

文章编号:1673-2049(2013)02-0049-06

大型结构模态参数识别研究

张敏, 黄俐, 李文雄, 钟学赋

(华南农业大学 水利与土木工程学院, 广东 广州 510640)

摘要:针对大型结构实际模态识别中存在难以准确对系统定阶和产生虚假模态等问题,提出了采用奇异熵导数结合稳定图技术进行子结构系统定阶并去除虚假模态的方法。以某简支梁结构为例,采用 MATLAB 软件仿真模拟振动测试和信息采集,进行数据处理分析。结果表明:奇异熵导数对信号信噪比的变化反应非常敏感,能够根据其零值点位置准确确定降噪的合理阶次;频率稳定图技术能够有效去除虚假模态,对子结构进行系统定阶,并有助于子结构之间进行模态阶次匹配,以获得准确的整体结构模态参数。

关键词:大型结构;模态识别;系统定阶;奇异熵导数;稳定图技术

中图分类号:TU317 **文献标志码:**A

Research on Modal Parameter Identification on Large-scale Structure

ZHANG Min, HUANG Li, LI Wen-xiong, ZHONG Xue-fu

(School of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: Aimed at the problems that was difficult to determine the substructure system order and false modal appeared in practice, differential quotient of singular entropy and stabilization diagram technology were used together to determine substructure system order and eliminate false modals. A MATLAB finite element model of a simply supported beam was taken for example to analyze the proposed method, by simulating vibration testing and data acquisition. The results show that differential quotient of singular entropy is sensitive to change of signal-noise ratio, and it can be used to determine reasonable noise reduction order according to the location of zero point. Frequency stabilization diagram technology is effective to eliminate false modals and get order for substructure system. It is helpful to match modal orders between substructures to obtain true modal parameters of whole structures.

Key words: large-scale structure; modal identification; system order determination; differential quotient of singular entropy; stabilization diagram technology

0 引言

结构的模态参数是反映结构动力学特性的主要参数,具有简明、直观和物理概念清晰等优点^[1]。有了结构的模态参数,即可建立一个模态动力学模型,

并由此计算结构在实际荷载作用下的响应以及进行振动校核和必要的结构修改^[2]。因此,对结构进行模态参数识别是结构动力特性分析的一个重要方法和手段,也是基于结构振动信息损伤识别研究的基础和重要组成部分,损伤前后结构模态参数的识别

收稿日期:2012-12-24

基金项目:国家自然科学基金项目(50678099);国家自然科学基金青年科学基金项目(51008129)

作者简介:张敏(1980-),女,陕西铜川人,讲师,工学博士,E-mail:ammindy@scau.edu.cn。

精度将直接影响损伤识别系统的实用性和有效性^[3-8]。

随着建筑结构的日渐复杂和庞大,需要密集布排大量节点的无线传感器,以获得足够的信息来反映结构振动特性或损伤。传统的集中式技术将难以胜任海量数据的处理要求^[9],采用分布式技术识别各子结构模态,由子结构信息得到整体模态参数是应运而生的新方向^[10]。

子结构的模态识别和整体结构集中式的识别过程是相同的,但由于各子结构的信息量相对于整体识别时的信息量大大减少,并且大型结构自振频率低,模态密集,加之测试过程中的噪声影响,在识别过程中会出现模态混叠及虚假模态^[11-12],因此,选择适用的模态识别方法和去除虚假模态信息是准确获得结构模态参数的关键。

本文中笔者针对模态识别中系统定阶对识别结果的影响,提出了采用奇异熵导数结合稳定图技术来进行子结构系统定阶并去除虚假模态的方法。以某一简支梁结构为例,采用 MATLAB 软件仿真模拟振动测试,将简支梁划分为子结构形式进行识别。

1 系统定阶分析

随机子空间识别(Stochastic Subspace Identification, SSI)方法是一种先进的土木工程结构模态识别方法,是近年来发展起来的一种线性系统辨识方法。SSI 的主要目标是求解系统的状态矩阵 \mathbf{A} 和输出矩阵 \mathbf{C} ,对 \mathbf{A} 进行特征值分解,可得到特征值和特征向量,以求解系统的模态参数。

