

基于多类数据处理方法联合分析的运营桥梁安全性预警分级

Classification of Operational Bridge Safety Warning based on Joint Analysis of Multiple Data Processing Methods

马耀华

(中化学建设投资集团有限公司, 北京 102300)

摘要: 为合理实现运营桥梁的安全性预警分级, 结合去噪处理的实测数据, 以累计变形序列、速率序列和加速度序列分别构建相应的预警判据, 实现运营桥梁安全性预警分级的多源信息融合, 充分保证分级结果的准确性。结果表明: PSO-DVMD模型可有效剔除桥梁变形数据中的随机噪声, 适用于桥梁变形数据的去噪处理; 不同监测点或监测项目在不同判据条件下的预警等级存在一定差异, 按不利原则综合确定桥梁的安全性预警等级。运营桥梁安全预警分级为运营桥梁安全性评价提供了一种量化分级标准, 值得进一步推广应用研究。

关键词: 桥梁; 去噪; 安全性预警; 相关向量机; 趋势判断

中图分类号: U446 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249(2024)05-0162-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.029

MA Yaohua

(China National Chemical Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing 102300, China)

Abstract: In order to reasonably realize the safety early warning classification of operational bridges, combined with the measured data of denoising processing, the corresponding early warning criteria were constructed based on the accumulated deformation sequence, rate sequence and acceleration sequence, to realize the multi-source information fusion of the safety early warning classification of operational bridges, and fully ensure the accuracy of the classification results. The results show that PSO-DVMD model can effectively remove random noise from bridge deformation data and is suitable for denoising bridge deformation data. There are some differences in the early warning levels of different monitoring points or monitoring items under different criteria, and the safety early warning levels of bridges are determined comprehensively according to the unfavorable principle. The early-warning classification of operational bridges provides a quantitative classification standard for the safety evaluation of operational bridges, which is worthy of further popularization and application.

Keywords: bridges; denoising; security early warning; correlation vector machine; trend judgment

0 引言

目前, 桥梁工程数量日益增加, 其建成后的运

营安全显得尤为重要, 因此, 开展运营桥梁的安全性预警分级研究具有重要意义^[1-2]。目前, 常嘉慧等^[3]开展了高海拔地区运营桥梁的安全评价; 刘朝阳等^[4]研究了桥梁施工过程中的安全性; 于承新等^[5]通过数字测量手段构建了运营桥梁的预警系统; 董俊等^[6]通过滑窗子空间算法评价了桥梁的运营状态。上述研究虽取得了相应成果, 但限于桥址区地质条件及桥型差异, 仍有必要进一步结合工程实际开展针对性的安全性预警分级研究。一般来说, 变

作者简介: 马耀华 (1973—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 土木工程。

收稿日期: 2023-05-04

形可直接反应桥梁运营状态，以其为基础构建预警判据是可行的。据郝付军^[7]研究成果，桥梁变形监测数据中含有一定的随机噪声，会对后续判据分析结果造成一定影响，因此，在判据构建过程中，需优先考虑监测数据的去噪处理。在以往类似岩土变形预警研究中，多是以累计变形序列和变形速率序列开展预警判据构建^[8]，忽略了变形加速度判据对预警分级的深层影响，所以，有必要将加速度判据引入至运营桥梁的安全性预警分级过程中。基于此，以运营桥梁现场变形监测成果为基础，先进行数据去噪处理，以累计变形序列、速率序列和加速度序列分别构建相应的预警判据，实现运营桥梁安全性预警分级的多源信息融合，为合理评价运营桥梁的现有安全状态及安全运营提供一定的理论依据。

1 基本原理

1.1 去噪方法的构建

在运营桥梁变形监测过程中，许多不确定因素（如风荷载、车载及人员因素等）会一定程度上影响监测数据的准确性，即桥梁变形监测数据中会含有一定的噪声信息，其对变形速率序列和加速度序列的敏感性更强，因此，为保证速率序列和加速度序列分析结果的准确性，有必要开展桥梁变形监测数据的去噪处理。

