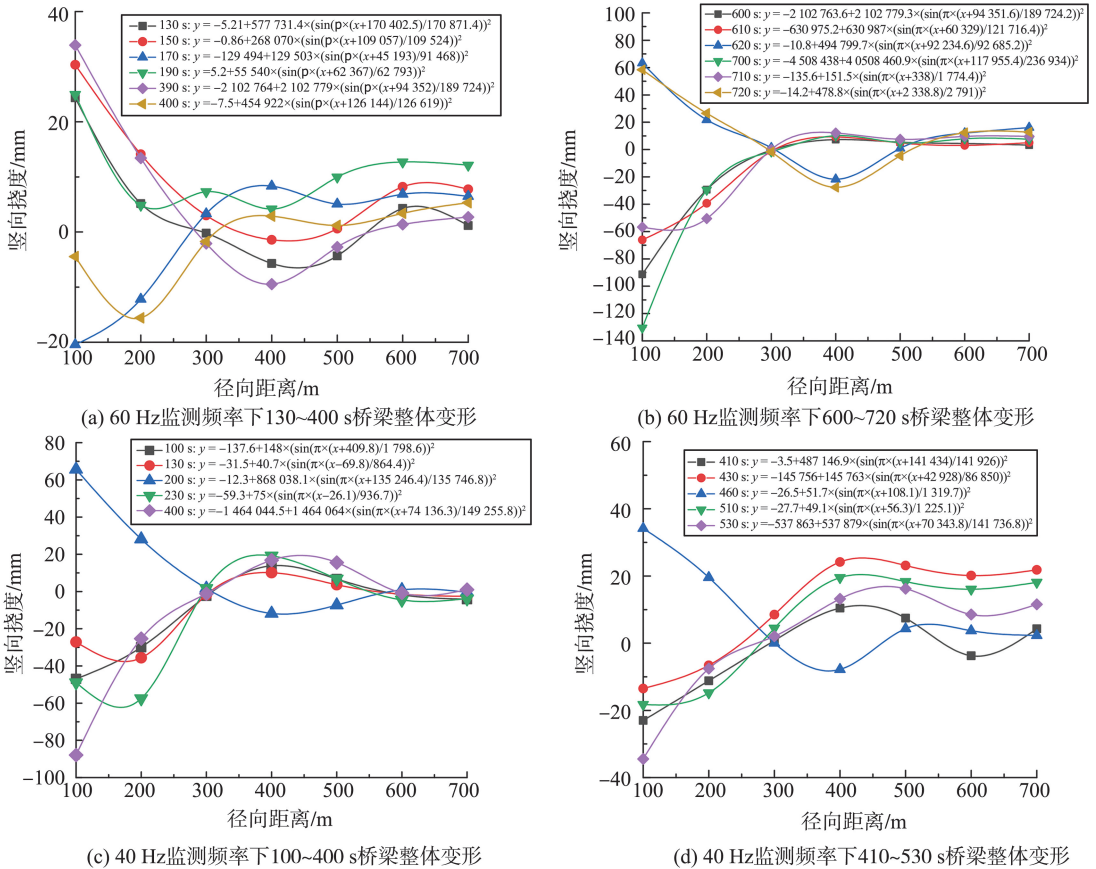


图 10 动荷载作用下桥梁动力特性

Fig. 10 Dynamic characteristics of bridge under dynamic load

## 5 结论

本研究以济南黄河凤凰大桥为研究对象,利用 GB-InSAR 技术分别采用 60、40 和 20 Hz 等频率监测车辆动荷载作用下的桥梁动态变形规律。经小波函数去噪后,从多维度分析桥梁变形特性,得到以下主要结论。

(1) 通过改变阈值准则、定义阈值重缩放类型、小波分解层数和小波基对降噪效果进行评价,发现在 heursure 准则下,结合 sqtwolog 软阈值函数,使用 sln 阈值重缩放类型,在第 7 分解层运用 sym3 小波基进行去噪时,对线型构筑物变形监测去噪效果

