

基于 TVFEMD-IMF 能量熵增量的桥梁监测数据 降噪方法*

李双江^{1,2}, 辛景舟^{1,2}, 蒋黎明^{1,2}, 刘永康³, 巴建明³, 周建庭^{1,2}

(1. 重庆交通大学省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室 重庆, 400074)

(2. 重庆交通大学土木工程学院 重庆, 400074)

(3. 中国葛洲坝集团第二工程有限公司 成都, 610091)

摘要 针对桥梁监测数据受多重噪声干扰、影响结构真实响应获取的问题,提出了一种基于时变滤波经验模态分解(time-varying filtering empirical mode decomposition,简称 TVFEMD)和本征模函数(intrinsic mode function,简称 IMF)能量熵增量的桥梁监测数据降噪方法。首先,利用 TVFEMD 分解桥梁原始监测数据,得到多个子序列;其次,采用 IMF 能量熵增量确定多个子序列中的有效子序列;然后,划分子序列中的结构响应分量和噪声分量,对结构响应分量重组实现监测数据降噪;最后,利用平均绝对误差(mean absolute error,简称 MAE)、均方根误差(root mean squared error,简称 RMSE)和信噪比(signal-noise ratio,简称 SNR)对不同方法的降噪效果进行评价。仿真算例和工程实例结果表明:TVFEMD 相比经验模态分解(empirical mode decomposition,简称 EMD),有效解决了模式混叠问题;TVFEMD 结合 IMF 能量熵增量方法,有效抑制了多重噪声影响,对结果精度有较大提升;与 EMD-IMF 能量熵增量和 Kalman 滤波降噪法相比,TVFEMD-IMF 能量熵增量法所得到降噪信号的 MAE 和 RMSE 值分别提升了 23% 和 21% 以上,降噪效果更好,信噪比提升 38% 以上,抗噪性能更佳。

关键词 桥梁;健康监测;降噪;时变滤波经验模态分解;本征模函数能量熵增量

中图分类号 TP274;TH70;U446

引言

桥梁结构服役环境复杂,监测信号干扰因素众多,影响桥梁真实结构监测数据的可靠性。因此,开展桥梁监测数据降噪研究,对于准确掌握桥梁健康状况、预测结构行为演化趋势,具有重要的科学研究意义与工程应用价值^[1]。

信号降噪方法可大致分为频域方法与时域方法。频域降噪方法通过傅里叶变换等将时域信号转换到频域,去除频域上的特定频率组分,将剩余频率的信号转换为时域,达到信号降噪的目的^[2],常见的方法有带通滤波、低通滤波等。谭冬梅等^[3]利用 FIR 低通滤波器剔除了实测信号中的车辆荷载效应与环境噪声等高频信号。杨坚等^[4]利用低通滤波剔除了活荷载效应。由于频域方法默认低频信号为有用信号,高频信号为噪声信号,因此频域降噪方法的精度有限。时域降噪方法直接从信号时程曲线上消

除信号噪声点,或者从不同尺度信息分量中选取有效分量并重构实现降噪^[5],常见的方法有 EMD、集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition,简称 EEMD)、自适应噪声完备集合模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise,简称 CEEMDAN)和小波变换(wavelet transform,简称 WT)等^[6-7]。严鹏等^[8]提出了 EMD 小波相关降噪的方法。熊春宝等^[9]提出 CEEMDAN 和 WT 相结合的方法,成功提取了桥梁真实位移。曹璐等^[5]利用 EEMD 方法成功对桥梁监测数据进行降噪。虽然小波变换能够在实测信号中提取出有效信号,但小波基函数难以选择,不同小波基的降噪效果不一致^[9]。EMD, EEMD 和 CEEMDAN 在分解信号时易产生模式混叠与端点效应等问题^[10]。相比之下,TVFEMD 在分解变换过程中不再强制要求上下包络对称,加入了时变滤波器,使信号的时变特征能够很好地保留,有效解决了

* 国家自然科学基金资助项目(52278292);重庆市杰出青年科学基金资助项目(CSTB2023NSCQ-JQX0029);贵州省交通运输厅科技资助项目(2023-122-001);重庆交通大学研究生科研创新资助项目(CYB23246)

收稿日期:2022-04-17;修回日期:2022-08-30

EMD, EEMD 易产生模态混叠、分解误差累积等问题^[11]。目前,该方法在风速预测和机械轴承故障诊断领域有一定的研究和应用^[10-12]。可见,TVFEMD 对于非线性和非平稳信号具有良好的适用效果。文献表明,桥梁监测数据具有类似数据特征^[1]。

笔者提出一种基于 TVFEMD-IMF 能量熵增量的桥梁监测数据降噪方法,引入 TVFEMD 方法来解离信号的多尺度信息,结合 IMF 能量熵增量方法准确提取有效信号,仿真算例和工程实例也证明了该方法的有效性。

