

基于 ERA 和 Gabor 最优分解的结构阻尼比识别方法^{*}

刘 纲¹, 罗 钧^{1,2}, 李荣富³

(1. 重庆大学土木工程学院 重庆, 400045)

(2. 重庆科技大学土木与水利工程学院 重庆, 401331)

(3. 新疆金风科技股份有限公司 乌鲁木齐, 830026)

摘要 针对密集模态情况下难以有效识别结构阻尼比的问题,提出了一种基于特征系统实现算法(eigensystem realization algorithm,简称 ERA)和 Gabor 最优分解的结构阻尼比识别方法。首先,采用结构自由振动响应,利用特征系统实现算法对结构频率进行识别,得到结构各阶频率的最小差异,并根据 Gabor 分解的时频分辨率确定 Gabor 分解的参数取值范围;其次,根据 Gabor 分解幅值曲线的线性拟合残差标准值,提出基于残差标准值最小化的 Gabor 形状参数确定原则,获得该密集模态条件下 Gabor 分解的最优参数;最后,基于最优 Gabor 分解的幅值曲线和相位曲线,利用线性拟合的曲线斜率识别结构的阻尼比。所提方法削弱了参数选取不当、密集模态对结构阻尼比识别的不利影响。数值算例和实验室框架结构识别结果表明,所提方法在无噪声时的阻尼比识别值与理论值基本一致,在噪声水平为 10%~30% 时的阻尼比识别值与理论值的相对误差在 6% 以内。

关键词 模态参数识别;阻尼比;自由振动;特征系统实现算法;Gabor 最优分解

中图分类号 TH707

引 言

结构模态参数(固有频率、阻尼比和振型)是有限元模型修正、损伤识别、安全状态评估和振动控制的重要参数^[1-2],在运营环境现场实测信号中实现模态参数识别是桥梁工程的主要研究方向之一。在模态参数识别中,由于密集模态和噪声干扰等不利因素影响,阻尼比识别一直是困扰学术界和桥梁工程界的难题,近年来已成为结构模态参数识别领域的研究热点。

根据数据处理方法的不同,运营状态下结构阻尼比识别方法可分为频域法、时域法和时频域法 3 类。频域法以频域分解法^[3]和最小二乘复频域法^[4]等为代表。时域法以时间序列分析^[5]、特征系统实现算法^[6]、随机子空间法^[7]和贝叶斯法^[8]等为代表。时频域法^[9-12]以时频分解^[9]、小波变换^[10]和希尔伯特-黄变换^[11]等为代表。其中,时域法直接利用数学模型来逼近和求解结构的模态参数,不受频率分辨率的限制,尤其适用于固有频率相对密集情况下的频率和振型的识别。时频域法能够进行自由振动曲线的时域和频域多尺度分解,在阻尼比识别时,能

够通过观察幅值曲线的线性程度,直观判断阻尼比识别的准确性。

目前,基于时频域法的阻尼识别多依赖于对结构自由振动曲线的分析来实现。杜永峰等^[10]提出采用小波 Shannon 熵与最小标准差相结合的 Morlet 小波参数选取方法,同时优化小波基中心频率和带宽参数。Tomac 等^[12]采用 Morlet 小波进行阻尼比的识别,并利用小波参数条件下所有可能阻尼比识别结果的最小变化来确定结构阻尼比。孙鹏等^[13]研究了 Morlet 小波在密集模态情况下结构阻尼比的识别,提出了边端效应抑制和最优小波中心频率的选取方法。黄应来等^[14]利用加逆衰减指数窗和带通滤波相结合的方法进行密集模态的分离,再利用小波分解等时频方法进行阻尼比的识别,但逆衰减指数的取值范围须依靠信号的半功率点计算得到。杜航等^[15]利用基于短时傅里叶变换的快速贝叶斯方法进行结构频率和阻尼的识别。Yao 等^[16]提出了一种基于时频分析和盲源分离的模态参数识别方法,并采用数值模拟和天津永和大桥的实测数据进行验证。然而,鉴于时频域法对信号进行处理时多需要设置时频分解的参数,当无法预先判断结构各阶频率分

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2022YFB4201400);国家自然科学基金面上资助项目(52078084)

收稿日期:2023-08-21;修回日期:2023-09-27

布时,仅根据时频分解的结果,难以准确判断较为接近的两阶频率成分是否得到有效分离。

笔者提出一种基于特征系统实现算法 ERA 和 Gabor 最优分解的结构阻尼比识别方法。该方法基于结构的自由振动响应,首先,利用特征系统实现算法对结构的固有频率进行初步识别,并计算结构各阶频率的差异,以确定 Gabor 分解的参数取值范围;其次,基于 Gabor 分解幅值曲线的线性拟合残差标准值最小原则,确定 Gabor 分解的最优参数;最后,基于 Gabor 最优分解的幅值曲线和相位曲线,提取结构的阻尼比。所提方法能够提取较密集模态情况下的各阶阻尼比,削弱了时频域方法参数选取不当和无法预先衡量密集模态分离与否对结构阻尼比识别的影响。本研究为获取桥梁结构阻尼比提供了一种新的有效手段。

