

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513719

基于多分辨奇异值分解的桥梁缆索索力 导波测定方法研究

王梓烨, 段淑玉, 孙令司, 武新军

(华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074)

摘 要: 缆索索力是评判缆索承载能力和服役寿命的重要指标。基于声弹效应的超声导波缆索索力测定方法, 在检测缆索缺陷的同时, 真实反映缆索整体应力情况, 是一种极具潜力的缆索索力测定方法。然而, 在采用超声导波进行索力测定过程中, 受缆索结构影响, 导波波形复杂, 难以准确提取声时测量需要的特征点。针对此问题, 提出基于多分辨奇异值分解的桥梁缆索索力导波测定方法。该方法基于二分递推原理, 构建一种新型二分递推矩阵, 结合多分辨奇异值分解 (MRSVD), 采用滑窗处理方法对信号进行分段处理, 获取一种新的回波声时定位特征量—奇异相关值 (SCV), 该特征量能够有效表征窗内信号与直达波信号之间的相关性。通过构建奇异相关值谱, 实现缆索端部回波声时的高精度提取。为验证方法有效性, 选用 $\phi 5-55$ 丝平行钢丝索试件, 在 0~500 kN 索力范围内开展缆索索力测定实验。实验结果表明, 对于规格为 $\phi 5-55$ 丝带锚头平行钢丝索, 在不同索力条件下, 该方法在降低噪声干扰同时, 能有效提取缆索端部回波声时实现导波波速测量, 并进行索力测定, 索力测定结果与实际测量索力之间相对误差在 10% 以内, 与互相关法相比, 该方法在声时提取精度和抗干扰方面均表现出优势, 为桥梁缆索索力测定提供新的特征提取途径。

关键词: 缆索索力; 超声导波; 多分辨奇异值分解; 奇异相关值; 声时

中图分类号: TH70 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4

Research on measurement method of bridge cable tension with guided wave based on multi-resolution singular value decomposition

Wang Ziyi, Duan Shuyu, Sun Lingsi, Wu Xinjun

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Cable tension is a critical indicator for evaluating the load-bearing capacity and service life of cable structures. Among various non-destructive testing methods, ultrasonic guided wave-based tension measurement-rooted in the acoustoelastic effect-has shown significant promise. This technique not only enables defect detection but also offers accurate assessment of the cable's overall stress state. However, in practical applications, the complex waveform characteristics of guided waves-caused by the cable's structural intricacies-poses challenges in extracting precise acoustic time-of-flight feature points. To address this problem, this study proposes a novel cable tension measurement method based on multi-resolution singular value decomposition (MRSVD). The approach constructs a new binary recursive matrix using a dichotomous recursion strategy, integrated with MRSVD. A sliding window technique is employed to segment the signal, enabling extraction of a newly defined echo localization feature-the singular correlation value (SCV). This metric effectively quantifies the correlation between the segmented signal and its corresponding echo. By constructing the SCV spectrum, the method achieves high-precision localization of the echo arrival time at the cable end. To validate the proposed approach, guided wave experiments were conducted on $\phi 5 \sim 55$ parallel steel wire cables with anchor heads under varying tension conditions. The results demonstrate that the method accurately identifies echo signals at the cable anchorage zone, enabling calculation of guided wave velocity and corresponding cable tension. The relative error between the measured and actual cable tension values remains within 10%. A comparative analysis with the conventional cross-correlation method highlights the superior performance of the proposed technique in both measurement accuracy and noise resistance, offering a novel and effective technical solution for cable tension evaluation.

Keywords: cable tension; ultrasonic guided wave; multi-resolution singular value decomposition; singular correlation value; acoustic time

0 引言

缆索具有强度高、质量轻等特点,广泛应用于大型跨江、跨海斜拉桥。缆索作为大桥中关键承载构件,自身状态影响着整座桥梁的使用安全和服役寿命。然而,在服役过程中,缆索不可避免会发生衰退和损伤,导致整体结构承载能力下降,引发安全事故。因此,为了防止桥梁突发性事故发生,及时掌握缆索受力情况,对缆索索力进行在役检测十分必要。国内外目前主要采用的在役缆索索力测定方法有磁弹法^[1-3]、光纤光栅检测法^[4-6]、振频法^[7-9]等。相比于其他方法,基于声弹效应的超声导波法^[10-11]具有单点激励和检测效率高等特点。另外,导波由于覆盖面广、传播距离长和传播平行于介质边界等特点,能在检测缆索缺陷的同时,反映缆索应力情况,具有广阔的应用前景。

超声导波在不同应力水平下的波导中传播时,其传播速度会发生变化,即导波的声弹性效应。将声弹效应应用于缆索索力测定的关键在于导波声时的准确获取,并据此计算导波波速,通过波速的变化反映缆索整体应力变化情况。声时测量有多种方法,如幅值法、过零检测法、互相关法、特征结构法和时频分析法等。刘增华等^[12]采用导波在钢绞线上开展声弹效应实验,以两个波包幅值的时间差作为声时计算导波群速度。卢小明等^[13]进行钢绞线张拉实验,通过导波首波峰值点计算首波波速,结果表明首波波速随张拉力的增大呈线性下降关系。Mažeika 等^[14]选取两个波包中同相位零点位置来计算兰姆波相速度。Draudviliene 等^[15]采用过零检测法和谱分解法,从均匀和非均匀平板介质中提取兰姆波相速度曲线。何星亮等^[16]采用经验小波对导波信号进行模态分解,有效获取了信号中特定模态下导波群速度,并使用该群速度进行螺栓轴向应力测量。丁旭等^[17]分析了互相关法中误差产生原因,并提出了基于互谱相位误差频域加权窗函数的误差抑制方法,极大提高了声时测量精度。基于维格纳时频分布方法,Chen 等^[18]研究了钢绞线中导波各频率分量的传播时间随应力变化情况,证明了导波应用于应力检测的可行性。针对复合板材中缺陷回波难以定位的问题,Zheng 等^[19]提出了具有各向异性补偿的双阵列导波多信号分类聚焦方法,通过提取损伤回波次波峰段协方差矩阵的噪声子空间完成了损伤回波信号聚焦定位。刘稳等^[20]提出一种适用于多层结构的损伤存在概率成像方法并结合虚拟时间反转技术,对多层异质金属粘接结构的内表面缺陷进行无基准的检测

和定位。针对缆索导波声时测量问题,以上方法都存在各自的局限性。其中,互相关法、幅值法和过零检测法等易受噪声影响,时频分析法存在时频分辨率问题,特征结构法需要多组相互独立的信号。在复杂的缆索结构中,受多模态和噪声影响,缆索端部回波信号混叠和衰减严重,导致导波声时难以测定,给缆索索力测定提出巨大挑战。