1 理论方法

1.1 时变滤波经验模态分解

利用 TVFEMD 分离桥梁监测数据的多尺度信

$$\varphi'(t) = \frac{1}{A^2(t)} \left\{ \varphi_1'(t) \left(a_1^2(t) + a_1(t)a_2(t) \cos[\varphi_1(t) - \varphi_2(t)] \right) + \varphi_2'(t) \left(a_2^2(t) + a_1(t)a_2(t) \cos[\varphi_1(t) - \varphi_2(t)] \right) \right\} + \frac{1}{A^2(t)} \left\{ a_1'(t)a_2(t) \sin[\varphi_1(t) - \varphi_2(t)] - a_2'(t)a_1(t) \sin[\varphi_1(t) - \varphi_2(t)] \right\} \quad (6)$$

3) 根据 $A(t)$ 的最小值和最大值曲线得到 $\beta_1(t)$ 和 $\beta_2(t)$, 计算幅度 $a_1(t)$, $a_2(t)$, $\varphi_1'(t)$ 和 $\varphi_2'(t)$ 分别为

$$\begin{cases} \beta_1(t) = |a_1(t) - a_2(t)| \\ \beta_2(t) = a_1(t) + a_2(t) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} a_1(t) = [\beta_1(t) + \beta_2(t)]/2 \\ a_2(t) = [\beta_2(t) - \beta_1(t)]/2 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \varphi_1'(t) = \frac{\eta_1(t)}{2a_1^2(t) - 2a_1(t)a_2(t)} + \frac{\eta_2(t)}{2a_1^2(t) + 2a_1(t)a_2(t)} \\ \varphi_2'(t) = \frac{\eta_1(t)}{2a_2^2(t) - 2a_1(t)a_2(t)} + \frac{\eta_2(t)}{2a_2^2(t) + 2a_1(t)a_2(t)} \end{cases} \quad (9)$$

其中: $\eta_1(t)$ 和 $\eta_2(t)$ 通过插值求得。

局部截止频率 $\varphi'_{bis}(t)$ 为

$$\varphi'_{bis}(t) = \frac{\varphi_1'(t) + \varphi_2'(t)}{2} = \frac{\eta_2(t) - \eta_1(t)}{4a_1(t)a_2(t)} \quad (10)$$

4) 利用时变滤波器对未计算的信号进行滤波, 得到局部均值, 计算获得信号 $h(t)$, 并将最后的逼近结果记为 $m(t)$ 。

$$h(t) = \cos \left[\int \varphi'_{bis}(t) dt \right] \quad (11)$$

停止条件为

$$\theta(t) = B_{Loughlin}(t) / \varphi_{avg}(t) \quad (12)$$

其中: $B_{Loughlin}(t)$ 为 Loughlin 瞬时带宽; ξ 为带宽阈

息, 其实现过程^[10-11]如下。

1) 确定待分解信号 $x(t)$ 的瞬时幅值 $A(t)$ 和瞬时相位 $\varphi(t)$, 即

$$A(t) = \sqrt{x(t)^2 + \hat{x}(t)^2} \quad (1)$$

$$\varphi(t) = \arctan[\hat{x}(t)/x(t)] \quad (2)$$

其中: $\hat{x}(t)$ 为 $x(t)$ 的希尔伯特变换。

2) 确定幅值 $A(t)$ 的局部极大值序列 $\{t_{max}\}$ 和局部极小值序列 $\{t_{min}\}$, 对应的解析信号定义为

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = A(t)e^{j\varphi(t)} \quad (3)$$

$z(t)$ 可以定义为以下信号的组合

$$z(t) = A(t)e^{j\varphi(t)} = \alpha_1 e^{j\varphi(t)} + \alpha_2 e^{j\varphi(t)} \quad (4)$$

因此, 可获得方程

$$A^2(t) = a_1^2(t) + a_2^2(t) + 2a_1(t)a_2(t) \cos[\varphi_1(t) - \varphi_2(t)] \quad (5)$$

值; $\varphi_{avg}(t)$ 为加权均值瞬时频率。

持续更新 $x(t)$, 若信号满足 $\theta(t) \leq \xi$, 则认为 $x(t)$ 此时为 IMF 分量; 否则, 重复上述步骤直到分解完成。

Loughlin 瞬时带宽和加权平均瞬时频率的计算公式分别为

$$B_{Loughlin}(t)^2 = \frac{a_1^2(t) + a_2^2(t)}{a_1^2(t) + a_2^2(t)} + \frac{a_1^2(t)a_2^2(t)(\varphi_1'(t) - \varphi_2'(t))^2}{(a_1^2(t) + a_2^2(t))^2} \quad (13)$$

$$\varphi_{avg}(t) = \frac{a_1^2(t)\varphi_1'(t) + a_2^2(t)\varphi_2'(t)}{a_1^2(t) + a_2^2(t)} \quad (14)$$

1.2 IMF 能量熵增量

能量谱也称为能量谱密度, 表示每个状态分量在整个系统中所占能量的相对关系。笔者提出一种利用 IMF 分量的能量熵增量的方法来判断虚假的 IMF 分量。有效的 IMF 分量会占据主要能量, 而虚假的 IMF 分量占据能量的比例较小^[13]。计算步骤如下:

1) 计算第 t 个 IMF 分量的信号能量以及分解信号能量的总和, 即

$$E_{i(t)} = i(t)^2 \quad (15)$$

$$E_{i(t)} = \sum_{t=1}^n [i(t)]^2 \quad (16)$$

2) 分别对各 IMF 分量进行归一化处理 and 能量

谱求取

$$P(i) = E_{i(t)} / \sum_{i=1}^n E_{i(t)} \quad (17)$$

$$Q(i) = \log[P(i)] \quad (18)$$

其中： $i(t)$ 为第 t 个IMF分量； n 为总的IMF分量个数。

3) 对各IMF分量计算能量熵增量

$$\Delta Q(i) = -P(i) \log[P(i)] \quad (19)$$

$\Delta Q(i)$ 值越大,代表IMF分量的真实性越高,反之则为干扰IMF分量。为防止有效信号被过度剔除,笔者将判别阈值设为 $\Delta Q(i)/\mu \geq 0.85$,其中 $\mu = 0.2^{[13]}$ 。

1.3 评估标准

为了定量评估不同方法的降噪性能和效果,选取MAE, RMSE和SNR 3种评价指标^[5,9,13]。

$$\text{MAE} = \sum_{i=1}^t \frac{|l(t) - \hat{l}(t)|}{t} \quad (20)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^t \left(\frac{l(t) - \hat{l}(t)}{t} \right)^2} \quad (21)$$

其中： t 为降噪的数据量； $l(t)$ 和 $\hat{l}(t)$ 分别为原信号与降噪后得到的信号。

$l(t)$ 和 $\hat{l}(t)$ 反映了二者信号之间的差异,通常认为MAE, RMSE值越小,代表信号的重组精度就越高,即降噪效果越好。

$$\text{SNR} = 10 \lg \left(\frac{P_y}{P_n} \right) \quad (22)$$

其中： P_y 为有效信号分量的功率； P_n 为噪声成分的功率。

一般认为SNR值越大,则降噪质量就越好^[9]。

1.4 笔者提出方法

笔者提出了一种基于TVFEMD-IMF能量熵增量的桥梁监测数据降噪方法。图1为所提出方法的工作流程。

2 仿真算例

桥梁监测数据往往伴随不同频率的噪声,笔者以2个频率分别为0.5 Hz和2 Hz的正弦信号 y_1, y_2 和一个声噪比为10 dB的高斯白噪声 y_3 构造模拟信号^[9]。其中： $y_1 = 3\sin(2 \times 0.5\pi t)$ ； $y_2 = 7\sin(2 \times 2\pi t)$ ；采样频率为 $F_s = 100$ Hz,采样点数为1 000。原始信号和加噪后的信号如图2所示。

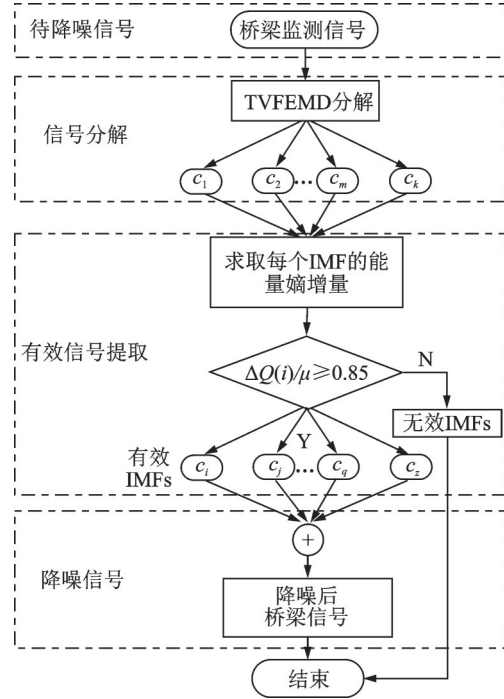


图1 所提出方法的工作流程

Fig.1 Flowchart of proposed method

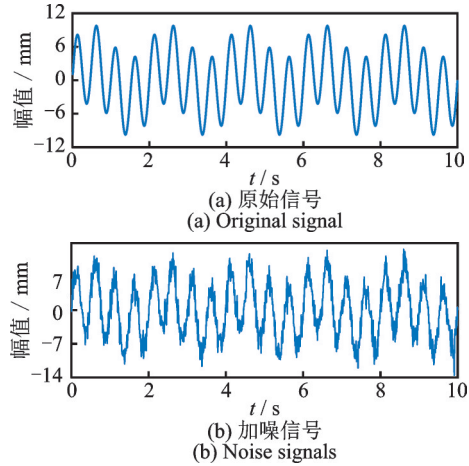


图2 原始信号及加噪后信号

Fig.2 Original signal and noise signal

2.1 仿真信号分解

为了证明本研究方法的有效性与优越性,分别利用TVFEMD与EMD方法对模拟信号进行分解,其中,TVFEMD的带宽阈值和B样条阶次参数设置参考文献[14],分别设为0.25和26。图3为2种方法的分解结果。可以看出:2种方法都能将不同频率的信号解离出来,TVFEMD得到的低频分量较为平缓,EMD得到的低频分量中发现相似的特征时间尺度分布在不同分量中,出现了模态混叠问题。

