

文章编号:1673-2049(2019)05-0071-09

大跨斜拉桥北斗监测挠度温度效应分离研究

谭冬梅¹, 聂顺¹, 瞿伟廉¹, 刘晓飞¹, 吴浩²

(1. 武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2. 华中师范大学 城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430079)

摘要:针对大跨斜拉桥北斗监测挠度温度效应分离问题,提出先利用挠度数据的周期特性,在挠度数据首尾分别进行波形延拓,在进行小波分解后所得小波细节中剔除高幅值车载作用挠度得到残余分量,将其与小波系数重构得到预降噪挠度,最后将预降噪挠度进行小波分解来实现挠度数据的高精度降噪;得到降噪挠度后,利用改进的集总平均经验模态分解(MEEMD)良好的可抑制分解过程中产生模态混叠的特性,将降噪挠度进行MEEMD分解,接着将所得日温差和年温差效应第1个半周期通过对称置换获得高精度日温差和年温差效应,最后将降噪挠度剔除高精度日温差和年温差效应后所得残余分量再次进行MEEMD分解,所得趋势部分即为长期挠度,从而实现日温差效应、年温差效应、长期挠度的逐步分离。结果表明:波形延拓+预降噪+小波分解的降噪算法比传统单一降噪算法精度更高;温度效应分离算法能实现挠度温度效应各周期成分的精确分离,适合大跨斜拉桥北斗监测挠度温度效应分离。

关键词:波形延拓;小波分解;改进的集总平均经验模态分解;温度效应

中图分类号:TU317 **文献标志码:**A

Research on Deflection Temperature Effect Separation in Beidou Monitoring of Long-span Cable-stayed Bridge

TAN Dong-mei¹, NIE Shun¹, QU Wei-lian¹, LIU Xiao-fei¹, WU Hao²

(1. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge & Structure Engineering, Wuhan University of Technology,

Wuhan 430070, Hubei, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences,

Central China Normal University, Wuhan 430079, Hubei, China)

Abstract: Aiming at the separation of deflection temperature effect in Beidou monitoring of long-span cable-stayed bridges, the periodic characteristic of deflection data was used to carry out waveform continuation at the beginning and the end of deflection data respectively. The high-amplitude vehicle deflection was removed from the wavelet details after wavelet decomposition and the residual components were gotten. The pre-denoising deflection was obtained by reconstruction of the residual components and wavelet coefficients. The deflection data could be denoised precisely by wavelet decomposition of pre-denoising deflection. After denoising deflection, it could be decomposed by the modified ensemble empirical mode decomposition (MEEMD) because of the fine characteristic that suppressed the mode aliasing in the decomposition process. After MEEMD decomposition, the first half cycle of daily temperature difference and annual temperature difference effect was symmetrically replaced to obtain high

收稿日期:2018-11-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51408452);道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室开放基金项目(DQJJ201709)

作者简介:谭冬梅(1976-),女,四川秀山人,副教授,工学博士,E-mail:smiledongmei@163.com。

precision daily temperature difference and annual temperature difference effect. Finally, the residual components of denoising deflection after eliminating high precision daily temperature difference and annual temperature difference effect were decomposed again by MEEMD. The trend part was long-term deflection, thus the gradual separation of the daily temperature difference effect, the annual temperature difference effect and the long-term deflection were realized. The results show that the denoising algorithms of waveform continuation + pre-denoising + wavelet decomposition is more accurate than the traditional single denoising algorithm. The temperature effect separation algorithm can achieve accurate separation of each periodic component of the deflection temperature effect and it is suitable for deflection temperature effect separation for Beidou monitoring of long-span cable-stayed bridge.

Key words: waveform continuation; wavelet decomposition; MEEMD; temperature effect

0 引言

桥梁结构挠度变化是桥梁安全运营期间评价桥梁结构安全状态的一个重要参数,而挠度成分复杂,常由环境噪声、车辆和行人活荷载、温度效应、结构自身材料和工作状态的变化等复杂成分组成。对于大跨斜拉桥来说,实际运营期间的挠度成分中温度效应已超过理论设计温度效应许多,同时该类型桥梁跨度大、柔性较强,车载对挠度的影响较大,因而对挠度监测的实时性和挠度监测数据各组成成分分别进行评价就显得尤为重要。挠度参数常通过预先安装在桥梁上的传感器来获取,如静力水准仪等,如今中国的北斗卫星导航系统(Beidou Navigation Satellite System, BDS)因在桥梁三维变形监测上的时效性、高精度性等优势而有着越来越多的应用,而 BDS 监测的桥梁挠度数据各成分的有效分离对桥梁结构安全评价、超载车辆管控、桥梁管养等具有重要参考意义。

目前,已经有一些学者对桥梁挠度成分的分离进行了研究,主要集中在环境噪声、车载作用挠度、温度效应、长期挠度趋势等的分离上。Sohn 等^[1]建立自联想神经网络,陈德伟等^[2]建立人工神经网络,刘纲等^[3]结合了粒子群优化算法和滤波算法,陈夏春等^[4]建立多元线性回归方程,刘夏平等^[5]建立最小二乘支持向量机模型,杨红等^[6]采用多个最小二乘支持向量机模型分别建立温度和温度效应关系,从而剔除温度效应;在能确定温度效应各周期后,刘夏平等^[7]利用奇异值分解,杨坚等^[8]通过特征值分析,杨红等^[9]利用快速独立分量分析,陈国良等^[10]利用中心移动平均法也都可以依次分离出不同周期特性的温度效应。

