

桥梁监测中预警值及异常数据的处理研究

赵 斌^{1,2}, 赵荣欣^{1,2}

(1. 上海市建筑科学研究院有限公司, 上海市 200032; 2. 上海市工程结构安全重点实验室, 上海市 200032)

摘要: 以上海市某区县 31 座典型桥梁群(含简支装配式桥梁、预应力混凝土连续箱梁、系杆拱桥、钢筋混凝土连拱桥及主跨挂孔桥梁等结构特点)为实际工程案例,针对桥梁结构健康监测系统中监测数据的预警阈值设定与单传感器信号的数据异常诊断开展系统性研究。基于理论分析与工程参数设置,提出通过融合规范阈值法在不同桥型的监测预警初值的设定,针对单传感器信号异常问题,集成了中值滤波、差分检测、动态基线修正、高斯混合模型(GMM)等方法有效的在保留关键特征值的同时将误报率控制在 4% 以内。研究成果为桥梁群监测系统的阈值优化、异常诊断及养护决策提供了可靠的技术思路,对类似城市基础设施群的安全监测具有一定参考价值。

关键词: 结构健康监测; 预警值; 数据异常; 相关性; 安全评估

中图分类号: U446.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0249-06

Research on Processing of Early Warning Values and Abnormal Data in Bridge Monitoring

ZHAO Bin^{1,2}, ZHAO Rongxin^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Building Research Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, Shanghai 200032, China)

Abstract: Taking 31 representative bridges in a district and a county of Shanghai (including the structural characteristics of simple-supported fabricated bridges, prestressed concrete continuous box girders, bowstring arch bridges, reinforced concrete multi-arch bridges and suspended-span bridges) as the practical engineering cases, a systematic research is conducted on the setting of early warning thresholds for monitoring data in the bridge structure health monitoring system and the abnormal diagnosis of data from single sensor signals. Based on the theoretical analysis and engineering parameter settings, it is proposed to set the initial values for monitoring and early warning of different bridge types by integrating the standard threshold method. For the problem of abnormal signals from a single sensor, the methods such as median filtering, differential detection, dynamic baseline correction, and Gaussian mixture (GMM) are integrated to keep the false alarm rate within 4% while effectively retaining the key feature values. The research results provide the reliable technical ideas for the threshold optimization, abnormal diagnosis and maintenance decision-making of the bridge group monitoring system, which has certain reference value for the safety monitoring of similar urban infrastructure clusters.

Keywords: structural health monitoring; early warning value; data anomaly; correlation; safety assessment

0 引言

随着桥梁结构健康监测技术在近些年的迅速发展,其在保障桥梁安全方面发挥着愈发重要的作用。为了能够切实地确保桥梁的结构安全,以及更

为科学有效地实施经济合理的养护计划,实时监测和预报桥梁结构的性能,及时发现和评估桥梁结构损伤位置和程度,特别是桥梁经历了特殊结构损伤(如台风、船撞及地震等)的事件后,及时对桥梁的健康状况作出评估是十分必要的,从而根据结构性能的变化提出相应的养护措施,对提升结构的运营效率意义重大。

该项目覆盖范围为 31 座不同结构形式的桥梁,主要有简支装配式桥梁、预应力混凝土连续箱梁、系杆拱桥、钢筋混凝土连拱桥及主跨挂孔桥梁等结构特点。监测内容主要包括环境荷载、结构特征及结

收稿日期: 2024-01-13

基金项目: 上海市 2023 年度“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(23DZ1202901);上海市住房和城乡建设管理委员会科研项目(沪建科 2024-Z02-003)

作者简介: 赵斌(1988—),男,工学学士,工程师,从事结构检测与评估咨询、监测技术的研究工作。

构响应等。通过对桥梁可能出现的状态变化,尽早发现结构固有动力特性参数的演变,并对桥梁结构的改变及损伤进行评估,为桥梁管理养护提供准确真实的数据支撑。

1 结构监测桥梁的选择依据

(1)主跨跨径不小于 150 m 的梁桥、200 m 的拱桥、300 m 的斜拉桥、500 m 的悬索桥等结构复杂和重要的桥梁;(2)技术状况等级为 3 类、4 类且需继续服役的重要桥梁;(3)其他经评估需要建设结构监测系