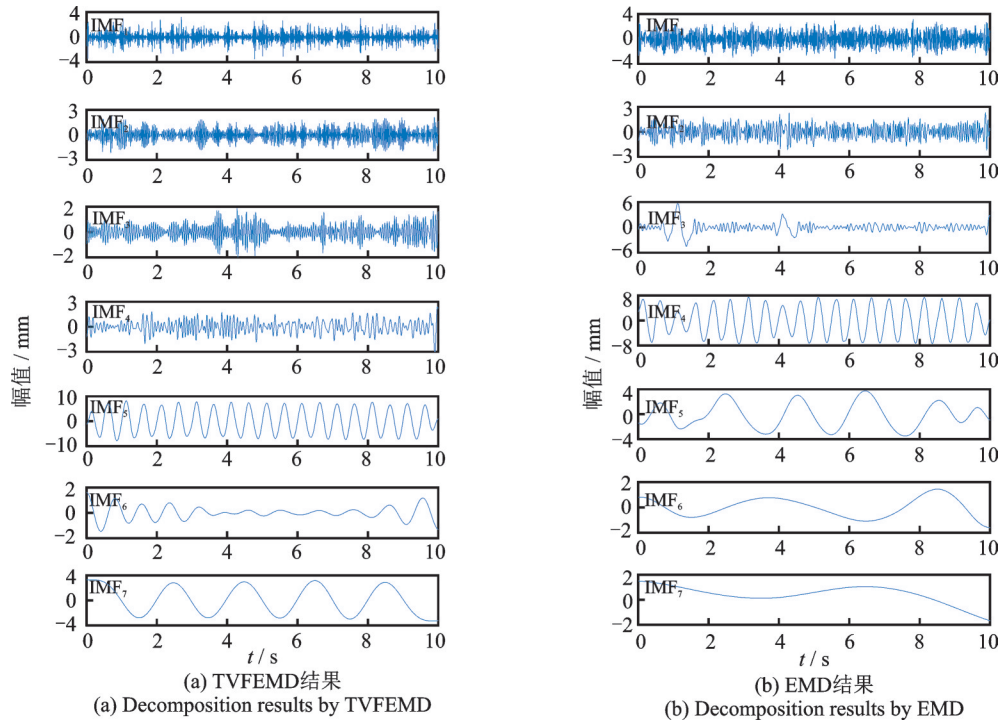


图 3 2 种方法分解结果

Fig.3 Separation results of the two methods

2.2 模拟信号降噪及评价

利用 IMF 能量熵增量求得 EMD 和 TVFEMD 结果中各 IMF 信号能量熵增量 $\Delta Q(i)$ 值,进而得到 $\Delta Q(i)/\mu$ 值,根据该值确定真实分量。表 1 为不同方法的 IMF 能量熵增量。

由表 1 可知,在 TVFEMD 得到的子序列中, IMF_5 和 IMF_7 的 $\Delta Q(i)/\mu$ 值分别为 1.052 5 和 1.436 0, 大于 0.85,故 IMF_5 和 IMF_7 为真实分量。同理,EMD

的真实分量为 IMF_4 和 IMF_5 , $\Delta Q(i)/\mu$ 值分别为 1.222 0 和 1.351 0。利用快速傅里叶变换对 IMF 能量熵增量进行计算,得到真实分量进行频谱分析。

图 4 为不同方法的有效分量频谱。由图 4 可知, 2 组信号的频率分别为 0.5 Hz 和 2.0 Hz,证明 IMF 能量熵增量可以准确筛选出模拟监测信号时输入的 0.5 Hz 和 2.0 Hz 的有效信号。EMD 与 TVFEMD 得到的有效信号的幅值均接近模拟信号预设幅值 (3 mm, 7 mm)。TVFEMD-IMF 能量熵增量法中

表 1 不同方法的 IMF 能量熵增量

Tab.1 Results of IMF energy entropy increments for different methods

模型	参数	IMF_1	IMF_2	IMF_3	IMF_4	IMF_5	IMF_6	IMF_7
TVFEMD	$\Delta Q(i)$	0.112 2	0.079 6	0.049 0	0.071 3	0.210 5	0.038 3	0.287 2
	$\Delta Q(i)/\mu$	0.561 0	0.398 0	0.245 0	0.356 5	1.052 5	0.191 5	1.436 0
EMD	$\Delta Q(i)$	0.161 3	0.078 4	0.130 5	0.244 4	0.270 2	0.073 5	0.083 6
	$\Delta Q(i)/\mu$	0.806 5	0.392 0	0.652 5	1.222 0	1.351 0	0.367 5	0.418 0

