

基于先验振型的贝叶斯结构模态参数识别方法^{*}

徐希堃¹, 洪 或¹, 许靖业¹, 蒲黔辉¹, 文旭光²

(1. 西南交通大学土木工程学院 成都, 610031)

(2. 南宁学院广西中国-东盟综合交通国际联合重点实验室 南宁, 530000)

摘要 为提升运营桥梁模态参数识别的自动化与抗干扰能力, 解决传统方法易受噪声影响、存在误判漏阶及依赖经验等问题, 提出了基于先验振型的贝叶斯(prior vibration mode shape Bayesian, 简称PVMSB)识别方法。首先, 基于贝叶斯框架, 以先验振型为参照构建振型匹配度指标, 量化实测数据与先验信息的吻合度, 从而引导识别过程; 其次, 通过该指标在参数空间中进行概率筛选, 并采用正向优化策略直接求解后验概率, 避免了传统贝叶斯方法中的大型矩阵求逆过程, 显著提升了计算效率与稳定性; 最后, 基于一座人行斜拉桥的实际环境振动数据, 验证了所提方法的有效性, 并与协方差驱动随机子空间识别法(covariance-based subspace system identification, 简称COV-SSI)进行对比。结果表明: 所提方法在强噪声背景下仍能稳定、准确地识别出结构各阶模态, 有效抑制了虚假模态; 该方法具备识别精度高、计算成本低、环境适应性强、可量化结果不确定性的优势, 为桥梁安全监测与性能评估提供了可靠性好、自动化程度高的分析工具。

关键词 贝叶斯方法; 模态参数识别; 桥梁工程; 先验振型; 随机子空间识别

中图分类号 TU311.3; TH113.1

0 引言

健康监测系统广泛用于结构损伤的诊断、评估、实时监控和预警^[1]。模态参数识别是结构健康监测的必要前提, 其中参数识别算法的精度直接影响结构评估的准确性^[2]。按照识别信号域的不同, 模态参数识别方法可分为时域识别方法、频域识别方法以及时频域识别方法。在实际操作中, 通常会有以下问题: ①对现场测试条件要求较高, 一般难以在不影响结构运营的条件下获取较高质量的测试数据, 而是需要特殊外部激励状态(如白噪声状态、冲击激励、扫频激励等), 以实现模态激发效果^[3-4]; ②现场存在未知因素产生的规律性信号、不同阶模态的差异性激发、测量误差以及倍频效应等情况, 易造成误识别, 表现为各种虚假模态^[5-6]; ③需要大量人工干预, 如信号窗口、识别阶数、采样率等经验性算法参数的调优^[7], 以及虚假模态的剔除^[8]等; ④需要进行大型矩阵运算, 计算成本高、效率低^[9]。

目前, 基于概率统计分析原理的贝叶斯理论已逐步应用于结构动力系统识别, 并发展出众多模态参数识别方法^[10]。文献[11-12]提出了贝叶斯模态

识别方法, 并将基于贝叶斯理论的模态参数识别方法应用于时域识别中, 发展出贝叶斯时域法、基于贝叶斯快速傅里叶变换(Bayesian fast Fourier transform, 简称BFFT)的模态参数识别法以及贝叶斯功率谱法等代表性识别方法。BFFT法是对原始时域数据进行快速傅里叶变换, 从而识别出结构的频率和振型等参数, 其理论推导严格, 具有明显优势^[13-14]。然而, 该方法需使用2次有限差分法来确定Hessian矩阵, 延长了计算时间。此外, 在优化目标函数时, 需要识别的模态参数数量会随测点数的增加而增加, 且在求逆过程中遭遇病态矩阵, 计算成本过高。

为提高BFFT法的识别效率, Au等^[15-17]提出了快速贝叶斯快速傅里叶变换法(fast Bayesian fast Fourier transform, 简称FBFFT), 通过简化模态参数的似然函数, 并采用后验协方差矩阵的解析式, 显著缩短了优化目标函数和计算协方差矩阵的所需时间。在此基础上, Zhu等^[18]及杨朝勇等^[19]进一步将FBFFT法与最大化算法、遗传算法结合, 提高了密集模态识别效率和大跨度桥梁参数识别精度。

本研究从贝叶斯原理出发, 构建一种新的参数

^{*} 广西科技计划资助项目(桂科AA21077011); 四川省科技计划资助项目(2021YJ0054); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2682022CX003)

收稿日期: 2023-07-15; 修回日期: 2023-12-08

识别方法。基于有限元模型提供的先验振型,提出PVMSB参数识别法。将该算法用于识别某人行斜拉桥的模态参数,并将所得结果与COV-SSI、Midas软件数值解进行对比分析,以验证所提识别算法的可靠性和准确性。

1 PVMSB 参数识别方法

1.1 基本原理

PVMSB方法利用振型在固有频率附近具有

稳定和高辨识度的特点,引入先验振型(来自有限元分析或工程经验)作为参照,通过贝叶斯框架量化实测振型与先验振型的匹配度,从而在频域中定位真实模态。PVMSB方法示意图如图1所示,其基本思路为:①在频域上先将先验模态振型与识别振型进行扫频式匹配;②构造频率窗口振型匹配度指标,找到频域上对应的最优窗口;③对最优窗口内的振型进行降噪处理。值得注意的是,先验模态振型可由数值仿真结果或工程经验取值提供,结合数值仿真和工程经验的方法通常可为工程问题提供更可靠的先验振型方案。