最佳。

(2) 经小波去噪后,本研究 IBIS 系统测量误差最大值为 0.05 mm,中误差为 0.016 5 mm,位移监测结果稳定性较好,监测精度优于 TCA2003 测量机器人。

(3) 在车辆动荷载作用下,跨中及 1/4 跨径处动态变形规律呈 Wave-Sin-sqr 模型演化。其中,跨中处振动周期平均值为 44 s,振幅平均值为 172 mm,1/4 跨径处振动周期平均值为 32 s,振幅平均值为 76.19 mm。最大挠度变形为 131.61 mm,满足桥梁安全规范。

(4) 车辆动荷载在济南黄河凤凰大桥内部以应力波形式传递,波长约为 600 m,周期为 0.12 s,频率

为8.3 Hz。该数学模型以桥墩处为平衡点,相邻跨径呈现出相反的偏离方向,同一跨径偏离方向一致。

#### 参考文献:

- [1] 刘兵, 潘芳. 新、旧《公路桥涵设计通用规范》中汽车荷载作用的比较分析[J]. 现代交通技术, 2017, 14(3): 57-61.  
LIU Bing, PAN Fang. Compare and study on vehicle and lane loading effect of new and old *general specifications for design of highway bridges and culverts* [J]. *General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts*, 2017, 14(3): 57-61.
- [2] 何浩祥, 李晓飞, 闫维明. 考虑信噪比和车-桥耦合效应的桥梁健康监测[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(1): 189-198.  
HE Haoxiang, LI Xiaofei, YAN Weiming. Health monitoring strategy for bridge considering signal to noise ratio and vehicle-bridge interaction [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2014, 22(1): 189-198.
- [3] ZHU Y, SHUANG M, SUN D Q, et al. Algorithm and application of foundation displacement monitoring of railway cable bridges based on satellite observation data [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(5): 2868.
- [4] 郭天惠, 崔耀月. 基于荷载试验修正的桥梁健康监测系统研究[J]. 公路, 2021, 66(8): 201-205.
- [5] XUE C Y, PSIMOULIS P A. Monitoring the dynamic response of a pedestrian bridge by using low-cost GNSS receivers [J]. *Engineering Structures*, 2023, 284: 115993.
- [6] 赵立都, 向中富, 周银, 等. 利用地面三维激光扫描进行桥梁挠度变形分析[J]. 测绘通报, 2022(5): 95-100.  
ZHAO Lidu, XIANG Zhongfu, ZHOU Yin, et al. Analysis of bridge deflection deformation based on ground three-dimensional laser scanning [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(5): 95-100.
- [7] 唐亮, 吴桐, 毛若愚, 等. 桥梁结构损伤定位的曲率影响线面积差方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(3): 541-553.  
TANG Liang, WU Tong, MAO Ruoyu, et al. Curvature influence line area difference method for damage location of bridge structures [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2022, 30(3): 541-553.
- [8] 周志祥, 姜腾蛟, 唐亮, 等. 移动式三维激光扫描系统在桥面全息变形监测的应用研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(5): 1078-1091.  
ZHOU Zhixiang, JIANG Tengjiao, TANG Liang, et al. Application of mobile three-dimensional laser scanning system in bridge deformation monitoring [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(5): 1078-1091.
- [9] 徐亚明, 王鹏, 周校, 等. 地基干涉雷达 IBIS-S 桥梁动态形变监测研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(7): 845-849.  
XU Yaming, WANG Peng, ZHOU Xiao, et al. Research on dynamic deformation monitoring of bridges using ground-based interferometric radar IBIS-S [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(7): 845-849.
- [10] PIERACCINI M, MICCINESI L, ABDORAZZAGH NEJAD A, et al. Experimental dynamic impact factor assessment of railway bridges through a radar interferometer [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(19): 2207.
- [11] 石安平, 周吕, 王成, 等. 结合 EMD 与小波阈值去噪的 GB-RAR 桥梁监测信号去噪[J]. 测绘通报, 2022(增刊2): 227-232.  
SHI Anping, ZHOU LÜ, WANG Cheng, et al. GB-RAR bridge monitoring signal denoising based on EMD and wavelet threshold denoising [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(Suppl.2): 227-232.
- [12] WANG C, ZHOU L, MA J, et al. GB-RAR deformation information estimation of high-speed railway bridge in consideration of the effects of colored noise [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(20): 10504.
- [13] HU J Y, GUO J M, XU Y, et al. Differential ground-based radar interferometry for slope and civil structures monitoring: two case studies of landslide and bridge [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(24): 2887.
- [14] ZHAO Y Q, ZHANG G Q, ZANG G C, et al. Monitoring bridge dynamic deformation law based on digital photography and ground-based RAR technology [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(19): 10838.
- [15] NICO G, MASCI O, FOCSA A, et al. GBRAR measurement of vibration frequencies: synergy with micro-Doppler analysis of spaceborne SAR images [C]// IGARSS 2024-2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Athens, Greece: IEEE, 2024: 2349-2352.
- [16] ZOU L L, NICO G, ALANI A M, et al. Strategy for vertical deformation of railway bridge monitoring using polarimetric ground-based real aperture radar system [J]. *Structural Health Monitoring*, 2024, 23(6): 3719-3730.
- [17] PLACHY T, POLÁK M, RYJÁČEK P, et al. Experimental dynamic analysis of the arch road bridge [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 906(1): 012061.
- [18] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规