1 基于 Gabor 分解的结构阻尼比识别方法

1.1 阻尼比识别

考虑一个线性多自由度体系,其自由振动信号为

$$x(t) = \sum_{r=1}^n A_r e^{-2\pi\xi_r f_r t} \cos(2\pi f_r \sqrt{1-\xi_r^2} t + \theta_r) \quad (1)$$

其中: A_r 为第 r 阶模态的振幅; θ_r 为第 r 阶模态的相位; f_r 和 ξ_r 分别为第 r 阶模态的无阻尼固有频率和阻尼比。

由式(1)可以看出,结构的自由振动响应可以视为多个模态自由振动响应的线性叠加。第 r 阶模态自由振动响应为

$$x_r(t) = A_r e^{-2\pi\xi_r f_r t} \cos(2\pi f_r \sqrt{1-\xi_r^2} t + \theta_r) \quad (2)$$

基于 Gabor 分解,结构的第 r 阶自由振动响应为幅值 B_r 和相位 φ_r 的形式,即

$$G_{xr}(\omega \rightarrow \omega_r, b) = \lim_{\omega \rightarrow \omega_r} \int_{-\infty}^{+\infty} x_r(t) g^*(t-b) e^{-j\omega t} dt = B_r(b) e^{j\varphi_r(b)} \quad (3)$$

其中: b 为时间。

幅值对数函数 $\ln B_r$ 和相位 φ_r 对时间 b 的一阶导^[10]为

$$\begin{cases} \frac{d \ln B_r(b)}{db} = -2\pi f_r \xi_r \\ \frac{d \varphi_r(b)}{db} = 2\pi f_r \sqrt{1-\xi_r^2} \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\ln(\cdot)$ 为对数函数。

由式(4)可知,一旦能够确定结构各阶固有频率的大概位置,即可得到线性多自由度体系的第 r 阶模态响应的 Gabor 系数,进而识别出结构的第 r 阶固有频率和阻尼比。结构各阶固有频率的大致确定可根据 Gabor 变换的能量谱(Gabor energy spectrum, 简称 GES)识别来实现,GES 的表达式为

$$GES(\omega) = \sum_{b=1}^N |G_x(\omega, b)|^2 \quad (5)$$

其中: G_x 为线性多自由度体系自由振动响应的 Gabor 分解系数。

1.2 参数取值

Gabor 分解的基函数一般采用 Gaussian 窗函数,其时域和频域表达式为

$$\begin{cases} g(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\tau^2/2\sigma^2} \\ g(\omega) = e^{-\sigma^2\omega^2/2} \end{cases} \quad (6)$$

其中: σ 为形状参数,无量纲,决定着基函数在时域和频域的形状。

Gabor 分解的时域和频域分辨率分别为

$$\begin{cases} \Delta t = \sigma / \sqrt{2} \\ \Delta \omega = 1 / \sqrt{2} \sigma \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知,由于 Gabor 分解频域和时域分辨率的乘积为 0.5,故其具有较高的时频分辨率。

Gabor 分解需要确定的参数为频率点数 N_f 和形状参数 σ 。频率点数 N_f 的取值应考虑频率域上两个频率点之间的间隔,此间隔应能够正确区分结构的两阶固有频率位置。形状参数 σ 的取值应考虑频率分辨率能够正确区分结构的两阶固有频率位置。

当结构两阶固有频率的差值为 Δf_n 时,参数 N_f 和 σ 的取值应使得 Δf_n 至少高于频率点间距和频率分辨率的 2 倍,即

$$\begin{cases} \Delta f_n \geq 2f_s / N_f \\ \Delta f_n \geq 2\Delta\omega / 2\pi = 1 / (\sqrt{2} \pi \sigma) \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)则有

$$\begin{cases} N_f \geq 2f_s / \Delta f_n \\ \sigma \geq 1 / (\sqrt{2} \pi \Delta f_n) \end{cases} \quad (9)$$

形状参数 σ 的取值不宜过大,其原因在于当 σ 取值较大时,其时域分辨率 Δt 随之增加,进一步加大 Gabor 分解的边端效应,将使得可用于阻尼识别的数据点数显著减少。因此,应对形状参数 σ 的最大

值进行限制。由于信号两端 $4\Delta t$ 时间内的数据点受到边端效应影响,因此用于阻尼比识别的数据时长应不低于总时长的 30%,应有

$$T - 8\Delta t \geq 0.3T \quad (10)$$

其中: T 为自由振动曲线的总时长。

将式(10)代入式(7)可得

$$\sigma \leq 0.124T \quad (11)$$

综上所述,频率点数 N_f 和形状参数 σ 的取值应满足

$$\begin{cases} N_f \geq 2f_s / \Delta f_n \\ 1 / (\sqrt{2} \pi \Delta f_n) \leq \sigma \leq 0.124T \end{cases} \quad (12)$$

