

文章编号:1005-0523(2025)06-0051-07



斜拉索基于DD-ACMD的在线时变索力识别

杨杰¹,卞涵禛²,刘迅²,林毅标¹,卓卫东²

(1. 福建省高速技术咨询有限公司,福建福州350018; 2. 福州大学土木工程学院,福建福州350108)

摘要:为实现斜拉桥斜拉索时变索力的在线准确获取,基于数据驱动的自适应调频模式分解(DD-ACMD)算法,提出了一种斜拉索在线时变索力实时识别新方法。该方法采用滑动窗口技术更新斜拉索振动信号,通过振动信号的功率谱密度分析确定其先验信息,确定目标模态分量;之后采用DD-ACMD算法识别拉索的振动瞬时频率,并通过轴向加载梁理论计算斜拉索的时变索力。通过斜拉索数值算例检验该方法的准确性,结果表明,在高噪声水平下时变索力识别平均误差为0.45%,最大误差为1.84%。

关键词:斜拉桥;结构健康监测;在线索力识别方法;滑动窗;功率谱密度分析

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

本文引用格式:杨杰,卞涵禛,刘迅,等.斜拉索基于DD-ACMD的在线时变索力识别[J].华东交通大学学报,2025,42(6):51-57.

Online Time-Varying Cable Force Identification of Stay Cables Based on DD-ACMD

Yang Jie¹, Bian Hanzhen², Liu Xun², Lin Yibiao¹, Zhuo Weidong²

(1. Fujian Expressway Technology Consulting Co., Ltd., Fuzhou 350018, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: To achieve accurate online acquisition of time-varying cable forces in cable-stayed bridges, a new method for real-time identification of online time-varying cable forces is proposed based on the data-driven adaptive chirp mode decomposition (DD-ACMD) algorithm. This method adopts the sliding window technique to update the vibration signal of the inclined cable, and determines its prior information and target modal components through the power spectrum density (PSD) analysis of the vibration signal. Afterwards, the DD-ACMD algorithm was used to identify the instantaneous frequency of the cable vibration, and the time-varying cable force of the inclined cable was calculated using the axial loading beam theory. The accuracy of the method was tested by a numerical case of inclined cable, and the results showed that the average error in identifying the time-varying cable forces under high noise level is 0.45%, with a maximum error of 1.84%.

Key words: cable-stayed bridge; structural health monitoring; online cable force identification method; sliding window; power spectral density analysis

Citation format: YANG J, BIAN H Z, LIU X, et al. Online time-varying cable force identification of stay cables based on DD-ACMD[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(6): 51-57.

收稿日期:2025-09-11

基金项目:福建省工业引导性(重点)项目(2023H0049)

斜拉桥在长期服役过程中,受到各种可变荷载的作用,如交通荷载、波浪荷载、风荷载等,在这些可变荷载的作用下,斜拉索受力实时变化。因此,时变索力识别对于斜拉桥的结构安全评估和健康维护是至关重要的^[1]。

斜拉索的时变索力识别方法通常分为直接法和间接法两种:直接法通过力传感器直接获取索力数据,尽管其具有直接性和较高精度等优势,但也存在一些限制,例如需要在施工阶段安装,且存在更换困难、耐久性差等不足;间接方法通过分析加速度响应并求解逆问题来确定拉索索力,其可进一步分为“模型驱动”和“数据驱动”两类方法,其中后者研究更为深入,后者方法的关键是采用具有良好性能的时频分析算法得到斜拉索时变频率。Bao 等^[2]提出一种基于自适应稀疏时频算法的时变索力识别方法;刘景良等^[3-4]采用同步压缩小波变换(synchronous squeezing wavelet transform, SS-WT)、同步提取变换(synchro extracting transform, SET)等算法识别拉索的瞬时频率;Hou 等^[5]将变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)用于一座实际斜拉桥的时变索力识别;Zhang 等^[6]采用同步压缩变换(synchro squeezing transform, SST)识别斜拉索的时变索力。现有研究表明,斜拉桥时变索力识别的精度和鲁棒性主要取决于时频分析算法的选择。受海森堡不确定性原理的限制,现有时频分析方法在准确性和计算效率方面还存在较大的不足,难以应用于在役斜拉桥实时在线的时变索力识别。