变分模态分解（Variational Mode Decomposition, VMD）可将分解过程调整至变分框架范围内，实现桥梁变形数据由低频至高频的合理分离，保证分离结果的准正交性和自适应性，相较以往经验模态分解方法，能有效避免分解冗余分量，减少不同模态的噪声，因此，提出利用其构建桥梁变形数据的去噪方法。去噪过程如图 1 所示。

在 VMD 模型应用过程中，其参数存在一定的随机性，如分解层数和惩罚因子等，对分解效果的影响较大，前者的影响主要表现为：若分解层数过大，易出现混频问题；反之，不利于确定各模态的中心频率。后者的影响主要表现为：若其值不具客观性，将不利于保存模态分量。为克服该问题，先采用双重变分模态分解（Dual Variational Mode Decomposition, DVMD）开展变形数据的二次分解处理，以搜寻最佳的分解层数；再通过粒子群算法（Particle Swarm

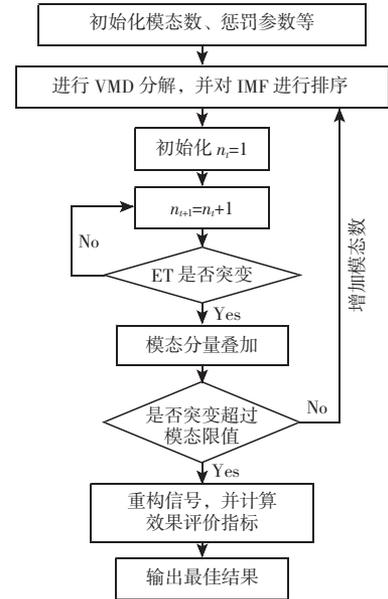


图 1 VMD 模型去噪分解过程

Fig. 1 Denoising decomposition process of VMD model

Optimization, PSO) 开展惩罚因子寻优，其寻优步骤为：

①对粒子群设置初始参数，如种群规模设置为 600，最大迭代次数为 700 次，其余参数随机确定；同时，将惩罚因子赋值于粒子属性，取值范围设定为 150 ~ 2000；

②将信噪比作为粒子的适应度函数，并初始化各粒子的适应度值；

③更新粒子的位置或速度，重新计算新一代粒子的适应度值，将其结果与初始化适应度值对比，若现状更优，则替换原有适应度值，反之保留；

④通过不断更新迭代，直至达到最大迭代次数，并对应输出全局最优解，进而完成惩罚因子寻优。

综上所述，将运营桥梁变形监测数据的去噪方法确定为 PSO - DVMD 模型，即利用其将桥梁变形数据分离为真实变形量和随机噪声。

为合理评价去噪效果，将信噪比和均方根误差作为评价指标，两者计算公式为：

$$SNR = 10 \lg \frac{P_s}{P_n} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f'_i)^2} \quad (2)$$

式中：SNR 为信噪比； P_s 为桥梁变形序列的原始功率； P_n 为桥梁变形序列处理后的功率；RMSE 为均方

研究与应用

根误差; n 为桥梁变形序列的节点数; f_i 为桥梁变形序列的原始信号; f_i' 为桥梁变形序列处理后的信号。

按照两评价指标的构建原理, 信噪比值越大, 说明去噪效果越好; 均方根误差值越小, 说明去噪效果越好。

1.2 累计变形序列分级标准的构建

一般来说, 累计变形越大其安全性越低, 进而利用变形预测开展累计变形序列的分级标准构建。考虑到相关向量机 (Relevance Vector Machine, RVM) 属监督学习模型, Mercer 定理对其约束无效, 且模型构建过程中, 不需设置核函数、惩罚因子等, 不仅具有较强泛化能力, 还具操作简便等优点, 因此, 提出以 RVM 模型为基础, 构建累计变形序列的预测模型。结合 RVM 模型的基本原理, 将其训练过程表示为:

$$t_i = \sum_{i=1}^N \mathbf{w}_i K(x, x_i) + \mathbf{w}_0 + \mathbf{z}_i \quad (3)$$

