

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.03.015

桥面变形监测的多尺度分析与建立模型

汤同旭

(上海市测绘院,上海 200333)

摘要:对于利用GNSS测量技术获取的桥面监测数据,研究如何对其进行准确而有效的处理与分析,获取桥梁的运营状态,对桥梁的养护与安全运营具有重要意义。从对桥面GNSS监测数据的处理与分析方法研究出发,利用EMD方法结合频谱分析,得到EMD后的IMF分量的频域范围,有效地分离出含有振动信息的变形量、趋势分量和高频噪声分量。结合SSA、EMD两种信号处理方法的优点,提出了一种新的EMD-SSA耦合模型,将经SSA去噪后的高频IMF分量与低频IMF分量和残余项进行重构。对新的信号处理模型通过仿真信号和桥面监测信号进行验证,试验结果表明,新模型的处理效果较单独的EMD、SSA方法的处理效果有了显著提升。与EMD、SSA方法相比,利用新方法处理信号后信噪比与相关系数增加,偏差减小,验证了新方法的可行性与有效性。

关键词:全球导航卫星系统;变形监测;奇异谱分析;周期特征;趋势特征;经验模态分解

中图分类号: P259 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2022)03-0114-11

Multi-scale Analysis and Modeling of Bridge Deck Deformation Monitoring

TANG Tong-xu

(Shanghai Surveying and Mapping Institute, Shanghai 200333, China)

Abstract: For the maintenance and safe operation of the bridge, it is of great significance to study how to conduct accurate and effective processing and analysis the bridge deck monitoring data obtained by using GNSS(Global Navigation Satellite System) measurement technology and obtain the operation status of the bridge. This paper starts from the method of processing and analysis of the bridge deck GNSS monitoring data, the frequency domain of IMF(Intrinsic Mode Function) components after EMD(Empirical Mode Decomposition) is obtained, and the deformation, trend and high frequency noise components of the vibration information are effectively separated. Based on the advantages of SSA(Singular Spectrum Analysis) and EMD signal processing methods, a new EMD-SSA coupling model is proposed by reconstructing the high frequency IMF component, the low-frequency IMF component and the residual items after SSA denoising. The experimental results show that the new signal processing model is more effective than EMD and SSA method in analyzing the simulation signals and bridge deck monitoring signals. Compared with EMD and SSA, the proposed method shows that the signal-to-noise ratio and correlation coefficient increase and the deviation reduces after signal processing, which verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method.

收稿日期: 2020-07-16; **修订日期:** 2020-08-04

作者简介: 汤同旭(1992-),男,硕士研究生,工程师,主要从事GNSS测量数据处理理论与方法方面的研究。

Key words: GNSS; Deformation monitoring; SSA; Spectral characteristics; Tendency characteristics; EMD

0 引言

在桥梁的竣工、运营阶段,通过对桥梁的实际结构状态和环境变化的实时监测和结构性能的实时诊断,及时发现桥梁的变形趋势和尺度,评估桥梁安全性已经成为工程建设的必然要求^[1-3]。国内外针对全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)变形监测数据的处理方法主要从时域分析、频域分析和时频域分析三方面展开。一般属于时域分析方法的有回归分析法、时间序列法、卡尔曼滤波法等,这些方法在过滤噪声提取趋势性信息方面具有优势,也在实际应用中发挥了重要作用。但这些方法对处理桥面数据均有线性、平稳性及标准性等要求,实际的桥面观测数据特别是影响因素复杂的桥面动态监测数据很难达到这些要求,将这类方法应用到桥面变形监测数据的处理,其效果将会受到很大的影响^[4-6]。

本文将引入经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法结合奇异谱分析(Singular Spectrum Analysis, SSA)方法处理钢箱梁桥面变形监测数据,以苏通大桥为例,利用 GNSS 接收机采集桥面动态变形监测数据,并对其监测数据进行处理与分析。其中数据采集使用徠卡 Leica GS15 接收机,可同时接收全球定位系统(Global Positioning System, GPS)/GLONASS/北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)信号,采样频率设置为 1Hz,卫星截止高度角为 15°,其精度可达厘米级,满足桥梁变形监测的数据精度指标。利用 EMD 方法对不同周期变形量提取的优势,可以将钢箱梁桥面的短周期变形量分离出来,对实验获取的钢箱梁桥面动态变形监测数据进行多尺度分解。钢箱梁桥面的短周期变形量一般与 GNSS 测量精度一致,且这种变形量是在外界环境的作用下产生的振动,很难将这部分变形量提取出来,通常视为噪声进行剔除。一般桥梁的振动频率可以表现出其自身的振动特性,如果桥梁的结构状态正常,那么其在各种环境因素的影响下的振动频率也比较固定。本文中采用 EMD 方法将桥面监测得到的 GNSS 数据分解为不同频率的本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)分量,分解后可以更加明显地得到 IMF 分量的振动特性,对于监测数据中

频率信息的提取更加精确和有效。EMD 分离出的 IMF 分量含有桥面原振动信号的频率信息,通过频谱分析方法可以将原信号各 IMF 分量的频率特征表现出来,进而识别出桥面监测数据中的振动信息。利用低频 IMF 和余项表示桥面监测数据中的长周期变形量,并且将它们作为去除噪声后的结果输出,结合 SSA 对去除的高频噪声进行降噪,从而完成对特长钢箱梁桥面的多尺度分解与重构。

1 EMD

EMD 方法实质上就是对原始信号进行平稳化处理,依据信号的时间特征,对其进行自适应地多尺度分解。EMD 方法理论上可以对任何信号进行自适应地分解,对于非平稳性、非线性信号的处理相比其他方法也有很好的效果,在实际工程应用中更具适用性^[7-8]。EMD 的一般过程就是对原始信号的趋势或者波动进行逐级分解,因此可以得到若干个 IMF 分量与余项之和。IMF 分量可以反映信号内部的特性,频率由高到低,高频 IMF 分量通常为信号的噪声,分解后余项表示信号的趋势^[9]。EMD 的基本理论与思想是,任何非线性、非稳定性的复杂信号都可以由不同的非正弦函数的分量组成。所以,对于原信号 $s(t)$, EMD 可以将其分解为若干个满足以下条件的 IMF 分量^[10]:

1)待分解信号的极小值与极大值点数之和与过零点的个数之差不超过 1;