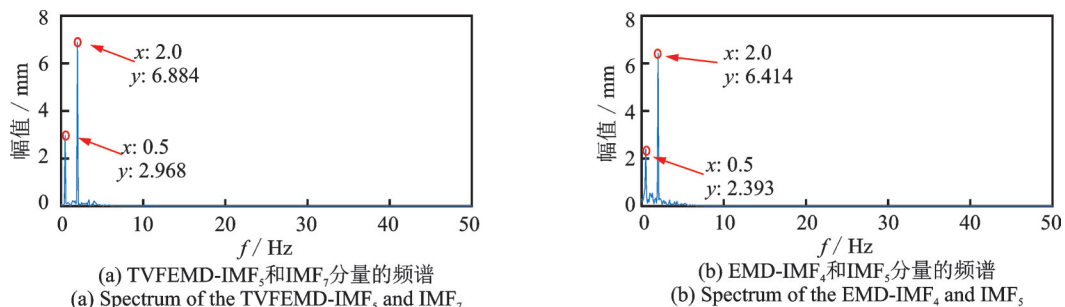


图 4 不同方法的有效分量频谱

Fig.4 Effective component spectrum of different methods

有效信号的频谱幅值为 2.968 mm 和 6.884 mm, EMD-IMF 能量熵增量法中有效信号的频谱幅值为 2.393 mm 和 6.414 mm。因此,TVFEMD 得到有效信号的幅值相对于 EMD 更加准确,相比 EMD 方法,TVFEMD 法得到的 0.5 Hz 与 2.0 Hz 信号幅值逼近效果分别提升了 24.03% 和 7.33%,表明 TVFEMD 相比 EMD 方法分解得到的信号保真度更高。将 EMD-IMF 能量熵增量法、Kalman 滤波降噪法与 TVFEMD-IMF 能量熵增量法得到的降噪信号分别同原始信号进行对比。

图 5 为不同方法降噪信号对比。由图 5 可知,所提出方法相比于 EMD-IMF 能量熵增量法、Kalman 滤波降噪法得到的降噪信号与原始模拟信号的重合度更高。利用 MAE, RMSE 和 SNR 评价参数对 EMD-IMF 能量熵增量法、Kalman 滤波与 TVFEMD-IMF 能量熵增量法的降噪信号进行降

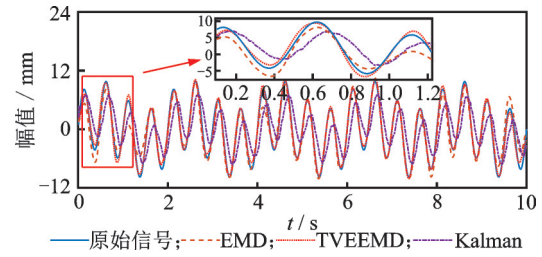


图 5 不同方法降噪信号对比

Fig.5 Comparison of noise reduction signals by different methods

噪效果评价。分别添加声噪比为 10 dB, 20 dB 和 30 dB 的高斯白噪声信号进行去噪,表 2 为不同方法下模拟信号的降噪效果。其中: $R = |\gamma_{(T)} - \gamma_{(x)}| / \gamma_{(x)} \times 100\%$; $\gamma_{(T)}$ 为 TVFEMD 计算得到的 MAE, RMSE 或 SNR; $\gamma_{(x)}$ 为对比方法计算得到的 MAE, RMSE 或 SNR。

表 2 不同方法下模拟信号的降噪效果

Tab.2 De-noise effect of simulated signals by different methods

评价参数	噪声信号 /dB	TVFEMD-IMF 能量熵增量	Kalman	EMD-IMF 能量熵增量	R/%	
					TVFEMD-Kalman	TVFEMD-EMD
MAE	10	0.467 6	3.315 3	1.105 2	85.90	57.69
	20	0.362 2	1.079 9	0.706 2	66.46	48.71
	30	0.286 8	1.313 7	0.533 1	78.17	46.20
RMSE	10	0.013 7	0.083 4	0.033 3	83.57	58.86
	20	0.010 7	0.027 4	0.021 4	60.95	50.00
	30	0.008 4	0.032 7	0.016 5	74.31	49.09
SNR	10	10.062 3	8.374 3	7.297 3	20.16	37.89
	20	18.817 3	12.352 7	13.645 3	52.33	37.90
	30	29.900 0	19.764 6	14.551 1	51.28	105.48

由表 2 可知,同 EMD-IMF 能量熵增量降噪法、Kalman 滤波降噪法相比,TVFEMD-IMF 能量熵增量法在不同声噪比高斯白噪声情况下,均取得了更优的降噪效果,降噪信号的 MAE 和 RMSE 值提升程度分别为 46.20%, 49.09% (最小提升程度)。与 EMD-IMF 能量熵增量、Kalman 滤波降噪法对比,TVFEMD-IMF 能量熵增量降噪信号的 SNR 值提升程度均高于 20.16%,说明所提方法抗噪性能更优,主要原因在于 TVFEMD 能够较大程度克服 EMD 在分解过程中产生的模态混叠等问题。

3 实例验证

3.1 工程概括

笔者选取一座钢筋混凝土箱板拱桥对所提方法

进行实桥验证。桥全长为 290.7 m,桥宽为 8.5 m,跨径组合为 $3 \times 25.0 \text{ m} + 1 \times 140.0 \text{ m} + 2 \times 25.0 \text{ m}$,矢高为 35.0 m,主拱圈矢跨比为 1/4。选取桥梁挠度监测数据进行降噪处理,此桥挠度监测测点布置在主跨 L/4, L/2 和 3L/4 处。测点布置如图 6 所示。