统的桥梁。
根据《公路桥涵养护规范》(JTG 5120—2020)和《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)的规定,在役桥梁按照技术状况评定等级分为 1 类、2 类、3 类、4 类和 5 类^[1-2]。

2 不同桥型结构响应监测内容

本文主要针对梁式桥、拱桥、斜拉桥及悬索桥,从环境荷载和结构响应两方面出发,对关键的监测参数进行汇总,详如表 1 所示。

表 1 不同桥型结构响应监测内容

监测内容类别	监测参数	监测参数选择			
		梁桥	拱桥	斜拉桥	悬索桥
结构响应监测类	振动	主梁竖向振动加速度	△	△	○
		主梁横向振动加速度	△	△	○
		主梁纵向振动加速度	△	△	△
		桥墩顶部纵向和横向加速度	△	△	△
		拱顶三向振动加速度	—	○	—
	变形	主梁挠度	○	○	○
		主梁横向位移	△	△	○
		梁端纵向位移	△	△	○
		支座位移	△	△	△
		墩顶位移	△	△	△
		拱顶偏位	—	○	—
		拱脚偏位	—	○	—
		塔顶偏位/偏位	—	—	○
	应变	主缆位移	—	—	○
		主梁断面应变	○	○	○
		体内或体外预应力筋应变	△	—	—
	基础冲刷	主拱断面应变	—	○	—
		基础冲刷深度	△	△	△
	索力	吊索(吊杆、斜拉索)振动加速度	—	△	△
	裂缝	钢筋混凝土	△	△	△
	腐蚀	钢筋腐蚀	△	△	△
		吊索(吊杆、斜拉索、主缆)	—	△	△
	疲劳	斜拉索	—	—	△
		钢箱梁	○	△	○
		吊索	—	△	△

注:○表示必选监测项;△表示可选监测项;—表示不包含项。

3 常见几种桥梁结构监测预警初值的设立

本文研究桥梁结构监测预警值的主要目的是对结构损伤和特殊事件(如台风、船撞及地震等)及时准确的预警,对桥梁结构或者构件所处的状态进行划分,并设定报警的等级,结合健康监测系统实测数据和规范,将常见的几类监测项目的报警阈值进行指标初设定。

(1)对于不同结构形式的桥梁主梁挠度^[3]预警

值,可参考表 2 至表 6 进行报警阈值初设,各类桥梁的主梁挠度应根据《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)^[2]予以确定。