2)极小值所构成的下包络线与极大值所构成的上包络线呈对称关系,对称轴为时间 t 轴。

每一个 IMF 是待分解信号 $s(t)$ 经过 EMD 后得到的基本单元,图 1 所示为 EMD 的分解过程。

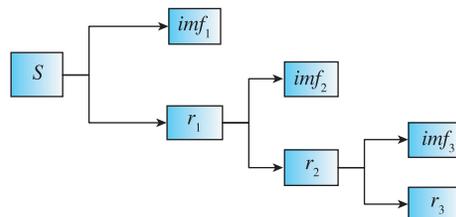


图 1 EMD 多尺度分解示意图

Fig. 1 Schematic diagram of EMD multi-scale decomposition

信号 $s(t)$ 分解后得到的所有 IMF 分量所有相

邻零点之间只是一个单纯的波动,将信号 $s(t)$ 进行分解,可由式(1)表示

$$s(t) = \sum_{i=1}^n imf_i(t) + res \quad (1)$$

式中, $imf_i(t)$ 表示第 i 个 IMF 分量; res 表示单调残差序列,一个典型的 IMF 分量如图 2 所示。

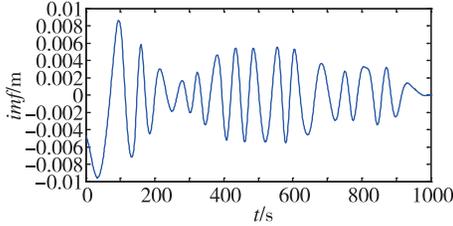


图 2 一个典型的 IMF

Fig. 2 A typical IMF

EMD 方法的基本步骤如下:

1) 找出待分解信号 $s(t)$ 的所有极大值序列和极小值序列,采用三次样条插值对极大值和极小值序列进行拟合,形成上、下包络线,上包络线记为 $s_u(t)$,下包络线记为 $s_l(t)$;

2) 计算得到上下包络线的均值 $s_a(t)$

$$s_a(t) = \frac{s_u(t) + s_l(t)}{2} \quad (2)$$

3) 将原始序列 $s(t)$ 与上下包络线均值 $s_a(t)$ 作差,提取细节 $h(t)$

$$h(t) = s(t) - s_a(t) \quad (3)$$

4) 式(3)中,如果 $h(t)$ 的均值为零,那么 $h(t)$ 就是一个 IMF,如果 $h(t)$ 的均值不为零,则需要对 $h(t)$ 重复进行上述步骤,直到 $h(t)$ 的均值为零时停止;

5) 计算信号的残余分量

$$res = s(t) - imf_i(t) \quad (4)$$

若 res 不是单调函数,即极值点的个数大于 2,那么令 $i = i + 1$,继续以上的步骤;否则分解结束, res 即是残余分量。信号的重构过程也就是信号分解的逆过程,将所有的 IMF 分量和残余分量加起来就是原始信号序列 $s(t)$,如式(1)所示。

一般在信号水平一致的情况下, $\sigma_m = \sigma$ 时可以停止分解,但更多时候信号的噪声是未知的,因此要找到一个分解标准来确定合适的分解层数,从而达到较为理想的分解结果是非常重要的。依据相关的实践和研究,可以利用式(5)作为分解停止的标准,从而获取比较理想的分解结果

$$R_K = \left| (ET_K - ET_{K-1}) / \frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^{K-1} ET_i \right| \quad (5)$$

式(5)中: $ET = E_n \cdot AvgT; E_n = \frac{1}{N} \cdot$

$$[IMF_n(j)]^2; AvgT = \frac{N \cdot 2}{Count(Optima_n)} \circ$$

其中, $Count(Optima_n)$ 表示第 n 个 IMF 分量的极值点的总数。

对于桥面 GNSS 变形信号,在利用 EMD 进行多尺度分解后,按式(6)定义标准化模量的累计均值 (Mean Standardized Accumulated Modes, MSAM)

$$\hat{h}_m = mean \left(\frac{\sum_{i=1}^m (imf_i(t) - mean(imf_i(t)))}{std(imf_i(t))} \right) \quad (6)$$

式(6)中, $mean(\cdot)$ 表示均值函数; $std(\cdot)$ 表示标准差函数。在尺度 m 下,如果标准化模量的累计均值 \hat{h}_m 明显偏离零值,就可认定从该尺度开始,残余信号和低频 IMF 分量为趋势项,并可以利用这一特性分离出 GNSS 钢箱梁桥面变形监测信号中的随机噪声和多路径误差,然后再逐一处理以达到更加理想的效果。

2 SSA

SSA 方法结合常规时间序列分析、多元集合、多元统计、信号处理、动态系统以及奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 等技术,打破了传统的方法,是一类元参数、独立于模型的时间序列分析方法。它可以从监测序列中提取出主要的变形以及振动信息,进而方便对产生变形和振动的原因进行分析以及后续的预测预报^[9-10]。它的具体操作过程是:根据嵌入维数(即窗口长度)把样本量为 n 的时间序列构造时滞矩阵,如果这个时滞矩阵能计算出明显成对的特征值,且对应的经验正交函数几乎是周期性或者正交时,就表明信号中有振荡行为^[11-13]。

假设一时间序列为 x_1, x_2, \dots, x_n , 嵌入维数(即窗口长度)为 $M (M < N/2)$, 按照给定的 M 建立时滞矩阵

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_{N-M+1} \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{N-M+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_M & x_{M+1} & \cdots & x_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{1,0} & X_{1,1} & \cdots & X_{1,N-M} \\ X_{2,0} & X_{2,1} & \cdots & X_{2,N-M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{M,0} & X_{M,1} & \cdots & X_{M,N-M} \end{bmatrix} \quad (7)$$

经过大量实验表明,当 $M < N/3$ 时,分析效果

较为理想。时滞矩阵 \mathbf{X} 的第 i 个状态量 \mathbf{X}_i 为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ x_{i+2} \\ \vdots \\ x_{i+M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{1,i} \\ X_{2,i} \\ \vdots \\ X_{M,i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $i=0,1,2,\dots,N-M$ 。则时滞矩阵共有 $N-M+1$ 个状态,对该时滞矩阵进行时间经验正交函数 (Time Empirical Orthogonal Functions, TEOFs) 展开 (即对时滞矩阵 \mathbf{X} 进行 SVD), 就可得到滞后自协方差阵 \mathbf{T}_x

$$\mathbf{T}_x = \begin{bmatrix} C(0) & C(1) & C(2) & \cdots & C(M-1) \\ C(1) & C(0) & C(1) & \cdots & \cdots \\ C(2) & C(1) & C(0) & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & C(0) & C(1) \\ C(M-1) & C(M-2) & \cdots & C(1) & C(0) \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $C(j)$ 是时间序列时迟为 j ($0 \leq j \leq M-1$) 的自协方差, 主对角线元素为时间序列的方差。用 x_1, x_2, \dots, x_N 序列估计可得自协方差阵的元素 $C(j)$, 即

$$C(j) = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} x_i x_{i+j} \quad (10)$$