2 基于 ERA 和最优 Gabor 分解的阻尼比识别

频率点数 N_f 和形状参数 σ 的取值直接影响着 Gabor 分解效果。然而,实际结构的频率成分通常无法预先准确估计,使得频率点数 N_f 和形状参数 σ 的取值具有一定的主观性,导致有时不能得到满意的密集模态分离和阻尼比识别结果。原因在于,结构各阶固有频率的提取是基于 GES 曲线得到的。不合适的频率点数 N_f 和形状参数 σ 可能造成 GES 曲线无法正确区分结构较为接近的两阶固有频率,使得密集模态未解耦,从而被错误认为是同一个模态阶次。因此,预先判断结构各阶模态的密集程度至关重要。

ERA 是一种基于自由振动响应的结构模态参数时域识别方法,能够直接利用数学模型来逼近和求解结构的模态参数,不受频率分辨率的限制,尤其适用于对各阶模态密集程度进行预判断。一个 n 维线性系统,存在 m 个系统输入和 p 个系统输出,可用离散时间状态方程描述该系统,即

$$\begin{cases} X(k+1) = G'X(k) + B'U(k) \\ Y(k) = C'X(k) \end{cases} \quad (13)$$

其中: $Y(k)$ 为系统输出; $U(k)$ 为系统输入; $X(k)$ 为状态变量; G' 、 B' 、 C' 分别为系统矩阵、控制矩阵和观测矩阵。

当结构的自由振动响应 $Y(k)$ 被观测记录后,可利用其构造的 Hankel 矩阵进行矩阵 G' 、 B' 、 C' 的识别,进而利用系统矩阵 G' 的特征分解得到系统的固有频率和阻尼比,如式(14)所示。应当指出的是,由于测试得到的加速度响应存在一定的测试误差,故建议适当增加 Hankel 矩阵规模以考虑其影响。

$$\begin{cases} \omega_i = |s_i| / T_s \\ \xi_i = \frac{\text{Re}(s_i)}{\sqrt{(\text{Re}(s_i))^2 + (\text{Im}(s_i))^2}} \\ s_i = \ln \lambda_i \end{cases} \quad (14)$$

其中: $\text{Re}(\cdot)$ 为取实部; $\text{Im}(\cdot)$ 为取虚部; $\ln(\cdot)$ 为自然对数; λ_i 为系统矩阵 G' 的第 i 个特征值; T_s 为采样时间间隔。

综合以上分析,笔者提出了基于 ERA 和 Gabor 最优分解的阻尼比识别方法。首先,利用特征系统实现算法对结构频率成分进行初步识别,得到结构各阶频率的最小差异 Δf_n ,充分发挥时域方法不受频率分辨率影响的优势;其次,根据 Δf_n 和式(12),计算得到 Gabor 分解的频率点数 N_f 和形状参数 σ 取值范围;然后,基于 Gabor 分解幅值曲线的线性拟合残差标准值最小原则,确定形状参数 σ 的最优参数;最后,基于 Gabor 最优分解的幅值曲线和相位曲线,提取结构的阻尼比。所提方法的流程图如图 1 所示。

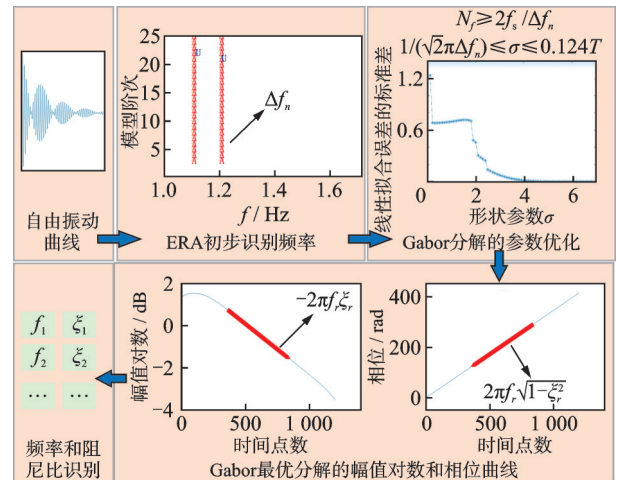


图1 所提方法流程图

Fig.1 Flow chart of proposed method

根据式(4),结构第 r 阶模态响应的幅值对数函数 $\ln B_r$,其对时间的一阶导数是结构第 r 阶固有频率和阻尼比的乘积。图 2 为幅值对数函数 $\ln B_r$ 曲线,直线斜率即为频率和阻尼比的乘积,时间点数为无量纲的量。若在该频率点处存在两阶模态响应的重叠,则关系曲线将发生较大波动,因此,通过最小化幅值对数函数 $\ln B_r$ 和线性拟合曲线两者间的标准差,可以确定最优形状参数 σ 。图 2 中,粗线表示挑选的用于线性拟合的数据段,两端各截断 $4\Delta t$ 时间内的数据点,参数 Δt 可根据最优形状参数 σ 和式(7)计算得到。