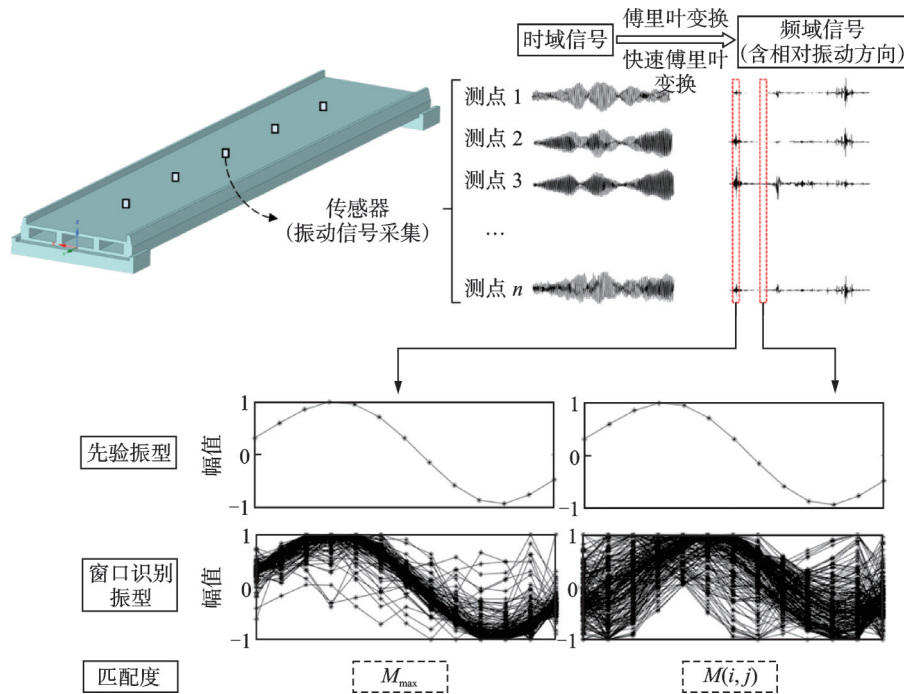


图1 PVMSB方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of PVMSB

1.2 模态振型匹配度指标

如图1中红色虚线框所示,本研究引入窗口概念。 $f(i)$ 表示离散傅里叶变换后频域上的第 i 个频率点,令窗口包含 N_w 个频率点,则 $i - 0.5N_w$ 为窗口左边界点, $i + 0.5N_w$ 为窗口右边界点。需要注意的是,参数 N_w 不应过小或过大,过小会因样本太少而无法体现振型稳定性,过大则会造成错误识别。

基于贝叶斯推断原理定义先验振型与测试振型的匹配度指标 $M(i, j)$ 计算式为

$$M(i, j) = p[\text{MAC}(\hat{\phi}_j, \bar{\phi}_j) = 1 | \mu(i, j), \sigma(i, j), N_w] = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma(i, j)} \exp \left\{ -\frac{[1 - \mu(i, j)]^2}{2\sigma^2(i, j)} \right\} \quad (1)$$

式(1)中,有

$$\mu(i, j) = \frac{1}{N_w} \sum_{k=1}^{N_w} \left\{ \text{MAC}[\hat{\phi}_j, \phi_{i,j}(k)] \right\} \quad (2)$$

$$\sigma(i, j) = \sqrt{\frac{1}{N_w} \sum_{k=1}^{N_w} \left\{ \text{MAC}[\hat{\phi}_j, \phi_{i,j}(k)] - \mu(i, j) \right\}^2} \quad (3)$$

其中: i 为第 i 个频率窗口; j 为第 j 阶模态; $\hat{\phi}$ 为先验模态振型向量; $\bar{\phi}$ 为识别振型向量;模态置信准则(modal assurance criterion, 简称MAC)算子^[20]取值为0~1,越接近1,则表示两向量之间差异越小; $\phi_i(k)$ 为第 i 个频率窗口中从小到大的第 k 个频率点上识别的振型向量; $\mu(i, j)$ 、 $\sigma(i, j)$ 分别为第 i 个频率窗口中所有频率点的MAC算子的均值、标准差。

$M(i, j)$ 建立于条件概率思想之上^[21],在式(1)

中表示在已知窗口 i 的 $\mu(i, j)$ 和 $\sigma(i, j)$ 的条件下, 识别振型与先验模态振型的 MAC 算子为 1 时的概率密度。假设该条件概率满足 $\mu(i, j)$ 和 $\sigma(i, j)$ 的正态分布时, 可得到式 (1)。当标准差 $\sigma(i, j)$ 越小时, 匹配度指标 $M(i, j)$ 越大, 这与条件概率方法的理念较为吻合。

1.3 最优频率窗口降噪

在确定最优振型匹配度窗口后, 由于存在少量因相位差、误差或环境干扰产生的离群噪声数据 (如图 1 所示), 需对窗口内数据进行降噪。本研究提出对窗口内各频率点的 MAC 值进行间隔为 0.1 的区间统计, 再保留最大概率区间内的频率点, 以实现降噪。最优频率窗口内区间统计如图 2 所示。最后, 选出目标频率点集合 $\{T\}$ 并获得结果可信度因子 (certainty factor, 简称 CF)。