随机子空间识别方法以尽量少的阶次来描述系统的振动特性,减少了计算量;考虑输出噪声的影响,从而使识别具有一定的抗干扰能力。该方法属于整体拟合法,拟合时同时考虑多点的输出波形,当模态比较密集时,即使模态频率比较接近,也不会影响识别的精度。拟合过程中需要选择 Hankel 矩阵^[13]的阶数,当 Hankel 矩阵的阶数较高时,计算量很大,比较费时。Hankel 矩阵的阶数选定后,还需要确定状态方程的阶数,阶数太低会造成模态丢失,阶数太高会出现虚假模态。因此,该方法也同样存在定阶和识别虚假模态的问题。

在模态空间上,线性系统的特征值和特征向量是确定量,而噪声模态具有随机性。在利用随机子空间方法识别的过程中,借助于奇异值分解的定阶剔除噪声。对 Hankel 矩阵 \mathbf{H} 进行奇异值分解,可以得到

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T = (\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2) \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: \mathbf{U} 为 $m \times m$ 阶的酉矩阵; \mathbf{S} 为半正定 $m \times n$ 阶的对角矩阵; \mathbf{V} 为 $n \times n$ 阶的酉矩阵。

定义与系统模态相关的奇异值向量用 \mathbf{S}_1 表示,其余向量表示为 $\mathbf{0}$;对应的酉矩阵 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 也可分为 2 个部分,分别表示为向量 $(\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2)$ 和 $\begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{bmatrix}$ 。

如果奇异值按从大到小排列时有明显的突然变小且小到一定程度的情况,则舍掉后面的奇异值,突变处即为系统的阶次^[14]。从逼近原理来看, $\mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T$ 是 Hankel 矩阵在所有子空间中的最佳逼近;从信号处理角度来看,用 $\mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T$ 代替 Hankel 矩阵,相当于对数据进行一次维纳滤波。被滤掉的是对应于奇异值为 0 且与输入输出无关的噪声和激励程度非常弱的模态,即 \mathbf{S} 矩阵中奇异值为 0 的部分。实际应用中由于非随机噪声和结构非线性因素的影响,对 Hankel 矩阵进行奇异值分解时,奇异值无明显突变分界线,且较高阶次的奇异值不会完全等于 0,在这种情况下,无法直观确定系统阶次,选择的阶次太高或太低对模态识别结果的影响较大。文献^{[15]~[17]}中采用奇异熵的概念,在随机子空间方法的识别过程中进行定阶分析,这里首先利用奇异熵进行系统定阶分析。

系统状态矩阵 \mathbf{A} 是 $2n$ 阶方阵,故奇异值分解时得到的对角矩阵 \mathbf{S} 必为 $2n$ 阶,即 $\mathbf{S} = \text{diag}(\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_{2n})$,其主对角线元素 $S_i (i = 1, 2, \dots, 2n)$ 是非负的奇异值,并按降序依次排列。由此定义

$$\left. \begin{aligned} p_i &= S_i / \sum_{k=1}^{2n} S_k \\ \sigma_i &= \lg(p_i) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: p_i 为第 i 个特征值 S_i 在整个特征值中所占的比例; σ_i 为 p_i 的对数值; S_k 为第 k 个特征值。

由 σ_i 组成的序列为 Hankel 矩阵经奇异值分解后得到的奇异值谱,表示各个状态变量在整个系统中所占能量的相对关系。一般奇异值谱图中,经奇异值分解后前面的少数奇异值会比较大,并且占据了整个信号的大部分能量,而其余的奇异值会相对较小,占有的能量比例也少。较大的奇异值反映了信号中的特征成分,而其余比较小的奇异值就构成了所谓的噪声平台,是需要截断的部分。

引入熵 E_k 的概念,其计算公式为

$$E_k = \sum_{i=1}^k \Delta E_i \quad (3)$$

$$\Delta E_i = -p_i \lg(p_i) \quad (4)$$

式中: k 为奇异熵的阶次; ΔE_i 为奇异熵在阶次 i 时的增量。

奇异熵是反映信息中有效信息量的一个指标,对信号信噪比的变化反应非常敏感。根据奇异熵增量的变化来确定降噪的合理阶次,取得了较好的效果。

在随机子空间方法识别过程中进行系统定阶时,对 Hankel 矩阵进行逼近处理,当原始信号中的有效信息量达到饱和时,奇异熵稳定于一个固定值,此时对应的阶次可以看做系统阶次。实际应用中为了让这种渐近更为明显,可以对奇异熵增量求一阶导数,当奇异熵增量的导数(斜率)值趋于 0 时,对应的奇异值谱阶次可以认为是系统的阶次,从而对奇异值进行截断。