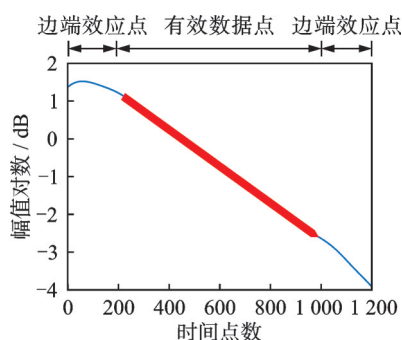
图2 幅值对数函数 $\ln B_r$ 曲线

Fig.2 Curve of amplitude logarithmic function

3 数值算例和试验验证

3.1 数值算例

采用两自由度体系的自由振动曲线进行数值模拟,信号表达式为

$$x(t) = \sum_{i=1}^2 A_i e^{-2\pi\xi_i f_i t} \sin(2\pi f_i \sqrt{1-\xi_i^2} t + \theta_i) \quad (15)$$

其中:第1阶模态频率 f_1 、阻尼比 ξ_1 、振幅 A_1 和相位 θ_1 分别取 1.0 Hz、0.010、1.0 和 0;第2阶模态频率 f_2 、阻尼比 ξ_2 、振幅 A_2 和相位 θ_2 分别取 1.1 Hz、0.012、1.0 和 0。

采样频率取 20 Hz,采样时长取 60 s,得到的两自由度(degrees of freedom,简称 DOF)体系的自由振动曲线如图3所示。

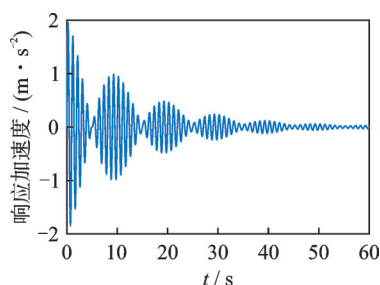


图3 两自由度体系的自由振动曲线

Fig.3 Free vibration curve of two DOF system

首先,利用ERA对自由振动信号进行分析,得到稳定图如图4所示。Hankel矩阵的行数随模型阶次的变化而改变,当ERA的模型阶次为 q 时,算例的Hankel矩阵行数取为 $q+10$ 以考虑观测噪声的影响。图4中:A表示相邻阶次的频率、阻尼和振型均保持稳定;U表示相邻阶次的频率和振型保持稳定,模型阶次为无量纲的量。可以看出,结构体系在 1.0 Hz 附近存在较为密集的模式,其固有频率分别为 1.0 和 1.1 Hz。因此,结构体系待分离的频率差异约为 0.1 Hz,代入式(12)可得Gabor变换的形状参数 σ 的取值范围为 2.25~7.44。

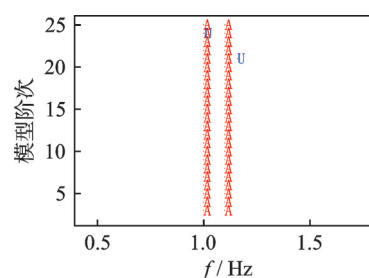
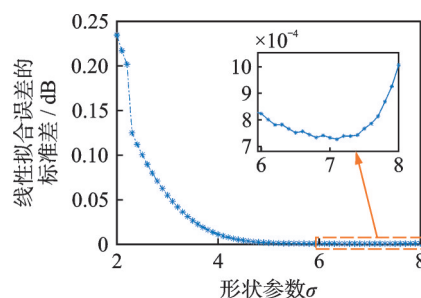


图4 ERA稳定图

Fig.4 Stability diagram of ERA

其次,基于Gabor分解幅值对数曲线的线性拟合残差标准值最小原则,确定形状参数 σ 的最优参数。频率点数 N_f 取为 1 024,计算得到的线性拟合残差标准值随形状参数 σ 的变化规律如图5所示,其最小标准差对应的形状参数为 7.1。

图5 线性拟合残差标准值随形状参数 σ 的变化规律Fig.5 Standard value of linear fitting residuals with different σ

然后,利用最优形状参数 7.1 进行Gabor分解,得到最优Gabor变换的能量谱曲线如图6所示,其中归一化能量谱为无量纲。选取各阶固有频率大致位置,得到各阶模态的Gabor变换幅值对数曲线和相位曲线的线性拟合结果如图7所示。