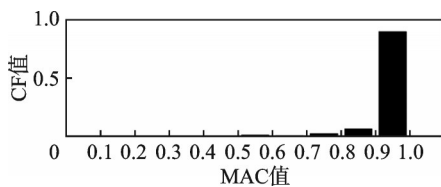


图 2 最优频率窗口内区间统计

Fig.2 Statistical analysis within the optimal frequency window interval

基于 $\{T\}$ 的识别结果为

$$\bar{f}_j = \frac{1}{N_{\{T\}}} \sum_r^{(T)} f_{r,j} \quad (4)$$

$$\bar{\varphi}_{n,j} = \frac{1}{N_{\{T\}}} \sum_r^{(T)} \varphi_{r,(n,j)} \quad (5)$$

$$CF = \frac{N_{\{T\}}}{N_w} \quad (6)$$

其中: n 为测点号; $N_{\{T\}}$ 为保留的频率集合所含频率点数; CF 为所保留的频率点数与总测点数的比值, 比值越高, 说明所取频率点数在区间中的集中度越高, 结果可信度越高。

2 PVMSB 参数识别流程

PVMSB 参数识别方法的操作流程主要分为数据准备、优化搜索与噪声排除。数据准备阶段需设置先验振型, 通常由有限元模型分析、模型试验或经验归纳得到。当实际振型与先验振型偏差较大时, 通常表明两者属于不同的振动模式。因此, 可通过预设多种先验振型模式来解决, 如预设不同破坏模

式或不同材料参数下的先验振型等。此外, 还需采集结构振动信号, 并进行频域变换。在优化搜索阶段, 需先设置窗口宽度参数, 预设频率识别有效区间, 以进一步提升计算效率, 避免不合理的识别结果。最后, 在找到最优频率识别窗口后, 进行噪声剔除, 得到最终识别结果。识别流程如图 3 所示。

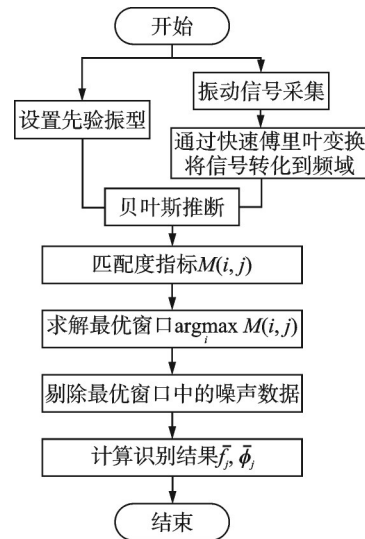


图 3 识别流程

Fig.3 Identification flowchart

3 实际工程算例

3.1 工程概况

以四川锦城湖一座主跨 175 m 的人行斜拉桥为研究对象, 在主梁 13 个截面布置加速度传感器, 同步采集横向与竖向振动响应。测试工况包括环境白噪声、人群慢走和人群快行激励。图 4 为斜拉桥加速度测点布置图。通过傅里叶变换对 A_1 测点的实测加速度数据进行处理, A_1 测点时域图、频域图分别如图 5、图 6 所示。