2 稳定图法去除噪声模态

在分布式的模态识别过程中,由于各子结构的信息量相对于整体识别时的信息量大大减少,加上各种噪声以及 Hankel 矩阵的块和行数量的影响,模态识别时会产生较多的虚假模态,仅用奇异熵还是很难确定系统的阶次。因此,本文中提出采用频率稳定图结合奇异熵导数来进行系统定阶,正确地识别了子结构的模态信息。

稳定图的原理是:假定模型有不同的阶次,这样得到多个不同阶次的状态空间模型,分别循环对每个状态空间模型进行识别,把不同阶次模型的模态参数绘制在同一幅二维图上,横坐标为频率,纵坐标为阶次。在相对应于某模态阶次的轴上,将高一阶模型的识别结果与低一阶模型的识别结果进行比较,根据一定的判别依据,满足误差允许范围的点就成为系统的稳定点,稳定点组成的轴为稳定轴,相对应的模态即为系统的真实模态。

频率稳定的判定因子一般可将频率、模态置信度和阻尼比等作为依据,常用的判定阈值有:特征频率 $\frac{f^i - f^{i+1}}{f^i} \times 100\% < \alpha$; 阻尼比 $0 < \xi^i < \gamma$; 模态置信

度 $M_{AC} = \frac{|(\boldsymbol{\varphi}^i)^T \boldsymbol{\varphi}^{i+1}|^2}{(\boldsymbol{\varphi}^i)^T \boldsymbol{\varphi}^i (\boldsymbol{\varphi}^{i+1})^T \boldsymbol{\varphi}^{i+1}} > \beta$ 。其中, $f^i, \xi^i, \boldsymbol{\varphi}^i$ 分别为第 i 阶系统的频率、阻尼比和模态振型, α, β, γ 分别为频率、模态置信度和阻尼比的误差阈值,可根据不同的结构选取适当的值。模态置信度 M_{AC} 为介于 0~1 的值,如果 $\boldsymbol{\varphi}^i$ 和 $\boldsymbol{\varphi}^{i+1}$ 是同一振型, M_{AC} 应接近 1,否则应很小。

3 数值算例分析

3.1 模型及装置

以某一简支梁为模型,利用 MATLAB 软件进行振动测试的仿真模拟,识别了该模型的模态参数,并验证该方法的有效性。

该简支梁的跨度为 6 m,截面尺寸为 0.25 m × 0.20 m,截面积 $A' = 0.05 \text{ m}^2$,材料弹性模量 $E = 24 \text{ GPa}$,密度 $\rho = 2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。将简支梁沿跨度划分为 15 个梁单元,16 个节点,如图 1 所示。

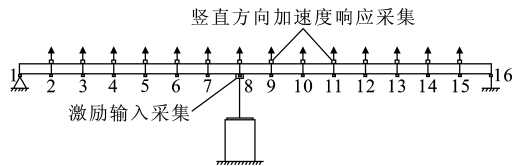


图 1 简支梁有限元模型

Fig. 1 Finite Element Model of Simply Supported Beam

在 MATLAB 软件中建立该简支梁有限元模型,采用 Simulink 仿真模拟功能激振简支梁结构并采集加速度响应。在仿真模拟中假设在节点 2~15 处竖向共安装 14 个加速度传感器,仅考虑简支梁的竖向振动,在节点 8 的 y 方向施加功率为 100 Hz 的白噪声模拟环境激励来激振简支梁结构,模拟振动时间为 50 s,采集节点 2~15 处的竖向加速度响应,随后在响应信号中增加 10% 的随机噪声信号进行分析。

3.2 仿真测试

3.2.1 测试结果

在白噪声的激励下得到 14 个测点的竖向加速度。节点 2 处的加速度信号见图 2,其中, g 为重力加速度。

整体结构进行集中式分析识别时以第 7 个测点(节点 8)为参考点,求解其他各响应信号与其之间的互功率谱密度函数,通过逆傅里叶变换得到相关函数。节点 7 与节点 8 处的互功率谱密度函数和相关函数如图 3 所示。