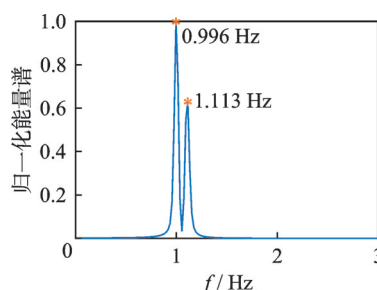


图6 最优Gabor变换的能量谱曲线

Fig.6 Energy spectrum curve with optimized Gabor decomposition

最后,基于式(4),利用线性拟合得到幅值对数曲线和相位曲线的斜率,所提方法计算得到的各阶固有频率和阻尼比如表1所示。根据结果可知,在无噪声情况下,ERA方法和笔者提出的方法均能准确提取结构体系的固有频率和阻尼比。

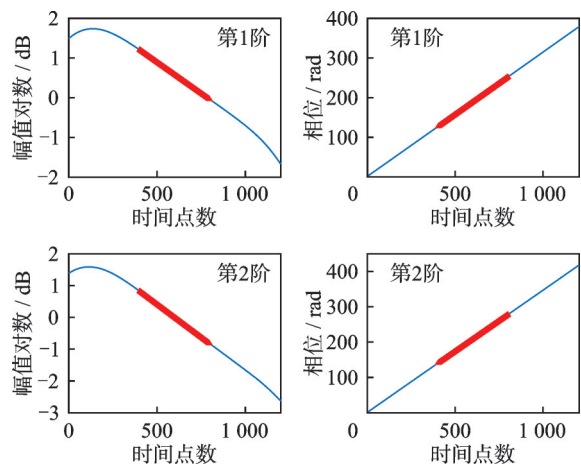


图 7 幅值对数曲线和相位曲线的拟合结果
Fig.7 Linear fitted results of amplitude curve and phase curve

为进一步研究噪声的干扰,在自由振动响应中添加白噪声信号以模拟测试噪声的影响。添加的测试噪声水平以白噪声幅值和自由振动响应幅值之比 (noise-signal ratio, 简称 NSR) 进行衡量。共添加 3 种噪声水平,即 NSR 分别为 10%、20% 和 30%,图 8 为添加噪声后的自由振动响应信号。

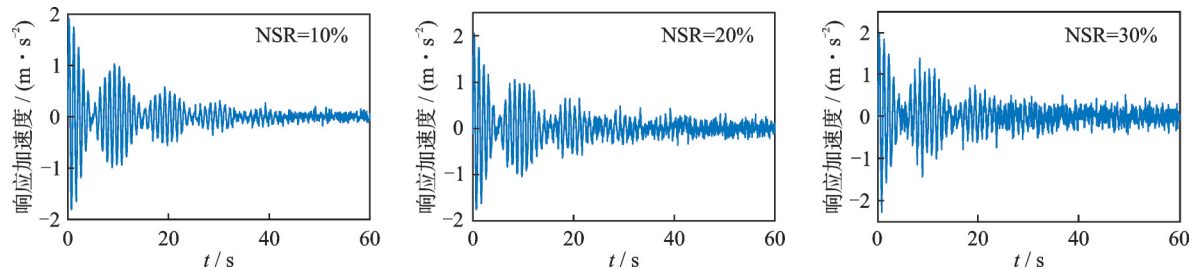


图 8 添加噪声后的自由振动响应信号
Fig.8 Free vibration curves with noises

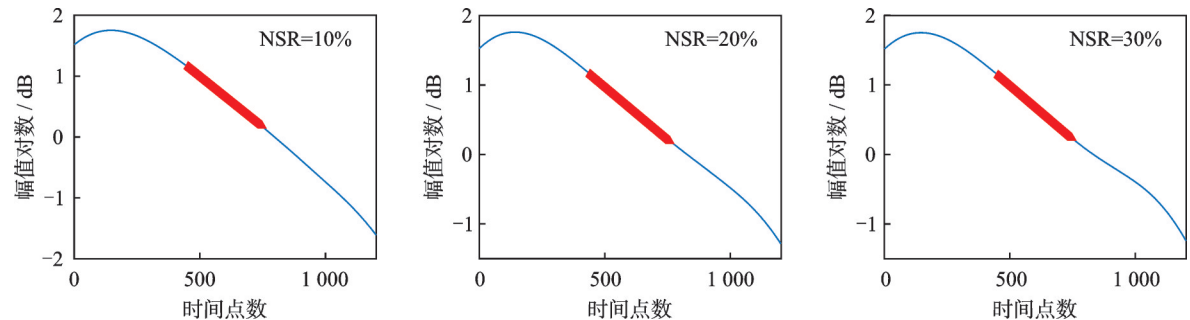


图 9 添加噪声后的第 1 阶幅值对数曲线及其线性拟合结果
Fig.9 The 1st amplitude logarithmic curves and their linear fitted results with noises

3.2 实验室框架试验

利用所提方法识别实验室框架结构的固有频率和阻尼比。如图 10 所示,实验室框架结构为一个总高为 600 mm 的三层平面框架结构,梁和柱的长度为 200 mm,厚度为 0.7 mm。框架以非接触式激励