上述文献中挠度温度效应分离算法是通过建立

挠度与温度的对应关系,或者确定挠度各成分的准确周期为基础,从而实现挠度温度效应分离。然而对于大跨斜拉桥的 BDS 监测来说,监测位置一般位于桥面上方,常常不方便在对应位置配置可以反映整桥变化的温度获取装置;另外,由于远距离的信号传输和测点三维坐标解算不完整的原因,所获得挠度监测数据会面临监测数据不完整的难题,导致温度效应的同成分周期并不完全相同。基于此,本文依据 BDS 监测数据的周期特性,通过波形延拓和车载作用挠度进行预降噪,再利用小波分解实现挠度的最终降噪。在得到降噪挠度后,利用改进的集总平均经验模态分解(MEEMD)^[11]能够很好抑制分解过程中模态混叠的特性和温度效应的周期特性,可实现不同周期温度效应的高精度分离。

1 桥梁挠度信号特征分析理论

1.1 挠度信号成分分析

桥梁挠度成分主要包括活荷载、环境噪声、温度效应、桥梁结构徐变及结构损伤等,其中活荷载一般包括行人和车辆荷载,温度效应一般包括日温差效应、年温差效应。考虑到大跨斜拉桥的柔性较强及车流量大、行人少,本文挠度成分中仅考虑车载作用挠度、环境噪声、日温差效应、年温差效应、长期挠度。挠度各成分表示如下

$$S(t) = S_1(t) + S_2(t) + S_3(t) + S_4(t) + S_5(t) \quad (1)$$

式中: $S(t)$ 为总挠度; S_1 为车载作用挠度; S_2 为环境噪声; S_3 为日温差效应; S_4 为年温差效应; S_5 为长期挠度; t 为时间。

1.2 挠度温度效应分离

依据 BDS 监测数据的周期特性,借鉴镜像延拓的思想,通过波形延拓(本文所指波形延拓包括分解前数据延拓和分解后数据截取)可以抑制分解过程

中的端点效应,接着进行小波分解实现车载作用挠度的预降噪。预降噪是指在小波分解后的细节中剔除相对较高幅值成分(主要为车载作用挠度)得到残余分量,将残余分量与分解的相关系数重构得到预降噪的挠度,最后将预降噪的挠度通过小波分解实现车载作用挠度和环境噪声的最终降噪。

在得到平滑的降噪挠度后,对降噪挠度进行 MEEMD 分解,依据温度效应的周期特性将初次分解所得日温差和年温差效应的第 1 个半周期进行置换,可得高精度日温差和年温差效应,最后将降噪挠度剔除高精度日温差和年温差效应所得残余分量再次进行 MEEMD 分解,所得趋势部分即为长期挠度,最终实现不同周期温度效应的精确分离。

2 模拟挠度信号分析

2.1 挠度信号模拟

本文以长江上某大跨双塔双索面斜拉桥为背景,采用 MIDAS/Civil 建立桥梁模型,如图 1 所示。

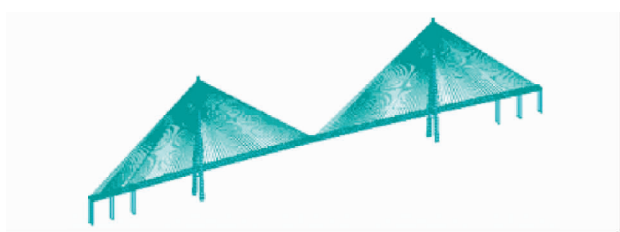


图 1 桥梁模型

Fig. 1 Bridge Model

考虑到该桥柔性较强,挠度主要受车载、温度和环境噪声影响,先对桥梁挠度进行短期模拟降噪研究。因此,挠度 $S(t)$ 可按式(2)计算

$$S(t) = S_1(t) + S_2(t) + S_3(t) \quad (2)$$

用 MIDAS/Civil 软件计算的该桥梁主跨跨中挠度值为:整体升温 1°C ,主跨跨中下挠 0.62 mm ;整体降温 1°C ,主跨跨中上挠 0.62 mm ;主梁截面每线性升高温差 1°C ,主跨跨中下挠 0.53 mm 。可取整体日温差为 14°C ,截面日温差为 7°C ,年温差为 36°C 。假定日温差和年温差均为按正弦函数变化的周期性函数,整体日温差和截面日温差共同组成日温差^[7],本文取采样频率为 5 min 一次,时间跨度为 5 d ,共 $1\,440$ 个数据,则日温差效应 $S_3(t)$ 可表示如下

$$S_3(t) = -6.15 \sin\left(\frac{\pi t}{144}\right) \quad (3)$$

环境噪声水平取日温差效应的 20% 。另外,为保持日温差效应与 5 min 采集 1 次的车载作用挠度

不至于相差太大,本文选取 45 kN 的节点动力荷载以 $100\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度通过该斜拉桥,主跨跨中挠度动力响应如图 2 所示。

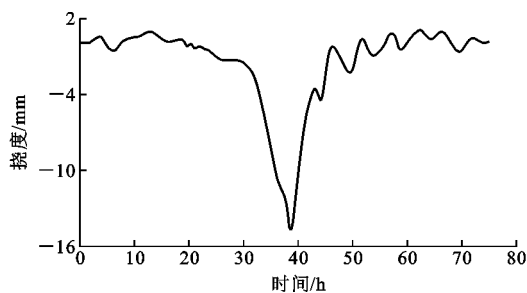


图 2 跨中挠度动力响应

Fig. 2 Dynamic Response of Midspan Deflection

由图 2 可知,主跨跨中挠度动力响应范围为 $-14.71 \sim 1.12\text{ mm}$ (负号表示下挠,正号表示上挠),由于采样频率为 5 min 一次,则该范围内任一数值都有可能被采集到。假设采集过程中共采集到 100 次动力响应,则可在 $-14.71 \sim 1.12\text{ mm}$ 之间随机抽取 100 个数据作为车载作用挠度随机分布到 5 d 的采集数据中。总挠度和各分量如图 3 所示。