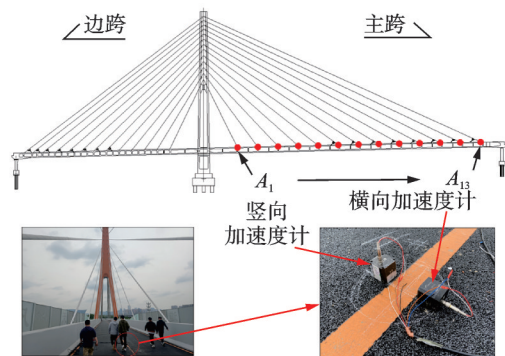


图 4 斜拉桥加速度测点布置图

Fig.4 Layout of acceleration measurement points for cable-stayed bridge

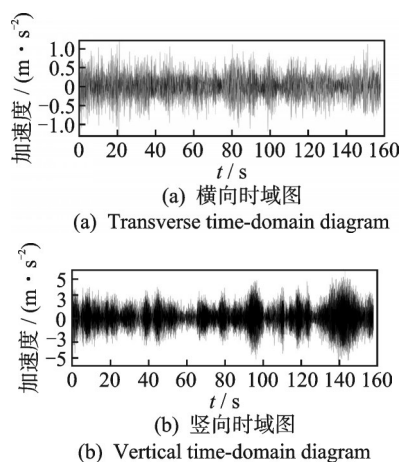


图 5 A_1 测点时域图
Fig.5 Time-domain diagrams of A_1

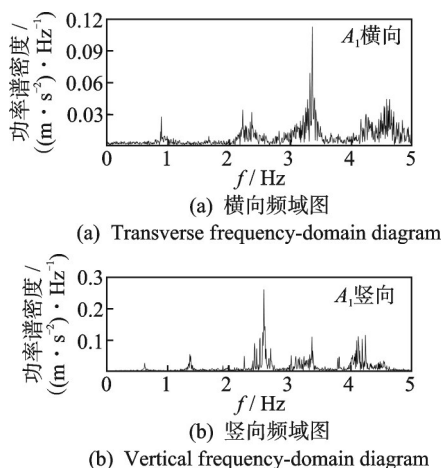


图 6 A_1 测点频域图
Fig.6 Frequency-domain diagrams of A_1

3.2 有限元分析

采用 Midas 有限元软件建立人行斜拉桥三维模型,主梁和主塔材料采用 C55 混凝土材质,弹性模量为 $3.55 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比为 0.2;承力索为钢材材质,弹性模量为 $1.95 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比为 0.3。其边界条件为:主塔与主梁之间的塔梁固结体系为主从约束连接,交接墩和辅助墩的支座采用弹性连接模拟。全桥模型节点数共计 1 528,单元数共计 1 376。动载测试主要分为白噪声激励、行人齐步慢走激励、行人齐步快走激励 3 种。其中:白噪声激励为桥面无任何交通荷载以及桥梁附近无规律性震源的工况,测定桥跨由桥址处风荷载、地脉动、水流等随机荷载激励引起的结构微幅振动响应;行人慢走激励、行人快走激励分别为 30 人以上在主跨纵向来回齐步慢走、跑动 1 圈,测定桥梁在 2 种激励下的加速度响应。有限元模型采用 Lanczos 法计算其模态振型及对应的频率,弯曲模态振型图如图 7 所示。人行桥自振

频率数值解如表 1 所示。

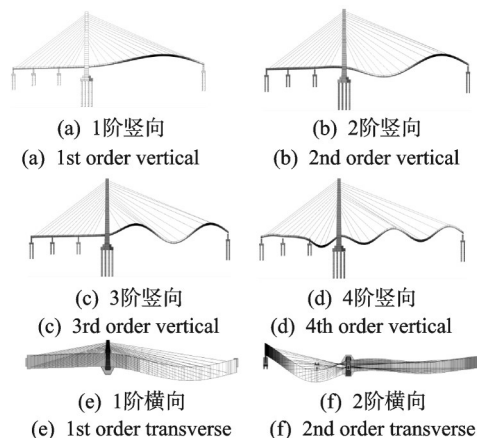


图 7 弯曲模态振型图
Fig.7 Bending mode shape plots

表 1 人行桥自振频率数值解

Tab.1 Theoretical values for natural frequencies of pedestrian bridge

阶次	竖向/Hz	横向/Hz
第 1 阶	0.617	0.888
第 2 阶	1.250	2.887
第 3 阶	2.330	—
第 4 阶	3.940	—

3.3 PVMSB 参数识别结果

设置频率窗口宽度 $N_w=200$,应用 PVMSB 方法对 3 种工况下的模态参数进行识别,PVMSB 识别结果见表 2。在全部工况的竖向模态识别中,匹配度指标 M 均大于 0.89,MAC 值大于 0.97,可信度因子 CF 高于 82%。尽管横向模态因部分测点损坏需补全先验振型,导致 M 与 CF 值有所降低,但其 MAC 值仍保持在 0.94 以上。各工况下 PVMSB 弯曲模态振型见图 8(幅值为归一化的量纲一的量)。各工况下 M 、CF 指标分别如图 9、图 10 所示。结果表明,PVMSB 方法在不同激励下均能获得稳定、可靠的识别结果。

在 COV-SSI 算法的适用工况(白噪声工况)下^[22],可获得有参考价值的模态识别结果。为验证 PVMSB 的可靠性,首先将其与 COV-SSI 方法进行对比,白噪声工况频率对比如表 3 所示。模拟阶数为 1、2、3 与 4 时的 Midas 结果(f_i)分别为 0.617、1.250、2.330 与 3.940 Hz。两者识别的前 4 阶竖向模态频率误差在 $-0.48\% \sim 1.49\%$ 内,吻合度良好,证明了 PVMSB 的基本可靠性。两者结果与有限元模型(Midas)的理论值存在一定偏差,这源于实际桥梁的附加质量、施工误差等因素。

表 2 PVMSB 识别结果

Tab.2 Identification results of PVMSB

识别阶数	白噪声(横向)				白噪声(竖向)				人群慢走(竖向)				人群快行(竖向)			
	f/Hz	M	MAC	CF/%	f/Hz	M	MAC	CF/%	f/Hz	M	MAC	CF/%	f/Hz	M	MAC	CF/%
第 1 阶	0.913	0.808	0.961	68.0	0.622	0.918	0.981	85.5	0.630	0.901	0.979	84.0	0.636	0.910	0.979	84.5
第 2 阶	2.370	0.862	0.948	79.5	1.365	0.911	0.982	82.0	1.363	0.930	0.982	89.0	1.366	0.893	0.977	83.5
第 3 阶	—	—	—	—	2.567	0.936	0.985	89.0	2.552	0.922	0.983	86.0	2.591	0.921	0.985	85.5
第 4 阶	—	—	—	—	4.104	0.914	0.984	84.0	4.132	0.923	0.985	88.5	4.108	0.923	0.983	90.0