表 2 梁式桥主梁挠度预警值

预警级数	预警等级	预警值
一级	橙色	跨中最大挠度>计算跨径的 1/600
二级	黄色	跨中最大挠度>计算跨径的 1/1 000 且≤计算跨径的 1/600

其中设计容许挠度值应采用荷载短期效应组合进行计算,同时考虑荷载长期效应影响^[2]。

表 3 拱式桥跨中挠度预警值

预警级数	预警等级	预警值
一级	橙色	跨中最大挠度>计算跨径的 1/800
二级	黄色	跨中最大挠度>计算跨径的 1/1 000 且≤计算跨径的 1/800

表 4 悬索桥加劲梁跨中挠度预警值

预警级数	预警等级	预警值
一级	橙色	跨中最大挠度>计算跨径的 1/500
二级	黄色	跨中最大挠度>计算跨径的 1/800 且≤计算跨径的 1/500

表 5 钢桁架加劲梁跨中挠度预警值

预警级数	预警等级	预警值
一级	橙色	跨中最大挠度>计算跨径的 1/800
二级	黄色	跨中最大挠度>计算跨径的 1/1 200 且≤计算跨径的 1/800

表 6 钢箱加劲梁跨中挠度预警值

预警级数	预警等级	预警值
一级	橙色	跨中最大挠度>计算跨径的 1/400
二级	黄色	跨中最大挠度>计算跨径的 1/600 且≤计算跨径的 1/400

(2)对于桥梁主梁振动预警值^[6],可参考《公路桥梁结构监测技术规范》(JTT 1037—2022)进行报警阈值初设,详见表 7。

表 7 主梁振动加速度预警值

预警级数	预警等级	预警值
一级	橙色	10 min 加速度均方根达到 50 cm/s ²
二级	黄色	10 min 加速度均方根达到 31.5 cm/s ²

(3)桥梁主梁裂缝预警值,可参考表 8 进行报警阈值初设。

表 8 主梁裂缝预警值

预警级数	预警等级	预警值
一级	橙色	0.20 mm 或 0.10 mm
二级	黄色	1.00 mm

其中二级的最大裂缝宽度限值根据环境类别不同视具体情况定。

(4)桥梁铰缝挠度预警值,目前相应规范尚未完善,可参考表 9 进行报警阈值初设。

铰缝技术状况评估目前没有统一的规范要求,先按照以下方式进行,在桥面荷载自由通行下所测

表 9 铰缝技术状况评定依据表

预警级数	无量纲参数 α	铰缝技术状况
一级	≥ 0.57	破坏
二级	$0.14 \leq \alpha < 0.57$	损伤
三级	< 0.14	完好

得的各板梁跨中动态挠度差^[4-5]结果,可通过求得各板梁铰缝无量纲参数 α ,来评定各板梁铰缝技术状况,参数 α 的求值如式 1 所示,铰缝不同技术状况的评定方法如表 9 所示。

无量纲参数: $\alpha = \Delta / L \times 10\ 000$ (1)

式中: Δ 为实测相对位移(跨中挠度差); L 为桥跨跨径; 10 000 为系数。

(5)对于拉索、吊杆力^[6]预警值,可参考《公路桥梁结构监测技术规范》(JTT 1037—2022)进行报警阈值初设,详见表 10。

表 10 拉索、吊杆预警值

预警级数	预警等级	预警值
一级	橙色	10 min 加速度均方根达到 300 cm/s ²
二级	黄色	10 min 加速度均方根 100 cm/s ²

(6)对于梁体伸缩位移^[7]预警值,可参考《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)进行报警阈值初设详见表 11、表 12。

表 11 梁体伸缩位移预警值

预警级数	预警等级	预警值
一级	橙色	Δl_t^+ 或 Δl_t^-
二级	黄色	Δl_t^+ 或 Δl_t^-

表 12 桥梁结构的有效温度标准值^[8] 单位:℃

气候分区	钢桥面板钢桥		混凝土桥面板钢桥		混凝土、石桥	
	最高	最低	最高	最低	最高	最低
严寒地区	46	-43	39	-32	34	-23
寒冷地区	46	-21	39	-15	34	-10
温热地区	46	-9(-3)	39	-6(-1)	34	-3(0)

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)中由温度变化引起的伸缩量按公式(1)和(2)计算:

温度上升引起的梁体伸长量 Δl_t ,

$\Delta l_t^+ = \alpha_c L (T_{\max} - T_{\text{set},t})$ (1)

温度下降引起的梁体缩短量 Δl_t ,

$\Delta l_t^- = \alpha_c L (T_{\text{set},u} - T_{\min})$ (2)

式中: $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别为当地最高、最低有效气温值,按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)取用; $T_{\text{set},u}$ 、 $T_{\text{set},t}$ 分别为预设的安装温度范围的上限值和下限值; L 为计算一个伸缩装置伸缩量所采用的梁体长度,视桥梁长度分段及支座布置情况而定; α_c 为梁体混凝土材料线膨胀系数,采用 $\alpha_c = 0.000\ 01$ 。

《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[9]计算桥梁结构因均匀温度作用引起的外加变形或约束变形时,应从受到约束时的结构温度开始,考虑最高和最低有效温度的作用效应。当缺乏实际调查资