2.2 降噪效果对比

对总挠度分别进行经验模式分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD)^[12]、总体平均经验模态分解 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)^[13-14]、小波分解^[15]、变分模态分解 (Variational Mode Decomposition, VMD)^[16-17],其中主要分解参数如下: EEMD 分解加入高斯白噪声 100 次进行运算;小波分解采用 sym8 小波基,分解 6 层; VMD 分解层数为 2 层。各分解结果中, EMD, EEMD 分解中分量较多,可通过周期识别有效成分,将周期不低于 1 d 的成分重构可得降噪后的温度效应;小波和 VMD 分解可直接得到降噪后的温度效应。

本次数值模拟的降噪效果采用分离值与实际值的相关系数 ρ 和均方根误差 σ 两种方式进行评价。

$$\rho_i(s_i, f_i) = \frac{\text{cov}(s_i, f_i)}{\sqrt{\delta(s_i)\delta(f_i)}} \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - f_i)^2}{n}} \quad (5)$$

式中: s_i 为挠度成分实际值; f_i 为挠度成分分离值; $\delta(s_i)$, $\delta(f_i)$ 分别为 s_i 和 f_i 的方差; n 为数据长度。

相关系数取值范围为 $[-1, 1]$,相关系数绝对值越接近 1 ,分离效果越好,越接近 0 ,分离效果越差,通常认为相关系数绝对值大于 0.8 时,实际值与分

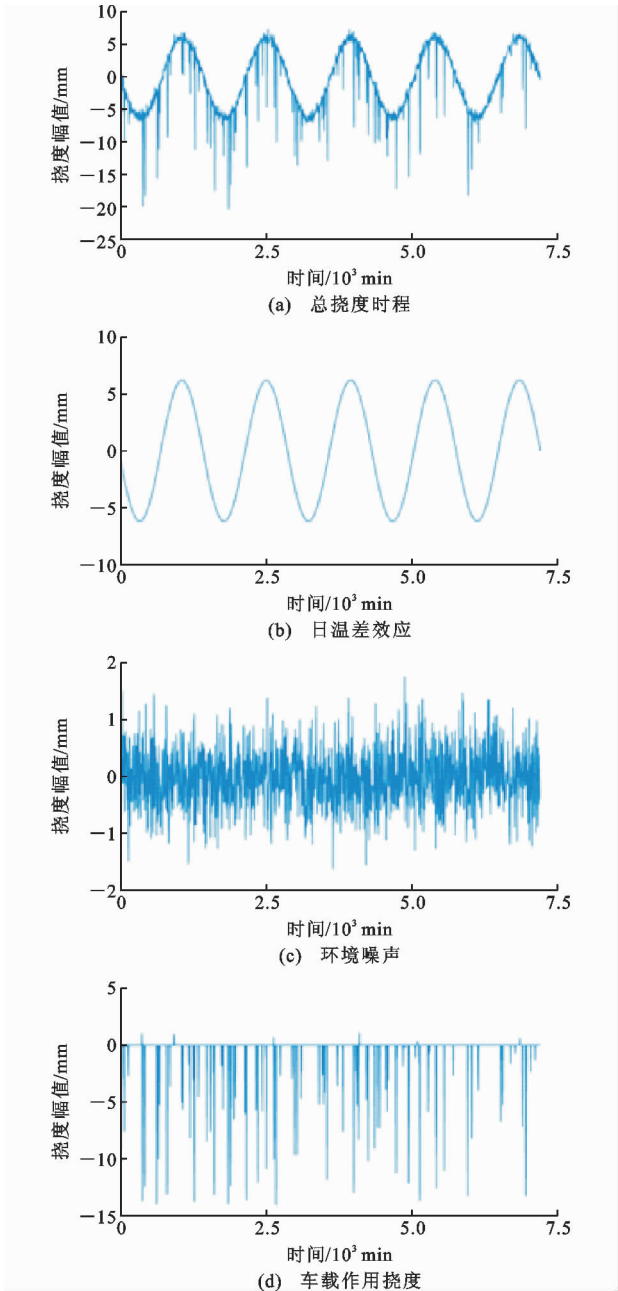


图3 总挠度及各分量

Fig. 3 Total Deflection and Components

离值就具有很强的相关性。

上述4种单一方法降噪效果见表1。由表1中相关系数和均方根误差对比可知,小波降噪后相似度高且均方根误差较小,所以为进一步减少车载作用挠度对降噪的影响,在小波分解的细节中剔除2 mm 以上的车载作用挠度得到残余分量,将残余分量与分解的相关系数重构得到预降噪挠度。预降噪挠度再次进行前文4种单一方法分解,二次降噪效果见表2。

对比表2和表1可知,考虑车载作用挠度的预降噪可有效提高分离相似度,并减小降噪误差。

表1 各算法直接分解降噪效果
Tab. 1 Effect of Direct Decomposition and Denoising by Each Algorithm

降噪算法	EMD 降噪	EEMD 降噪	小波降噪	VMD 降噪
ρ	0.994 4	0.996 8	0.997 9	0.995 2
σ	0.685 7	0.664 6	0.514 2	0.596 0

表2 各算法二次分解降噪效果
Tab. 2 Effect of Secondary Decomposition and Denoising by Each Algorithm

降噪算法	EMD 降噪	EEMD 降噪	小波降噪	VMD 降噪
ρ	0.999 4	0.999 5	0.998 9	0.999 4
σ	0.159 5	0.147 3	0.205 0	0.159 2

由于 EMD/EEMD 分解中端点不一定存在极值,VMD 分解中希尔伯特变换的使用会使待分解信号进行 90°相移,这3种分解算法在降噪中均存在端点效应,小波分解也同样存在端点效应,因而有必要对分解过程中的端点效应进行抑制。