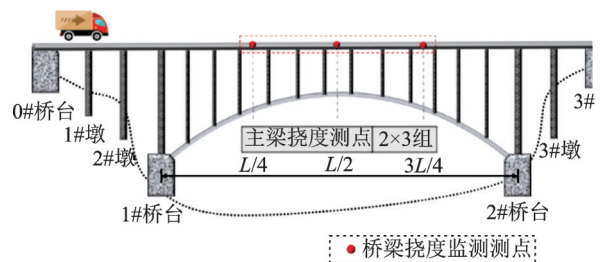


图 6 测点布置

Fig.6 Layout of measurement points

3.2 监测数据处理及评价

3.2.1 桥梁监测数据获取

采集 2020-03-02T00:00~2020-03-05T24:00 的桥梁挠度监测数据,每次采样时间间隔为 1 min,取前 50 h 的监测数据进行分析。采集得到的实测桥梁监测数据如图 7 所示。可以看出,实测桥梁竖向位移在 $[-33.51\sim 41.98]$ mm 范围变化,在实测信号中出现了 $-33.51, 30.40$ mm 等突变异常值,实测信号存在随机噪声影响。

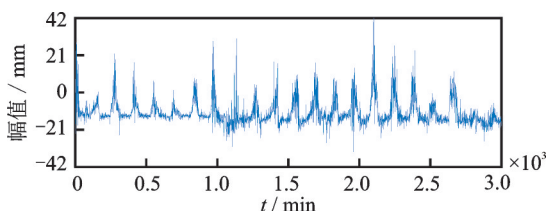


图 7 实测桥梁监测数据
Fig.7 Measured bridge monitoring data

3.2.2 监测数据降噪及评价

分别利用 EMD 和 TVFEMD 对桥梁监测数据进行分解,EMD 得到 12 个 IMF,TVFEMD 参数设置与仿真算例一致,分解得到 10 个 IMF。图 8 为 2 种方法的分解结果。可以看出,EMD 和 TVFEMD 得到的 $IMF_1\sim IMF_4$ 受噪声影响较大。

分别利用 IMF 能量熵增量计算 EMD 和 TVFEMD 得到的各分量 $\Delta Q(i)/\mu$ 值,表 3 为各分量的 IMF 能量熵增量结果。由表 3 可知,TVFEMD 得到的分量 IMF_6, IMF_7 和 IMF_{10} 的能量熵增量值分别为 0.173 6, 0.246 0 和 0.225 5, 3 个分量的 $\Delta Q(i)/\mu$ 值分别为 0.868 0, 1.230 0 和 1.127 5, 大于 0.85, 即以上 3 个信号为真实信号,其余为干扰分量。同理,EMD 得到的分量 IMF_7 和 IMF_{12} 的 $\Delta Q(i)/\mu$ 值分别为 0.885 0 和 1.217 5, 此 2 个信号为真实信号。将不同方法下的真实信号分别重组,得到降噪后的监测信号。利用 Kalman 滤波降噪法对原始信号进行降噪,将原始信号与 3 种方法得到的降噪信号进行对比。