料时,公路混凝土结构和钢结构的最高和最低有效温度标准值可按下表取用。

(7)对于桥面铺装温度^[6]预警值,可参考《公路桥梁结构监测技术规范》(JTT 1037—2022)进行报警阈值初设,详见表 13。

表 13 桥面铺装温度预警值		
预警级数	预警等级	预警值
一级	黄色	大于 60 ℃或小于-20 ℃根据铺装体系材料力学性能随温度变化关系确定

4 几种典型的预警值分析

(1)主梁挠度直接反映了主梁的刚度状况。以 1 座跨径为 10.00 m+13.00 m+10.00 m 的空心板梁桥为例,在主梁跨中布置动态挠度测点,主梁跨中动挠度测点竖向位移变化如图 1 所示。

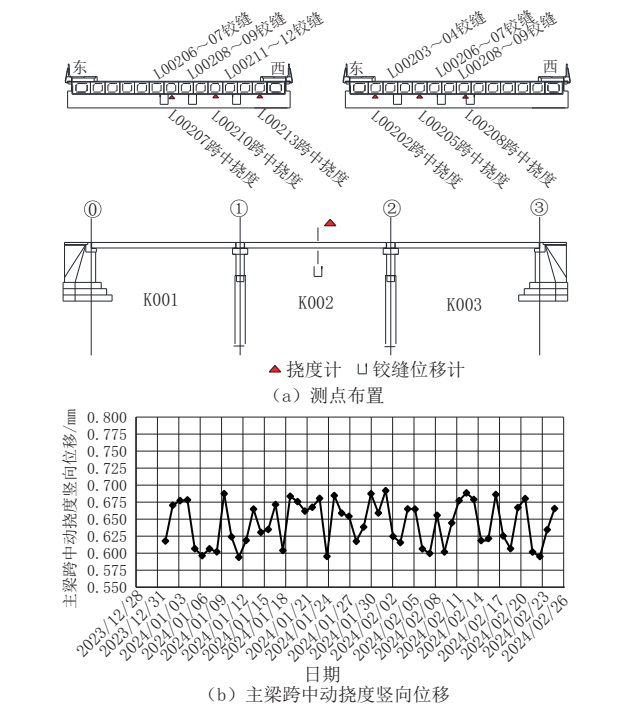


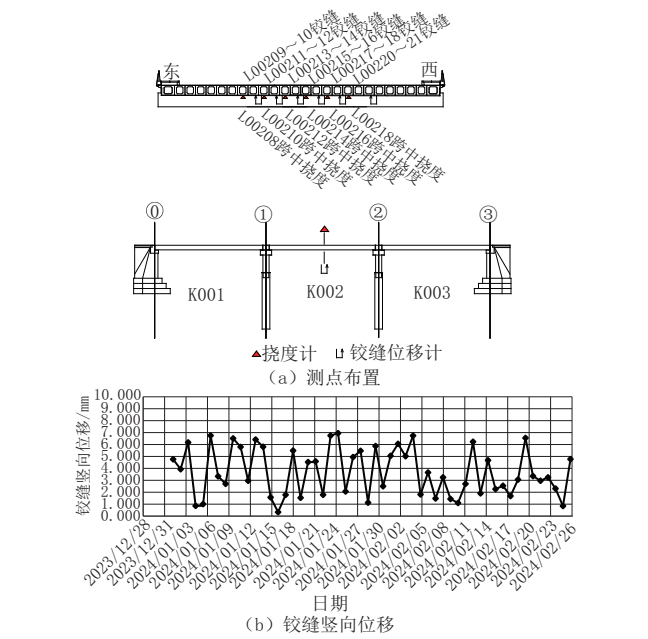
图 1 主梁跨中动挠度竖向位移曲线

数据分析结果表明:L00207 主梁跨中最大挠度变化量为 0.11 mm,主梁竖向挠度在限值以内。

(2)车辆荷载作用下铰缝两侧板梁的相对位移进行测量,通过行车荷载作用下相对位移的大小来判断铰缝的损伤程度。在主梁跨中布置铰缝测点,铰缝测点竖向位移变化如图 2 所示。