对于在线的斜拉桥时变索力识别,Yu 等^[7]提出基于块递归幅值相位估计算法和频率压缩后处理技术的时频分析方法,以识别拉索的瞬时频率;通过对理论计算索力和模态频率进行拟合,得到一种在线时变索力识别方法。Yu 等^[8]还提出了递归形式的Capon方法以识别拉索的瞬时频率,并对比了3种拉索频率计算公式的准确性。Dan 等^[9]将递归带通滤波器与递归希尔伯特变换相结合,以识别拱桥吊杆的瞬时频率,进而得到吊杆的时变索力。然而,上述时频分析算法需要严格控制算法参数,影响了其在实际工程中的适用性。Liu 等^[10]基于自适应非线性调频分量分解(adaptive chirp mode decomposition, ACMD)实现了在线的斜拉桥时变索力识别,由于该方法依赖尺度空间峰值(scale space

peak picking, SSPP)确定算法的关键参数,即斜拉索振动初始频率的估计,导致其在实际工程应用中仍存在不便。

本文采用一种新颖的时频分析算法来识别斜拉索的时变频率,即数据驱动的自适应调频模式分解(data-driven adaptive chirp mode decomposition, DD-ACMD)算法^[11]。DD-ACMD 算法在识别振动信号的瞬时频率上拥有良好的准确性和计算效率,更为重要的是其可以自适应确定算法的关键参数,即振动频率初始值的估计值。通过斜拉索有限元数值案例和实际斜拉桥中的应用,验证了该方法的有效性。

1 理论基础与方法实现

1.1 滑动窗技术在线更新斜拉索振动信号

为在线更新在役斜拉桥的斜拉索振型信号,采用滑动窗对拉索振动信号进行分割,过程如图1所示。图1中 L_w 为滑动窗长度, L_s 为滑动窗步长。当新增拉索振动信号长度满足 L_s 时,滑动窗向前滑动,基于每个滑动窗数据得到时变索力结果,并将识别结果连接,连接位置取前后滑动窗重合段的中点,即图1中红色竖向虚线所示。

1.2 基于DD-ACMD算法的斜拉索瞬时频率识别

一个由 K 个模态分量组成的斜拉索振动信号 $s(t)$ ^[12]可建模为

$$s(t) = \sum_{i=1}^K s_i(t) = \sum_{i=1}^K A_i(t) \cos\left(2\pi \int_0^t f_i(\tau) d\tau + \theta_i\right) \quad (1)$$

式中: $A_i(t)$ 为第 i 个分量的瞬时幅值; $f_i(t)$ 为瞬时频率; θ_i 为初始相位。

经解调技术处理后,上式可表示为

$$s(t) = \sum_{i=1}^K a_i(t) \cos\left(2\pi \int_0^t \tilde{f}_i(\tau) d\tau\right) + b_i(t) \sin\left(2\pi \int_0^t \tilde{f}_i(\tau) d\tau\right) \quad (2)$$

式中: $a_i(t)$ 和 $b_i(t)$ 为解调信号; $\cos\left(2\pi \int_0^t \tilde{f}_i(\tau) d\tau\right)$ 和 $\sin\left(2\pi \int_0^t \tilde{f}_i(\tau) d\tau\right)$ 均为对应的解调算子; $\tilde{f}_i(t)$ 为解调算子的频率函数。其中, $a_i(t)$ 和 $b_i(t)$ 可表示为

$$\begin{cases} a_i(t) = A_i(t) \cos\left(2\pi \int_0^t (f_i(\tau) - \tilde{f}_i(\tau)) d\tau + \theta_i\right) \\ b_i(t) = -A_i(t) \sin\left(2\pi \int_0^t (f_i(\tau) - \tilde{f}_i(\tau)) d\tau + \theta_i\right) \end{cases} \quad (3)$$

若有 $\tilde{f}_i(t) = f_i(t)$,则 $a_i(t)$ 、 $b_i(t)$ 退化为纯幅度调制信号,具有最窄的带宽。DD-ACMD 通过最小化