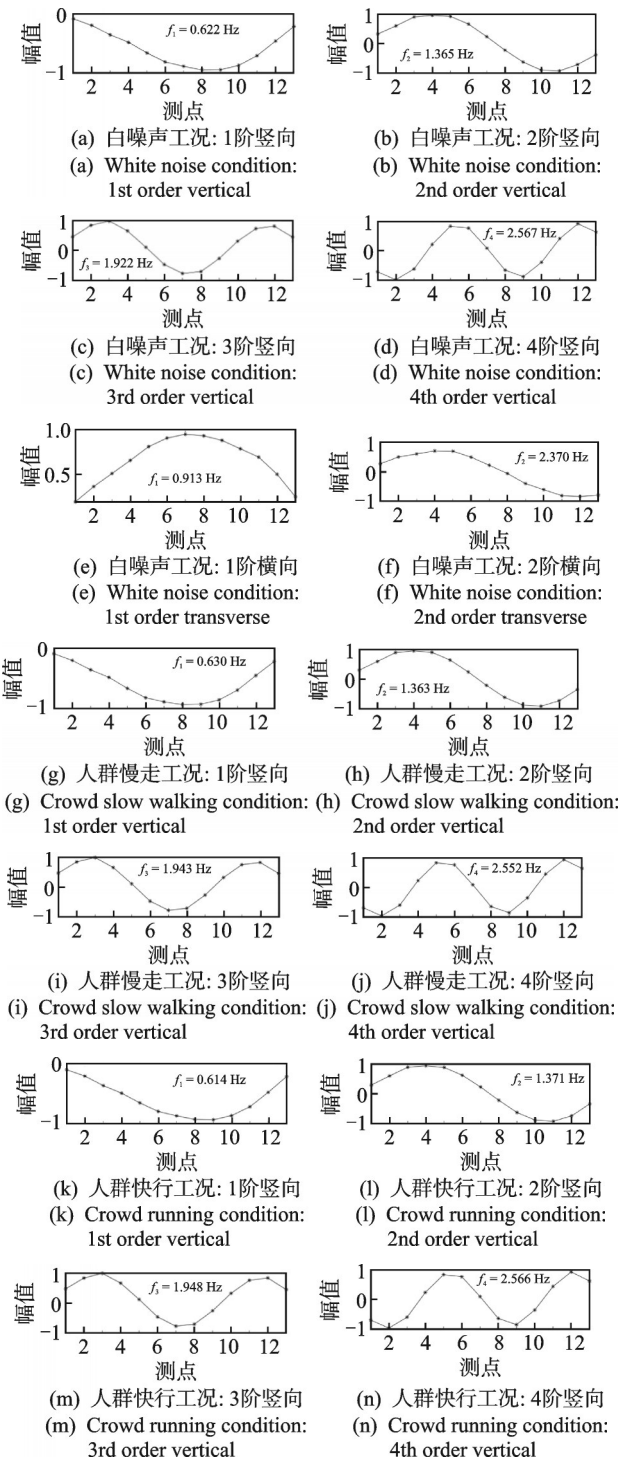


图 8 各工况下 PVMSB 弯曲模态振型

Fig.8 Bending mode shapes plots by PVMSB under different conditions

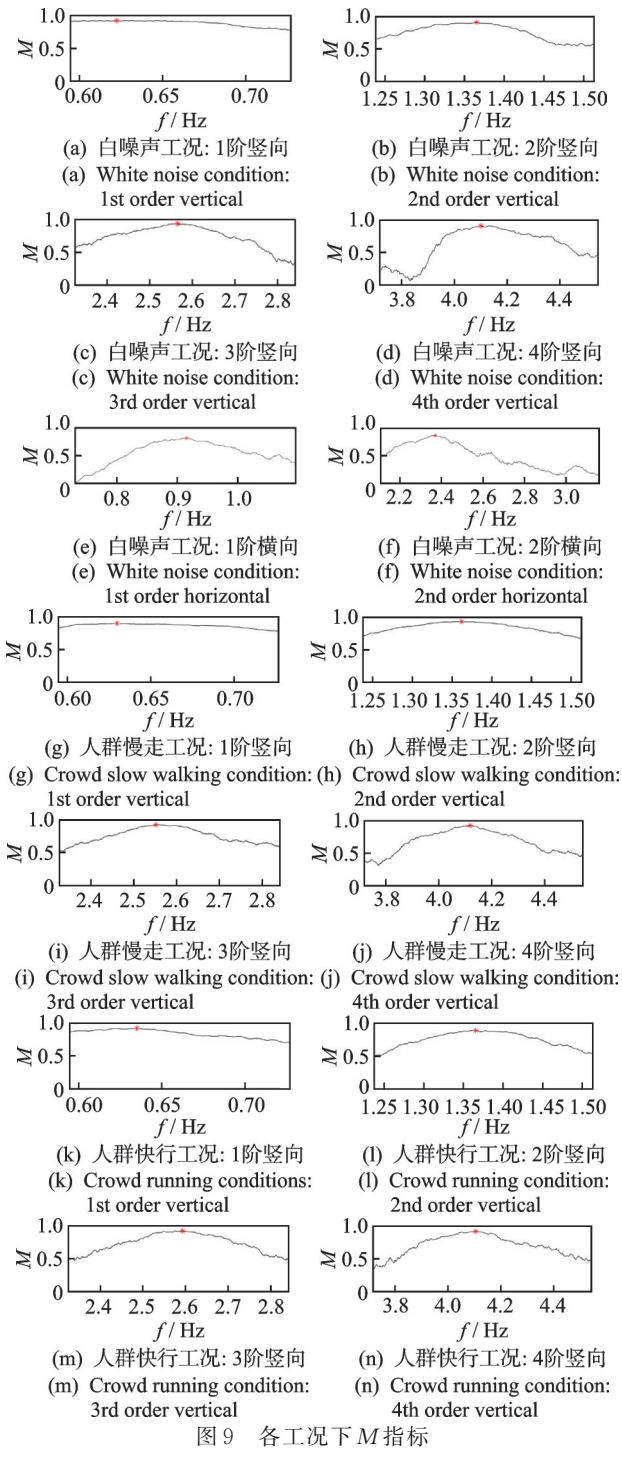


图 9 各工况下 M 指标

Fig.9 Match index under different conditions

在更复杂的人群激励工况下,人群慢走、快行工况频率对比如表 4、表 5 所示(模拟阶数为 1、2、3 和 4

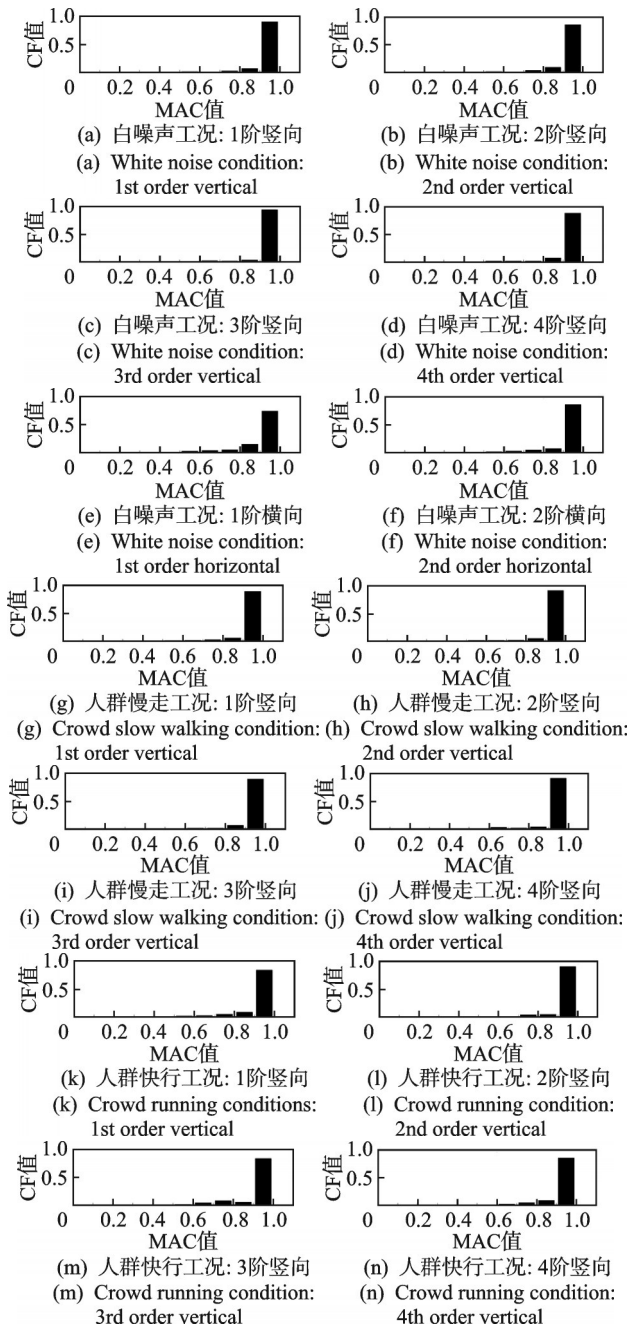


图 10 各工况下 CF 指标

Fig.10 CF indicators under different conditions

表 3 白噪声工况频率对比

Tab.3 Comparison of frequencies under white noise condition

识别阶数	COV-SSI 结果(f_2)/Hz	PVMSB 结果(f_3)/Hz	f_2 与 f_1 差值/%	f_3 与 f_2 差值/%
1	0.621	0.622	0.65	0.16
2	1.345	1.365	7.60	1.49
3	2.571	2.567	10.34	-0.16
4	4.124	4.104	4.67	-0.48

时的 Midas 结果(f_1)分别为 0.617、1.250、2.330 和 3.940 Hz),PVMSB 的优势更为明显。分析数据可得到以下结果。

1) 在人群慢走与快行工况下,COV-SSI方法的