多分辨奇异值分解(multi-resolution singular value decomposition, MRSVD)是一种基于奇异值分解的多分辨分析信号处理方法,广泛应用于图像处理^[21-22]、故障诊断^[23-24]和地质监测^[25]等领域。MRSVD 主要将复杂信号分解为与原始信号相关性较小的细节信号和与原始信号相关性较大的近似信号^[26]。根据此特性,基于 MRSVD 和一种新型二分递推矩阵形式,在去除信号噪声同时,提取一种新的回波声时定位特征量—奇异相关值(singular correlation value, SCV),并通过奇异相关值谱进行缆索导波声时测量,根据所测声时计算导波波速以实现缆索索力测定。

1 理论分析

1.1 MRSVD 二分递推原理

MRSVD 是一种基于奇异值分解的多分辨信号处理方法。该方法通过一种二分递推矩阵形式,将复杂信号在不同层次的矢量空间上进行分解,得到一系列具有不同概貌特征的近似和细节信号^[22]。将原始信号 $\mathbf{A}_0 = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ 构造矩阵,即:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} x_1, x_2, \dots, x_{N-1} \\ x_2, x_3, \dots, x_N \end{pmatrix} \quad (1)$$

对 $\mathbf{H} \in \mathbf{R}^{(N-1) \times 2}$ 进行奇异值分解,得到:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T \quad (2)$$

式中: $\mathbf{U}$ 为左奇异向量; $\mathbf{V}$ 为右奇异向量; $\mathbf{\Lambda}$ 为奇异值矩阵, $\mathbf{\Lambda} = (\text{diag}(\lambda_1, \lambda_2), \mathbf{0})$, λ_1 为近似奇异值,对应两个奇异值中较大者, λ_2 为细节奇异值,对应两个奇异值中较小者。通过近似和细节奇异值,可以得到两个分量信号,分别为近似信号和细节信号。将近似信号构造为式(1)所示结构的矩阵进行进一步分解,得到不同层次的细节信号和近似信号。令 $j-1$ 次分解后的近似信号为 $\mathbf{A}_{j-1} = (a_{j-1,1}, a_{j-1,2}, \dots, a_{j-1,N})$, 其构造的矩阵为:

$$\mathbf{H}_j = \begin{pmatrix} a_{j-1,1}, a_{j-1,2}, \dots, a_{j-1,N-1} \\ a_{j-1,2}, a_{j-1,3}, \dots, a_{j-1,N} \end{pmatrix} \quad (3)$$

对其进行奇异值分解,得到:

$$\mathbf{H}_j = \mathbf{U}_j \mathbf{\Lambda}_j \mathbf{V}_j^T \quad (4)$$

式中: $\mathbf{U}_j$ 为左奇异向量, $\mathbf{U}_j = (\mathbf{u}_{j,1}, \mathbf{u}_{j,2})$, $\mathbf{U}_j \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$; $\mathbf{V}_j$ 为右奇异向量, $\mathbf{V}_j = (\mathbf{v}_{j,1}, \mathbf{v}_{j,2}, \dots, \mathbf{v}_{j,N-1})$, $\mathbf{V}_j \in \mathbb{R}^{N-1 \times N-1}$; 将矩阵 $\mathbf{H}_j$ 展开,得到:

$$\mathbf{H}_j = \mathbf{H}_{j,a} + \mathbf{H}_{j,d} = \lambda_{j,1} \mathbf{u}_{j,1} \mathbf{v}_{j,1}^T + \lambda_{j,2} \mathbf{u}_{j,2} \mathbf{v}_{j,2}^T \quad (5)$$

式中: $\mathbf{u}_{j,i} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$, $\mathbf{v}_{j,i} \in \mathbb{R}^{N-1 \times 1}$, $i = 1, 2$; $\mathbf{H}_{j,a}$ 为近似奇异值相对应近似矩阵, $\mathbf{H}_{j,d}$ 为细节奇异值相对应细节矩阵。近似和细节矩阵形式为:

$$\mathbf{H}_{j,a} = \lambda_{j,1} \mathbf{u}_{j,1} \mathbf{v}_{j,1}^T = \begin{pmatrix} \overbrace{a_{j,1,1}, a_{j,1,2}, \dots, a_{j,1,N-1}}^{L_{j,a,1}} \\ \underbrace{a_{j,2,1}, a_{j,2,2}, \dots, a_{j,2,N}}_{L_{j,a,2}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{H}_{j,d} = \lambda_{j,2} \mathbf{u}_{j,2} \mathbf{v}_{j,2}^T = \begin{pmatrix} \overbrace{d_{j,1,1}, d_{j,1,2}, \dots, d_{j,1,N-1}}^{L_{j,d,1}} \\ \underbrace{d_{j,2,1}, d_{j,2,2}, \dots, d_{j,2,N}}_{L_{j,d,2}} \end{pmatrix} \quad (7)$$

为了充分提取近似信号信息,令 j 次分解后的近似信号 $\mathbf{A}_j$, 细节信号 $\mathbf{D}_j$ 为:

$$\mathbf{A}_j = (a_{j,1,1}, (L_{j,a,1} + L_{j,a,2})/2, a_{j,2,N}) \quad (8)$$

$$\mathbf{D}_j = (d_{j,1,1}, (L_{j,d,1} + L_{j,d,2})/2, d_{j,2,N}) \quad (9)$$

依据递推原理,可以得到 $j-1$ 次分解后的信号 $\mathbf{A}_{j-1}$ 为:

$$\mathbf{A}_{j-1} = (a_{j-1,1,1}, (L_{j-1,a,1} + L_{j-1,a,2})/2, a_{j-1,2,N}) \quad (10)$$

多分辨分解的思想中,重要的一点是能通过所有细节信号和 N 次迭代后近似信号重新还原为原始信号。由式 (5) 可得:

$$\mathbf{A}_{j-1} = \mathbf{A}_j + \mathbf{D}_j \quad (11)$$

通过式 (11) 的递推关系,从所有细节信号和 N 次迭代后近似信号中重建原始信号 $\mathbf{A}_0$, 即:

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{A}_N + \sum_{j=1}^N \mathbf{D}_j \quad (12)$$

1.2 新型 MRSVD 二分递推矩阵

基于上述的二分递推原理,提出一种新型 MRSVD 二分递推矩阵。令原始信号 $\mathbf{A}_0 = (a_{0,1}, a_{0,2}, \dots, a_{0,N})$ 引入一组参考信号 $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)$, 构造的矩阵为:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} a_{0,1} & a_{0,2} & \dots & a_{0,N} \\ y_1 & y_2 & \dots & y_N \end{pmatrix} \quad (13)$$

使 $j-1$ 次分解后信号为 $\mathbf{A}_{j-1} = (a_{j-1,1}, a_{j-1,2}, \dots, a_{j-1,N})$, 其构造的矩阵为:

$$\mathbf{H}_j = \begin{pmatrix} a_{j-1,1} & a_{j-1,2} & \dots & a_{j-1,N} \\ y_1 & y_2 & \dots & y_N \end{pmatrix} \quad (14)$$