端点效应的抑制方法较多,总的来说都是根据原信号的特点通过不同手段将模拟的数据进行两端延拓,分解之后截取原数据的相应位置数据即可。结合本文温度效应分离的特点,温度效应相邻周期相关性较大,可直接将相邻周期的同幅值水平段的半个周期通过对称平移进行波形延拓,模拟总挠度延拓如图4所示。

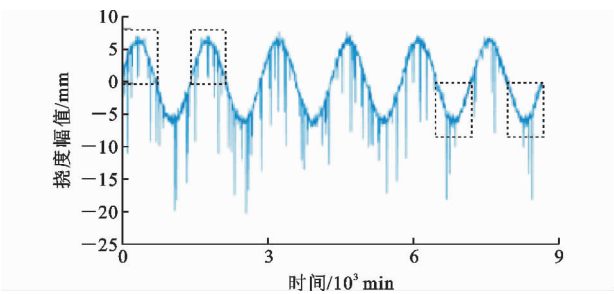


图4 总挠度波形延拓

Fig. 4 Waveform Continuation of Total Deflection

将总挠度进行波形延拓后,先通过小波预降噪,之后再分别进行前文4种单一方法分解,最终分离结果如表3所示。

对比表2与表3可知,本文波形延拓方法能进一步提高小波降噪和VMD降噪的分离精度,而EMD和EEMD使用该种延拓方法则分离效果提升相对一般。综合表1~3可知,采用波形延拓+预降噪+小波分解的降噪方法效果最好。

2.3 降噪后的温度效应成分分离

桥梁挠度降噪后成分又分为日温差效应、年温

表 3 本文算法的分解降噪效果

Tab. 3 Effect of Decomposition and Denoising by Paper				
降噪算法	EMD 降噪	EEMD 降噪	小波降噪	VMD 降噪
ρ	0.999 4	0.999 5	0.999 7	0.999 5
σ	0.153 9	0.147 7	0.113 8	0.140 2

差效应、长期挠度等,因此有必要对降噪后温度效应和长期挠度进行成分细分。

由于模拟数据时间较长,因此构建数据时间间隔为 1 h 一次。假设长期挠度随时间趋于平稳,因此利用幂函数来拟合长期挠度^[10],所构建无噪总挠度记为 $S(t)$

$$S(t)=S_3(t)+S_4(t)+S_5(t)$$

(6)

$$S_3(t)=-6.15\sin(\frac{\pi t}{12})$$

$$S_4(t)=-11.07\sin(\frac{\pi t}{4\ 380})$$

$$S_5(t)=-0.3t^{0.4}$$

本次模拟无噪总挠度各成分的时程如图 5 所示。将无噪总挠度进行 MEEMD 分解,可得各 IMF 分量如图 6 所示。从图 6 所得 MEEMD 各 IMF 分量幅值及周期特性可以看出:该分解算法基本能将温度效应各周期一次性分离出来,在总挠度模态分解过程中能够有效抑制模态混叠;同时在分量初始边缘也同样存在端点效应,尤其是长期挠度(IMF6)分离左端点有接近 8 mm 的发散,年温差效应(IMF5)有接近 7 mm 的发散。为再次提高分离精度,结合日温差效应、年温差效应的周期特性,可将 MEEMD 分解所得日温差和年温差效应的第 1 个半周期与第 3 个半周期通过对称平移进行置换,IMF5 的置换方式如图 7 所示。

将初次分解得到的日温差效应、年温差效应第 1 个半周期进行置换后,从无噪总挠度效应中剔除日温差效应、年温差效应后得到的残余分量再次进行 MEEMD 分解,得到长期挠度,最终各分解分量如图 8 所示,分解结果见表 4。

从表 4 可知,MEEMD 算法结合波形置换所得温度效应各周期成分分离值与实际值相关系数均在 0.99 以上,分离均方根误差在 0.5 mm 以内,分离精度较高。