式中: t_i 为预测值; N 为训练样本总数; \mathbf{w}_i 为权重向量; $K(x, x_i)$ 为核函数; \mathbf{w}_0 为偏差向量; \mathbf{z}_i 为噪声向量。

RVM 模型虽具有较强的非线性预测效果, 但其核函数、惩罚因子均是随机产生, 这会一定程度上影响预测精度。生物地理学优化算法 (Biogeography Based Optimization, BBO) 是模拟生物筛选地理分布的仿生算法, 其能有效解决高维度、多目标的全局寻优问题, 进而利用其优化 RVM 模型的核函数及惩罚因子参数。参数寻优过程如图 2 所示。

通过 BBO 算法的优化处理, 有效保证了 RVM 模型参数的最优性, 但碍于桥梁累计变形序列的非线性特征, BBO-RVM 模型的预测结果也会存在一定的预测误差。为实现桥梁累计变形序列的高精度预测, 再进一步提出通过 Arima 模型实现其预测误差修正, 且修正公式可表示为:

$$z_i = \sum_{m=1}^p \varphi_m z_{i-m} - \sum_{j=1}^q \theta_j a_{i-j} + a_i \quad (4)$$

式中: z_i 为误差修正预测值; p 、 q 分别为自回归阶数和滑动阶数; φ_m 为自回归系数; θ_j 为滑动系数; a_i 为白噪声。

根据以上分析, 将累计变形序列的预测模型最终设定为 BBO-RVM-Arima 模型, 且一般来说, 若

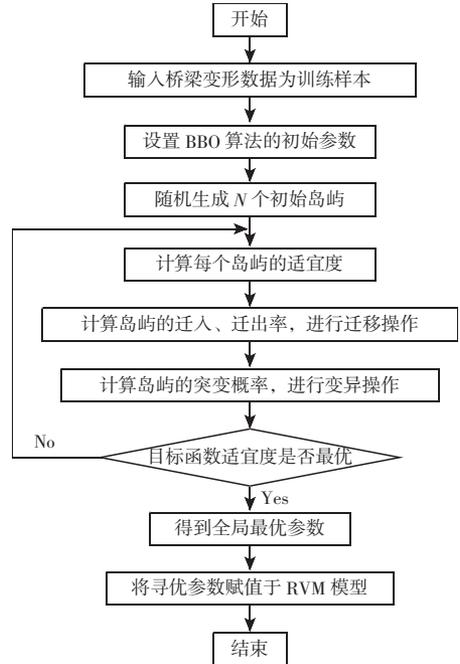


图 2 BBO-RVM 模型的优化流程

Fig. 2 Optimization process of BBO-RVM model

桥梁后续预测速率大于现有速率, 那么其安全状态越差; 反之, 安全状态则应越好。

1.3 速率及加速度序列分级标准的构建

由于桥梁变形速率序列及加速度序列值相对较小, 且波动特征显著, 变形预测难以衡量其结合发展趋势; 同时, 结合桥梁变形数据的去噪处理, 因此, 在后续速率及加速度序列的预警分级过程中, 提出以去噪后的真实变形数据开展相应分析。多重分形去趋势波动分析法 (Multifractal Detrended Fluctuation Analysis, MF-DFA) 是一种新型标度指数算法, 能有效分析变形序列的相关性, 适用于桥梁变形序列的趋势判断^[9-10]。因此, 提出利用 MF-DFA 分析构建速率及加速度序列的分级标准。

结合 MF-DFA 分析的基本原理, 先以相应桥梁变形序列为基础, 进行累计离差计算; 同时, 再进行累计离差序列的区间划分处理, 具体原则为: 将区间划分为 $N_s = N/s$ 个 (N 为累计离差序列节点数; s 为区间长度); 同时, 若 N_s 非整数时, 应取整数, 且当 N_s 非整数时, 会丢失部分信息, 为充分利用桥梁变形数据, 再逆序开展相同的区间划分, 此时可得到子区间个数为 $2N_s$ 个。