式中, $j=0,1,2,\dots,M-1$ 。

自协方差阵 \mathbf{T}_x 是 Toeplitz 矩阵 (实对称矩阵且主对角线为同一常数)。根据式 (4)、式 (5) 可以求得 \mathbf{T}_x 的特征值 λ_k 和特征向量 \mathbf{E}_k 。

$$\mathbf{T}_x \mathbf{E}_k = \lambda_k \mathbf{E}_k \quad (k=1,2,\dots,M) \quad (11)$$

自协方差阵 \mathbf{T}_x 的全体特征值为

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_m \geq 0 \quad (12)$$

即为序列 $\{x_i\}$ 的奇异谱, 将对它的奇异值运算的过程称为 SSA。其中, λ_i 对应的特征向量为第 i 主分量 ($i=1,2,3,\dots,m$)。第 1 主分量为信号最大的变化趋势, 第 2 主分量为除第 1 主分量外剩余信号量的最大变化趋势...

计算状态量 \mathbf{X}_i 在 \mathbf{E}_k 上的投影 $a_{i,k}$

$$a_{i,k} = \mathbf{X}_i \cdot \mathbf{E}_k = \sum_{j=1}^M X_{ji} E_{j,k} = \sum_{j=1}^M x_{i+j} E_{j,k} \quad (13)$$

式中, $0 \leq i \leq N-M$; 特征向量 \mathbf{E}_k 称为时间 EOF (简称 T-EOF); $a_{i,k}$ 称为时间主成分 (简称 T-PC)。

SSA 的重要功能由重建成分 (Reconstruction

Component, RC) 实现。由 T-EOF 和 T-PC 重建一个长度为 N 的序列, 由第 k 个 T-EOF 和 T-PC 重建 x_i 的 RC 记为

$$x_{i,k} = \begin{cases} \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M a_{i-j,k} E_{j,k}, & M \leq i \leq N-M+1 \\ \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i a_{i-j,k} E_{j,k}, & 1 \leq i \leq M-1 \\ \frac{1}{N-i+1} \sum_{j=i-N+M}^M a_{i-j,k} E_{j,k}, & N-M+2 \leq i \leq N \end{cases} \quad (14)$$

RC 还具有叠加性质, 所有重建成分叠加之和与原序列相同, 即

$$x_i = \sum_{k=1}^M x_{i,k} \quad (15)$$

在 SSA 中, 利用 Kendall 非参数检验判断某一个 RC 是否为趋势项成分。具体过程如下 (以判断第 k 个 RC 是否为趋势项成分为例):

1) 计算满足 $x_{ik} < x_{jk}$ 的指标数 K_τ , 并且构造统计量

$$\tau = \frac{4K_\tau}{N(N-1)} - 1 \quad (16)$$

2) 若原假设: x_k 不是趋势项成分成立, τ 服从均值为 0、均方差为 S 的正态分布。 S 的计算公式见式 (17)。

$$S = \sqrt{\frac{2(2N+5)}{9N(N-1)}} \quad (17)$$

3) 取信度 $\alpha = 0.05$, 当 $\tau < -1.96S$ 或 $\tau > 1.96S$ 时, 则拒绝原假设, 即认为第 k 个 RC 为趋势项成分。 $\tau > 1.96S$ 时, 第 k 个 RC 呈上升趋势, $\tau < -1.96S$ 呈下降趋势。

3 EMD-SSA 耦合模型

如上, 结合 EMD 的自适应分解能力与 SSA 的降噪能力, 提出了 EMD-SSA 耦合模型。新模型通过对信号进行 EMD 后, 可以得到一系列的高频 IMF 分量与低频 IMF 分量, 并且对得到的 IMF 分量进行 MSAM 计算。对得到的高频 IMF 进行 SSA 降噪, 很好地发挥了 SSA 的降噪能力。下面将给出该算法的具体流程以及评价指标, 对信号处理的结果进行评价:

1) 利用 EMD 方法对原信号进行分解, 得到若干个具有不同频率的 IMF 分量, 并且对 IMF 分量进行 MSAM 计算;

2) 计算 1) 中分解得到的信号 IMF 分量的 MSAM, 并且对计算结果进行判断, 如果在第 m 层信号 IMF 分量的 MSAM 偏离零值, 那么认为从第 m 层开始所有的 IMF 分量表现为系统性误差, 并且第 $1 \sim (m-1)$ 层的 IMF 分量表现为高频噪声, 此时可利用 SSA 对高频 IMF 分量进行进一步去噪;

3) 重构经过 SSA 降噪处理的高频 IMF 分量和低频 IMF 分量, 得到经过耦合模型重构后的信号;

4) 通过给出的评价指标对分解重构后的信号进行评价, 本文提出的 EMD-SSA 耦合模型示意图如图 3 所示。

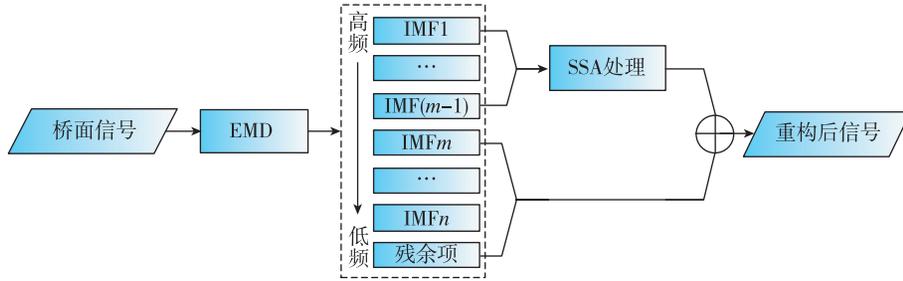


图 3 耦合模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of coupling model

在钢箱梁桥面 GNSS 观测信号中, 多路径信号存在周日重复的特点。从上述该模型处理步骤可以看出, 新模型利用 EMD 方法对桥面 GNSS 信号进行分解, 利用 SSA 方法对高频 IMF 分量进一步降噪, 获取了高频 IMF 分量中的低频信息, 最后可以获得桥面真实的振动信号。本文详细讨论了该模型削弱多路径误差与随机误差的方法与步骤, 并给出了模拟实验和桥面 GNSS 信号处理的实际应用效果。

本文将采用偏差和相互系数 R 这两个评价指标对经模型处理后提取的桥面信号进行质量评价。

1) 偏差 (BIAS)