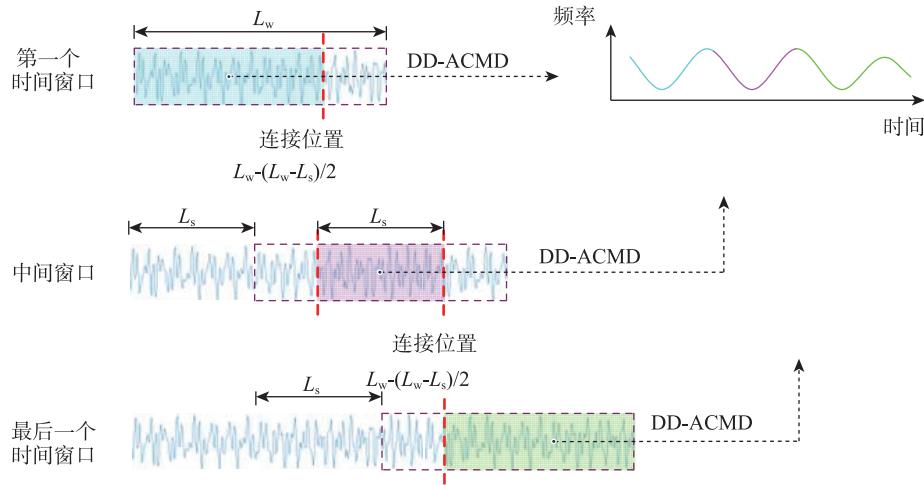


图1 滑动窗更新振动信号示意图

Fig. 1 Sliding window updating vibration signal diagram

二者的带宽提取目标分量, 目标函数为

$$\begin{cases} \min_{a_i(t), b_i(t), \tilde{f}_i(t)} \left\{ \|a''_i(t)\|_2^2 + \|b''_i(t)\|_2^2 + \alpha \|s(t) - s_i(t)\|_2^2 \right\} \\ s_i(t) = a_i(t) \cos \phi_i(t) + b_i(t) \sin \phi_i(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\|\cdot\|_2^2$ 和 $b_i(t)$ 均为解调信号的二阶导数的范数平方; α 为权重系数; $\|s(t) - s_i(t)\|_2^2$ 为信号 $s(t)$ 去除当前估计分量 $s_i(t)$ 后的剩余能量。

交替更新解调信号和频率函数, 在 j 次迭代后, $s_i(t)$ 的瞬时频率更新为

$$\mathbf{f}_i^{j+1} = \mathbf{f}_i^j + \left(\frac{1}{\beta} \boldsymbol{\Omega}^T \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{I} \right)^{-1} \Delta \tilde{\mathbf{f}}_i^j \quad (5)$$

式中: $\mathbf{f}_i^j = [\tilde{f}_i^j(t_0), \dots, \tilde{f}_i^j(t_{N-1})]^T$; 瞬时频率增量 $\Delta \mathbf{f}_i^j = [\Delta \tilde{f}_i^j(t_0), \dots, \Delta \tilde{f}_i^j(t_{N-1})]^T$; β 为惩罚系数; $\boldsymbol{\Omega}$ 为二阶差分矩阵; \mathbf{I} 为单位矩阵。

DD-ACMD 以频率从高到低的顺序依次提取信号中的各模态分量, 当求得估计分量 $\tilde{s}_i(t)$, 残余信号 $R_i(t)$ 更新为

$$R_i(t) = s(t) - \tilde{s}_i(t) \quad (6)$$

在完成对当前模态分量的提取后, 可通过时变低通滤波器(TVLP)去除该模态分量对残余信号的影响, 计算式为

$$\hat{q}(t) = TVLP[q(t)] \quad (7)$$

式中: $q(t)$ 为调频信号; $\hat{q}(t)$ 为去噪后的调频信号。

基于 $R_i(t)$ 继续进行后续迭代计算, 直至 $R_i(t)$ 小于预设值, 或得到的目标模态分量达到预设数目。在进行当前模态分量的提取前, 需要预先获得

该分量的初始频率估计, 式(1)中, 第 i 个信号模态可表示为

$$s_i(t) = A_i(t) \cos [2\pi \int_0^t f_i(\tau) d\tau + \phi_i] = A_i(t) g_i(t) \quad (8)$$