数据分析结果表明:L00217~18 主梁铰缝实测相对最大位移为 3.18 mm,铰缝预警阈值 α 为 2.45,该铰缝处于破坏状态。

(3)以一座吊杆顺桥向间距 5.0 m,吊杆采用 PES (FD)5-73 低应力防腐拉索,吊杆钢丝采用低松弛镀



(1)每根吊杆的吊杆力变化连续、趋势比较平稳;
(2)上下行侧对称位置吊杆的吊杆力基本对称;
(3)W005 吊杆基频为 8.82 Hz, W006 吊杆基频为 9.09 Hz, W007 吊杆基频为 8.93 Hz。W008 吊杆基频为 8.44 Hz, E006 吊杆基频为 9.33 Hz, E007 吊杆基频为 8.31 Hz。吊杆力变化趋势较平稳,两侧拱肋相应位置吊杆力基本一致。

(4)通过对伸缩缝的位移进行长期实时监测,从而实现对伸缩缝运动状态的分析和评定(顺滑、阻碍),存在阻碍导致上部结构出现附加内力。伸缩缝相对位移变化如图 4 所示。

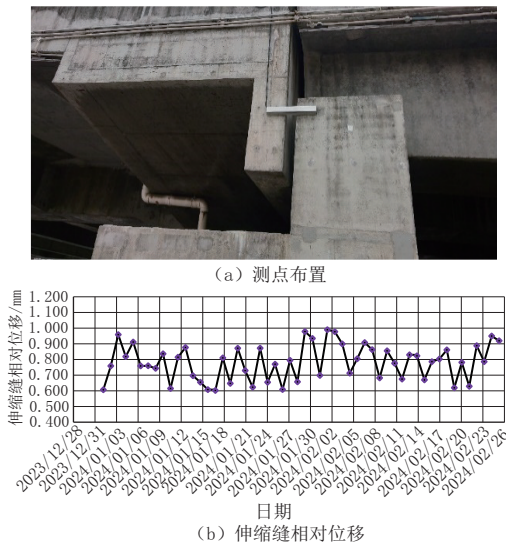


图 4 伸缩缝相对位移曲线

数据分析结果表明:位移示值均在正常范围内,位移变化与大气温度变化关系吻合,说明该桥梁体位移工作性能良好。

5 结构健康状况评价体系

由于传感器系统不可能覆盖整座桥梁的所有构件,对于大型桥梁或者复杂结构的桥梁会存在某些隐蔽部位的监测不足。因此,在现有的技术水平下,可以采用实时监测技术与传统现场检查相结合的方法,如图 5 所示,实时监测系统负责全桥整体工作性能、与桥梁安全直接相关的关键点的监测以及突发事件的预警,从总体上把握全桥的工作状态,而传统的检测方法(包括无损检测)则是对局部位置进行重点检查^[11]。换言之,监测与检测本质是相通的,传统的人工检测技术与在线监测技术的互补和结合,形成了及时的、连续的、有效的交通基础设施安全监测系统。