表 4 人群慢走工况频率对比

Tab.4 Comparison of frequencies under crowd slow walking condition

识别阶数	COV-SSI 结果(f_2)/Hz	PVMSB 结果(f_3)/Hz	f_2 与 f_1 差值/%	f_3 与 f_2 差值/%
1	0.637	0.630	3.24	-1.10
2	1.351	1.363	8.08	0.89
3	1.972	—	—	—
4	2.281	—	—	—
6	2.574	2.552	10.47	-0.85
7	4.100	4.118	4.06	0.44

表 5 人群快行工况频率对比

Tab.5 Comparison of frequencies under crowd running condition

识别阶数	COV-SSI 结果(f_2)/Hz	PVMSB 结果(f_3)/Hz	f_2 与 f_1 差值/%	f_3 与 f_2 差值/%
1	0.625	0.636	1.30	1.76
2	1.790	1.366	43.20	23.69
3	1.799	—	—	—
4	1.811	—	—	—
5	1.817	—	—	—
6	2.581	2.591	10.77	0.39
7	3.603	—	—	—
8	3.618	—	—	—
9	4.096	4.108	3.96	0.29

识别结果中出现了理论模型中所没有的冗余阶次,如表 4 中的识别阶数 3、4,以及表 5 中的识别阶数 2、5、7 和 8,这些即为算法受干扰产生的虚假模态。相比之下,PVMSB 方法在对应的 f_3 列中未对这些虚假模态进行输出,有效实现了对虚假模态的自动抑制。