3.2.2 分析识别

在仿真模拟过程中,设计低通椭圆滤波器剔除高频的噪声频率,该滤波器的截断频率为 150 Hz。在对该简支梁结构进行识别时,只考虑前 4 阶频率,因此,奇异值截断应该至少为 8 阶。

图 4(a)为简支梁识别模态过程中的 Hankel 矩阵奇异值对数,奇异值无明显突变分界线,且高阶次的奇异值没有接近 0,很难对系统进行准确的定阶。

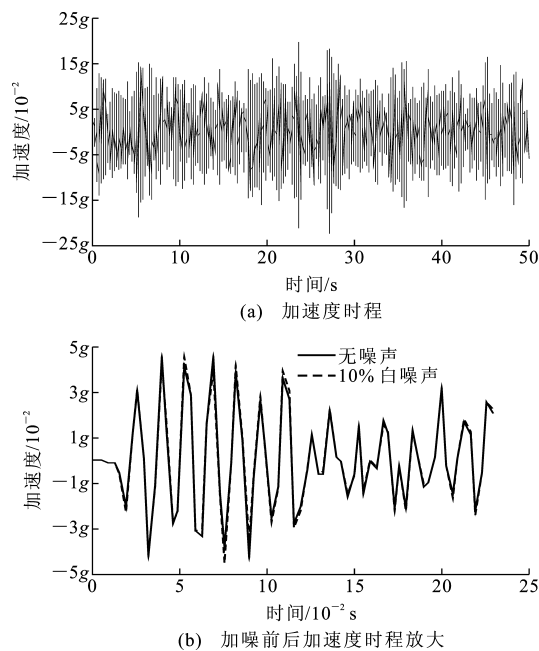


图 2 节点 2 处的加速度信号

Fig. 2 Acceleration Signals at Joint 2

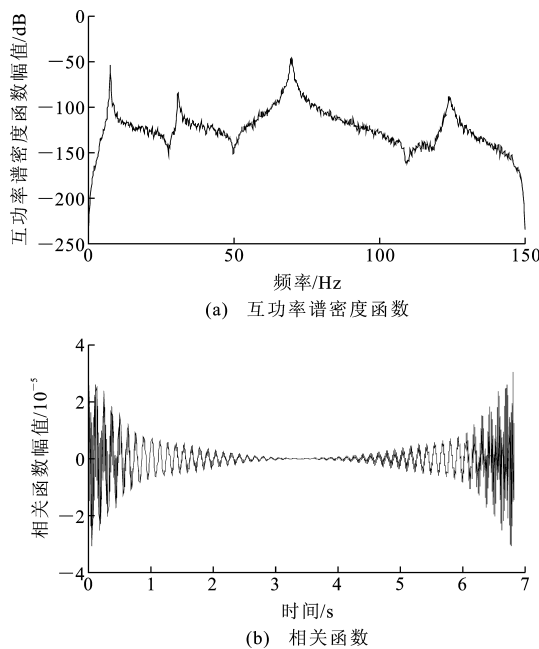


图 3 节点 7 与节点 8 处的互功率谱密度函数和相关函数

Fig. 3 Cross Power Spectral Density Function and Correlation Function at Joints 7,8

图 4(b)为奇异熵增量导数,可知奇异熵增量导数在 10 阶左右就已经接近 0。从互功率谱密度函数图可知,150 Hz 的截断频率之前有 4 阶模态,因此这里选取 8 阶的截断值。