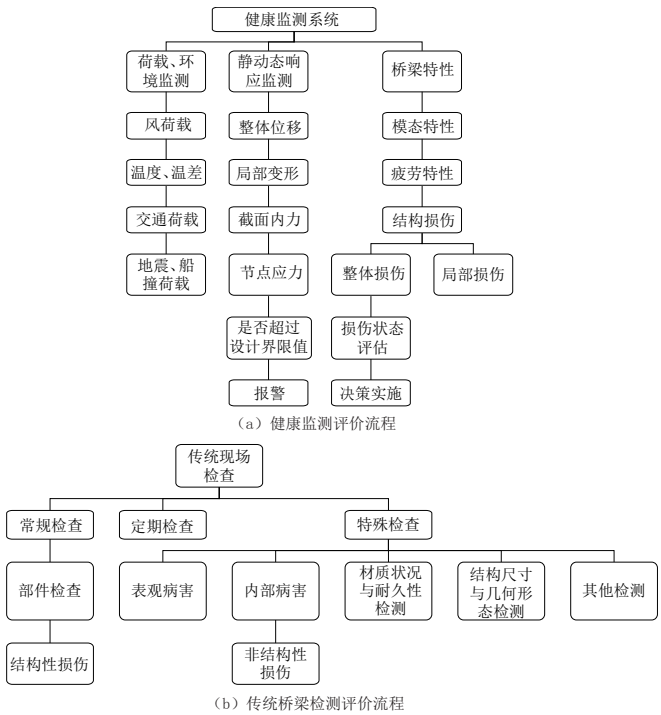


图 5 结构健康状况评价流程框图

6 常见的单传感器信号的数据异常处理方法

通过对大量监测数据的分析,目前发现主要存在的数据异常可分为跳点、数据跃迁、数据漂移、数据缺失及难以快速识别的数据异常等。对于难以快速判断的数据异常,可以采用多传感器数据相关性分析的手段来解决。

6.1 非一致的异常跳点

对于如图 6 所示的非一致的异常跳点,主要表现在一定时域范围内出现间隔性的跳点,或在一段时域范围内数据持续出现跳点。分析可能产生的原因,并进行消点补点处理。

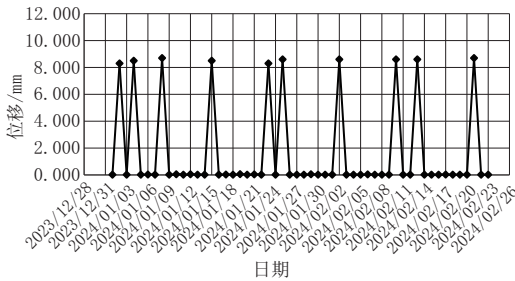


图 6 非一致的异常跳点图

对于非一致的异常跳点主要通过中值滤波和差分检测来解决。

(1)中值滤波是通过抑制脉冲噪声来保持信号边缘特征,

$$y_i = \text{median} \{x_i - [N/2], \dots, x_i, \dots, x_i + [N/2]\}$$
,其中 N 为窗口长度(奇数)。

(2)差分检测是通过捕捉信号突变来识别跳点异常,差分 $\Delta_{y_i}=|y_i-y_{i-1}|$,动态阈值(基于中位中位绝对偏差)

$\text{threshold}=k \cdot \text{MAD}(\Delta Y)=k \cdot 1.482 \cdot \text{median}(|\Delta_{y_i}-\text{median}(\Delta Y)|)$, $k=3 \sim 5$ 。

6.2 无规律的数据跃迁

无规律的数据跃迁(见图7)主要表现在一定时域数据的均值或平均值明显高于或低于正常数据。通过对可能产生的原因分析并进行数据的平移处理。

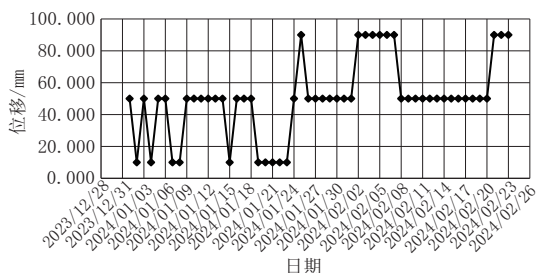


图7 无规律的数据跃迁图

对于无规律的数据跃迁主要通过动态基线修正和高斯混合模型来解决。

(1)动态基线的修正目的是为了消除环境因素引起的基线漂移,指数加权移动平均(EWMA):

$$\mu_i = \alpha \mu_{i-1} + (1-\alpha)x_i \quad (\alpha \in [0.9, 0.99])$$

$$\sigma_i^2 = \alpha \sigma_{i-1}^2 + (1-\alpha)(x_i - \mu_i)^2$$

$$\text{标准化残差: } z_i = \sigma_i^{-1} (x_i - \mu_i)$$

(2)高斯混合模型(GMM)

$$\text{概率密度函数: } p(z_i) = \sum_{k=1}^K \pi_k N(z_i | \mu_k, \Sigma_k)$$

异常判定:异常标志= $\left\{ \sum_{0 \text{ 其他}}^1 p(z_i) < \epsilon \right\}$ (通常取 ϵ 对应置信度99%的分位数)。