对其进行奇异值分解,得到:

$$\mathbf{H}_j = \mathbf{U}_j \mathbf{\Lambda}_j \mathbf{V}_j^T \quad (15)$$

式中: $\mathbf{U}_j$ 为左奇异向量, $\mathbf{U}_j = (\mathbf{u}_{j,1}, \mathbf{u}_{j,2})$, $\mathbf{U}_j \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$; $\mathbf{V}_j$ 为右奇异向量, $\mathbf{V}_j = (\mathbf{v}_{j,1}, \mathbf{v}_{j,2}, \dots, \mathbf{v}_{j,N-1})$, $\mathbf{V}_j \in \mathbb{R}^{N-1 \times N-1}$; 将

矩阵 $\mathbf{H}_j$ 展开,得到:

$$\mathbf{H}_j = \mathbf{H}_{j,a} + \mathbf{H}_{j,d} = \lambda_{j,1} \mathbf{u}_{j,1} \mathbf{v}_{j,1}^T + \lambda_{j,2} \mathbf{u}_{j,2} \mathbf{v}_{j,2}^T \quad (16)$$

$$\mathbf{H}_{j,a} = \lambda_{j,1} \mathbf{u}_{j,1} \mathbf{v}_{j,1}^T = \begin{pmatrix} \overbrace{a_{j,1,1}, a_{j,1,2}, \dots, a_{j,1,N}}^{L_{j,a,1}} \\ \underbrace{a_{j,2,1}, a_{j,2,2}, \dots, a_{j,2,N}}_{L_{j,a,2}} \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{H}_{j,d} = \lambda_{j,2} \mathbf{u}_{j,2} \mathbf{v}_{j,2}^T = \begin{pmatrix} \overbrace{d_{j,1,1}, d_{j,1,2}, \dots, d_{j,1,N}}^{L_{j,d,1}} \\ \underbrace{d_{j,2,1}, d_{j,2,2}, \dots, d_{j,2,N}}_{L_{j,d,2}} \end{pmatrix} \quad (18)$$

为了保持新型矩阵的二分递推性,令 j 次分解后的信号为:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_j = \mathbf{L}_{j,a,1} \\ \mathbf{D}_j = \mathbf{L}_{j,d,1} \end{cases} \quad (19)$$

根据奇异值分解合成原理,可以得到 j 次分解后的 2 行矩阵 $\mathbf{H}_j$ 为:

$$\mathbf{H}_j = \mathbf{H}_{j,a} + \mathbf{H}_{j,d} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{j-1} \\ \mathbf{Y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{L}_{j,a,1} + \mathbf{L}_{j,d,1} \\ \mathbf{L}_{j,a,2} + \mathbf{L}_{j,d,2} \end{pmatrix} \quad (20)$$

因此,在 j 和 $j-1$ 次分解后的信号 $\mathbf{A}_j$ 和 $\mathbf{A}_{j-1}$ 之间建立递推关系,即:

$$\mathbf{A}_{j-1} = \mathbf{L}_{j,a,1} + \mathbf{L}_{j,d,1} = \mathbf{A}_j + \mathbf{D}_j \quad (21)$$

通过式 (21) 的递推关系,可以从所有细节信号和 N 次迭代后近似信号中重建原始信号 $\mathbf{A}_0$, 得到如图 1 所示的多分辨奇异值分解过程。

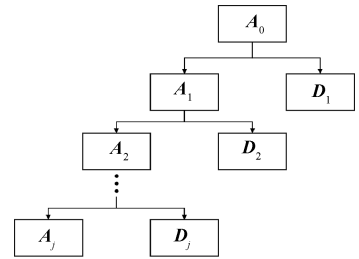


图 1 原始信号的 MRSVD 过程

Fig. 1 MRSVD process of the original signal

1.3 基于 MRSVD 的声时测定原理

互相关法是目前应用最为广泛的声时测定方法之一,其原理是通过评估回波信号与基准信号的相似程度来计算声时,其中相似程度最大处的时间偏移量为所估计的声时,但该方法易受噪声影响。MRSVD 是基于相关性的去噪方法,因此,利用 MRSVD 提取特征量来衡量接收信号与基准信号之间相关程度是一种高度可行方法。令基准信号 $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)$, 接收信号中回波信号片段 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ 。 N 为时间序列长度,为便于计算, N 一般取奇数。其中,无噪声和频散影响的回波信号与基准信号的关系可表示为:

$$\mathbf{X} = \alpha \mathbf{Y} \quad (22)$$

式中: α 为回波信号与基准信号之间的幅值系数。构造矩阵 $\mathbf{H}$, 即:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_N \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha y_1 & \alpha y_2 & \cdots & \alpha y_N \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_N \end{pmatrix} \quad (23)$$

对矩阵 $\mathbf{H}$ 进行奇异值分解, 得到:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T = \mathbf{U} \begin{pmatrix} \sqrt{(1 + \alpha^2)} \mathbf{Y} \mathbf{Y}^T & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \mathbf{V}^T \quad (24)$$

可以得到唯一非零奇异值 $\lambda = \sqrt{(1 + \alpha^2)} \mathbf{Y} \mathbf{Y}^T$ 。该奇异值一定程度上反映了回波信号能量。当回波信号中存在噪声和频散影响时, 可以将其表示为:

$$\mathbf{X}_d = \alpha \mathbf{Y} + \mathbf{D} \quad (25)$$

式中: $\mathbf{D}$ 为回波信号中的加性干扰序列, $\mathbf{D} = (d_1, d_2, \cdots, d_N)$; $\mathbf{X}_d$ 为带有干扰的回波信号段。构造如式 (26) 的矩阵, 即:

$$\mathbf{H}_d = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_N \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha y_1 + d_1 & \alpha y_2 + d_2 & \cdots & \alpha y_N + d_N \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_N \end{pmatrix} \quad (26)$$

对矩阵 $\mathbf{H}_d$ 进行奇异值分解, 得到:

$$\mathbf{H}_d = \mathbf{U}_d \mathbf{\Lambda}_d \mathbf{V}_d^T = \mathbf{U}_d \begin{pmatrix} \lambda_{j,1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_{j,2} & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \mathbf{V}_d^T \quad (27)$$

将时间序列 $\mathbf{X}_d$ 经过 j 次分解后所构造矩阵记作 $\mathbf{H}_{d,j}$, 令其近似信号 $\mathbf{A}_{d,j}$ 所对应近似奇异值为 $\lambda_{j,1}$, 细节信号 $\mathbf{D}_{d,j}$ 所对应细节奇异值为 $\lambda_{j,2}$ 。对于相关程度较高的回波信号, 两个奇异值满足如式 (28) 所示条件。

$$\begin{cases} \lambda \leq \lambda_{j,1} \leq \lambda_{j-1,1} \leq \cdots \leq \lambda_{1,1} \\ 0 \leq \lambda_{j,2} \leq \cdots \leq \lambda_{d,2} \ll \lambda_{1,2} \end{cases} \quad (28)$$