表 1 所提方法计算得到的固有频率和阻尼比(无噪声)
Tab.1 Identified natural frequencies and damping ratios(no noise)

方法	参数	第 1 阶	第 2 阶
理论值	f/Hz	1.00	1.10
	阻尼比/%	1.00	1.20
ERA	f/Hz	1.00	1.10
	阻尼比/%	1.00	1.20
ERA&Gabor	f/Hz	1.00	1.10
	阻尼比/%	1.00	1.20

利用笔者所提方法对不同噪声水平下的自由振动响应进行处理,得到不同噪声水平下的第 1 阶幅值对数曲线及其线性拟合结果如图 9 所示。不同噪声水平下计算得到的固有频率和阻尼比如表 2 所示。从表 2 中可以看出,由于噪声的干扰,特征系统实现算法中各稳定点的阻尼比识别结果具有较大的扰动,致使阻尼比识别结果误差较大。笔者所提方法对噪声干扰具有一定的稳定性,各噪声水平下识别的阻尼比最大相对误差为 6%。

器进行激励,激励信号为白噪声。
图 11 为结构的加速度响应及自由振动曲线。采用加速度传感器对框架结构顶点动力时程响应进行测量,采样频率为 60 Hz,采样时间为 600 s。采集的加速度时程曲线如图 11(a)所示,采用随机减量法提取得到的结构自由振动曲线如图 11(b)所示。

表2 不同噪声水平下计算得到的固有频率和阻尼比
Tab.2 Calculated natural frequencies and damping ratios under different noise levels

噪声水平	阶次	参数	ERA		ERA&Gabor	
			f/Hz	阻尼比/%	f/Hz	阻尼比/%
10%	第1阶	识别值	1.00	1.09	1.00	1.05
		相对误差	0	9.0	0	5.0
	第2阶	识别值	1.10	1.43	1.10	1.26
		相对误差	0	19.2	0	6.0
20%	第1阶	识别值	1.00	1.51	1.00	0.97
		相对误差	0	51.0	0	3.0
	第2阶	识别值	1.10	1.37	1.10	1.19
		相对误差	0	14.2	0	0.8
30%	第1阶	识别值	1.00	1.43	1.00	0.98
		相对误差	0	43.0	0	2.0
	第2阶	识别值	1.10	2.02	1.10	1.20
		相对误差	0	68.3	0	0

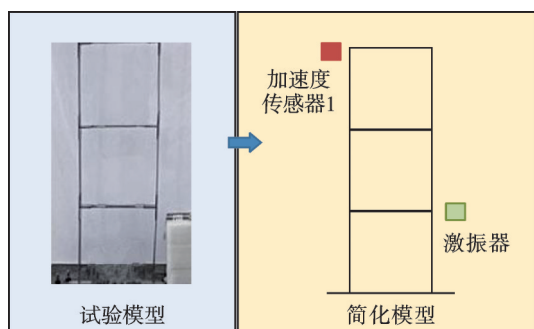
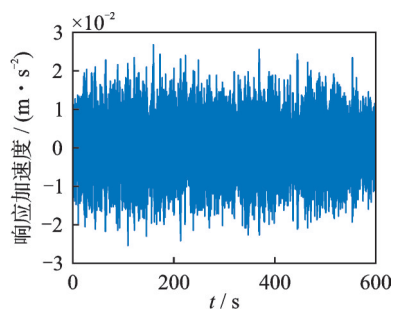


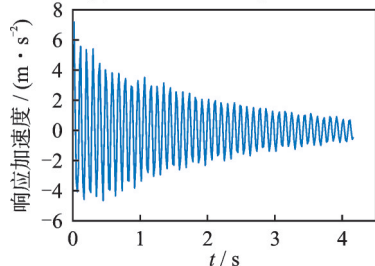
图10 实验室框架结构

Fig.10 Laboratory frame



(a) 加速度响应曲线

(a) Acceleration response curve



(b) 自由振动曲线

(b) Free vibration curve

图11 结构的加速度响应及自由振动曲线

Fig.11 Acceleration response and free vibration curves

随机减量法采用极值条件触发,获取的自由振动曲线的时间点数为250,时长为4.16 s。

不同频率下ERA稳定图如图12所示。其中,A表示频率、阻尼和振型均稳定的点;U表示频率和振型稳定的点。尽管存在虚假模态的干扰,但根据稳定点从低阶到高阶的连续分布规律,仍可以看出存在3个模态阶次,频率成分大致分布在2.8、10.5和21.6 Hz附近。