其次, 对各子区间进行 v 阶多项式拟合, 并计算相应方差, 具体求解原则为:

$$F^2(s, v) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Z[(v-1)s+i] - y_v(i)\}^2$$

$$v \in (1, N_s) \quad (5)$$

$$F^2(s, v) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Z[N-(v-N_s)s+i] - y_v(i)\}^2$$

$$v \in (N_s+1, 2N_s) \quad (6)$$

式中: $Z(i)$ 为累计离差值; $y_v(i)$ 为多项式拟合值。

在子区间方差计算基础上, 再进一步求解 q 阶波动函数 $F(q, s)$:

$$F(q, s) = \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} [F^2(s, v)]^{q/2} \right\}^{1/q} \quad (7)$$

$F(q, s)$ 值与 q 值和 s 值相关, 在 q 值确定条件下, 可通过改变 s 值求得若干对应的 $F(q, s)$ 值, 且 s 值与 $F(q, s)$ 值间存在幂函数关系, 即:

$$\ln F(q, s) = k + h(q) \cdot \ln s \quad (8)$$

式中: $h(q)$ 为广义 Hurst 指数, 与 q 值对应; k 为拟合常数。

一般来说, 若 q 值变化, $h(q)$ 值不随之变化, 则说明桥梁速率或加速度序列不具多重分形特征; 若随 q 值减小, $h(q)$ 值随之减小, 则说明桥梁速率或加速度序列具多重分形特征。

表 2 桥梁安全性预警等级划分标准及处理措施

Table 2 Classification standards and treatment measures for early warning levels of bridge safety

预警等级	安全状态	累计变形序列判据	速率变形序列判据	加速度序列判据	处理措施
一级-绿色	安全	$V_2 < 0.8V_1$	减小趋势	$a < 0$	无需采取措施, 正常运营即可
二级-黄色	基本安全	$0.8V_1 \leq V_2 < V_1$	增加趋势且趋势等级为一级	$a > 0$ 且趋势等级为一级	应继续监测, 并准备好维修加固预案
三级-橙色	较危险	$V_1 \leq V_2 < 1.3V_1$	增加趋势且趋势等级为二级	$a > 0$ 且趋势等级为二级	已具有一定的潜在威胁, 应尽快开展维修加固处理
四级-红色	危险	$V_2 \geq 1.3V_1$	增加趋势且趋势等级为三级	$a > 0$ 且趋势等级为三级	潜在威胁已相对较大, 应暂停桥梁运营, 并采取切实加固维修处理

注: V_1 为预测速率, 即外推预测 4 周期的速率均值; V_2 为现有速率, 即监测成果最后 4 周期的速率均值; a 为监测成果最后 4 周期的加速度均值

2 实例分析

2.1 工程概况

某桥梁总长 2 030 m, 属特大桥, 其桥跨布置为 336 m + 1 385 m + 309 m (主桥立面见图 3), 中间主跨采用全焊带风嘴钢箱梁, 两边跨采用预应力混凝土连续箱梁, 且其高度与钢箱梁等高。中跨主缆直径 90 cm, 材质为高强镀锌钢丝, 每根主缆由 169 股组成, 每股含有 127 根钢丝, 采用 PPWS 法进行架设。该桥共设两座主塔, 其中, 西塔高度 186 m, 东塔高度 183 m, 均采用空箱式钢筋混凝土施做, 并设置三道预应力混

$h(2)$ 值为传统 Hurst 指数, 据其可开展桥梁速率或加速度序列的变化趋势分析, 判据为: 若 $h(2) < 0.5$, 说明相应序列具减小趋势; 若 $h(2) > 0.5$, 说明相应序列具增加趋势; $h(2) = 0.5$, 说明相应序列具随机性, 无法判断变形趋势。同时, $h(2)$ 值与 0.5 差值的绝对值 d 越大, 说明其对应趋势性相对越强, 因此, 可以 d 值为基础, 开展桥梁速率或加速度序列的趋势等级划分。考虑到桥梁速率序列、加速度序列对累计变形的敏感性存在差异, 因此, 趋势等级划分标准也随之变化, 具体见表 1。