在 MRSVD 过程中, 一部分噪声能量被分离到细节信号 $\mathbf{D}_{d,j}$ 中, 而近似信号 $\mathbf{A}_{d,j}$ 仍保留一定程度噪声。通过重新引入基准信号 $\mathbf{Y}$, 构造矩阵 $\mathbf{H}_{d,j+1}$ 进行奇异值分解, 进一步分离噪声。随着分解的次数增加, 噪声能量逐渐变小。则有:

$$\begin{cases} \lim_{j \rightarrow \infty} \lambda_{j,1} = \lambda \\ \lim_{j \rightarrow \infty} \lambda_{j,2} = \varepsilon \end{cases} \quad (29)$$

式中: ε 为很小的正数。对于相关程度较高的回波信号, 根据奇异值分解原理, 矩阵 $\mathbf{H}_{d,j}$ 两个奇异值中近似奇异值 $\lambda_{j,1}$ 趋于 $\lambda = \sqrt{(1 + \alpha^2)} \mathbf{Y} \mathbf{Y}^T$, 细节奇异值 $\lambda_{j,2}$ 趋于 0。当时间序列 $\mathbf{X}_d$ 为噪声信号时, $\mathbf{X}_d$ 与基准信号 $\mathbf{Y}$ 相关程度较小, 其矩阵 $\mathbf{H}_{d,j}$ 两个奇异值将不再满足式 (29)。因此, 提出一种新的特征量—SCV 来衡量回波信号与基准信号的相关程度, 即:

$$\psi_j = \rho \lambda_{j,1} (\lambda_{j,1} - \lambda_{j,2}) \quad (30)$$

式中: ψ_j 为经过 j 次分解后的 SCV; 近似奇异值 $\lambda_{j,1}$ 主要反映回波信号能量大小; 近似奇异值 $\lambda_{j,1}$ 与细节奇异值

$\lambda_{j,2}$ 之间差值反映回波信号与基准信号之间的相关程度; ρ 为中心修正系数, $\rho = a_{\max} - a_m$, $a_{\max}$ 为时间序列中最大值, a_m 为时间序列中位于 $(N + 1)/2$ 处幅值大小。对于导波信号, 采用信号中心处进行声时定位。

采用滑窗的方式, 计算不同时间位置处 j 次分解后的 SCV, 得到奇异相关值谱, 奇异相关值谱中特征量最大处的时间偏移量为所估计的声时。

1.4 奇异相关值谱计算过程

基于 MRSVD 的声时测定方法的核心在于计算接收信号的奇异相关值谱, 其计算流程如图 2 所示。

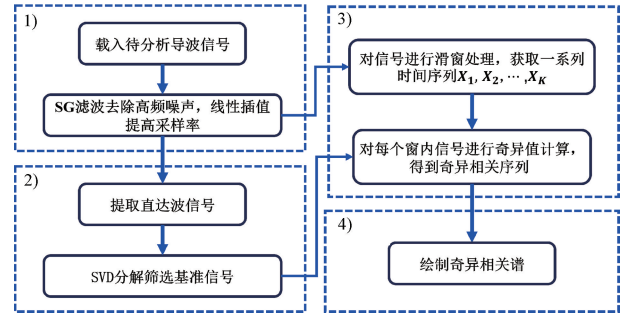


图2 奇异相关值谱计算流程

Fig. 2 Calculation process of singular correlation value spectrum

具体计算步骤为:

1) 载入如图 3 所示的待分析实测缆索导波信号, 并对导波信号进行预处理。首先, 采用 SG 滤波法降低高频噪声。然后, 利用线性插值法提高信号采样率。

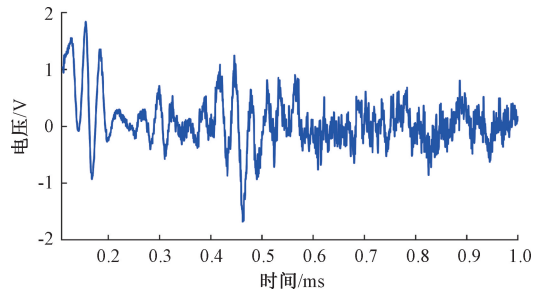


图3 待分析实测缆索整体导波信号

Fig. 3 Overall guided wave signal of the cable under analysis

2) 提取待分析导波信号中直达波信号段作基准信号。导波信号作为一种中心对称的多周期正弦信号, 利用奇异值分解能提取导波信号中心对称点位置^[27]。首先, 从接收信号中截取如图 4 中长虚线所示直达波信号。对所截取信号进行滑窗处理, 其窗长为 L , 滑窗的步进长度为 1, 并且对每个窗内信号进行去趋势项处理。

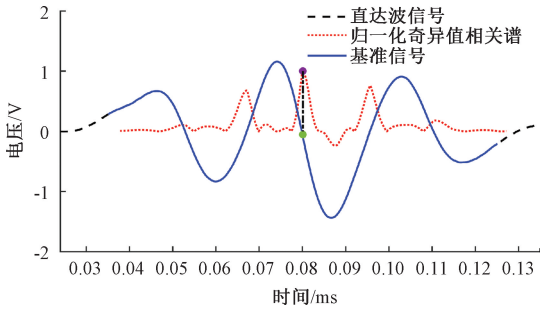


图4 局部直达波和其归一化奇异相关值谱

Fig. 4 Local direct waves and their normalized singular correlation value spectra

令第 i 个滑窗内处理后信号为 $\mathbf{Y}_i = (y_{i,1}, y_{i,2}, \dots, y_{i,L})$, 并构造矩阵 $\mathbf{H}_i$, 进行奇异值分解, 即:

$$\mathbf{H}_i = \begin{pmatrix} y_{i,1} & y_{i,2} & \cdots & y_{i,L-1} & y_{i,L} \\ y_{i,L} & y_{i,L-1} & \cdots & y_{i,2} & y_{i,1} \end{pmatrix} = \mathbf{U}_i \begin{pmatrix} \lambda_{i,1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_{i,2} & \cdots & 0 \end{pmatrix} \mathbf{V}_i^T \quad (31)$$

根据式 (30), 对每个窗内的信号仅进行 1 次分解, 得到奇异相关值序列 $\boldsymbol{\psi}_1 = (\psi_{1,1}, \psi_{1,2}, \dots, \psi_{1,M})$, M 为滑窗总个数。再对奇异相关值序列进行归一化处理, 得到奇异相关值谱如图 4 中短虚线所示。以奇异相关值谱峰值为滑窗中心, 选取滑窗内信号作为基准信号 $\mathbf{Y}$, 如图 4 中实线所示。

3) 对接收信号进行滑窗处理, 窗长为 L , 滑窗的步进长度为 1, 并对每个窗内信号进行去趋势项处理。设第 i 个滑窗内处理后信号为 $\mathbf{X}_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,L})$, 结合基准信号 $\mathbf{Y}$, 构建矩阵 $\mathbf{H}_{0,i}$, 即:

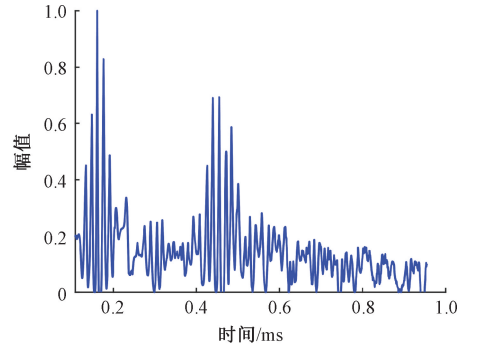
$$\mathbf{H}_{0,i} = \begin{pmatrix} x_{i,1} & x_{i,2} & \cdots & x_{i,L-1} & x_{i,L} \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_{L-1} & y_L \end{pmatrix} = \mathbf{U}_{0,i} \begin{pmatrix} \lambda_{0,i,1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_{0,i,2} & \cdots & 0 \end{pmatrix} \mathbf{V}_{0,i}^T \quad (32)$$

根据图 1 所示的 MRSVD 过程, 对信号 $\mathbf{X}_i$ 进行去噪, 计算 j 次分解后奇异相关值。综合所有滑窗计算得到 $\boldsymbol{\psi}_j$, 得到奇异相关值序列 $\boldsymbol{\psi}_j = (\psi_{j,1}, \psi_{j,2}, \dots, \psi_{j,M})$, 其中, K 为接收信号上滑窗总个数。

4) 根据 $\boldsymbol{\psi}_j = (\psi_{j,1}, \psi_{j,2}, \dots, \psi_{j,M})$, 绘制奇异值相关谱。

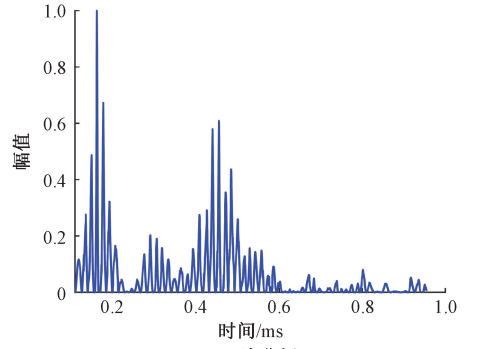
对图 3 中实测缆索导波信号进行滑窗处理, 对每个滑窗内信号进行 MRSVD, 不同 MRSVD 次数下所计算的奇异相关值谱如图 5 所示。

由图 5 可知, 1 次分解时回波信号存在“双峰”情况。然而, 随着分解次数的增加, 端部回波信号处奇异相关值谱峰值也愈发突出。另外, 随着分解层数的增加, 端部回波信号周围的噪声明显变弱。在计算奇异相关值谱峰



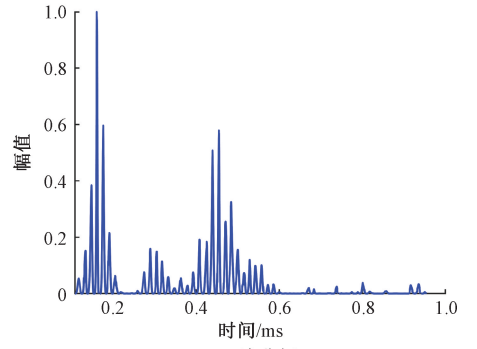
(a) 1次分解

(a) First-level decomposition



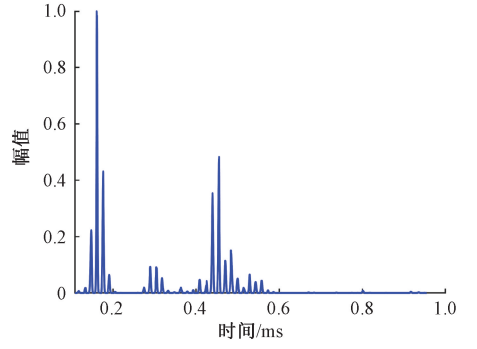
(b) 3次分解

(b) Third-level decomposition



(c) 5次分解

(c) Fifth-level decomposition



(d) 10次分解

(d) Tenth-level decomposition

图5 不同分解次数下缆索导波接收信号奇异相关值谱

Fig. 5 Singular correlation spectra of cable guided wave received signals at different decomposition levels

值的过程,发现:随着分解次数增加,奇异相关值的计算时间也随之大幅递增。

2 缆索索力测定实验

为验证基于导波 MRSVD 的索力测定方法的可行性,以不同索力条件下接收信号奇异相关值谱中,直达波和端部回波处谱峰值之间的时差作为声时来计算缆索导波波速,并据此进行索力测定。下面研究将该方法用于索力测定,搭建缆索索力测定实验平台。

如图 6 所示为导波检测仪器和缆索构件,采用图 6(a)中磁致伸缩缆索导波检测仪器获取导波信号。

实验试件为 2 根带锚头的平行钢丝绳,规格均为 $\phi 5-55$ 丝,长度均为 2 400 mm。将其中 1 根钢丝绳作为标定索,并在其上进行标定测试。另外 1 根钢丝绳作为测定索,进行索力测定。实验平台如图 7 所示,采用螺纹杆、

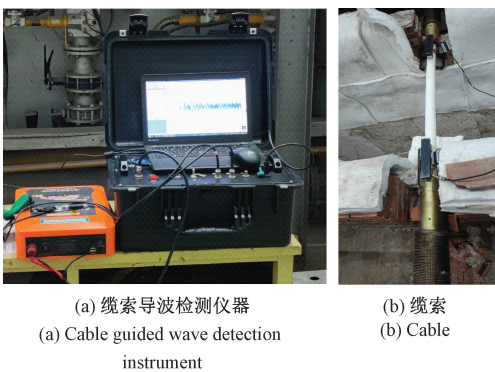


图 6 导波检测仪器和缆索构件
Fig. 6 Guided wave detection instrument and cable detection component

固定钢板和固定螺母将缆索两端固定在支架台上。缆索两端分别安装载荷传感器和液压泵,通过载荷传感器和液压装置进行张拉力监测和调控。

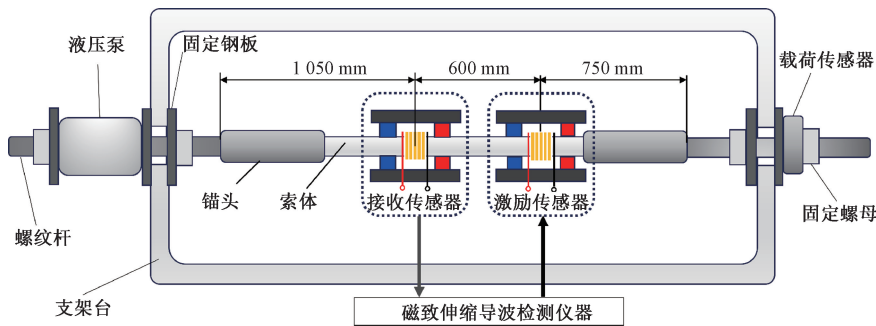


图 7 缆索索力测定实验平台
Fig. 7 Schematic diagram of the cable tension measurement experimental platform

通过液压装置在拉索张拉端分别施加 0%、5%、10%、15%、20%、25% 破断索力的张拉力。对于 $\phi 5-55$ 丝拉索,其破断索力为 2 000 kN,因此实验中在张拉端分别施加约 0、100、200、300、400 和 500 kN 张拉力。考虑到液压系统的控制精度有限,实际索力以荷载传感器测得的数值为准,其具体示值见表 1 和 2。