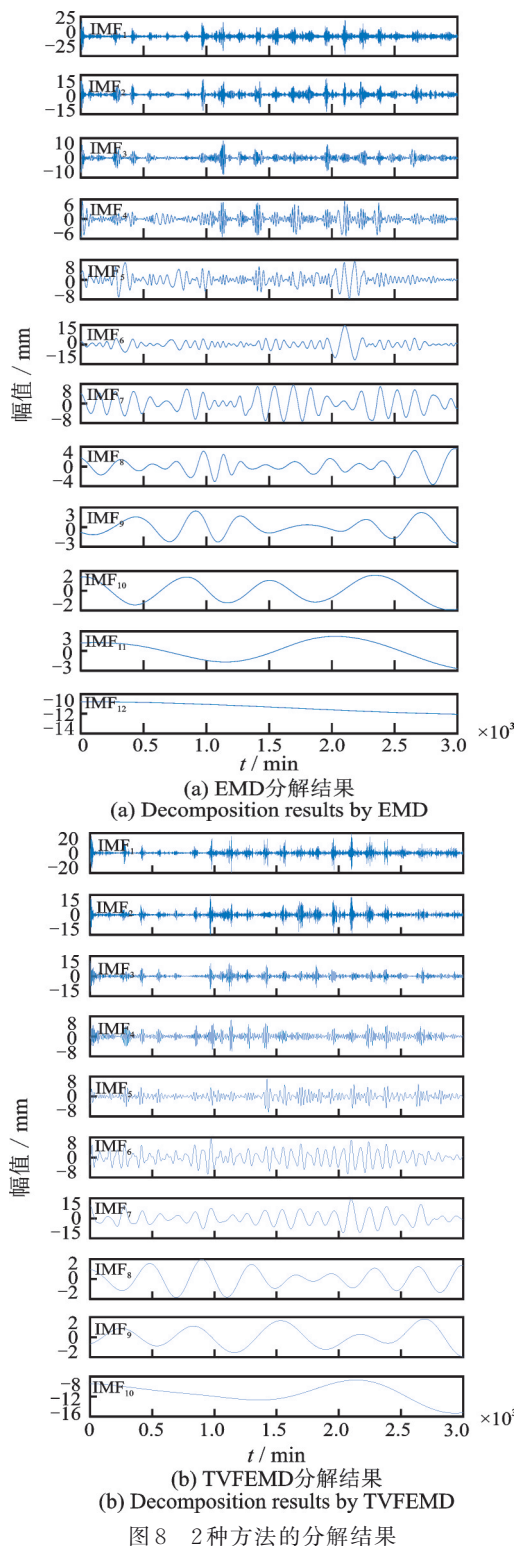


图 8 2 种方法的分解结果
Fig.8 Decomposition results of the two methods

表 3 各分量的 IMF 能量熵增量结果

Tab.3 Results of the IMF energy entropy increments for each component

模型	参数	IMF ₁	IMF ₂	IMF ₃	IMF ₄	IMF ₅	IMF ₆	IMF ₇	IMF ₈	IMF ₉	IMF ₁₀	IMF ₁₁	IMF ₁₂
TVFEMD	$\Delta Q(i)$	0.139 9	0.099 1	0.066 5	0.042 4	0.047 3	0.173 6	0.246 0	0.025 6	0.025 3	0.225 5	—	—
	$\Delta Q(i)/\mu$	0.699 5	0.495 5	0.332 5	0.212 0	0.236 5	0.868 0	1.230 0	0.128 0	0.126 5	1.127 5	—	—
EMD	$\Delta Q(i)$	0.158 7	0.092 5	0.048 2	0.048 0	0.092 3	0.157 9	0.177	0.048 3	0.038 4	0.030 4	0.047 5	0.243 5
	$\Delta Q(i)/\mu$	0.793 5	0.462 5	0.241 0	0.240 0	0.461 5	0.789 5	0.885	0.241 5	0.192 0	0.152 0	0.237 5	1.217 5

图9为监测数据降噪前、后的信号。由图9可知,经TVFEMD-IMF能量熵增量降噪后的信号竖向位移变化区间在 $[-19.82\sim 12.56]$ mm之间,所提出方法得到的降噪信号比其余方法更接近原始信号。同时,降噪信号去除了噪声和监测数据异常点,可以获得了原始信号中的有效信息。

表4为利用MAE, RMSE和SNR对实测桥梁监测数据的降噪效果。由表4可知,EMD-IMF能量熵增量、Kalman滤波降噪法得到的降噪信号的MAE和RMSE值分别为4.405 2, 3.884 4, 0.232 8和0.226 3, TVFEMD-IMF能量熵增量得到的降噪信号的MAE和RMSE分别为2.958 2和0.177 2。与EMD-IMF能量熵增量和Kalman滤波降噪2种方法得到的降噪信号相比, TVFEMD-IMF能量熵增量计算得到的降噪后信号MAE和RMSE值分别提升了23.84%和21.70%以上,所提方法对实测桥梁监测数据的降噪效果更佳。TVFEMD-IMF能量熵增量得到的降噪信号的SNR值为15.200 5,相比EMD-IMF能量熵增量、Kalman滤波降噪法相比,提升了38.45%以上,表明所提方法的抗噪性能更好。以上结果证明了所提出方法用于实桥监测数据降噪的有效性。

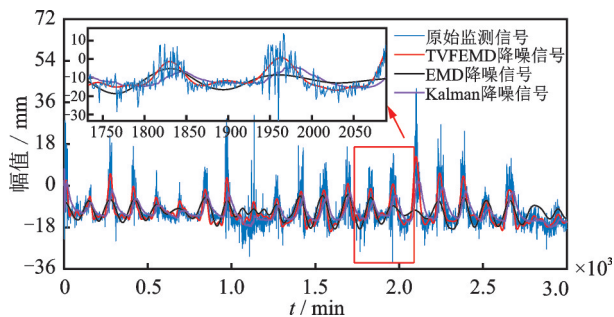


图9 监测数据降噪前、后的信号

Fig.9 Comparison of monitoring signals before and after denoise

表4 实测桥梁监测数据的降噪效果

Tab.4 Evaluation of the de-noise effect of the measured bridge monitoring data

评价参数	TVFEMD-IMF 能量熵增量	EMD-IMF 能量熵增量	Kalman	R/%	
				TVFEMD-Kalman	TVFEMD-EMD
MAE	2.958 2	4.045 2	3.884 4	23.84	26.87
RMSE	0.177 2	0.232 8	0.226 3	21.70	23.88
SNR	15.200 5	10.978 8	7.125 3	113.33	38.45