表 1 速率、加速度序列的趋势等级划分标准

Table 1 Grading criteria for trend of velocity and acceleration sequences

判据类型	趋势等级划分		
	一级	二级	三级
速率变形序列判据	$d < 0.15$	$0.15 \leq d < 0.30$	$d \geq 0.30$
加速度序列判据	$d < 0.10$	$0.10 \leq d < 0.20$	$d \geq 0.20$

1.4 桥梁安全性预警等级划分标准的构建

结合文献 [3] 及工程经验, 将桥梁预警等级划分为四级, 且最终预警等级按三类判据结果的不利情况确定。经整理, 得桥梁安全性预警等级划分标准及对应处理措施见表 2。

凝土横梁。

为保证主塔稳定, 西塔基础设置于岸边, 东塔设置于水深约 2.5 m 的浅滩中, 两者均采用嵌岩灌注群桩基础。桥面共布设六车道, 桥面宽度为 33.8 m, 设计时速 100 km。

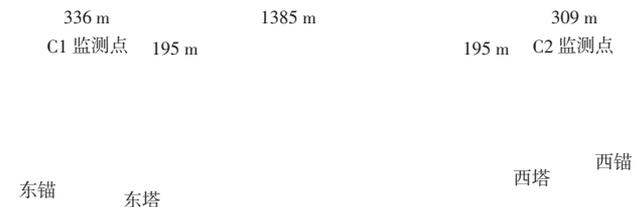


图 3 桥梁主桥立面图

Fig. 3 Elevation of main bridge

研究与应用

2.2 监测成果分析

在桥梁建成后，为充分掌握其运营状况，对其两侧主塔进行了变形监测，在两塔顶分别设置了1个监测点（见图3），监测内容包括沉降变形和水平位移，共计得到34期监测数据成果，监测频率为1月监测1次。整理得到两监测点的累计变形曲线，如图4所示。

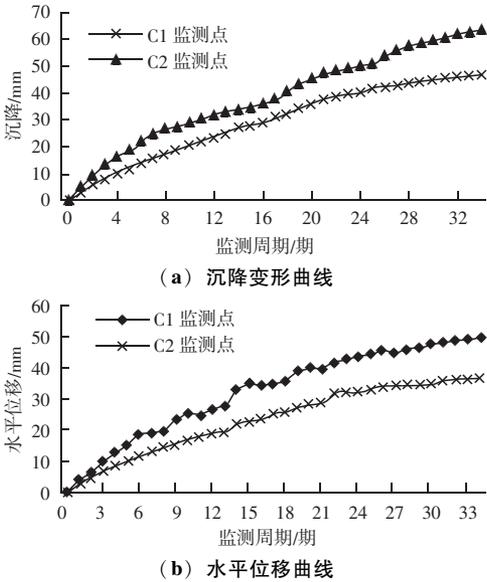


图4 桥梁主塔累计变形曲线

Fig. 4 Cumulative deformation curve of bridge main tower

两监测点的沉降变形和水平位移均具持续增加

趋势，其中，C1 监测点的沉降变形值为 47.50 mm，水平位移值为 36.85 mm；C2 监测点的沉降变形值为 63.36 mm，水平位移值为 49.78 mm。两者对比，在相应监测项目条件下，C2 监测点的变形值相对更大，且两监测点的沉降变形值均一定程度上大于水平位移值，即两主塔变形以沉降变形为主。

为进一步掌握桥梁主塔变形特征，再对其变形速率特征参数和加速度特征参数进行统计，见表3。

据上，两监测点的沉降变形速率均为正值，水平位移速率具有少量负值，且两监测点的方差值对比，得出C1监测点的沉降变形速率和水平位移速率具有相对更小的波动范围。

在两监测点的加速度变形序列中，各类监测项目的加速度均值均为负值，且C2监测点加速度均值的绝对值相对大于C1监测点加速度均值的绝对值；同时，C2监测点水平位移的加速度变化范围相对更大，波动性更强。