系统定阶后,按照前面讲述原理即可得到结构的模态频率和模态振型,如表 1 和图 5 所示。

由频率和振型结果可知,对整体结构进行识别

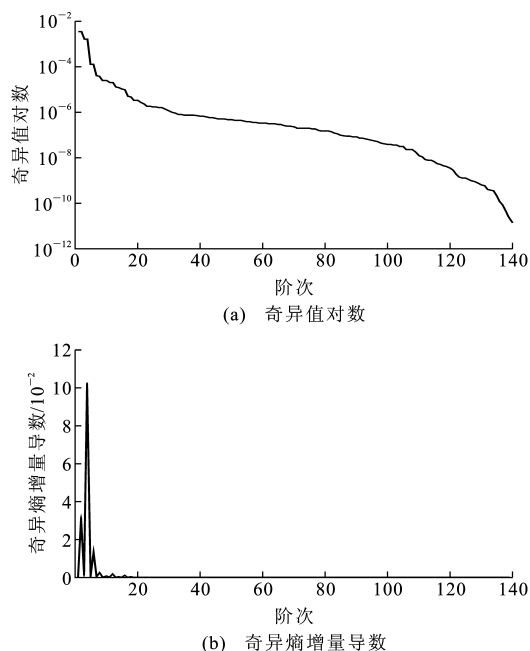


图 4 奇异值分解结果

Fig. 4 Results of Singular Value Decomposition

表 1 简支梁频率

Tab. 1 Frequencies of Simply Supported Beams

阶次	1	2	3	4
频率/Hz	7.772	31.088	69.942	124.306
有限元模型解	7.772	31.088	69.942	124.306
随机子空间方法	7.842	31.194	70.024	124.192

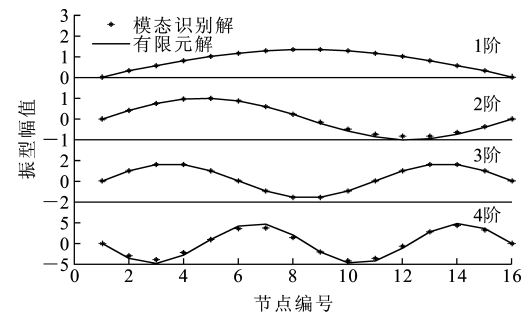


图 5 简支梁模态振型

Fig. 5 Modal Shapes of Simply Supported Beam

时,采用奇异熵技术能够很好地进行系统定阶,并获得较为准确的结构模态参数。然而当将结构加速度采集系统划分为多个子结构,分别在各子结构内部进行模态识别时,由于子结构独立系统包含的加速度信息量相对较少,即使采用奇异熵也很难确定子结构系统阶次,很容易产生模态遗漏或虚假模态的增加。这里将简支梁振动测试的全加速度分为 4 个子结构(表 2)分别进行识别,观察子结构加速度信息减少情况下的识别结果和系统定阶问题,说明结合稳定图技术对各子结构进行定阶的作用。稳定图识别过程中,以模态置信度和阻尼比作为稳定频率

表 2 子结构划分

Tab.2 Divisions of Substructures

子结构编号	节点编号
Group 1	2,3,4,5
Group 2	5,6,7,8
Group 3	8,9,10,11
Group 4	11,12,13,14,15

的判定阈值,取值分别为 $\beta=0.9,\gamma=5$ 。

图 6(a)为 Group 1 内的加速度在进行模态识别时的奇异值分解后的奇异熵增量导数图。可见,奇异熵增量导数在 10 阶左右开始接近于 0,但是当选取截断值为 10 阶或 10 阶以上时,识别出的结果会产生虚假模态频率。结合图 6(b)的频率稳定图来看,前 4 阶频率在系统截断值为 8 阶时就已经出现稳定值,因此选择截断值为 8 阶。

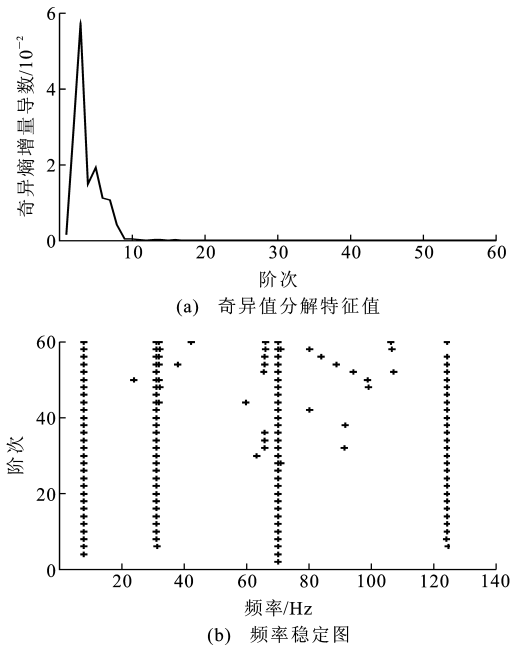


图 6 Group 1 的分析结果

Fig.6 Analysis Results of Group 1

图 7 为 Group 2 内的加速度在进行模态识别时的奇异熵增量导数图和频率稳定图。奇异熵增量导数在 10 阶后才趋于 0,但由频率稳定图可知,该子结构从 8 阶开始出现较为稳定的频率。如果选取 10 阶作为该子结构的阶次,识别出的模态会增加在 70 Hz 左右的虚假噪声模态。因此采用频率稳定图的显示结果,以 8 阶作为 Group 2 的系统阶次。另外,频率稳定图中 20 阶后出现在 105 Hz 左右的频率是高频噪声频率。