表 1 基于互相关系数谱的索力标定结果
Table 1 Cable tension calibration results based on cross-correlation spectra

标定声时/ms	荷载传感器示值/kN	索力标定值/kN
0. 293 2	0	30
0. 293 6	140	81
0. 294 8	248	233
0. 296 0	338	384
0. 296 4	416	435
0. 297 1	543	522

表 2 基于奇异相关值谱的索力标定结果
Table 2 Cable tension calibration results based on singular correlation spectra

标定声时/ms	荷载传感器示值/kN	索力标定值/kN
0. 293 6	0	11
0. 294 3	140	114
0. 295 2	248	245
0. 296 0	338	361
0. 296 4	416	419
0. 297 2	543	534

本次导波测定实验中,首先在 30~100 kHz 频率范围内以 5 kHz 为步长进行扫频检测,发现当激励频率为 40 kHz 时,直达波信号最为明显,具有良好的信噪比和较小的回波衰减,适合作为基准信号。因此,选取激励频率为 40 kHz 的 3 周期正弦信号作为激励源,开展缆索索力测定实验。

不同索力条件下标定索的导波检测信号如图 8 所示。分别采用互相关法和多分辨奇异值分解法对导波检测信号进行处理。

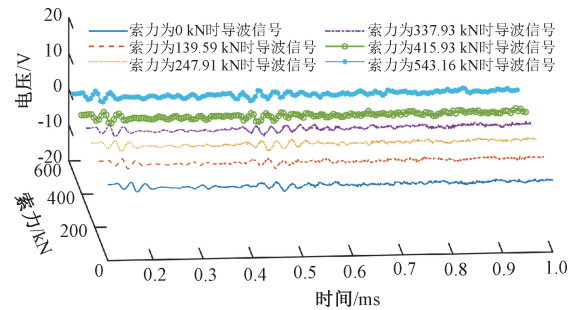


图 8 不同索力下导波信号

Fig. 8 Guided wave signals under different cable tension

图 9 和 10 为两种方法处理得到的互相关系数谱和奇异相关值谱。

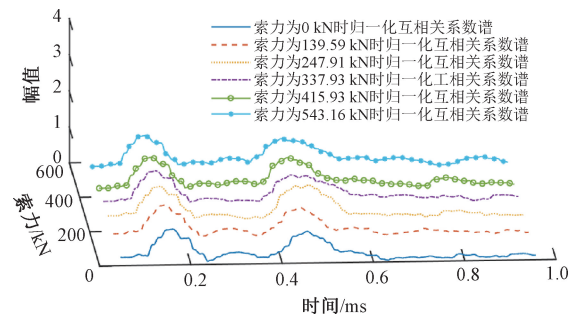


图 9 不同索力下整体归一化互相关系数谱

Fig. 9 Overall cross-correlation spectra under different cable tension

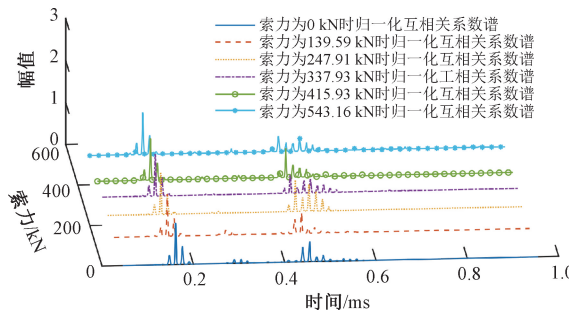


图 10 不同索力下整体归一化奇异相关值谱

Fig. 10 Overall singular correlation spectra under different cable tension

图 11~13 分别为不同索力下回波处信号、互相关系数谱和奇异相关值谱。如图 12 所示,对于 $\phi 55$ 丝缆索,互相关法产生的互相关系数谱存在双峰现象,且峰值位置辨识度较低,导致回波时间难以准确判定。相比之下,如图 13 所示,多分辨奇异值分解法生成的奇异相关值谱呈现出单一显著峰值,且随着索力增加,能明显观察

到谱峰值的时移特征,延迟趋势明显,表明奇异相关值谱在索力变化下对信号时延更敏感,具有更好的特征提取效果。

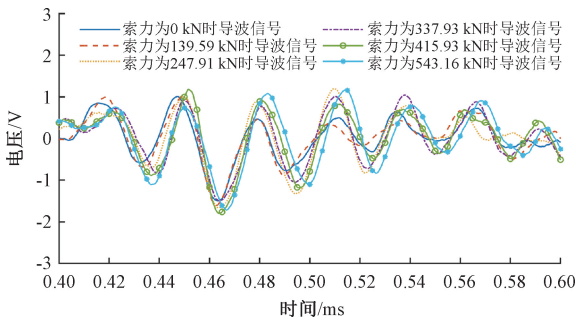


图 11 不同索力下回波处局部信号

Fig. 11 Local signals at the echo location under different cable tension

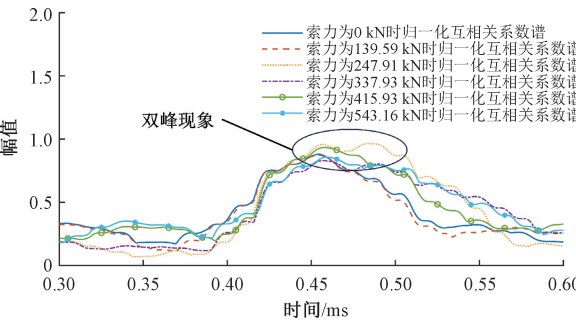


图 12 不同索力下回波处局部归一化互相关系数谱

Fig. 12 Local cross-correlation spectra at the echo location under different cable tension

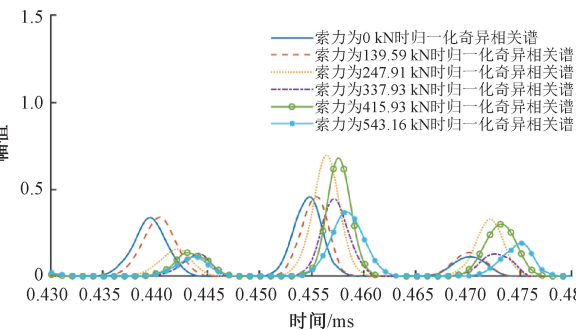


图 13 不同索力下回波处局部奇异相关值谱

Fig. 13 The local singular correlation spectra at the echo location under different cable tension

根据不同索力条件下导波检测信号中互相关系数谱与奇异相关值谱处理结果,提取直达波与端部回波谱峰时差作为声时特征量。基于该声时特征量计算缆索导波传播波速,并结合荷载传感器示值建立索力标定关系。其中,基于互相关系数谱的索力标定结果见表 1,基于奇