2.3 安全性预警分级研究

2.3.1 去噪结果分析

采用 PSO - DVMD 模型开展桥梁变形数据的去噪处理，且鉴于该模型具有逐步寻优组合过程，提出对 VMD 模型、DVMD 模型及 PSO - DVMD 模型均进行去噪处理，以验证各步寻优过程的有效性。结果见表4。

表3 主塔变形和加速度特征参数

Table 3 Deformation and acceleration characteristic parameters of the main tower

特征参数	测点	沉降			水平		
		速度/(mm/期)	均值/(mm/期)	方差/(mm ² /期)	速度/(mm/期)	均值/(mm/期)	方差/(mm ² /期)
变形	C1	0.38 ~ 3.39	1.40	0.607	-0.15 ~ 2.76	1.08	0.602
	C2	0.62 ~ 4.85	1.86	1.256	-0.69 ~ 5.19	1.46	2.006
加速度	C1	-1.68 ~ 1.43	-0.07	0.722	-2.15 ~ 2.10	-0.06	0.848
	C2	-1.31 ~ 2.17	-0.11	0.455	-3.23 ~ 4.26	-0.13	3.072

表4 各模型去噪的结果

Table 4 The denoising results of each model

模型分类	SNR 值/dB	RMSE 值/(10 ⁻⁴ mm)
VMD 模型	39.77	7.95
DVMD 模型	43.37	6.02
PSO - DVMD 模型	47.21	4.48

三类模型的去噪效果存在一定差异，依次由 VMD 模型 → DVMD 模型 → PSO - DVMD 模型，SNR 值具持续增加趋势，RMSE 值具持续减小趋势，只是相应增加或减小幅度存在一定差异，说明随寻优过程的逐步递进，其去噪效果逐步变优，充分验证了各步寻优组合过程的有效性，也说明 PSO - DVMD 模

型在桥梁变形数据去噪处理中具有较强的适用性。

至此，利用 PSO - DVMD 模型将桥梁变形数据分解为真实变形量和随机噪声，为后续桥梁安全性预警分级奠定了基础。

2.3.2 预警分级结果分析

利用累计变形序列、速率序列和加速度序列开展桥梁安全性的分级研究，具体结果如下：

(1) 累计变形序列的预警分级结果 累计变形序列的预测模型为 BBO - RVM - Arima 模型，其在两监测点中的预测结果见表5，以两监测点在不同监测项目条件下的预测结果为基础，统计得到其特征参

数为：C1 监测点沉降变形相对误差均值为 2.01%，方差值为 3.97×10^{-7} ；C2 监测点沉降变形相对误差均值为 2.05%，方差值为 2.60×10^{-7} ；C1 监测点水平位移相对误差均值为 2.09%，方差值为 2.12×10^{-7} ；C2 监测点水平位移相对误差均值为 2.10%，方差值为 1.13×10^{-7} 。两类监测项目的预测效果对比，以沉降

变形的预测精度相对略优，但总体来说，相对误差均值及方差值差异较小，且平均值均只略大于 2%，方差值亦不大，说明 BBO-RVM-Arima 模型在桥梁变形预测中的预测效果不仅具有较强的预测精度，还具有较强的稳定性。

表 5 桥梁主塔累计变形预测结果

Table 5 Cumulative deformation prediction results of bridge main tower

监测周期/期	C1 监测点沉降变形			C2 监测点沉降变形			C1 监测点水平位移			C2 监测点水平位移		
	实测值/mm	预测值 Y/mm	预测误差 E/%									
30	45.48	44.57	2.01	59.57	58.39	1.98	34.80	34.07	2.10	47.67	46.64	2.15
31	45.87	44.98	1.94	60.30	59.03	2.11	36.02	35.28	2.06	48.07	47.08	2.06
32	46.56	45.59	2.10	61.61	60.34	2.06	36.41	35.62	2.16	48.80	47.77	2.12
33	47.01	46.06	2.03	62.37	61.11	2.02	36.53	35.79	2.04	49.27	48.24	2.09
34	47.50	46.56	1.96	63.36	62.04	2.08	36.85	36.08	2.08	49.78	48.73	2.10
35		46.94			62.56			36.61			49.05	
36		47.48			63.05			37.02			49.38	
37		48.02			63.29			37.40			49.91	
38		48.13			63.88			37.89			50.63	