式中: $g_i(t)$ 为纯调频信号; ϕ_i 为相位函数。

进一步, 模态初始瞬时频率 $f_i(t)$ 可表示为

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \arccos[g_i(t)] \quad (9)$$

对于幅值函数变化缓慢的信号, 通过其导数增强高频模态的幅值, 同时保持其瞬时频率不变,

$$\begin{cases} s'(t) = \sum_{i=1}^K A'_i(t) \cos[\phi_i(t)] - A_i(t) \phi'_i(t) \sin[\phi_i(t)] \\ \approx \sum_{i=1}^K A_i(t) \phi'_i(t) \cos[\phi_i(t) + 0.5\pi] \\ \text{s.t. } A'_i(t) \approx 0 \end{cases} \quad (10)$$

归一化 $s'(t)$ 获得对应最高频模态的纯调频信号 $g(t)$ 为

$$g(t) = \frac{2s'(t) - [s'(e_n) + s'(e_{n+1})]}{s'(e_n) - s'(e_{n+1})} \quad (11)$$

式中: e_n 和 e_{n+1} 分别为相邻极值点的时间位置; $s'(e_n)$ 和 $s'(e_{n+1})$ 分别为对应极大值与极小值。

本文提出的TVLP方法能够降低因噪声引起的振动频率初始估计偏差。在模态分量提取过程中, 每当完成对当前目标模态分量的估计后, 该方法利用TVLP对残余信号进行滤波, 以去除高于该分量频率的噪声成分。这样不仅避免了已提取分量对后续模态估计的干扰, 也进一步抑制了噪声的影响, 从而使各个模态分量的估计均达到较高的精度。此外, 该方法基于数据驱动, 无需人工设定参

数,因而具备良好的自适应性。

1.3 斜拉索时变索力计算

通常可假定在役斜拉桥的斜拉索截面和材质均匀、且处于线弹性工作范围,忽略斜拉索的垂度和阻尼,基于轴向加载梁理论的斜拉索时变索力计算式为

$$T(t_j) = 4\bar{m}L^2 \left(\frac{f_n(t_j)}{n} \right)^2 - \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}, j=1,2,\cdots,N \quad (12)$$

式中: $T(t_j)$ 为拉索的时变索力; $f_n(t_j)$ 为 t_j 时刻拉索的第 n 阶瞬时模态频率; N 为离散斜拉索振动信号长度; L 为斜拉索的轴向长度; n 为振动模态阶次; \bar{m} 为斜拉索线质量密度。

采用 DD-ACMD 算法得到拉索的瞬时模态频率后,利用式(12)即可计算得到在役斜拉桥的斜拉索的在线时变索力。

1.4 实施步骤

步骤1:设置滑动窗的长度和步长,滑动窗在线分割数据,在线更新斜拉索振动信号;

步骤2:通过功率谱密度(power spectral density, PSD)分析确定拉索的先验信息,如斜拉索的基频以及目标模态分量;

步骤3:基于每个滑动窗中斜拉索振动信号,采用 DD-ACMD 算法识别拉索的瞬时频率,根据斜拉索基频与斜拉索模态频率之间的呈倍规律,推算斜拉索振动瞬时频率的模态阶次 n ;

步骤4:将斜拉索的瞬时频率和对应模态阶次 n 代入式(12),得到拉索的时变索力。

2 方法验证

2.1 斜拉索有限元算例

本文首先采用拉索的有限元算法验证所提方法的有效性。图2给出算例斜拉索的几何示意图,其初始索力 $T=3029$ kN, 截面积 $S=5.46 \times 10^{-3}$ m², 长度 $L=101.18$ m, $L_{OA}=90.15$ m, $L_{OB}=45.94$ m, 线质量密度 $\bar{m}=42.85$ kg/m, 弹性模量 $E=2.0 \times 10^5$ MPa, 基频为 1.318 Hz。采用 ANSYS 软件建立斜拉索有限元模型,有限元模型中斜拉索采用 LINK10 单元模拟,斜拉索被划分为 49 个单元,边界条件为两端铰接。拉索的振动激励方式为基于 Davenport 谱模拟的风荷载^[13]。在斜拉索振动过程中,调整 LINK10 单元的初应变实现索力的变化,最大索力变化幅度约为初始索力的 20%。进行瞬态分析,得到拉索下