3 实测信号分析

3.1 实测挠度数据获取

本文监测的桥梁为长江上某大跨双塔双索面斜拉桥,桥梁柔性较强,桥上车载情况复杂。为全面、

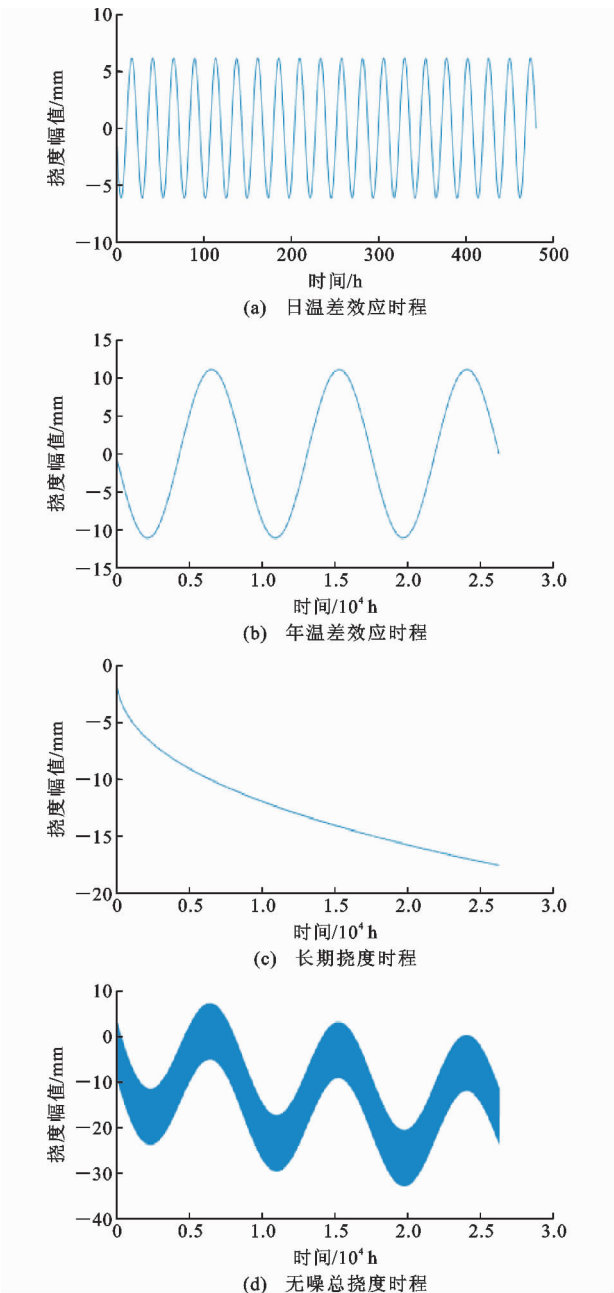


图 5 无噪总挠度各成分时程

Fig. 5 Time History of Components of Noiseless Total Deflection

表 4 各分量分离结果

Tab. 4 Separation Results of Components			
挠度分量	日温差效应	年温差效应	长期挠度
ρ	0.999 5	0.998 8	0.995 0
σ	0.139 3	0.440 2	0.444 9

实时监测桥梁三维变形情况,在桥面、桥墩、桥塔等位置均安装有 BDS 监测点以实时接收北斗卫星坐标信号^[18],同时在桥梁附近 3 km 范围内布设 4 座北斗参考站。该参考站是以北斗卫星导航系统为

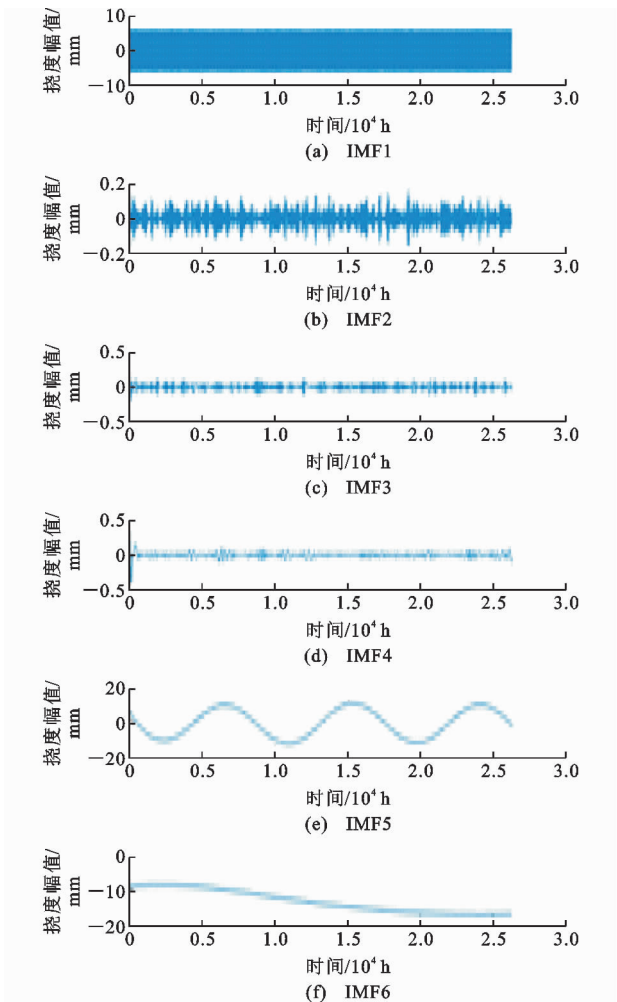


图 6 无噪总挠度各 IMF 分量时程

Fig. 6 Time History of IMF Components of Noiseless Total Deflection

主,兼容其他全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)^[19]的地基增强系统,通过地面通信系统播发导航信号修正量和辅助定位信号,起到对桥梁上的 BDS 监测点三维坐标修正的作用。BDS 监测点和北斗参考站所接收的卫星信号通过光纤传输到后台云机房进行数据处理,数据处理则采用专业的北斗高精度实时数据解算处理软件,该解算处理软件在进行GNSS数据处理方面采

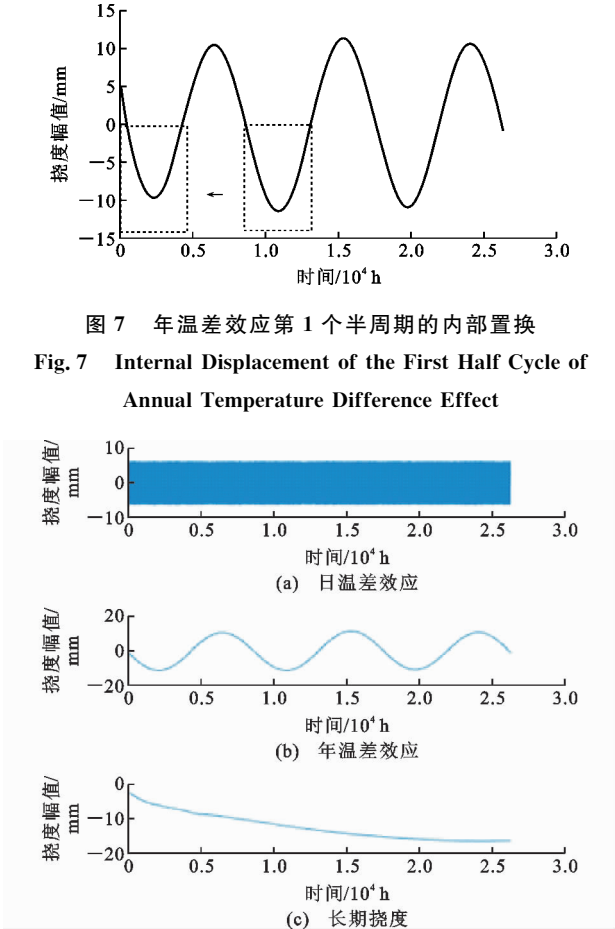


图 8 分解所得分量

Fig. 8 Components of Decomposition

用了先进的非线性 Kalman 滤波双差解、三差解算法,同时增加了先进的电离层改正模型、支持多参考站解算及实时独立基线网平差等功能,最终可解算出各监测点的精确三维坐标。