预测结果显示，桥梁累计变形仍会增加，但增加速率偏小，经统计得到预测速率 V_1 、现有速率 V_2 及其对应分级结果，见表 6。在累计变形序列判据条件下，C1 监测点的两类变形均属一级 - 绿色预警，具安全状态；C2 监测点的两类变形均属二级 - 黄色预警，具基本安全状态；两者安全性均较好。

表 6 累计变形序列的分级结果 / (mm/期)

Table 6 Grading results of cumulative deformation sequence

速率	C1 监测点		C2 监测点	
	沉降	水平	沉降	水平
V_1 值	0.50	0.91	0.50	0.52
V_2 值	0.39	0.46	0.45	0.47

(2) 速率变形序列的预警分级结果 以去噪处理结果中的真实变形量为基础，利用 MF-DFA 开展速率变形序列的多重分形特征及变化趋势分析。经统计，得到速率变形序列的 MF-DFA 分析结果见表 7。随阶次 q 的逐步增大，各监测点或监测项目对应的 $h(q)$ 值具逐步减小趋势，说明桥梁速率序列具多重分形特征；同时，两监测点在沉降变形上的 $h(2)$ 值均小于 0.5，但水平位移的 $h(2)$ 值均大于 0.5，说明桥梁主塔的沉降变形速率具减小趋势，而水平位移速率具增加趋势，且结合表 1，趋势等级为一级。

表 7 速率变形序列条件下的 $h(q)$ 值统计Table 7 Statistics of $h(q)$ under the condition of rate deformation sequence

阶次 q	C1 监测点		C2 监测点	
	沉降	水平	沉降	水平
-8	0.605	0.686	0.569	0.654
-6	0.552	0.657	0.545	0.621
-4	0.519	0.617	0.513	0.588
-2	0.504	0.601	0.500	0.572
0	0.492	0.578	0.486	0.549
2	0.465	0.541	0.458	0.512
4	0.440	0.515	0.559	0.486
6	0.409	0.489	0.404	0.448
8	0.386	0.460	0.379	0.422

结合表 7 和表 2 安全性预警等级划分标准，得到两监测点沉降变形的预警等级为一级，水平位移的预警等级为二级。

(3) 加速度变形序列的预警分级结果 利用 MF-DFA 开展加速度变形序列的多重分形特征及变化趋势分析见表 8。 $h(q)$ 值随阶次 q 的增大而减小，亦说明桥梁加速度序列也具多重分形特征；同时，C1 监测点沉降变形的 $h(2)$ 值小于 0.5，说明其具减小趋势，其余的 $h(2)$ 值均大于 0.5，具增加趋势，且结合表 1，趋势等级均为一级。另外，计算得到各监测点及项目在最后 4 周期的加速度均值分别为：C1 监测点沉降的 a 值为 -0.15 mm/期^2 ；C1 监

研究与应用

测点水平的 a 值为 -0.04 mm/期^2 ; C2 监测点沉降的 a 值为 0.02 mm/期^2 ; C2 监测点水平的 a 值为 -0.14 mm/期^2 。

表 8 加速度变形序列条件下的 $h(q)$ 值统计
Table 8 Statistics of $h(q)$ under acceleration deformation sequence