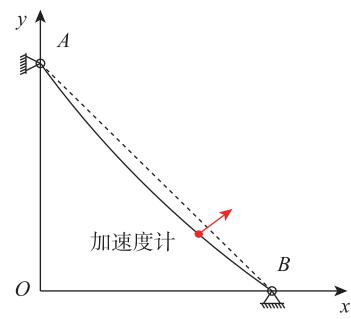


图2 斜拉索几何示意图

Fig. 2 Geometric diagram of a stay cable

四分点处垂直于斜拉索方向的加速度响应,如图3 所示,加速度采样频率为 100 Hz。

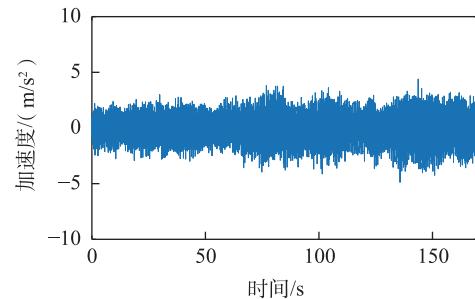


图3 斜拉索振动响应

Fig. 3 Vibration response of the stay cable

将拉索的目标识别模态限定为 3 阶,为确保索力识别的稳定性,采用滤波范围为 3.36~4.54 Hz 的带通滤波器对信号进行预处理。在加速度响应中添加信噪比(signal to noise ratio, SNR)为 5 dB 和 20 dB 的高斯白噪声,以考虑噪声对识别结果的影响,SNR 计算方式为

$$SNR = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (13)$$

式中: P_s 和 P_n 分别为信号和噪声的功率。

表1列出本文所提方法的具体参数设置。图4

表1 本文方法参数设置

Tab.1 Parameter settings of the proposed method

参数	有限元案例	实桥案例	
		DNZ02	DNZ14
权重系数 α	10^{-8}	10^{-4}	10^{-7}
迭代收敛容差 ε	10^{-8}	10^{-7}	10^{-4}
惩罚系数 β	10^{-11}	10^{-10}	10^{-10}
滑动窗口长度 L_w/m	25	25	25
滑动步长 L_s/m	7	7	7

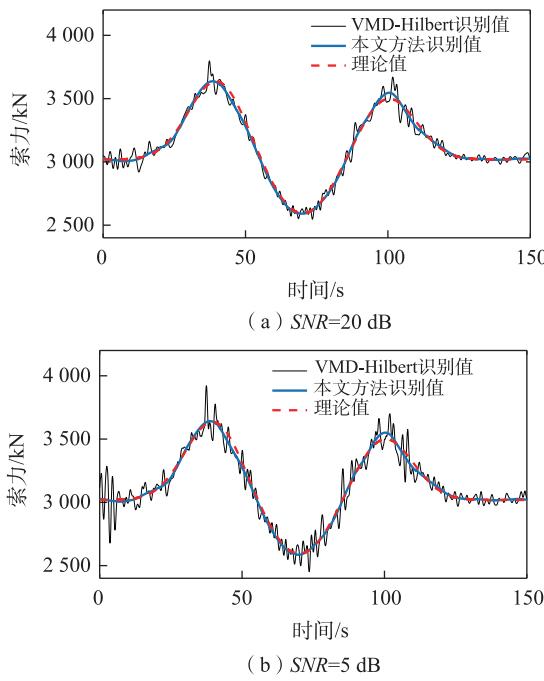


图4 时变索力识别结果

Fig. 4 Time-varying cable force identification results

同时给出本文方法和VMD-Hilbert方法的时变索力识别结果,可以看出,本文方法得到的斜拉索时变索力结果连续、光滑,与理论值有着良好的吻合度;而VMD-Hilbert方法的识别结果出现明显的振荡或跳变现象。此外,噪声强度的增加对本文方法的影响较小,而VMD-Hilbert方法受噪声影响明显。

为量化本文方法的识别精度,采用时间历程内的索力识别平均误差(AE)、最大误差(ME)作为精度指标,计算式为

$$\left\{ \begin{array}{l} AE = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\mathbf{T}_{ij} - \mathbf{T}_{aj}}{\mathbf{T}_{aj}} \right| \times 100\% \\ ME = \max \left| \frac{\mathbf{T}_{ij} - \mathbf{T}_{aj}}{\mathbf{T}_{aj}} \right| \times 100\%, \quad j = 1, 2, \dots, N \end{array} \right. \quad (14)$$