本文监测数据来源于上述北斗监测信号采集、传输与处理后的三维坐标,桥梁上监测点的竖向动态坐标即为桥梁的挠度数据。本次监测数据取自具有代表性的上下游跨中 BDS 监测点,其监测位置和斜拉桥立面图如图 9 所示。

3.2 挠度温度效应分离

本文选取跨中上下游监测点 2017 年 11 月 21

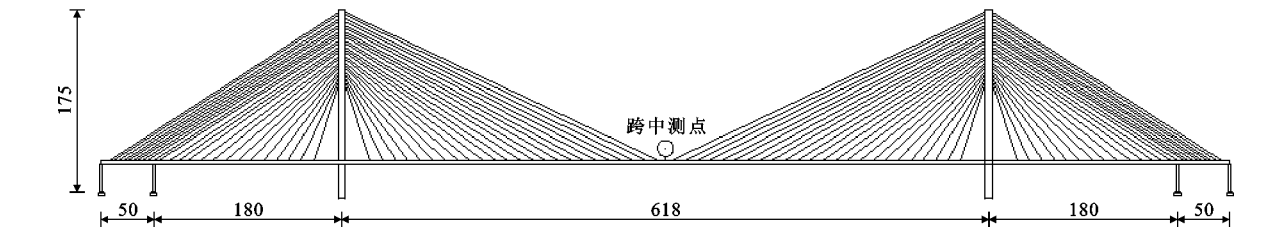


图 9 BDS 测点位置及斜拉桥立面图(单位:m)

Fig. 9 Measuring Point Location of BDS and Cable-stayed Bridge Elevation Map (Unit: m)

日 0 点至 2017 年 12 月 2 日 23 点 55 分共 12 d 的监测数据,为方便分离温度效应,采样间隔取 5 min,所采挠度监测数据时程如图 10 所示。

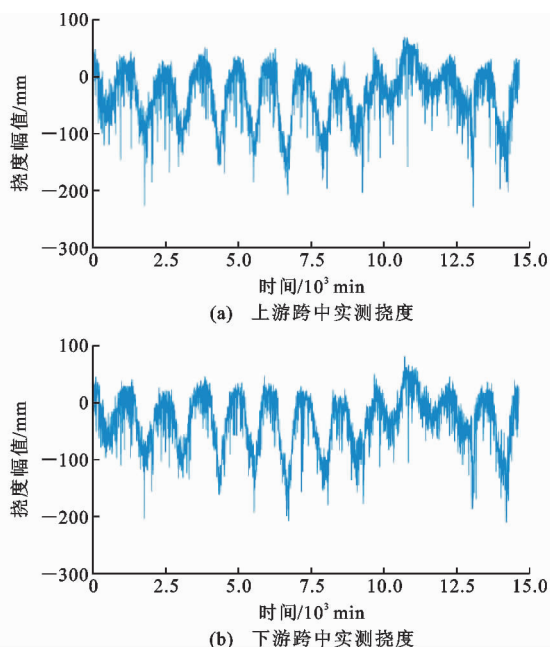


图 10 跨中实测挠度

Fig. 10 Measured Deflection in Midspan

从图 10 可以看出:实测挠度成分除日温差效应外,还具有复杂的噪声成分和车载作用挠度。因此先将实测数据进行波形延拓+预降噪+小波分解的降噪处理,实测数据小波分解均选取 sym8 小波进行 6 层分解,降噪效果如图 11 所示。

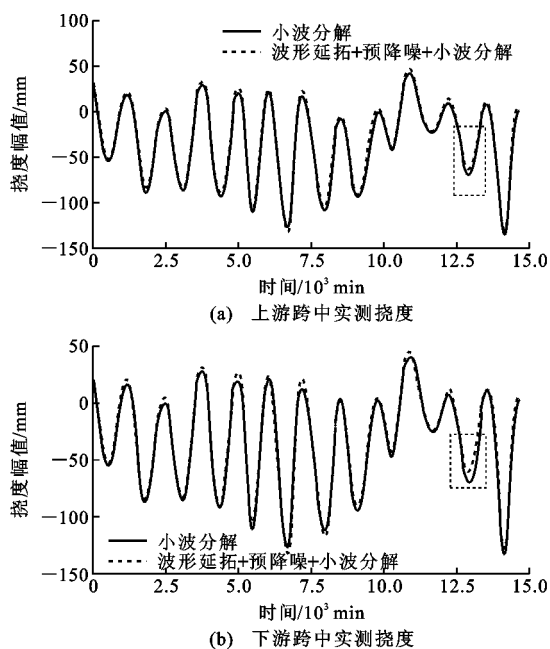


图 11 跨中实测数据降噪

Fig. 11 Denoising of Measured Data in Midspan

从图 11 可以看出,本文波形延拓+预降噪+小波分解的降噪方式比直接进行小波分解的降噪方式所得温度效应曲线整体更偏靠上一些,原因为车载作用挠度多为幅值较大的下挠,这会影响分解得到的温度效应。在车载作用较为集中的时段,所分解温度效应因混入车载作用挠度而偏低,所以本文考虑车载作用挠度的预降噪所得温度效应更接近实际温度变化。