异相关值谱的索力标定结果见表 2。图 14 所示为两种方法所得的导波波速与索力的变化趋势,其中横坐标为张拉力,纵坐标为波速。可见,互相关法和多分辨奇异值分解法所得到的导波波速随着索力的增大均呈现近似线性递减规律,符合导波声弹性理论。

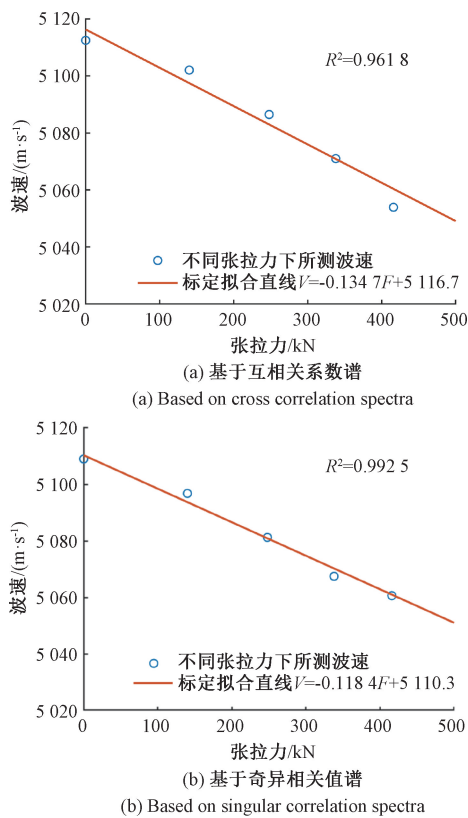


图 14 F - V 标定拟合直线

Fig. 14 The calibrate fitting line

进一步对实验数据进行线性拟合。如图 14 所示,通过线性回归分析获得索力与导波波速定量关系。其中,基于互相关系数谱的 F - V 标定拟合方程为:

$$V = -0.1347F + 5116.7$$

(33)

其拟合优度为 0.96。基于奇异相关值谱的 F - V 标定拟合方程为:

$$V = 0.1183F + 5110.3$$

(34)

其拟合优度为 0.99。其中, F 为缆索两端所受张拉力, V 为波速。可见,奇异相关值谱法具有更高的拟合优度。

同样地,分别采用互相关法和多分辨奇异值分解法对测定索的导波检测信号进行处理,提取声时。通过声时计算不同张拉力下的波速,代入到标定方程式 (33) 和 (34) 中,得到索力结果分别见表 3 和 4 所示。可见,互相关法中索力测定的相对误差最大可达 32.1%;而多分辨奇异值分解法中相对误差在 10% 以内。

表 3 基于互相关系数谱的索力测量结果

Table 3 Cable tension measurement results based on cross correlation spectra

测定声时/ms	荷载传感器示值/kN	索力测量值/kN	相对误差/%
0.293 7	137	93	32.1
0.294 9	228	246	7.9
0.296 2	327	409	25.1
0.296 7	436	472	8.3
0.297 0	546	509	6.8

表 4 基于奇异相关值谱的索力测量结果

Table 4 Cable tension measurement results based on singular correlation spectra

测定声时/ms	荷载传感器示值/kN	索力测量值/kN	相对误差/%
0.294 4	137	128	6.6
0.295 1	228	230	0.9
0.295 9	327	347	6.1
0.296 8	436	477	9.4
0.297 5	546	577	5.7

3 结 论

在 MRSVD 二分递推原理基础上,提出了一种新型二分递推矩阵形式,并证明该矩阵符合二分递推原理。此外,根据奇异值分解性质,分析了基于 MRSVD 声时测定原理,提出了一种新的导波回声声时定位特征量—奇异相关值,并采用奇异相关值谱进行缆索导波声时测定。根据 MRSVD 特性,提出了奇异相关值谱算法,该算法在降低噪声的同时能准确提取端部回波的声时,从而实现缆索索力测定。为验证基于 MRSVD 的索力导波测定方法的可行性,开展了缆索索力测定实验,在两根同规格缆索上采集导波检测信号,并采用互相关法和多分辨奇异值分解法,计算其互相关系数谱和奇异相关值谱,以不同索力下导波检测信号互相关系数谱和奇异相关值谱中直达波和端部回波处谱峰值之间的时差作为声时,计算缆索导波波速,发现:互相关系数谱中存在双峰情况,奇异相关值谱中谱峰明显,且随着索力的增加,缆索导波波速呈近似线性递减关系。此外,以 1 根索上所测声时作为标定数据,以另外 1 根索上所测声时作为验证数据,根据标定数据所拟合的直线来计算验证数据的索力结果。实验结果表明,互相关法的拟合优度低于多分辨奇异值分解法,且其最大相对误差高达 32.1%。相比之下,多分辨奇异值分解法的索力测定结果与实际张拉力之间的相对误差均在 10% 以内,表现出更高的精度和可靠性。然而,由于实验条件有限,实验缆索数量较少且缆索长度较短,

导致传感器布置位置受到限制,本研究仅采集两根缆索上导波检测信号,并采用缆索端部回波进行索力测定。在实际缆索索力测定过程中,可通过调节传感器布置位置,采集索体上导波信号进行索力测定,可进一步提高索力测定精度。