式中: N 为采样点个数; \mathbf{T}_{ij} 为识别得到的索力向量; \mathbf{T}_{aj} 为索力理论值向量或实测值向量。

为评价本文方法的实时性,采用窗口时间 T_{window} 表征计算耗时

$$T_{\text{window}} = \frac{T_{\text{total}}}{f_{\text{number}} \times N_{\text{all}}} \times N_{\text{window}} \quad (15)$$

式中: T_{total} 为方法总时间消耗; f_{number} 为目标分量数目; N_{all} 为全段信号数据量; N_{window} 为单个滑动窗口的数据量。

表2列出了本文方法与VMD-Hilbert方法的索

表2 不同方法的时变索力识别误差
Tab.2 Error in time-varying tensile force identification by different methods

方法	SNR/dB	耗时/s	T_{window}/s	AE/%	ME/%
VMD-Hilbert	20	1.81	0.30	1.07	5.00
	5	1.98	0.33	1.70	11.29
本文方法	20	6.12	1.02	0.44	1.62
	5	7.20	1.20	0.45	1.84

力识别误差结果,从表中可见,当SNR为20 dB时,本文方法的平均误差AE与最大误差ME分别为0.44%和1.62%,而VMD-Hilbert方法分别为1.07%和5.00%;当SNR为5 dB时,本文方法的平均误差AE与最大误差ME分别为0.45%和1.84%,而VMD-Hilbert方法分别为1.70%和11.29%。可见,本文方法的识别结果基本不受噪声影响,VMD-Hilbert方法的识别结果受到噪声水平的影响明显,而且与VMD-Hilbert方法相比,本文方法明显具有更高的识别精度。在耗时方面,即使当SNR为5 dB时,本文方法的 T_{window} 仅为1.20 s,远小于窗口步长($L_s=7$ s),这表明本文方法能够在下一个滑动窗口数据更新前完成当前窗口数据的分析,即本文方法能够实现在线的索力识别。

2.2 在役大跨斜拉桥案例

以一座在役公路大跨斜拉桥为案例,对本文所提方法进行检验。该斜拉桥位于福建省福鼎市,总长961 m,主跨长535 m,跨越沙埕湾海域;中跨和南边跨主梁采用封闭扁平钢箱梁,北边跨主梁采用混凝土箱梁。斜拉索采用空间扇形双索面布置形式,共设置了 $2 \times 68 = 136$ 根斜拉索。选取一根短索(DNZ02)和一根长索(DNZ14)进行分析,拉索在桥梁中的位置示意如图5所示,拉索参数信息见表3。

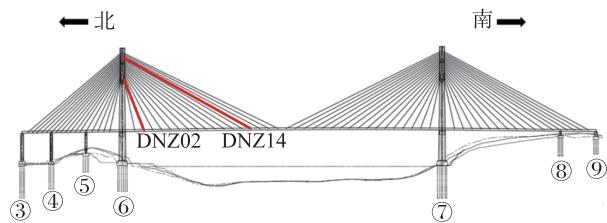


图5 沙埕湾跨海大桥
Fig. 5 Fuding Shacheng Bay Cross-Sea Bridge

图6为结构健康监测系统获取的两根拉索的加速度振动响应,其采样频率为50 Hz。选取6 min的加速度响应,通过PSD分析确定振动信号中的主要

表3 斜拉索参数

Tab.3 Stay cable parameter

拉索编号	线密度/(kg/m)	长度/m	恒载索力/kN
DNZ02	52.5	95.983	2 923.8
DNZ14	64.0	245.094	4 184.5