阶次 q	C1 监测点		C2 监测点	
	沉降	水平	沉降	水平
-8	0.676	0.913	0.743	0.868
-6	0.650	0.841	0.700	0.791
-4	0.612	0.784	0.644	0.732
-2	0.559	0.721	0.601	0.685
0	0.529	0.621	0.550	0.584
2	0.456	0.536	0.513	0.507
4	0.429	0.503	0.474	0.476
6	0.400	0.473	0.437	0.430
8	0.374	0.407	0.403	0.385

在加速度变形序列的预警分级结果中, 仅 C2 监测点沉降变形的安全性预警等级为二级, 其余的预警等级均为一级, 与速率变形序列的预警等级存在一定差异。

(4) 桥梁安全性预警分级的综合评价 基于上述累计变形序列、速率序列和加速度序列的预警分级结果, 进一步开展桥梁安全性预警分级的综合评价, 见表 9。不同监测点或监测项目在不同判据条件下的预警等级存在一定差异, 其中, C1 监测点沉降变形的最终预警等级为一级, 其余的最终预警等级均为二级。

表 9 桥梁安全性的综合预警分级结果

Table 9 Comprehensive early warning classification results of bridge safety

评估指标	C1 监测点		C2 监测点	
	沉降	水平	沉降	水平
累计变形序列判据	一级	一级	二级	二级
速率变形序列判据	一级	二级	一级	二级
加速度序列判据	一级	一级	二级	一级
最终预警等级	一级	二级	二级	二级

按不利原则, 综合确定该桥梁的安全性预警等级为二级 - 黄色, 具基本安全状态, 后续应继续监测, 并准备好维修加固预案。

3 结论与讨论

通过对运营桥梁的安全性预警分级研究, 主要得出如下结论和讨论:

(1) 在桥梁变形数据去噪过程中, 从 VMD 模型 \rightarrow DVMD 模型 \rightarrow PSO - DVMD 模型, 去噪效果逐步变优, 充分验证了去噪模型构建思路的合理性, 即 PSO - DVMD 模型在桥梁变形数据去噪处理过程中具有良好的适用性。

(2) 桥梁既有变形大致具持续增加特征, 变形速率及变形加速度的波动性较强, 且通过不同序列的安全性预警分级研究, 得出不同监测点或监测项目在不同判据条件下的预警等级存在一定差异, 按不利原则, 综合确定本文实例桥梁的安全性预警等级为二级 - 黄色, 属基本安全状态, 为其后续安全运营评价提供了一定的理论指导。

(3) 基于桥梁主塔变形资料构建了安全性预警等级划分模型, 建议后续可在此基础上, 进一步结合其余监测项目, 如应力监测等, 进一步拓展预警等级的参照指标, 以充分保证预警结果的准确性。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 苏延文, 颜永逸, 曾永平, 等. 复杂山区铁路大跨桥梁施工大风监测预警技术 [J]. 铁道标准设计, 2020, 64 (增刊 1): 204-207.
- [3] 常嘉慧, 郝伟. 高海拔地区在役混凝土桥梁安全预警研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16 (3): 111-117.
- [4] 刘朝阳, 吕永波, 刘步实, 等. 高速公路桥梁施工过程安全评估及预警研究 [J]. 北京交通大学学报, 2019, 43 (2): 131-136.
- [5] 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.
- [6] 董俊, 陈列, 杨国静, 等. 基于滑窗子空间算法的桥梁运营状态预警分析研究 [J]. 铁道标准设计, 2018, 62 (3): 68-74.
- [7] 郝付军. 运营桥梁的变形程度评价和预测分析 [J]. 噪声与振动控制, 2022, 42 (4): 121-126, 137.
- [8] 耿海深, 吕文斌, 栗桑, 等. 滑坡失稳机理分析及预警预测研究 [J]. 西北师范大学学报 (自然科学版), 2021, 57 (6): 103-109.
- [9] 常瑶. 基于尖点突变理论和 MF - DFA 法的隧道大变形监测 [J]. 人民长江, 2019, 50 (1): 118-123.
- [10] 朱靛. 基于 MF - DFA 法和 PSO - ELM 模型的基坑变形规律研究 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36 (3): 53-58.