将实测数据经过本文方式降噪后再进行 MEEMD 分解,分离得各 IMF 分量,如图 12 所示。

从图 12 可以看出:上下游跨中实测数据分解的 IMF3 分量为各自日温差效应,IMF4,IMF5 分量为各自实测数据中周期长于 1 d 的温度效应成分,IMF6 为温度效应趋势成分。分解过程中未出现明显模态混叠和虚假分量现象,分离效果较好。另外,通过对比上下游跨中实测数据分离出来的日温差效应(图 13)可知,两者相关系数为 0.994 7,均方根误差仅为 3.9 mm,可见上下游分离出来的日温差效应基本一致,这与实际情况相符,所以该算法分离效果较为可靠。

4 结 语

(1)对于柔性较大的斜拉桥,考虑端点效应、车载作用挠度的预降噪可以有效提高降噪精度,本文波形延拓+预降噪+小波分解的降噪方式比其他单一降噪方式效果更好。

(2)MEEMD 分解能够有效抑制分解过程中的模态混叠现象,适合大跨斜拉桥北斗监测挠度温度效应的分离,考虑端点效应可以进一步提高挠度各成分分离精度。

(3)BDS 实测数据中主要成分为日温差效应,还伴随有周期长于 1 d 的温度效应和温度变化趋势成分,其上下游跨中日温差效应变化基本一致,与实际相符,温度效应分离效果较好。

参考文献:

References:

- [1] SOHN H, WORDEN K, FARRAR C R. Statistical Damage Classification Under Changing Environmental and Operational Conditions[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2002, 13 (9): 561-574.
- [2] 陈德伟,荆国强,黄 峥.用人工神经网络方法估计桥梁在温度作用下的挠度行为[J]. 结构工程师, 2006, 22(4): 24-28.

CHEN De-wei, JING Guo-qiang, HUANG Zheng. Pre-

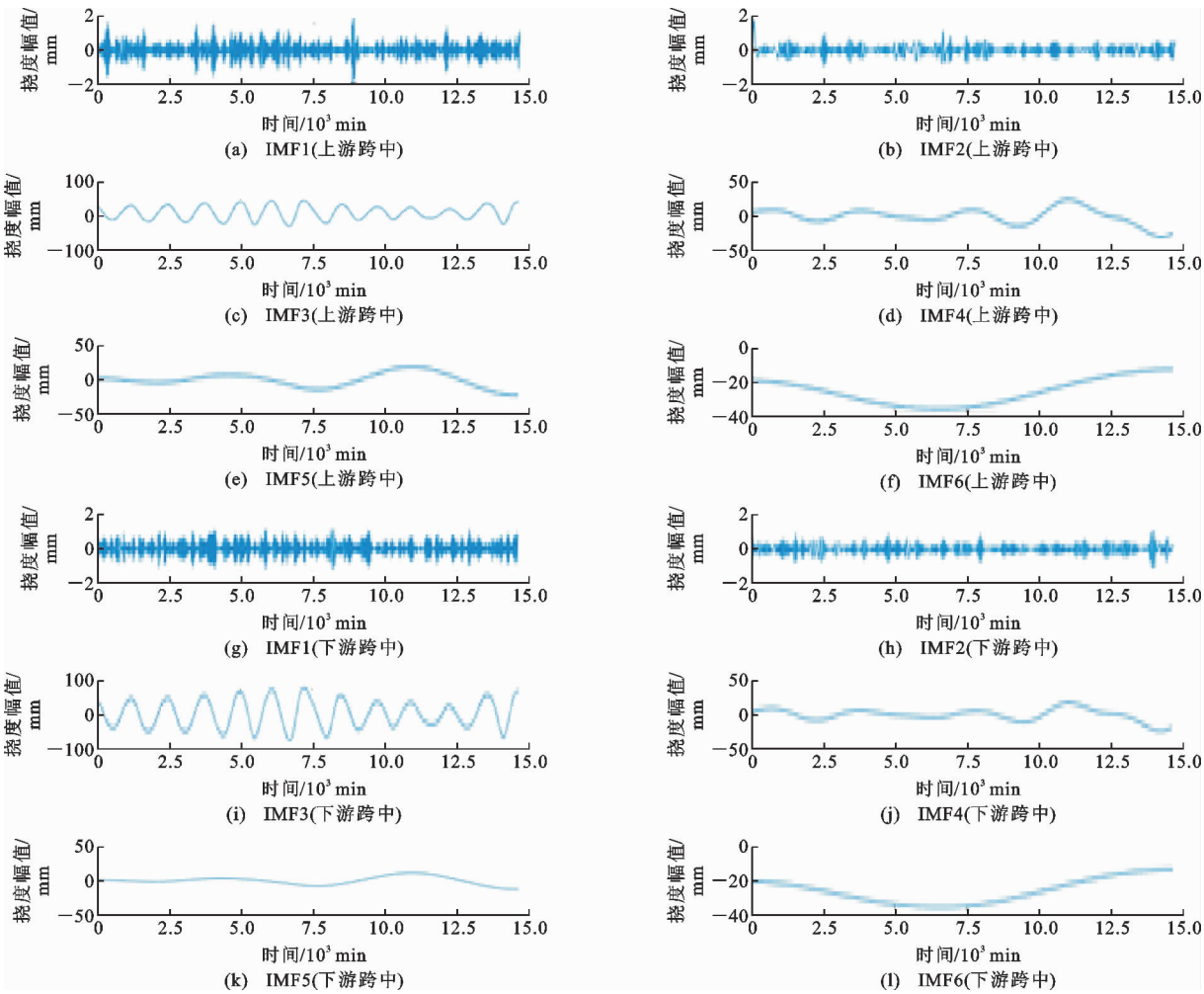


图 12 跨中实测数据温度效应分解

Fig. 12 Temperature Effect Decomposition of Measured Data in Midspan

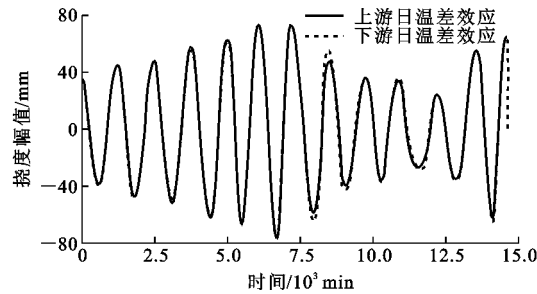


图 13 上下游跨中日温差效应对比

Fig. 13 Comparison of Temperature Difference Effect Between Upstream and Downstream Midspan