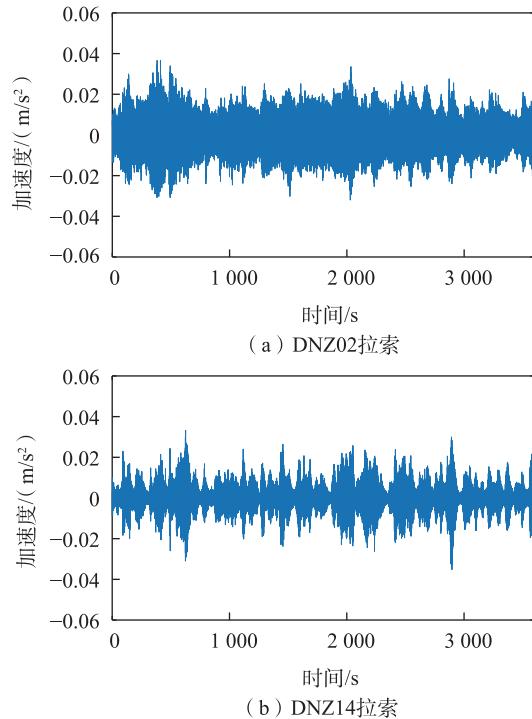
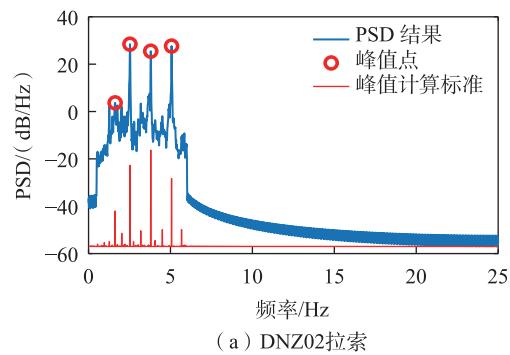


图6 斜拉索加速度响应

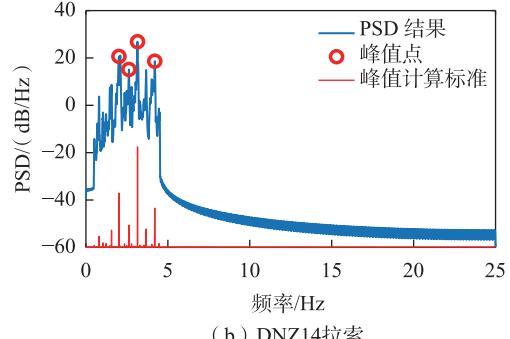
Fig. 6 Acceleration responses of the stay cables

频率成分和拉索基频,结果如图7所示。根据拉索振动的倍频特性,由图7可确定DNZ02拉索和DNZ14拉索的基频分别为1.269 Hz和0.524 Hz。为提高识别结果的稳定性,将具有高振动能量的模态作为识别目标,采用带通滤波方法,滤除目标模态范围外的成分。DNZ02拉索目标识别模态设为2阶,滤波器的通带频率设为[2.517, 2.919] Hz;DNZ14拉索目标识别模态设为6阶,滤波器的通带频率设为[2.672, 3.616] Hz。

图8为本文方法的索力识别结果,由于该斜拉桥的结构健康监测系统未在斜拉索上安装索力计,无法获取实际索力,故本文将识别结果与桥梁竣工荷载试验实测得到的恒载索力进行比较。在正常运营状态下,大跨斜拉桥结构通常处于弹性阶段,可变作用如汽车荷载等引起的斜拉索索力变化会围绕恒载索力小范围波动。从图8可以发现,在外部环境激励下,该斜拉桥的典型短索和长索的索力



(a) DNZ02拉索



(b) DNZ14拉索

图7 斜拉索加速度响应 PSD 分析

Fig. 7 PSD analysis of the acceleration responses

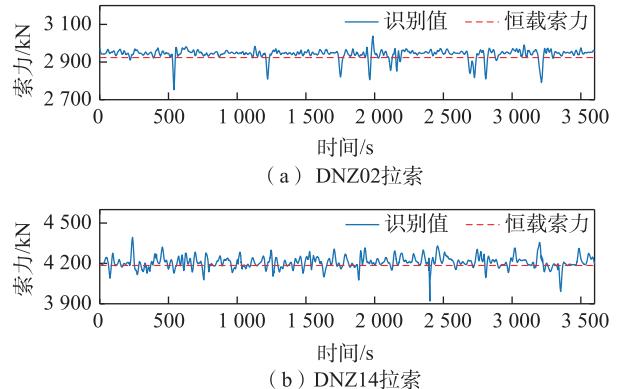


图8 斜拉桥时变索力识别结果

Fig. 8 Identification results of time-varying cable forces of the stay cables

均在一定的范围内波动,索力识别结果符合理论预期。本案例中,本文方法处理DNZ02拉索和DNZ14拉索对3 600 s监测数据的时间消耗分别为115 s和120 s, T_{window} 分别为1.60 s和1.67 s,均明显小于设定的窗口步长(7 s),表明本文方法能够在一定延时下实现在线的时变索力识别。