图 8,9 分别为 Group 3 和 Group 4 的奇异熵增量导数图和频率稳定图,同样这 2 个子结构的奇异

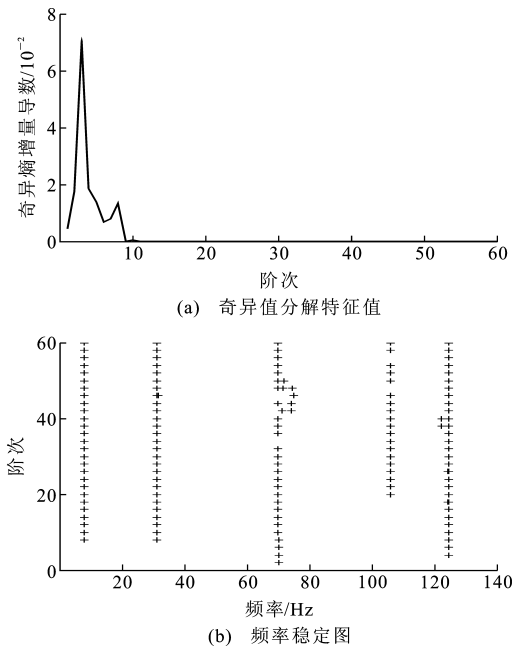


图 7 Group 2 的分析结果

Fig.7 Analysis Results of Group 2

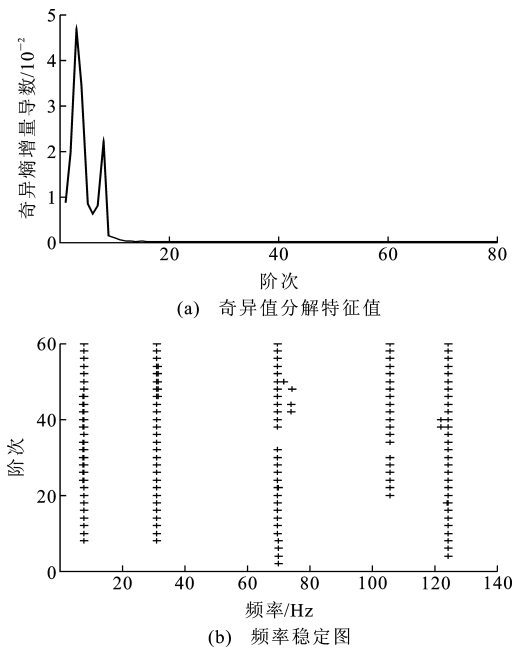


图 8 Group 3 的分析结果

Fig.8 Analysis Results of Group 3

熵增量导数都是从 9 阶或 10 阶开始趋于 0,然而 10 阶的截断值会产生虚假模态频率。结合频率稳定图来看,这 2 个子结构的前 4 阶频率都在 8 阶开始已经趋于稳定,因此可确定这 2 个子结构的阶次为 8,不足之处是 20 阶后出现在 105 Hz 左右的频率是高频噪声频率。