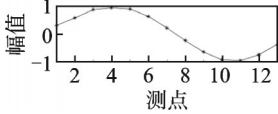
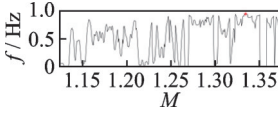
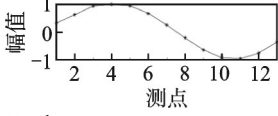
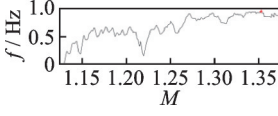
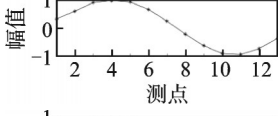
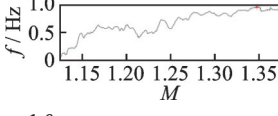
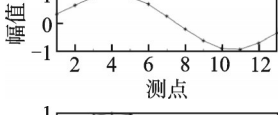
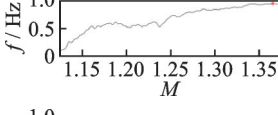
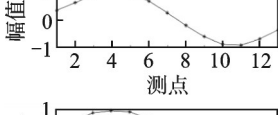
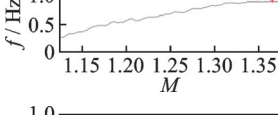
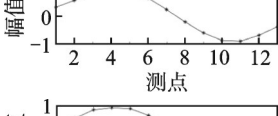
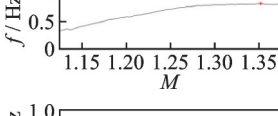
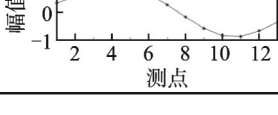
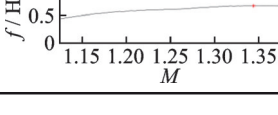
2) 在剔除虚假模态后,于人群慢走工况下,PVMSB、COV-SSI 的识别结果误差百分比范围为-1.10%~0.89%;于人群快行工况下,2 种算法的识别结果误差百分比范围为 0.29%~1.76%,说明 PVMSB 算法识别精度高,识别效果好,适用范围广。

3) 在识别过程中,对比了 PVMSB 与 COV-SSI 的操作流程,PVMSB 将先验信息直接融入识别流程,减少了后续人工核对环节,自动化程度更高。

为进一步研究频率窗口宽度 N_w 对识别结果的影响,以白噪声工况下 2 阶竖向模态的识别为例,对 $N_w=10,30,50,100,200,500$ 和 1 000 时的识别结果进行对比,不同 N_w 对白噪声工况下 2 阶竖向模态识别结果的影响如表 6 所示。分析表中数据可知:①窗口宽度对计算效率存在影响,窗口宽度越小,计算速度越快;②匹配度分布图显示,随着窗口宽度的增大,匹配度 M 分布图像的平滑度逐渐提高,但峰值逐渐降低。这是由于在窗口宽度过小时可能存在集中程度较高的虚假模态,使得匹配度 M 在频率轴上产生剧烈波动,因此窗口宽度不宜过小。窗口宽度过大时(考察的频率区间过大),噪声增多,CF 逐渐下降,导致模态参数识别的功能减弱;③从模态参数来看,

N_w 在较大取值区间内变化时,识别结果保持稳定,这进一步证明了PVMSB算法具有较强的鲁棒性。

表 6 不同 N_w 对白噪声工况下 2 阶竖向模态识别结果的影响

Tab.6 Effect of different N_w on the 2nd order vertical mode identification results under white noise condition					模态振型	匹配度分布
N_w	计算时间/s	f /Hz	CF/%	MAC		
10	1.261	1.335	90.0	0.986		
30	1.447	1.353	96.7	0.991		
50	1.641	1.349	92.0	0.987		
100	2.138	1.366	89.0	0.984		
200	3.878	1.365	82.0	0.982		
500	10.920	1.349	63.8	0.973		
1 000	20.929	1.359	43.2	0.967		

4 结 论

1) 提出并阐释了PVMSB模态参数识别方法框架。通过将先验振型信息引入贝叶斯推断过程,构建了更贴合结构实际状态的概率模型。理论分析表明,该框架能够有效利用先验知识约束解空间,从而在数据信噪比较低或存在复杂环境干扰的情况下,显著提升参数识别的精度与算法的鲁棒性。

2) 相比传统识别方法,PVMSB方法展现出多方面的优势。验证结果表明,该方法不仅提高了识别效率、降低了试验与计算成本,且显著拓宽了适用场景,在环境激励与复杂运行激励下均能保持稳定的识别性能。PVMSB方法适用于长期、在线监测等对数据质量与算法可靠性要求较高的工程场合。

3) PVMSB方法具有明确的工程应用价值与决策支持能力。通过引入先验信息,增强了对结构动力特性物理含义的理解,有助于过滤干扰模态;同时,该方法提供的后验概率分布能够对识别结果的不确定性进行定量评估,为结构健康状态评估与安全决策提供可量化的可靠依据,为桥梁等工程结构的模态参数识别研究提供有益参考。

参 考 文 献

[1] 秦世强. 桥梁健康监测与工作模态分析的理论和应用及系统实现[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

[2] 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)

[3] 李雪艳, 官宇航, 罗铭涛, 等. 基于 Welch 法的协方差随机子空间方法的模态参数识别[J]. 力学学报, 2022, 54(10): 2850-2860.