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_n [f(n) - \hat{f}(n)] \quad (18)$$

处理后的信号与原始信号偏差越接近零, 表示处理效果越好。

2) 信噪比 (SNR)

信噪比是衡量信号中噪声量度的一种传统方法, 作为评价去噪效果的指标, 信噪比越大表示去噪效果越好。信噪比定义为

$$SNR = 10 \times \log_{10} (power_{\text{signal}} / power_{\text{noise}}) \quad (19)$$

式中, $power_{\text{signal}}$ 为真实信号的功率; $power_{\text{noise}}$ 为噪声功率。

3) 相互系数 (R)

$$R = Cov(f(n), \hat{f}(n)) / \sigma_{f(n)} \sigma_{\hat{f}(n)} \quad (20)$$

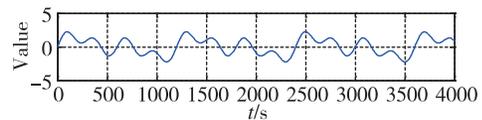
相关系数越大, 表示处理的效果越好。

3.1 EMD-SSA 耦合模型仿真实验

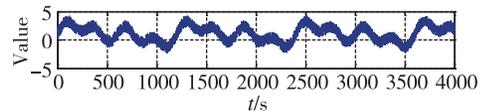
为了验证耦合模型处理信号的有效性, 现模拟一个由 3 个不同频率的正弦信号的叠加数据 s , 其函数为

$$y_t = \sin(2\pi t/1200) + \sin(2\pi t/600) + \sin(2\pi t/300) + e_t \quad (21)$$

模拟信号采样频率为 1Hz, 采样点数为 4000 个, e_t 是服从正态分布 $N(0, 1.5)$ 的随机噪声, 图 4 所示为真实信号和加了随机噪声之后的模拟信号。



(a) Real signal



(b) Noise added signal

图 4 模拟信号序列

Fig. 4 Analog signal sequence

将耦合模型应用于该模拟信号的信息提取, 首先利用 EMD 方法对信号进行多尺度分解, 如图 5 所示, 余项的极值点与过零点相差 1 个时, 停止分解过程, 得到 9 个 IMF 分量和 1 个残余项, 9 个 IMF 分量从高频到低频依次排列, 很好地分离出低频趋势项。

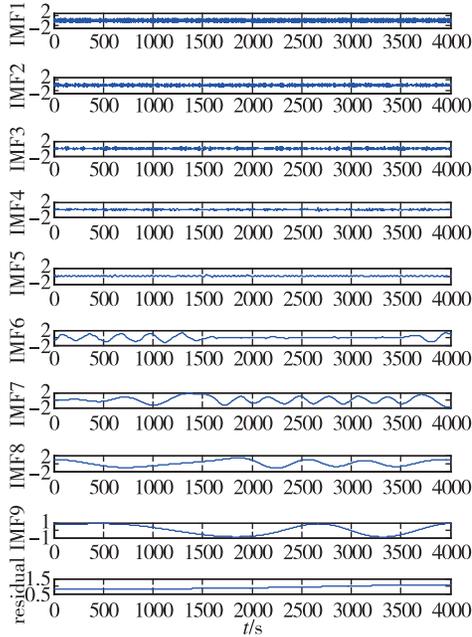


图 5 模拟信号的 EMD 分解

Fig. 5 EMD decomposition of analog signal

3.2 高频分量 SSA 与信号重构

通过计算 IMF 分量的 MSAM,从图 6 可以看出,IMF6 分量的 MSAM 明显偏离了零值。同时

IMF 分量中包含有大量的频率信息,对 IMF 分量进行频谱分析,可以识别出模拟信号中的频率信息。采用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)对 EMD 后的 9 个 IMF 分量进行傅里叶变换,将 IMF 分量转变为频域内的幅值。通过图 7 各个 IMF 分量的频谱图可以看出,每个 IMF 分量都有其在该频谱图中的峰值点,峰值点对应的横坐标就是该 IMF 分量的主频。结合图 6 和图 7,可以得到 IMF1~IMF5 为高频部分,主要为随机噪声;IMF6~IMF9 和残余项主要为低频部分,表现为趋势项。