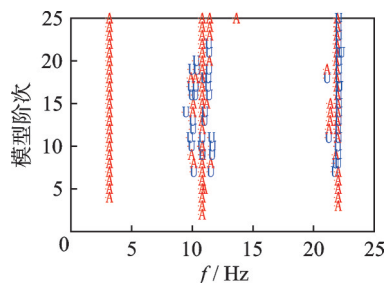


图12 不同频率下ERA稳定图

Fig.12 Stability diagram of ERA with different frequencies

基于式(12),计算得到Gabor分解的形状参数优化范围为0.03~0.50,频率点数取1 024。得到的线性拟合残差标准值曲线如图13所示,其最小标准差对应的形状参数为0.5。利用所提方法计算得到的3个模态阶次对应的Gabor最优分解幅值对数曲线的拟合效果如图14所示。可以看出,Gabor最优分解得到的幅值对数曲线在拟合段具有较好的线性程度。

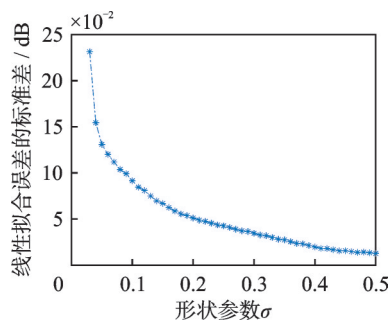


图13 线性拟合残差标准值曲线

Fig.13 Curve of standard value of linear fitting residuals

利用ERA和所提方法识别得到的固有频率和阻尼比如表3所示。根据识别结果可以看出,2种方法识别的差异在低阶较为吻合,在高阶存在一定的差异,但所提方法能够通过观察幅值曲线的线性程度,直观判断阻尼比的识别准确性和可用性。图14中的红色线性拟合段幅值曲线若发生明显的波动或偏移,表明该模态阶次识别的阻尼比受噪声干扰较大,幅值曲线的线性程度和识别的阻尼比准确性较低。

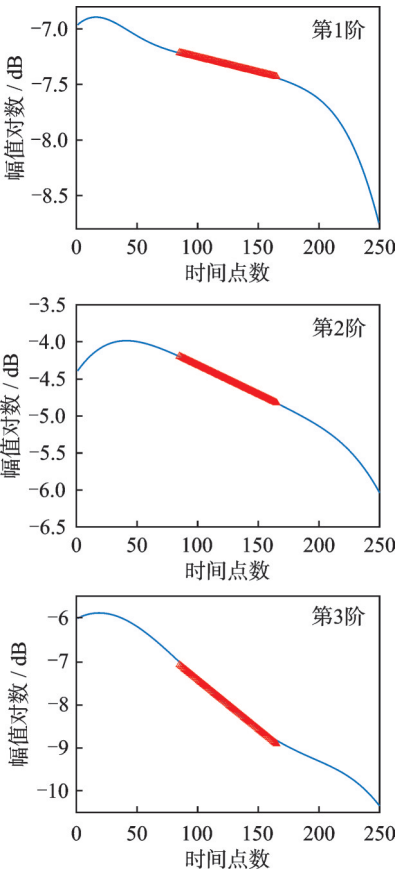


图 14 Gabor 最优分解幅值对数曲线拟合图

Fig.14 Linear fitted results of optimized Gabor amplitude logarithmic curve

表 3 识别的框架结构固有频率和阻尼比
Tab.3 Identified natural frequencies and damping ratios

方法	参数	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶
ERA	f/Hz	2.86	10.51	21.64
	阻尼比/%	0.90	0.72	1.53
ERA&	f/Hz	2.87	10.51	21.79
Gabor	阻尼比/%	0.90	0.71	1.00

4 结 论

- 1) 无噪声情况下,ERA 和笔者所提方法均能准确识别出结构的各阶固有频率和阻尼比。
- 2) 有噪声情况下,特征系统实现算法的稳定点受噪声干扰,固有频率所受的影响较小,但阻尼比所受的波动较大,使得特征系统实现算法识别的阻尼比误差较大。
- 3) 有噪声情况下,笔者所提方法具有较高的识别精度,且在不同噪声水平下,阻尼比的识别精度较为稳定,故所提方法对噪声干扰具有一定的稳定性。
- 4) 所提方法在大跨度桥梁结构中的实际应用

有待进一步研究。对大跨度桥梁运营状态的结构响应进行实测,结合随机减量法或 NExT 法等提取结构的自由振动曲线,并进行结构固有频率和阻尼比的识别是笔者后续研究的方向。

参 考 文 献

[1] 刘纲,陈奇,雷振博,等.基于改进萤火虫算法的有限元模型修正[J].工程力学,2022,39(7):1-9.
LIU Gang, CHEN Qi, LEI Zhenbo, et al. Finite element model updating method based on improved firefly algorithm[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(7): 1-9. (in Chinese)

[2] 刘纲,雷振博,杨微,等.风机塔架 PS-TMD 被动控制装置机理分析及参数调谐优化研究[J].工程力学,2021,38(12):137-146.
LIU Gang, LEI Zhenbo, YANG Wei, et al. Mechanism analysis and parameter tuning optimization for wind turbine towers with PS-TMD passive control devices[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(12): 137-146.(in Chinese)