根据稳定图定阶和随机子空间的识别结果,该简支梁各子结构的前 4 阶频率见表 3。

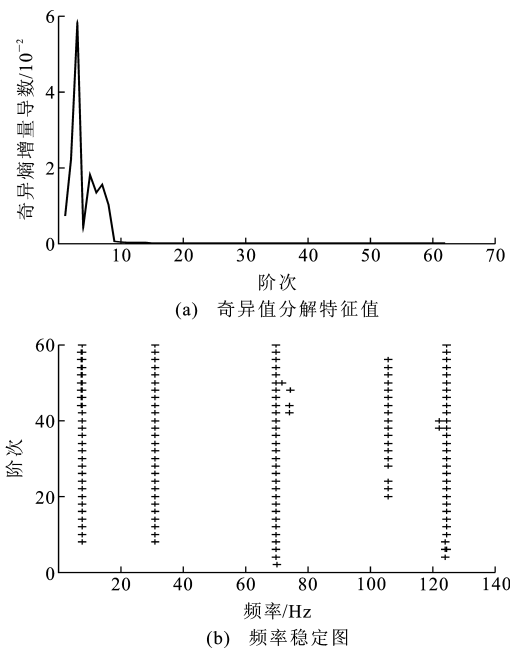


图 9 Group 4 的分析结果

Fig. 9 Analysis Results of Group 4

表 3 子结构频率

Tab. 3 Frequencies of Substructures

阶次		1	2	3	4
频率/Hz	Group 1	7.853	31.268	70.014	124.335
	Group 2	7.851	31.233	70.015	124.318
	Group 3	7.842	31.187	70.020	124.290
	Group 4	7.836	31.145	70.012	124.380

由上述结果可知,各子结构识别的结果和整体结构及有限元解的结果比较接近,说明频率稳定图技术能够很好地对子结构系统进行定阶,以获得准确的模态信息。

4 结 语

对大型复杂结构进行模态识别时需要采用分布式的分析处理技术,本文中针对分布式识别中系统定阶问题对识别结果的影响,提出了采用奇异熵导数结合稳定图技术进行子结构系统定阶去除虚假模态的方法。通过对简支梁有限元模型进行 Simulink 仿真模拟测试分析,得到以下结论:①奇异熵导数对信号信噪比的变化反应非常敏感,能直观地反映 Hankel 矩阵的逼近情况,根据奇异熵增量导数的零点来确定降噪的合理阶次,能够很好地进行系统定阶,以获得较为准确的结构模态参数;②分布式识别技术中由于子结构信息量少和噪声影响而产生虚假模态,频率稳定图技术能够有效去除虚假模态,对子结构进行系统定阶,并有助于子结构之间模态阶

次匹配,以获得准确的整体结构模态参数。

参考文献:

References:

[1] 秦世强,蒲黔辉,施 洲. 环境激励下大型桥梁模态参数识别的一种方法[J]. 振动与冲击,2012,31(2):95-100.
QIN Shi-qiang,PU Qian-hui,SHI Zhou. A Method of Modal Parameters Identification Using Ambient Vibration Measurements for a Large-scale Bridge[J]. Journal of Vibration and Shock,2012,31(2):95-100.

[2] YUAN L,GONG S F,JIN W L. Spallation Mechanism of RC Slabs Under Contact Detonation [J]. Transaction of Tianjin University,2008,14(6):464-469.

[3] PEETERS B,DE ROECK G. Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering [J]. Inverse Problems in Engineering,2000,8:47-74.

[4] ALAMPALLI S. Effects of Testing, Analysis, Damage, and Environment on Modal Parameters[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2000,14(1):63-74.

[5] 刘龄嘉,赵小星,贺拴海. 混凝土模型梁模态试验方法[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(5):58-61.
LIU Ling-jia, ZHAO Xiao-xing, HE Shuan-hai. Modal Test Method for Concrete Beams Model[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007,27(5):58-61.

[6] 周勇军,赵小星,宋一凡,等. 连续梁桥模态分析与试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(3):57-60.
ZHOU Yong-jun, ZHAO Xiao-xing, SONG Yi-fan, et al. Modal Analysis and Experiment Test of Continuous Beam Bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2007,27(3):57-60.

[7] 华旭刚,陈政清. 基于 ANSYS 的桥梁全模态颤振频域分析方法[J]. 中国公路学报,2007,20(5):41-47.
HUA Xu-gang,CHEN Zheng-qing. Full-mode Flutter Frequency Domain Analysis Method of Bridge Based on ANSYS[J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(5):41-47.

[8] 贺 瑞,秦 权. 基于含噪声脉动反应的悬索桥损伤识别[J]. 中国公路学报,2009,22(5):75-82.
HE Rui,QIN Quan. Damage Detection of Suspension Bridges Based on Noise-contaminated Ambient Responses[J]. China Journal of Highway and Transport,2009,22(5):75-82.