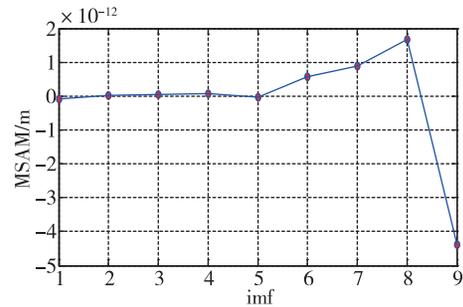


图 6 模拟信号各 IMF 分量的 MSAM

Fig. 6 MSAM values of IMF components of simulated signals

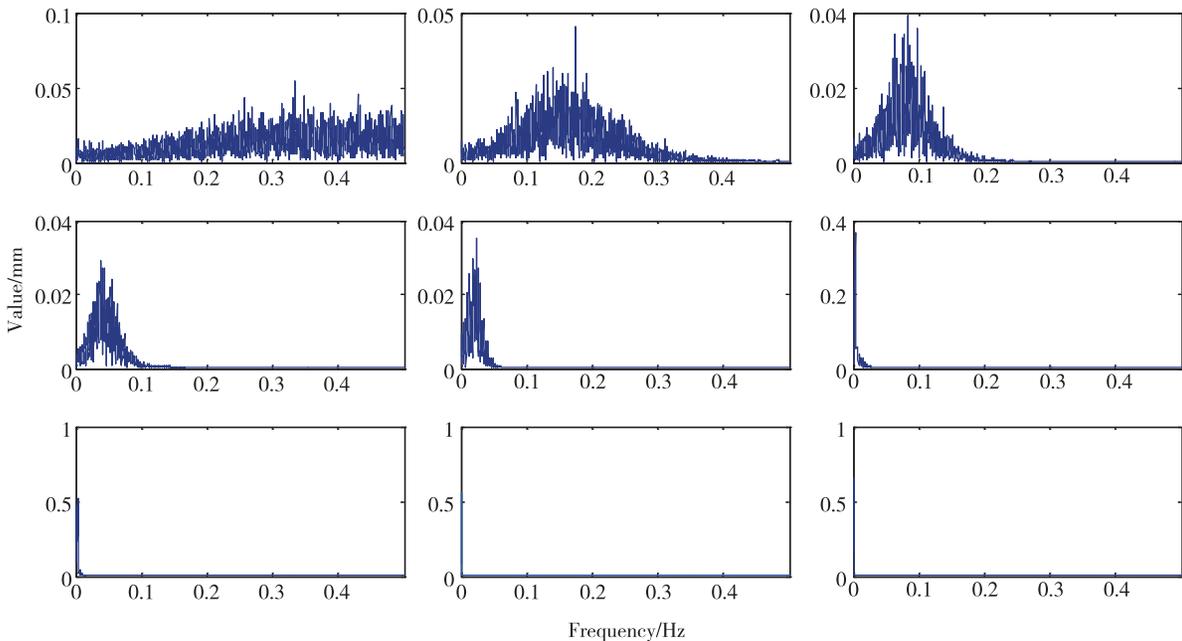


图 7 模拟信号各 IMF 分量频谱图

Fig. 7 IMF component spectrum diagram of analog signal

对于 IMF1~IMF5 分量,采用 SSA 进行处理,根据嵌入维数 M 和有效主分量层数的方法,可以计

算得到嵌入维数 M 为 850,有效主分量层数为 2。为了在 IMF1~IMF5 分量中尽量多地包含有效频

率成分,选取 IMF1~IMF5 分量中有效主分量进行重构。将残余项、低频 IMF 和经 SSA 处理的信号进行重构,图 8 所示为经耦合模型提取后获得的信号,通过图 8 可以看出,总体提取效果较好。

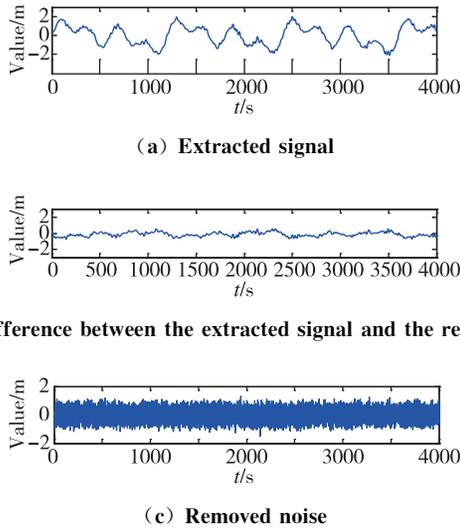


图 8 模拟信号的耦合模型提取效果

Fig. 8 Extraction effect of the coupling model on analog signal

为了解新模型对模拟信号特征提取的效果,表 1 分别给出了三种评价指标对不同方法下的模拟信号的特征提取效果。从表 1 中可知,新模型对模拟信号的处理效果最好,EMD 方法对模拟信号的处理效果最差;再通过计算,相比 EMD 方法与 SSA 方法,新模型处理后信号的偏差分别减少了 55.0% 和 40.0%,信噪比分别增加了 21.16% 和 12.18%,相互关系系数分别增加了 2.4% 和 1.8%。综上所述,新模型对信号的特征提取是切实有效的,并且有着不错的效果。

表 1 不同方法对模拟信号提取效果对比

Tab. 1 Comparison of different methods for analog signal extraction

评价指标	EMD	SSA	EMD-SSA
偏差(BIAS)/m	0.0020	0.0015	0.0009
信噪比(SNR)/dB	47.5050	51.3096	57.5578
相互关系系数(R)/%	96.63	0.9725	0.9899

4 钢箱梁桥面变形监测数据模型分析

由于受车辆荷载的影响较大,钢箱梁桥面的振动一般表现在其高程方向上,本文将采用苏通大桥 GNSS 监测点 S 点、N 点与 M 点高程方向上的 GNSS

变形监测数据进行新模型的趋势项提取,3 个监测点高程方向上分别取 1000 个历元进行实验分析,单位为 s。图 9 所示为跨中监测点 M 点和桥面南北端监测点 S 点、N 点高程方向上的监测数据时程曲线。从图 9 可见,在载荷变化和外界条件的影响下,跨中点的高程变形量大多在 $-100\text{mm} \sim +100\text{mm}$ 变化, S 点、N 点的高程变形量大多在 $-50\text{mm} \sim 50\text{mm}$ 变化, M 点的变形量受车辆荷载的影响较 S、N 两点大,在此仅以桥面跨中位置为例,进行相关问题的说明。桥面跨中位置的变形中包含量级较小的变形量,在新的模型中,首先利用 EMD 方法将这部分变形量从桥面监测数据中分离出去,这也是本文桥面监测数据多尺度分析的第一步。

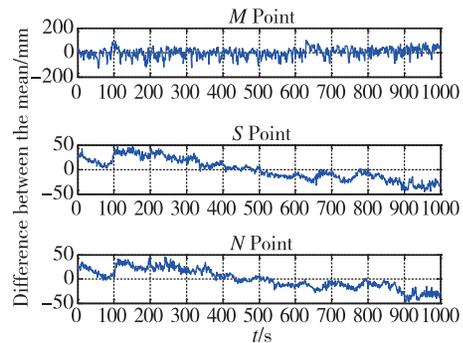


图 9 桥面 M、S、N 点高程方向原始时间序列

Fig. 9 Original time series of elevation direction of M, S and N points of bridge deck

利用 EMD 对桥面监测点 GNSS 数据进行多尺度分解,分解的结果如图 10 所示。通过图 10 可以看出,在分离出 8 个 IMF 分量和 1 个残余项后,分解停

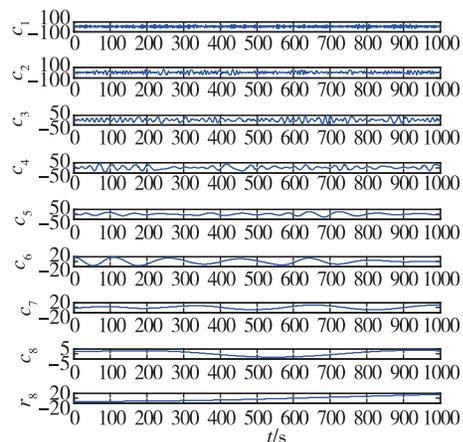


图 10 桥面跨中监测点高程方向变形量 EMD

Fig. 10 EMD of the deformation in the elevation direction of the mid-span monitoring point of the bridge deck

止,此时余项的极值点个数与过零点个数只差 1 个。可以看出,从 IMF1 分量到 IMF8 分量的频率一直在减小,但各分量的振幅却在逐级增大,一直到余项趋于单调。各 IMF 分量的 MSAM 计算结果如图 11 所示。从图 11 中可以看出,第 4 个 IMF 分量的 MSAM 明显偏离零值,此时可认为 IMF1 分量~IMF3 分量为高频分量,IMF4 分量~IMF8 分量与残余项为低频信息。