LI Xueyan, GUAN Yuhang, LUO Mingtao, et al. Modal parameter identification of covariance-based stochastic subspace identification based on Welch method [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(10): 2850-2860.(in Chinese)

[4] 常军, 张启伟, 孙利民. 随机子空间产生虚假模态及模态遗漏的原因分析[J]. 工程力学, 2007, 24(11): 57-62.

CHANG Jun, ZHANG Qiwei, SUN Limin. Analysis how stochastic subspace identification brings false

- modes and mode absence[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(11): 57-62.(in Chinese)
- [5] 刘剑锋,李元兵,张启伟.基于改进随机减量法和小波变换的结构模态参数识别[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(10):1447-1453.
LIU Jianfeng, LI Yuanbing, ZHANG Qiwei. Identification for modal parameters based on improved random decrement technique and wavelet transform[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(10): 1447-1453.(in Chinese)
- [6] 时运来,吴文博,邵飞,等.某平推式桥梁展开工况下模态分析与试验研究[J].振动、测试与诊断,2024,44(3):485-492.
SHI Yunlai, WU Wenbo, SHAO Fei, et al. Modal analysis and experimental study of a flat-push bridge under unfolding conditions[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(3): 485-492. (in Chinese)
- [7] 陈永高,钟振宇.环境激励下桥梁结构信号分解与模态参数识别[J].振动、测试与诊断,2018,38(6):1267-1274.
CHEN Yonggao, ZHONG Zhenyu. Signal decomposition and modal parameter identification for bridge structural under environmental excitation[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2018, 38(6): 1267-1274.(in Chinese)
- [8] 梁鹏,贺敏,张阳,等.实时在线桥梁模态参数自动识别[J].振动、测试与诊断,2021,41(1):76-84.
LIANG Peng, HE Min, ZHANG Yang, et al. Real-time online automatic bridge modal identification [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2021, 41(1): 76-84.(in Chinese)
- [9] 蒲黔辉,洪彧,王高新,等.快速特征系统实现算法用于环境激励下的结构模态参数识别[J].振动与冲击,2018,37(6):55-60.
PU Qianhui, HONG Yu, WANG Gaoxin, et al. Fast eigensystem realization algorithm based structural modal parameters identification for ambient tests[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(6): 55-60.(in Chinese)
- [10] 秦超,颜王吉,孙倩,等.基于贝叶斯功率谱变量分离方法的实桥模态参数识别[J].工程力学,2019,36(10):212-222.
QIN Chao, YAN Wangji, SUN Qian, et al. Operational modal analysis of bridge engineering based on Bayesian spectral density approach using a variable separation technique[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(10): 212-222.(in Chinese)
- [11] BECK J L, KATAFYGIOTIS L S. Updating models and their uncertainties. I: Bayesian statistical framework [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(4): 455-461.
- [12] KATAFYGIOTIS L S, BECK J L. Updating models and their uncertainties. II: model identifiability[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(4): 463-467.
- [13] YUEN K V, KATAFYGIOTIS L S, BECK J L. Spectral density estimation of stochastic vector processes [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2002, 17(3): 265-272.
- [14] YUEN K V, KATAFYGIOTIS L S. Bayesian fast Fourier transform approach for modal updating using ambient data[J]. Advances in Structural Engineering, 2003, 6(2): 81-95.
- [15] AU S K. Fast Bayesian FFT method for ambient modal identification with separated modes[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2011, 137(3): 214-226.
- [16] AU S K. Fast Bayesian ambient modal identification in the frequency domain, part I: posterior most probable value [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 26: 60-75.
- [17] AU S K. Fast Bayesian ambient modal identification in the frequency domain, part II: posterior uncertainty [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 26: 76-90.
- [18] ZHU Z, AU S K, LI B B. Bayesian operational modal analysis with multiple setups and multiple (possibly close) modes[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 150: 107-261.
- [19] 杨朝勇,茅建校,王浩,等.贝叶斯方法在大跨度斜拉桥模态参数识别中的应用研究[J].振动工程学报,2022,35(3):691-698.
YANG Zhaoyong, MAO Jianxiao, WANG Hao, et al. Application study on Bayesian method in modal parameter identification of the long-span cable-stayed bridge [J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(3): 691-698.(in Chinese)
- [20] AU S K. Operational modal analysis: modeling, Bayesian inference, uncertainty laws[M]. Singapore: Springer Nature, 2017.
- [21] XU X K, HONG Y, CHEN L J, et al. Hybrid nested sampling method for identifying the uncertainty of the high-dimensional updating parameters in Bayesian structural model updating [J]. Advances in Structural Engineering, 2022, 25(8): 1730-1744.
- [22] 尹红燕,唐莉,刘东霞.改进EMD和COV-SSI在桥梁结构模态参数识别中的运用[J].公路交通科技,2022,39(12):75-85.
YIN Hongyan, TANG Li, LIU Dongxia. Application of improved EMD and COV-SSI in bridge structure modal parameters identification [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(12): 75-85.(in Chinese)



第一作者简介:徐希望,男,1993年2月生,博士生。主要研究方向为桥梁智能检测与安全评定。曾发表《Hybrid nested sampling method for identifying the uncertainty of the high-dimensional updating parameters in Bayesian structural model updating》(《Advances in Structural Engineering》2022, Vol.25)等论文。
E-mail: xuxikun@my.swjtu.edu.cn

通信作者简介:洪彧,女,1989年10月生,博士、讲师。主要研究方向为桥梁健康监测和结构动力学。
E-mail: hongyu@swjtu.edu.cn