参考文献

- [1] LEE H J, KYUNG S B, KIM J W. Yoke-type elastomagnetic sensor-based tension force monitoring method for enhancement of field applicability[J]. *Sensors*, 2024, 24(11):3369.
- [2] 刘付鹏,王辅宋,刘文峰,等. 磁通量传感器温度补偿方法的研究[J]. *工程技术研究*, 2023, 8(14):95-97.
LIU F P, WANG F S, LIU W F, et al. Research on temperature compensation method for the magnetic flux sensor[J]. *Engineering and Technological Research*, 2023, 8(14):95-97.
- [3] 王晓琳,朱茂华,章鹏,等. 拱桥圆钢吊杆拉力监测的磁弹传感技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(9):140-148.
WANG X L, ZHU M H, ZHANG P, et al. Study on magneto-elastic tensile monitoring of round steel suspender in arch bridge[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(9):140-148.
- [4] 谢永宏,黄晓燕,蒋波,等. 光纤光栅传感器在吊索健康监测中的应用[J]. *中国设备工程*, 2022(6):187-189.
XIE Y H, HUANG X Y, JIANG B, et al. Application of FBG sensor in sling health monitoring[J]. *China Plant Engineering*, 2022(6):187-189.
- [5] QIN H Y, LI CH D, LUO B G, et al. Force monitoring in steel-strand anchor cables using quasi-distributed embedded FBG sensors[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 438:137192.
- [6] ZHU W X, TENG W, LIU F R, et al. Measurement of cable force through a fiber bragg grating-type thin rod vibration sensor and its application[J]. *Sensors*, 2022, 22(20):8081.
- [7] WU W H, CHEN C C, LIN SH L, et al. A real-time monitoring system for cable tension with vibration signals based on an automated algorithm to sieve out reliable modal frequencies[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2023, 2023(1):9343343.
- [8] CHEN C C, WU W H, LIU Y T, et al. A convenient cable tension estimation method simply based on local vibration measurements to fit partial mode shapes[J]. *Engineering Structures*, 2022, 272:115008.
- [9] XU Y CH, ZHANG J, ZHANG Y F, et al. A novel approach for cable tension monitoring based on mode shape identification[J]. *Sensors*, 2022, 22(24):9975.
- [10] 王婉儿,郑相锋,张新梦,等. 基于高纯石墨杆的纵向模态超声导波测温方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(10):263-271.
WANG W ER, ZHENG X F, ZHANG X M, et al. Research on temperature measurement method based on longitudinal mode ultrasonic guided waves using high-purity graphite rods[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(10):263-271.
- [11] 周鲜成,李鹏飞,李杰,等. 基于宽带相干信号子空间方法的超声导波长骨评价[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(6):166-176.
ZHOU X CH, LI P F, LI J, et al. Evaluation of long bone with ultrasound guided waves using wideband coherent signal subspace method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(6):166-176.
- [12] 刘增华,刘溯,吴斌,等. 预应力钢绞线中超声导波声弹性效应的试验研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(2):22-27.
LIU Z H, LIU S, WU B, et al. Experimental research on acoustoelastic effect of ultrasonic guided waves in prestressing steel strand[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(2):22-27.
- [13] 卢小明,钱骥. 基于声弹性效应的钢绞线张拉力识别方法[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(13):281-286.
LU X M, QIAN J. Identification method of tension of steel strand based on acoustic elastic effect[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(13):281-286.
- [14] MAŽEIK A L, DRAUDVILIENĖ L. Analysis of the zero-crossing technique in relation to measurements of phase velocities of the Lamb waves[J]. *Ultrasound*, 2010, 65(2):7-12.
- [15] DRAUDVILIENE L, AIDER H A, TUMSYS O, et al. The Lamb waves phase velocity dispersion evaluation using an hybrid measurement technique[J]. *Composite Structures*, 2018, 184:1156-1164.
- [16] 何星亮,陈平. 基于高频柱面超声导波的螺栓轴向应力测量[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(4):179-186.
HE X L, CHEN P. Bolt axial stress measurement based on high-frequency cylindrical ultrasonic guided wave[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(4):179-186.
- [17] 丁旭,巴洪,武新军. 用于螺栓轴力测量的电磁超声声时测量方法[C]. 第十届全国信息获取与处理学术会议论文集, 2012:189-192.
DING X, BA H, WU X J. Time of flight measurement method applied to electromagnetic acoustic transducer bolt axial stress detection[C]. *Proceedings of the 10th National Conference on Information Acquisition and Processing*, 2012:189-192.
- [18] CHEN H L, WISSAWAPAISAL K. Application of

- Wigner-Ville transform to evaluate tensile forces in seven-wire prestressing strands [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(11):1206-1214.
- [19] ZHENG F, CHEN J, YUAN SH F, et al. Guided wave-MUSIC based damage monitoring method for complex composite structures[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 277:109450.
- [20] 刘稳,刘立师,项延训,等. 基于超声导波虚拟时间反转的多层异质金属粘接结构损伤定位[J]. 仪器仪表学报, 2024,45(6):111-119.
- LIU W, LIU L SH, XIANG Y X, et al. Damage localization in multilayer heterogeneous metal bonded structures based on virtual time reversal of ultrasonic guided wave [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(6):111-119.
- [21] SURYANARAYANA G, VARADARAJAN V, PILLUTLA S R, et al. Multiple degradation skilled network for infrared and visible image fusion based on multi-resolution SVD upation[J]. Mathematics, 2022, 10(18):3389.
- [22] FAHAD S, RAHMAN S U, ALAM F, et al. A modified singular value decomposition (MSVD) approach for the enhancement of CCTV low-quality images [J]. IEEE Access, 2024, 12: 20138-20151.
- [23] DONG SH J, LI Y, ZHU P, et al. Rolling bearing performance degradation assessment based on singular value decomposition-sliding window linear regression and improved deep learning network in noisy environment[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(4): 045015.
- [24] 赵学智,叶邦彦,陈统坚. 多分辨奇异值分解理论及其在信号处理和故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2010,46(20):64-75.
- ZHAO X ZH, YE B Y, CHEN T J, Theory of multi-resolution singular value decomposition and its application to signal processing and fault diagnosis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(20):64-75.
- [25] 李晋,马翻红,汤井田,等. 基于自适应多分辨率奇异值分解的大地电磁数据处理[J]. 地球物理学报, 2022,65(12):4944-4962.
- LI J, MA F H, TANG J T, et al. Magnetotelluric data processing based on adaptive multi-resolution singular value decomposition[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022,65(12):4944-4962.
- [26] 徐睿,白云. 改进 CEEMD-MRSVD 降噪方法及应用研究[J]. 航空制造技术,2022,65(7):77-82.
- XU R, BAI Y. Study on Improved CEEMD-MRSVD denoising method and its application [J]. Aeronautical

Manufacturing Technology, 2022,65(7):77-82.

- [27] TANG M X, WU X J, CONG M, et al. A method based on SVD for detecting the defect using the magnetostrictive guided wave technique [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 70:601-612.

作者简介



王梓烨,2021 年于宁夏大学获得学士学位,2025 年于华中科技大学获得硕士学位,主要研究方向为桥梁缆索导波信号处理。

E-mail:wangziye99@126.com

Wang Ziyi received the B. Sc. degree from Ningxia University in 2021 and the M. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2025. His main research direction is guided wave signal processing for bridge cables.



段淑玉,2008 年于重庆大学获得学士学位,2011 年于重庆大学获得硕士学位,现为华中科技大学博士研究生,主要研究方向为信号与信息处理。

E-mail:duanshuyuzou@163.com

Duan Shuyi received her B. Sc. degree in 2008 and M. Sc. degree in 2011 both from Chongqing University. Now she is a Ph. D. candidate at Huazhong University of Science & Technology. Her research direction is signal and information processing.



孙令司,2018 年于吉林大学获得学士学位,2021 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,现为华中科技大学博士研究生,主要研究方向为漏磁检测和信号处理。

E-mail:sunlingsi@hust.edu.cn

Sun Lingsi received the B. Sc. degree from Jilin University in 2018. He received the M. Sc. degree from Harbin Engineering University in 2021. He is pursuing a Ph. D. degree at Huazhong University of Science and Technology. His research interests include magnetic flux leakage and signal processing.



武新军(通信作者),1993 年于焦作矿业学院获得学士学位,1996 年于华中理工大学获得硕士学位,1999 年于华中理工大学获得博士学位,现为华中科技大学教授、博士生导师,主要研究方向为工程测试与信号处理、无损检测新技术等。

E-mail:xinjunwu@hust.edu.cn

Wu Xinjun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jiaozuo Mining Institute in 1993, and received his M. Sc. and Ph. D. degrees from Huazhong University of Science and Technology in 1996 and 1999. He is currently a professor and a Ph. D. advisor in Huazhong University of Science and Technology. His main research interests include engineering testing and signal processing, nondestructive testing.