4.1 IMF 分量频谱分析与桥面振动分量提取

根据桥面跨中 M 点的高程数据,对前 8 个 IMF 分量进行傅里叶变换,将时域内的 IMF 分量转变为频域内幅值随频率的变化。图 12 所示为前 8 个 IMF 分量的频谱图,各个 IMF 分量频谱图中峰值点对应的横坐标就是该 IMF 分量的主频。根据参考文献,苏通大桥一阶对称振动频率的理论计算值

为 0.180Hz,实测值为 0.185Hz。根据图 12 频谱图对应的峰值,可以认为 IMF1 分量为含有振动成分的分量,提取振动分量如图 13 所示。同时 IMF2、IMF3 分量主要以多路径和随机噪声为主。

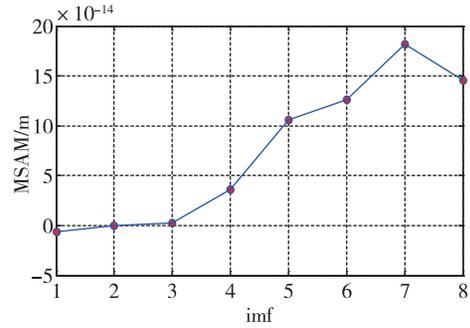


图 11 桥面跨中 M 点高程方向各 IMF 分量的 MSAM
Fig. 11 MSAM values of IMF components in the elevation direction of mid-span M -point of bridge deck

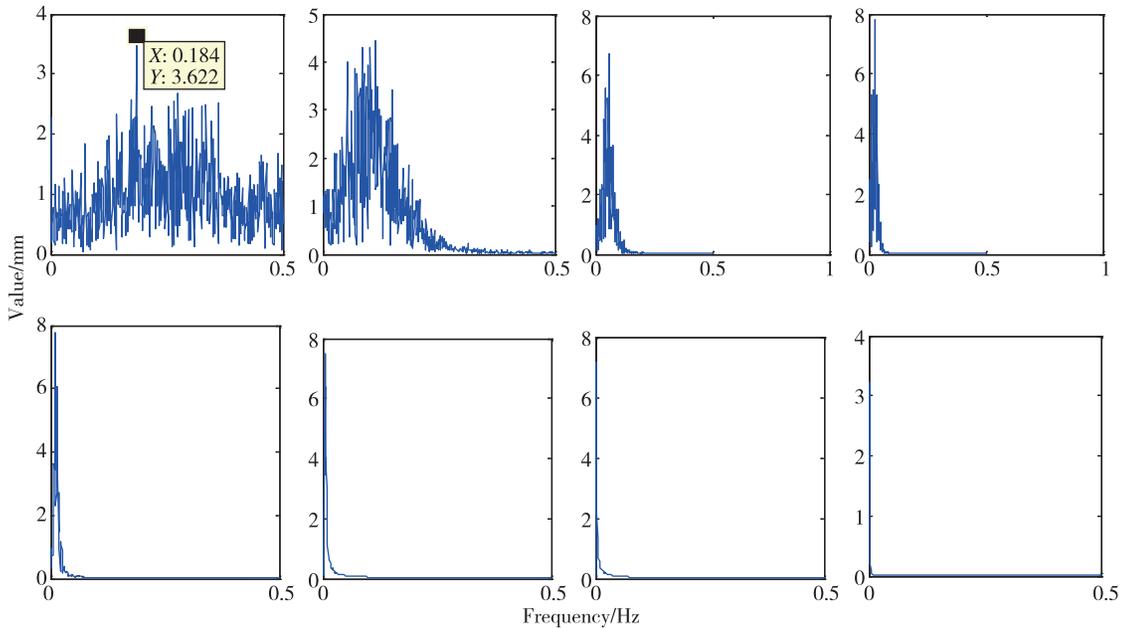


图 12 钢箱梁桥面 M 监测点 $c_1 \sim c_8$ 分量频谱图

Fig. 12 Spectrum diagram of $c_1 \sim c_8$ components of M monitoring point of steel box girder bridge deck

计算含有振动分量的 IMF1 分量与含有多路径与随机噪声的 IMF2、IMF3 分量的相关系数,得到的结果为 -0.0184,可以看出它们之间没有明显的相关性,表明通过 EMD 方法可以很好地将信号中的振动分量分离出来。本文采用 EMD 方法结合频谱分析的方法,识别出苏通大桥振动主频为 0.184Hz,振幅达到了 3.6mm。与《苏通大桥主桥斜拉桥动静载实验报告》中观测得到的结果进行对比,报告中主桥在满足最大工况的情况下,观测得到的主跨一阶振动频率为 0.185Hz,并且振幅最大可以达到 3.5mm,认为

该方法可以有效地识别其主频,并且能够有效地分离出含有振动信息的变形量。

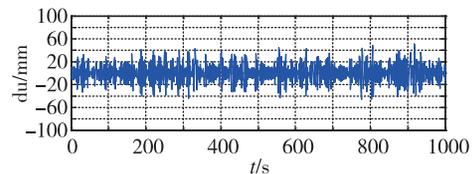


图 13 钢箱梁桥面 M 监测点振动分量

Fig. 13 Vibration component of M monitoring point of steel box girder bridge deck

经 EMD 后 IMF 分量之间的正交性是评价 EMD 方法对信号处理结果的重要指标, IMF 分量之间的正交性表明 EMD 的正确性, 并且表明经 EMD 分离出的 IMF 分量之间是相互独立的。本文对苏通大桥桥面 M 监测点变形监测数据进行 EMD 并对其结果进行分析, 通过计算可以得到监测数据经 EMD 后各 IMF 分量之间的相互系数, 各 IMF 分量之间的相互系数通过灰度表示。由图 14 可以看出, IMF1 分量和其他 IMF 分量不具有明显的相关性, IMF1 分量与其他分量相关系数都不超过 0.02, IMF4~IMF8 之间相关系数也不超过 0.02, 表明各分量之间相对独立, 趋势项正交性明显, 采用 EMD 方法对桥面监测信号进行分解取得了较好的结果。