[3] 杭晓晨,蒋令闻,顾明华,等.频域分解模态识别方法的阻尼识别精度研究[J].振动工程学报,2015,28(4):518-524.
HANG Xiaochen, JIANG Lingwen, GU Minghua, et al. Accuracy of modal damping identification using frequency domain decomposition method[J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(4): 518-524. (in Chinese)

[4] PEETERS B, VANHOLLEBEKE F, AUWERAER H. Operational PolyMAX for estimating the dynamic properties of a stadium structure during a football game [C]//Proceedings of the 23rd International Modal Analysis Conference. Orlando, Florida: [s.n.], 2005: 23.

[5] 康杰,段忠东. MAR 模型模态参数识别的虚假模态判定方法[J].振动工程学报,2020,33(6):1189-1198.
KANG Jie, DUAN Zhongdong. False modes discrimination for modal parameter identification using MAR model [J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(6): 1189-1198.(in Chinese)

[6] 武璠,程琳,杨杰,等.基于地震记录的混凝土拱坝模态识别结果评价研究[J].地震工程学报,2021,43(6):1460-1471.
WU Fan, CHENG Lin, YANG Jie, et al. Evaluation of modal identification results of concrete arch dams based on seismic records [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(6): 1460-1471.(in Chinese)

[7] 陈永高,钟振宇.环境激励下桥梁结构模态参数识别的改进随机子空间算法[J].振动与冲击,2020,39(16):

- 196-204.
- CHEN Yonggao, ZHONG Zhenyu. An improved stochastic subspace method for modal parameter identification for bridge structures under ambient excitation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(16): 196-204. (in Chinese)
- [8] ZHU Z, AU S K, LI B B, et al. Bayesian operational modal analysis with multiple setups and multiple (possibly close) modes [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 150: 107261.
- [9] 樊江玲, 张志谊. 时频分布与FRFT在环境激励下模态参数辨识中的应用[J]. 上海工程技术大学学报, 2011, 25(3): 199-202, 206.
- FAN Jiangling, ZHANG Zhiyi. Application of time-frequency distribution and FRFT in modal parameter identification under ambient excitation[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2011, 25(3): 199-202, 206. (in Chinese)
- [10] 杜永峰, 赵丽洁, 党星海, 等. 基于最优复 Morlet 小波的结构密集模态参数识别[J]. 振动与冲击, 2015, 34(1): 135-139, 155.
- DU Yongfeng, ZHAO Lijie, DANG Xinghai, et al. Identification of structural closely spaced modes parameters based on optimized complex Morlet wavelet[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(1): 135-139, 155. (in Chinese)
- [11] LAKSHMI K, REDDY V K, RAO A R M. Modal parameter estimation of tall structures using HHT with improved EMD[J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 2022, 81(6): 594-605.
- [12] TOMAC I, LOZINA Ž, SEDLAR D. Extended Morlet-wave damping identification method[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 127: 31-40.
- [13] 孙鹏, 丁幼亮, 张劲泉, 等. 基于 Morlet 小波变换的结构密集模态参数识别[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(2): 339-345.
- SUN Peng, DING Youliang, ZHANG Jinquan, et al. Modal identification of closely spaced modes based on Morlet wavelet transform[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(2): 339-345. (in Chinese)
- [14] 黄应来, 董大伟, 闫兵. 密集模态分离及其参数识别方法研究[J]. 机械强度, 2009, 31(1): 8-13.
- HUANG Yinglai, DONG Dawei, YAN Bing. Study on closely spaced modes decomposition and modal parameter identification[J]. Journal of Mechanical Strength, 2009, 31(1): 8-13. (in Chinese)
- [15] 杜航, 徐海巍, 楼文娟. 基于短时傅里叶变换的快速贝叶斯模态参数识别方法[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(5): 305-314, 334.
- DU Hang, XU Haiwei, LOU Wenjuan. Fast Bayesian modal parameter identification method based on short-time Fourier transform [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(5): 305-314, 334. (in Chinese)
- [16] YAO X J, YI T H, QU C X, et al. Blind modal identification using limited sensors through modified sparse component analysis by time-frequency method[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2018, 33(9): 769-782.



第一作者简介: 刘纲,男,1977年1月生,博士、教授。主要研究方向为结构健康监测、振动控制与结构性能提升的理论方法、技术标准和工程应用。曾发表《Structural motion estimation via Hilbert transform enhanced phase-based video processing》(《Mechanical Systems and Signal Processing》2022, Vol.166)等论文。

E-mail: gliu@cqu.edu.cn

通信作者简介: 罗钧,男,1986年5月生,博士、高级工程师。主要研究方向为结构健康监测与模态参数识别。

E-mail: jluo@cqu.edu.cn