6.3 一定时域数据内长周期干扰数据

在一定时域数据内长周期干扰的数据(见图8)主要表现在与正常的数据相比较,该段时域实测数据的总体形态出现明显的、周期性的变化。通过对可能的原因分析进行消趋势处理。除此之外还有数据缺失、噪声干扰和频域型号异常等数据异常情况。对于上述各种桥梁结构出现异常的情况,均需要进行现场检查 and 发出预警。

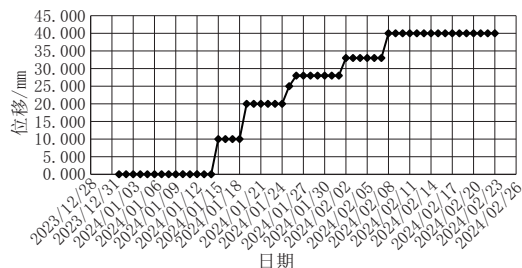


图8 一定时域数据内长周期干扰图

对于在一定时域数据内长周期干扰的数据主要通过频域分析、频点抑制和逆变换重构来解决。

(1)频域分析:对信号 $x(t)$ 进行FFT变换得到频谱 $X(f)$ 识别干扰频段 $[f_{\text{start}}, f_{\text{stop}}]$,

$$x(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{j2\pi fn}{N}} \quad (f = 0, 1, \dots, N-1)$$

(2)频点抑制:在干扰频段内设置阻带衰减(置零或者衰减到某个定值)。

(3)逆变换重构:通过IFFT恢复时域信号 $x(t)$ 。 $X(f) = X(f) \cdot H(f)$, $x(t) = \text{IFFT}[X(f)]$ 。

通过合理的参数设置,能够实现保留关键特征值的同时将误报率控制在4%以内。

7 结 语

(1)桥梁结构预警阈值并非简单固定值,应实际项目考虑多种影响(如温度),由固定预警阈值向时变预警阈值转变,使预警阈值更加真实有效的发挥作用,并结合实际管养需要针对各级报警制定明确的养护要求。

(2)进一步完善桥梁预警阈值的设立,建立健全的桥梁结构健康监测评价体系和规范标准。

(3)在传感器选型方面要对其的稳定性、灵敏度、量程和精度等方面根据不同的桥梁结构需重点考量。

(4)通过对桥梁运营状态的监测和评价,更准确地判断结构使用性能,挖掘结构潜力,提高运维效率。

参考文献:

- [1] JTG 5120—2020,公路桥涵养护规范[S].
- [2] JTG/T H21—2011,公路桥梁技术状况评定标准[S].
- [3] 侯天宇.在役公路桥梁性能演化与可靠性评估[D].大连:大连理工大学,2017.
- [4] 钱寅泉,周正茂,葛玮明,等.基于相对位移法的铰缝破损程度检测[J].公路交通科技,2012,29(7):76-81.
- [5] 杨超斌,杨超斌.基于相对位移法的板梁铰缝加固前后性能评估试验研究[C]//第四届全国工程结构安全检测鉴定与加固修复研讨会论文集.上海:上海市建筑科学研究院,2015:407-410.
- [6] JTT 1037—2022,公路桥梁结构监测技术规范[S].
- [7] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [8] 刘森林.基于监测数据的长大跨桥梁温度应力分析与安全评价[D].南京:东南大学,2017.
- [9] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [10] 薛国华,李明慧,韩宇轩,等.桥梁结构健康监测基于相关性分析的多源数据预测算法研究[J].铁道建筑,2022,62(11):73-79.
- [11] 陈伟.桥梁结构监测设计的发展方向的研究[J].交通世界(建养·机械),2012(8):275-276.