[9] WONG K Y. Instrumentation and Health Monitoring of Cable-supported Bridge[J]. Structural Control

- tion[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44(3): 494-504.
- [3] HE T, ZHOU D, BAO Y. Combined Interface Boundary Condition Method for Fluid-rigid Body Interaction[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 223/224: 81-102.
- [4] NITHIARASU P, CODINA R, ZIENKIEWICZ O C. The Characteristic-based Split (CBS) Scheme—A Unified Approach to Fluid Dynamics[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2006, 66(10): 1514-1546.
- [5] LEFRANCOIS E. A Simple Mesh Deformation Technique for Fluid-structure Interaction Based on a Sub-mesh Approach[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2008, 75(9): 1085-1101.
- [6] MARKOU G A, MOUROUTIS Z S, CHARMPIS D C, et al. The Ortho-semi-torsional (OST) Spring Analogy Method for 3D Mesh Moving Boundary Problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2007, 196(4/5/6): 747-765.
- [7] JAN Y J, SHEU T W H. Finite Element Analysis of Vortex Shedding Oscillations from Cylinders in the Straight Channel [J]. Computational Mechancis, 2004, 33(2): 81-94.
- [8] PIPERNO S. Explicit/Implicit Fluid/Structure Staggered Procedures with a Structural Predictor and Fluid Subcycling for 2D Inviscid Aeroelastic Simulations[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1997, 25(10): 1207-1226.
- [9] KUTTLER U, WALL W. Fixed-point Fluid-structure Interaction Solvers with Dynamic Relaxation[J]. Computational Mechancis, 2008, 43(1): 61-72.
- [10] DETTMER W, PERIC D. A Computational Framework for Fluid-rigid Body Interaction: Finite Element Formulation and Applications[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195(13): 1633-1666.
- [11] ROBERTSON I, LI L, SHERWIN S J, et al. A Numerical Study of Rotational and Transverse Galloping Rectangular Bodies[J]. Journal of Fluids and Structures, 2003, 17(5): 681-699.
- [12] BLEVINS R D. Flow-induced Vibration[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Co. Inc., 1990.
- [13] WILLIAMSON C H K, ROSHKO A. Vortex Formation in the Wake of an Oscillating Cylinder[J]. Journal of Fluids and Structures, 1988, 2(4): 355-381.

(上接第 54 页)

- Health Monitoring, 2004, 11(2): 91-124.
- [10] NAGAYAMA T. Structural Health Monitoring Using Smart Sensor[D]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007.
- [11] 阎 石, 张 亮, 王 丹. 钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下的破坏模式分析[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2005, 21(3): 177-180.
- YAN Shi, ZHANG Liang, WANG Dan. Failure Mode Analysis for RC Slab Under Explosive Loads[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2005, 21(3): 177-180.
- [12] 张 舵, 卢芳云, 王瑞峰. 钢筋混凝土板在爆炸作用下的破坏研究[J]. 弹道学报, 2008, 20(2): 13-16.
- ZHANG Duo, LU Fang-yun, WANG Rui-feng. Study on Destruction of Reinforced Concrete Slab Under Blast Loading[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(2): 13-16.
- [13] JAMES G H, CARNE T G. The Natural Excitation Technique for Modal Parameter Extraction from Ambient Operating Structure[J]. The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 1995, 10(4): 260-277.
- [14] KUNG S Y. A New Identification and Model Reduction Algorithm Via Singular Value Decomposition [C]//HSIEH C C. Proceedings of the 12th Asilomar Conference on Circuits, Systems and Computers. New York: IEEE, 1978: 705-714.
- [15] 吕志民, 张武军, 徐金梧. 基于奇异谱的降噪方法及其在故障诊断技术中的应用[J]. 机械工程学报, 1999, 35(3): 85-88.
- LU Zhi-min, ZHANG Wu-jun, XU Jin-wu. A Noise Reduction Method Based Singular Spectrum and Its Application in Machine Fault Diagnosis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(3): 85-88.
- [16] 李 睿, 于德介, 曾 威. 一种基于奇异谱熵和脉冲响应的结构损伤诊断方法[J]. 振动工程学报, 2006, 19(3): 331-335.
- LI Rui, YU De-jie, ZENG Wei. Damage Diagnosis of Structures Based on Singular Spectrum Entropy and Impulse Response[J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(3): 331-335.
- [17] 杨文献, 任兴民, 姜节胜. 基于奇异熵的信号降噪技术研究[J]. 西北工业大学学报, 2001, 19(3): 368-371.
- YANG Wen-xian, REN Xing-min, JIANG Jie-sheng. On Improving the Effectiveness of the New Noise Reduction Technique Based on Singularity Spectrum[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2001, 19(3): 368-371.