[3] 刘 纲,邵毅敏,黄宗明,等.长期监测中结构温度效应分离的一种新方法[J].工程力学,2010,27(3):55-61,100.
LIU Gang, SHAO Yi-min, HUANG Zong-ming, et al. A New Method to Separate Temperature Effect

from Long-term Structural Health Monitoring Data [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3): 55-61, 100.
[4] 陈夏春,陈德伟.多元线性回归在桥梁应变监测温度效应分析中的应用[J].结构工程师,2011,27(2): 120-126.
CHEN Xia-chun, CHEN De-wei. Application of Multiple Linear Regression Model in Analysis of Temperature Effect on Strain Monitoring for Bridge Structures [J]. Structural Engineers, 2011, 27(2): 120-126.
[5] 刘夏平,杨 红,孙 卓,等.基于LS-SVM的桥梁挠度监测中温度效应分离[J].铁道学报,2012,34(10):91-96.
LIU Xia-ping, YANG Hong, SUN Zhuo, et al. Study on Separation of Bridge Deflection Temperature Effect Based on LS-SVM [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(10): 91-96.
[6] 杨 红,孙 卓,刘夏平,等.基于多最小二乘支持向量机的桥梁温度挠度效应的分离[J].振动与冲击,

- 2014,33(1):71-76,88.
- YANG Hong,SUN Zhuo,LIU Xia-ping,et al. Separation of Bridge Temperature Deflection Effect Based on M-LS-SVM[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(1):71-76,88.
- [7] 刘夏平,杨红,孙卓,等.基于奇异值分解的桥梁挠度分离研究[J].中山大学学报:自然科学版,2013,52(3):11-16.
- LIU Xia-ping,YANG Hong,SUN Zhuo,et al. Separation Study of Bridge Deflection Based on Singular Value Decomposition[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2013,52(3):11-16.
- [8] 杨坚,刘夏平,杨红,等.桥梁结构变形中温度效应提取的一种新方法[J].广州大学学报:自然科学版,2013,12(3):38-44.
- YANG Jian,LIU Xia-ping,YANG Hong,et al. A New Method to Extract Temperature Effect from Bridge Structure Deformation[J]. Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition, 2013, 12(3):38-44.
- [9] 杨红,刘夏平,崔海霞,等.大跨径桥梁实时动态挠度信号的分离[J].振动、测试与诊断,2015,35(1):42-49,186.
- YANG Hong,LIU Xia-ping,CUI Hai-xia,et al. Separation of Real-time Dynamic Deflection Signals for Long-span Bridges[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,2015,35(1):42-49,186.
- [10] 陈国良,林训根,岳青,等.基于时间序列分析的桥梁长期挠度分离与预测[J].同济大学学报:自然科学版,2016,44(6):962-968.
- CHEN Guo-liang,LIN Xun-gen,YUE Qing,et al. Study on Separation and Forecast of Long-term Deflection Based on Time Series Analysis[J]. Journal of Tongji University:Natural Science,2016,44(6):962-968.
- [11] 郑旭,郝志勇,金阳,等.基于MEEMD的内燃机辐射噪声贡献[J].浙江大学学报:工学版,2012,46(5):954-960.
- ZHENG Xu,HAO Zhi-yong,JIN Yang,et al. Studying Noise Contributions of IC Engine via MEEMD Method[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science,2012,46(5):954-960.
- [12] HUANG N E,SHEN Z,LONG S R. A New View of Nonlinear Water Waves: The Hilbert Spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 417-457.
- [13] FLANDRIN P,RILLING G,GONCALVES P. Empirical Mode Decomposition as a Filter Bank[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2): 112-114.
- [14] WU Z H,HUANG N E. Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Noise-assisted Data Analysis Method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009,1(1):-41.
- [15] 张乐文,王洪波,邱道宏,等.小波降噪与粒子群优化综合回归爆破震动参数[J].岩土力学,2014,35(增2):338-342.
- ZHANG Le-wen,WANG Hong-bo,QIU Dao-hong,et al. Blasting Vibration Parameters Using Comprehensive Regression of Wavelet Denoising and Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(S2):338-342.
- [16] 马增强,柳晓云,张俊甲,等.VMD和ICA联合降噪方法在轴承故障诊断中的应用[J].振动与冲击,2017,36(13):201-207.
- MA Zeng-qiang,LIU Xiao-yun,ZHANG Jun-jia,et al. Application of VMD-ICA Combined Method in Fault Diagnosis of Rolling Bearings[J]. Journal of Vibration and Shock,2017,36(13):201-207.
- [17] DRAGOMIRETSKIY K,ZOSSO D. Variational Mode Decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2014,62(3):531-544.
- [18] 安庆,李岩.基于BDS的桥梁形变监测系统实现[J].测绘地理信息,2018,43(1):44-47.
- AN Qing,LI Yan. Implementation of Deformation Monitoring System About Bridge Based on BDS[J]. Journal of Geomatics,2018,43(1):44-47.
- [19] 徐爱功,韩晓东,崔希民,等.全球卫星导航定位系统原理与应用[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008.
- XU Ai-gong,HAN Xiao-dong,CUI Xi-min,et al. Principles and Applications of Global Navigation Satellite Systems[M]. Xuzhou:China University of Mining and Technology Press,2008.