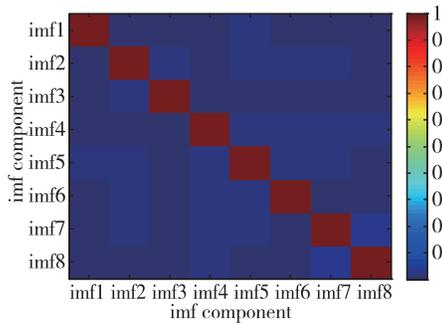


图 14 IMF 分量之间相互系数

Fig. 14 Correlation coefficients between IMF components

4.2 高频噪声的 SSA

进一步采用 SSA 方法对监测点观测信号 IMF2~IMF3 分量多路径误差高频噪声进行剔除, 获得低频信号。通过图 15 可以看出, 参照获取最优嵌入维数的方法, 桥面监测点观测信号的 IMF2~IMF3 分量在 $M=61$ 处 RC1-2 重建序列与实际序列均方根

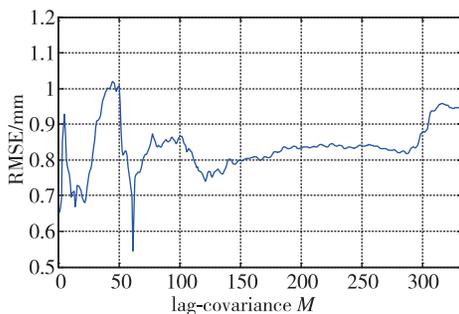


图 15 桥面 M 监测点高频分量重建序列与实际序列均方根误差随窗口 M 的变化

Fig. 15 Variation of RMSE between the reconstruction sequence of high frequency components and the actual sequence of bridge deck M monitoring point with window M

误差(Root Mean Squared Error, RMSE)最小, 所以可设窗口长度为 61, 此时的 RMSE 为 0.5454。图 16 所示为桥面 M 监测点高频 IMF2~IMF3 分量曲率谱图, 根据图 16 可知, 高频分量的信息主要集中在前 4 个奇异值上, 所以有效分量层数为 4。

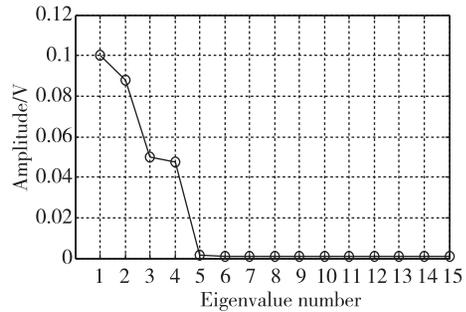


图 16 桥面 M 监测点高频分量曲率谱图

Fig. 16 High frequency component curvature spectrum of bridge deck M monitoring point

对 M 点 IMF2~IMF3 高频分量的有效主分量进行重建序列, 图 17 所示为通过 SSA 方法 M 点高频分量的有效主分量信号重建序列图, 其中蓝线表示原始高频分量, 红线表示高频分量降噪后的趋势成分。由图 17 可以看出, 经过 SSA 重构后的重建序列比 M 点高频分量序列更加光滑, 表明 SSA 具有明显的降噪效果。

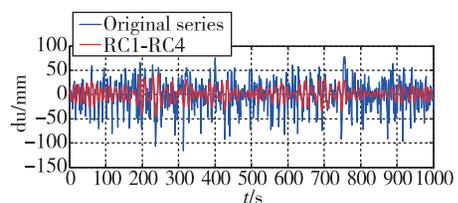


图 17 桥面 M 监测点高频 IMF2~IMF3 分量有效主分量 RC1-4 信号重建序列

Fig. 17 High frequency IMF2~IMF3 component effective principal component RC1-4 signal reconstruction sequence at bridge deck M monitoring point

4.3 趋势项提取与变形分析

将经 SSA 去噪后的 IMF2~IMF3 高频分量与低频分量和残余项进行重构, 重构结果如图 18 所示, 图 19 和图 20 所示分别为桥面 S 、 N 两点经耦合模型处理后的重构结果。

为了验证新模型对于桥面监测信号的处理效果, 表 2~表 4 分别给出了新模型对于 M 、 S 、 N 三点信号提取结果的几组评价指标。

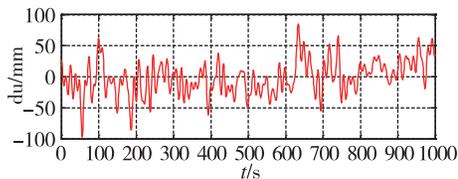


图 18 桥面 M 监测点高程方向经耦合模型处理后的重构信号

Fig. 18 Reconstructed signal in the elevation direction of the bridge deck M monitoring point is processed by the coupling model

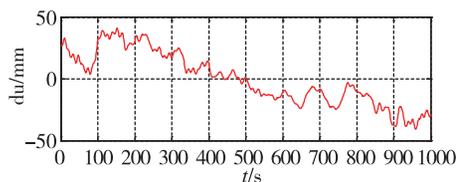


图 19 桥面 S 监测点高程方向经耦合模型处理后的重构信号

Fig. 19 Reconstructed signal in the elevation direction of the bridge deck S monitoring point processed by the coupling model

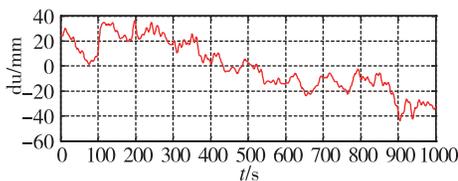


图 20 桥面 N 监测点高程方向经耦合模型处理后的重构信号

Fig. 20 Reconstructed signal in the elevation direction of the bridge deck N monitoring point processed by the coupling model

表 2 不同方法对桥面变形信号提取效果对比(M 点)

Tab. 2 Comparison of different methods for bridge deck deformation signal extraction (Point M)

评价指标	EMD	SSA	EMD-SSA
偏差(BIAS)/m	0.0184	0.0153	0.0082
信噪比(SNR)/dB	16.2556	16.3055	18.2575
相互关系数(R)/%	98.13	0.9830	0.9899

表 3 不同方法对桥面变形信号提取效果对比(S 点)

Tab. 3 Comparison of different methods for bridge deck deformation signal extraction (Point S)

评价指标	EMD	SSA	EMD-SSA
偏差(BIAS)/m	0.0187	0.0097	0.0078
信噪比(SNR)/dB	15.1384	15.5252	16.6987
相互关系数(R)/%	98.50	98.63	99.31

表 4 不同方法对桥面变形信号提取效果对比(N 点)

Tab. 4 Comparison of different methods for bridge deck deformation signal extraction (Point N)

评价指标	EMD	SSA	EMD-SSA
偏差(BIAS)/m	0.0333	0.0257	0.0196
信噪比(SNR)/dB	16.0489	16.1317	18.3040
相互关系数(R)/%	98.79	98.81	99.20