3 结论

本文结合DD-ACMD算法、滑动窗技术及斜拉

索振动原理,提出了一种在线斜拉索时变索力识别方法。

1) 所提方法具有良好的准确性和噪声鲁棒性。在斜拉索算例中,当SNR=5 dB下,本文方法的索力识别的平均相对误差为0.45%,最大相对误差为1.84%。

2) 在大跨斜拉桥的应用案例中,所提方法准确地揭示了斜拉索时变索力变化情况,表明本文所提方法适用于在役斜拉桥实时在线的时变索力识别。

3) 所提方法能自适应确定算法的关键参数,无需繁琐的人为干预,计算效率高,在实际工程中使用效果良好。

参考文献:

- [1] 刘迅,卓卫东,杨宁,等. 基于改进多重同步压缩算法的斜拉索时变索力识别[J]. 振动与冲击, 2023, 42(12): 212-219.
LIU X, ZHUO W D, YANG N, et al. Identification of time-varying cable force based on an improved multisynchsqueezing transform[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(12): 212-219.
- [2] BAO Y Q, GUO Y B, LI H. A machine learning-based approach for adaptive sparse time-frequency analysis used in structural health monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19(6): 1963-1975.
- [3] 刘景良,郑锦仰,林友勤,等. 变分模态分解和同步挤压小波变换识别时变结构瞬时频率[J]. 振动与冲击, 2018, 37(20): 24-31.
LIU J L, ZHENG J Y, LIN Y Q, et al. Instantaneous frequency identification of time-varying structures using variational mode decomposition and synchrosqueezing wavelet transform[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37 (20): 24-31.
- [4] 刘景良,王新宇,郑锦仰,等. 基于同步提取和时频系数模极值的瞬时频率识别[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41 (3): 519-526, 622.
LIU J L, WANG X Y, ZHENG J Y, et al. Instantaneous frequency identification based on synchroextraction and maximum modulus of time-frequency coefficients[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41 (3): 519-526, 622.
- [5] HOU S T, DONG B, FAN J H, et al. Variational mode decomposition based time-varying force identification of stay cables[J]. Applied Sciences, 2021, 11(3): 1254.
- [6] ZHANG X, PENG J Y, CAO M S, et al. Identification of instantaneous tension of bridge cables from dynamic responses: strict algorithm and applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 142: 106729.
- [7] YU X W, DAN D H. Block-wise recursive APES aided with frequency-squeezing postprocessing and the application in online analysis of vibration monitoring signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 162: 108063.
- [8] YU X W, DAN D H. Real-time cable force identification based on block recursive Capon spectral estimation method[J]. Measurement, 2023, 213: 112664.
- [9] DAN D H, HAO X M. An automatic real-time cable modal frequency identification and tracking algorithm by combining recursive band-pass filter and recursive Hilbert transform[C]//2021 4th International Symposium on Traffic Transportation and Civil Architecture (ISTTCA), Suzhou, China. New York: IEEE, 2021: 340-343.
- [10] LIU X, YANG J, ZHUO W D, et al. Real-time identification of time-varying cable force for cable-stayed bridges based on vibration monitoring[J]. Measurement, 2024, 231: 114590.
- [11] WANG H B, CHEN S Q, ZHAI W M. Data-driven adaptive chirp mode decomposition with application to machine fault diagnosis under non-stationary conditions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 188: 109997.
- [12] CHEN S Q, DONG X J, PENG Z K, et al. Nonlinear chirp mode decomposition: a variational method[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(22): 6024-6037.
- [13] DAVENPORT A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1961, 87(372): 194-211.



通信作者:杨杰(1972—),男,高级工程师,研究方向为桥梁检测和结构健康监测。E-mail:634455345@qq.com。

(责任编辑:吴海燕)