4 结论

1) TVFEMD分离模型不仅弥补了EMD分离

模型分解时易造成模态混叠等问题,还保留了信号的时变特性,具有理论上的优势。

2) 在分析复杂的桥梁监测数据时, TVFEMD-IMF能量熵增量方法更加优于EMD-IMF能量熵增量方法,较好地解决了虚假成分的干扰问题,有效去除监测数据中的异常点和噪声,更容易获得准确的桥梁结构真实响应。

3) 仿真算例证明了所提出方法对于不同强度的噪声干扰具有较好的适用性。在工程实例中, TVFEMD-IMF能量熵增量的MAE, RMSE和SNR值相对于EMD-IMF能量熵增量和Kalman滤波方法分别提升了23.84%, 21.70%和38.45%以上,证明了所提出方法用于桥梁监测数据降噪具有更高的准确性、抗噪性能和实用性。

4) 本研究方法实现了拱桥挠度监测数据的有效降噪,面向不同桥梁结构的多类型响应监测数据的降噪有效性验证与改进,将是下一步工作的主要方向。

参 考 文 献

- [1] XIN J Z, JIANG Y, ZHOU J T, et al. Bridge deformation prediction based on SHM data using improved VMD and conditional KDE[J]. Engineering Structures, 2022, 261: 114285.
- [2] 刘海江, 刘世高, 李敏. 换挡加速度信号的EMD和小波阈值降噪方法[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(2): 198-203.
LIU Haijiang, LIU Shigao, LI Min. EMD and wavelet threshold denoising method of gear-shift acceleration signals[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(2): 198-203. (in Chinese)
- [3] 谭冬梅, 刘晓飞, 柳勇, 等. 基于改进PCA和EEMD的桥梁挠度监测中温度效应分离[J]. 武汉理工大学学报, 2018, 40(3): 28-34.
TAN Dongmei, LIU Xiaofei, LIU Yong, et al. Study on separation of bridge deflection temperature effect based on improved PCA and EEMD[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2018, 40(3): 28-34. (in Chinese)
- [4] 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 Xiaping, 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. (in Chinese)
- [5] 曹璐, 解威威, 唐睿楷, 等. EEMD与WT在桥梁

- GNSS 数据降噪中的对比应用[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(4): 73-79, 281.
- CAO Lu, XIE Weiwei, TANG Ruikai, et al. Comparative application of EEMD and WT in bridge GNSS data denoising[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(4): 73-79, 281. (in Chinese)
- [6] 朱颖, 赵欣欣, 孙大奇, 等. 北斗卫星监测大跨桥梁基础变位算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(2): 168-174.
- ZHU Yin, ZHAO Xinxin, SUN Daqi, et al. An algorithm for foundation displacement of long-span bridges based on Beidou navigation satellite system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(2): 168-174. (in Chinese)
- [7] GUO J, ZHEN D, LI H, et al. Fault feature extraction for rolling element bearing diagnosis based on a multi-stage noise reduction method[J]. Measurement, 2019, 139: 226-235.
- [8] 严鹏, 李乔, 单德山. 斜拉桥健康监测信号改进小波相关降噪[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(2): 317-322.
- YAN Peng, LI Qiao, SHAN Deshan. Improved wavelet correlation de-noising on cable-stayed bridge health monitoring signal[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(2): 317-322. (in Chinese)
- [9] 熊春宝, 王猛, 于丽娜. 桥梁 GNSS-RTK 变形监测数据的 CEEMDAN-WT 联合降噪法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(9): 12-18.
- XIONG Chunbao, WANG Meng, YU Lina. CEEMDAN-WT joint denoising method for bridge GNSS-RTK deformation monitoring data[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(9): 12-18. (in Chinese)
- [10] JIANG Y, LIU S, ZHAO N, et al. Short-term wind speed prediction using time varying filter-based empirical mode decomposition and group method of data handling-based hybrid model[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 220: 113076.
- [11] LI H, LI Z, MO W. A time varying filter approach for empirical mode decomposition[J]. Signal Processing, 2017, 138: 146-158.
- [12] XU Y, CAI Z, CAI X, et al. An enhanced multipoint optimal minimum entropy deconvolution approach for bearing fault detection of spur gearbox[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(6): 2573-2586.
- [13] 周小龙, 徐鑫莉, 王尧, 等. 基于变分模态分解和最大重叠离散小波包变换的齿轮信号去噪方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(12): 265-274.
- ZHOU Xiaolong, XU Xinli, WANG Yao, et al. A gear signal de-noising method based on variational mode decomposition and maximal overlap discrete wavelet packet transform[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(12): 265-274. (in Chinese)
- [14] ZHANG X, LIU Z, MIAO Q, et al. An optimized time varying filtering based empirical mode decomposition method with grey wolf optimizer for machinery fault diagnosis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 418: 55-78.



第一作者简介:李双江,男,1996年12月生,博士生。主要研究方向为桥梁健康监测及安全评估等。

E-mail: leesnails@163.com

通信作者简介:辛景舟,男,1989年10月生,博士、教授。主要研究方向为桥梁监测、评估与预测等。

E-mail: xinjz@cqjtu.edu.cn

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价 30 元,全年 180 元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街 29 号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332

邮发代号:28-239 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdc.nuaa.edu.cn