从表 2~表 4 可以看出,不管是从偏差还是信噪比或是相互系数的对比,SSA 方法对于桥面监测点信息的提取都要优于 EMD 方法,但是新模型的信息提取效果相对于 EMD、SSA 方法更为显著。通过计算可知,对于 M 点信息提取,新模型较 EMD、SSA 方法偏差值分别减少了 55.43% 与 46.40%,信噪比分别增加了 14.05% 与 11.97%,相互关系数分别增加了 0.88% 与 0.71%;对于 S 点信息提取,新模型较 EMD、SSA 方法偏差值分别减少了 48.13% 与 18.56%,信噪比分别增加了 10.31% 与 7.56%,相互关系数分别增加了 0.82% 与 0.69%;同样对于 N 点信息提取,新模型较 EMD、SSA 方法偏差值分别减少了 41.14% 与 23.74%,信噪比分别增加了 14.05% 与 13.47%,相互关系数分别增加了 0.42% 与 0.40%。

经过模型重构得到的是长周期变形分量,即桥梁结构在外界荷载等变化下产生的趋势性变形。由图 17 可以得到桥面跨中高程方向上的动态变形量为 -97mm~85mm 之间,变化幅度达到了 182mm。在《苏通大桥主桥斜拉桥动静载实验报告》中,苏通大桥在满载情况下跨中高程方向最大变形量为 1388mm,远大于本文中苏通大桥跨中高程方向上的变化幅度,认为主桥在运营期内变形量在设计范围内。

5 结论

1) 在 EMD、SSA 方法的基础上,提出了一种新的 EMD-SSA 耦合模型,首先通过仿真数据验证了该模型在信号提取中的优势,并给出了三种评价指标对不同方法下的模拟信号的特征提取效果进行对比。通过计算得知,新模型对模拟信号的处理效果最好,表明新模型对信号的特征提取是切实有效的,并且有着不错的效果。

2) 对桥面 GNSS 监测数据采用新模型进行趋势项提取,首先探讨了桥面变形监测数据中包含的振动成分,得出桥面变形监测数据由噪声分量、振动分量和结构变形分量组成。结合频谱分析,得到 EMD 后的 IMF 分量的频域范围,有效地分离出含

有振动信息的变形量,并且对 EMD 方法的相关性进行了分析,验证了 EMD 多尺度分解的正确性。

3)对经 EMD 后的高频噪声分量进行 SSA 去噪,获得高频噪声中的低频信息,将经 SSA 去噪后的高频分量与低频分量和残余项进行重构,通过三种评价指标对不同方法的特征提取效果进行验证,同样与 EMD、SSA 方法进行对比,可得 EMD-SSA 耦合模型的效果最好。最后对重构的结构变形分量进行分析,得到桥面的振动信息和结构变形特征,与相关检测报告的结果相一致,验证了该模型的可行性。

参考文献

- [1] 张怀阳. 特大型桥梁运营期间变形监测关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
Zhang Huaiyang. Research on key technology of deformation monitoring during operation of super large bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018(in Chinese).
- [2] 袁兴明, 马鑫程, 孙玉强. GNSS 系统在桥梁施工控制中的应用分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(5): 220-221+224.
Yuan Xingming, Ma Xincheng, Sun Yuqiang. Application analysis of GNSS system in bridge construction control[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2017, 40(5): 220-221+224(in Chinese).
- [3] 徐佳, 麻凤海, 杨帆. EEMD 滤波技术在 GPS 动态监测数据去噪中的应用[J]. 测绘科学, 2012, 37(3): 155-156+55.
Xu Jia, Ma Fenghai, Yang Fan. Application of EEMD filtering technology in GPS dynamic monitoring data denoising[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(3): 155-156+55(in Chinese).
- [4] 徐艳, 陈冰冰, 马宏忠, 等. 基于 EMD-PSD 的 OLTC 振动信号特征提取方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 3-10.
Xu Yan, Chen Bingbing, Ma Hongzhong, et al. Feature extraction method of OLTC vibration signal based on EMD-PSD[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 3-10(in Chinese).
- [5] Jiang Z, Wu Y, Li J, et al. Application of EMD and 1.5-dimensional spectrum in fault feature extraction of rolling bearing[J]. The Journal of Engineering, 2019(3): 9121.
- [6] Zhang X, Yang J, Wang B, et al. An inverse decaying frequency modulation EMD method for closely spaced modal parameter identification in high precision with Laplace wavelet correlation filtering [J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(10): 105003.
- [7] Nie Z, Shen F, Xu D, et al. An EMD-SVR model for short-term prediction of ship motion using mirror symmetry and SVR algorithms to eliminate EMD boundary effect[J]. Ocean Engineering, 2020, 217(3): 107927.
- [8] 张宁. 基于 CEEMD-SSA-ELM 的短期电价集成预测模型[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2020, 37(5): 82-88.
Zhang Ning. Integrated forecasting model of short-term electricity price based on CEEMD-SSA-ELM [J]. Journal of Guizhou University (Natural Science Edition), 2020, 37(5): 82-88(in Chinese).
- [9] Vargas-Lopez O, Amezcua-Sanchez J P, De-Santiago-Perez J J, et al. A new methodology based on EMD and nonlinear measurements for sudden cardiac death detection[J]. Sensors, 2019, 20(1): 20010009.
- [10] Miyazaki K, Xu C, Hieda M. A new potential-type humidity sensor using EMD-based manganese oxides as a solid electrolyte[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 141(4): 2054871.
- [11] Lv Y, Wang P, Wang Y, et al. Eliminating phase drift for distributed optical fiber acoustic sensing system with empirical mode decomposition. [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(24): 5392.
- [12] Aswathaiah U, Nandagiri L. Extraction of nonlinear trends in time series of rainfall using singular spectrum analysis[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2020, 25(12): 04020053.
- [13] Remote Sensing; Studies from Yazd University Reveal New Findings on Remote Sensing [Comparison of Harmonic Analysis of Time Series (HANTS) and Multi-Singular Spectrum Analysis (M-SSA) in Reconstruction of Long-Gap Missing Data in NDVI Time Series][J]. Journal of Technology, 2020.
- [14] Wang J, Guo J, Yu H, et al. A combined EMD and MSSA model for the extraction of gravity tide correction from relative gravimetric data[J]. Acta Geodaetica et Geophysica, 2019, 54(4): 583-618.
- [15] 王鑫, 吴际, 刘超, 等. 奇异谱分析在故障时间序列分析中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(11): 2321-2331.
Wang Xin, Wu Ji, Liu Chao, et al. Application of singular spectrum analysis in fault time series analysis [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(11): 2321-2331(in Chinese).

(编辑:孟彬)