- 范: JTG D60—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [19] 于承新, 张国建, 赵永谦, 等. 基于数字测量技术的桥梁监测及预警系统[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(1): 115-122.  
YU Chengxin, ZHANG Guojian, ZHAO Yongqian, et al. Bridge monitoring and warning system based on digital measurement technology [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(1): 115-122.
- [20] 张国建, 郭广礼, 于承新, 等. 快速摄影测量系统在观测桥梁震动变形中的应用[J]. 公路, 2017, 62(9): 193-197.  
ZHANG Guojian, GUO Guangli, YU Chengxin, et al. Application of rapid photogrammetry system in the deformation observation of bridge[J]. Highway, 2017, 62(9): 193-197.
- [21] 张国建, 于承新. 数字近景摄影测量在桥梁变形观测中的应用[J]. 全球定位系统, 2016, 41(1): 91-95.  
ZHANG Guojian, YU Chengxin. The application of digital close-range photogrammetry in the deformation observation of bridge [J]. GNSS World of China, 2016, 41(1): 91-95.
- [22] ZHANG G J, GUO G L, LI L, et al. Study on the dynamic properties of a suspended bridge using monocular digital photography to monitor the bridge dynamic deformation [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2018, 8(4): 555-567.
- [23] ZHANG G J, GUO G, YU C X, et al. Monitoring dynamic global deflection of a bridge by monocular digital photography [J]. The Civil Engineering Journal, 2018, 2018(2): 168-182.
- (编辑: 宋艳)
- 
- (上接第 126 页)
- [28] GURBUZ A, PEKER I. Monitored performance of a concrete-faced sand-gravel dam[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(5): 04016011.
- [29] 郝锋平. 曲亭水库水毁修复设计洪水计算[J]. 水科学与工程技术, 2016(3): 22-23.  
HAO Fengping. The flood calculation in the design of Quting reservoir water damage restoration [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2016(3): 22-23.
- [30] REBOUL N, VINCENS E, CAMBOU B. A computational procedure to assess the distribution of constriction sizes for an assembly of spheres [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(1/2): 195-206.
- [31] 赵明阶, 余东, 赵火炎. 土石坝渗漏的波速-电阻率联合成像诊断试验研究[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 118-126.  
ZHAO Mingjie, YU Dong, ZHAO Huoyan. Experimental study on velocity and resistivity combined tomography for diagnosing leakage in earth rock-fill dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 118-126.
- [32] FELL R, WAN C F, CYGANIEWICZ J, et al. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(4): 307-314.
- (编辑: 郭少华)