

基于响应传递比的桥梁结构工作模态参数识别

孙 倩, 颜王吉, 任伟新

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽, 合肥 230009)

摘 要: 响应传递比在系统极点处与输入无关, 并且等于振型比。基于这一独特性质, 可以融合多个激励工况下的测试值构建传递比矩阵, 并通过奇异值分解技术快速判断出系统的极点, 进而根据传递比向量直接估算出振型向量。为了研究该方法在土木工程结构的工作模态参数识别中的应用, 首先通过数值算例验证了响应传递比方法可以有效剔除谐波输入引起的虚假模态。此外, 通过一环境激励下实桥的振动试验对该方法进行验证, 并与有限元方法和随机子空间法结果进行了对比。结果表明, 响应传递比方法能够有效地运用于环境激励下桥梁结构的模态参数识别。

关键词: 模态分析; 传递比; 环境振动; 功率谱估计; 桥梁工程

中图分类号: TU311.3; TN911.6

文献标志码: A

doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.07.0558

OPERATIONAL MODAL ANALYSIS FOR BRIDGE ENGINEERING BASED ON THE DYNAMIC TRANSMISSIBILITY MEASUREMENTS

SUN Qian, YAN Wang-ji, REN Wei-xin

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: The dynamic transmissibility is equal to the ratios of mode shapes when approaching the system poles. On the basis of the unique property, transmissibility matrix is formulated by combining vibration response transmissibility functions under multiple vibration conditions, and the system poles are achieved by taking the Singular Value Decomposition (SVD) for transmissibility matrix. The proposed method is further employed to identify the mode shapes. The aim of this paper is to analyze its application to the modal parameters identification of structures under natural excitation. A numerically simulated beam is used to investigate the robustness of the method to harmonic excitations, and the result indicates that the method reduces the risk to identify the spurious modes induced by the presence of harmonics. Furthermore, the ambient vibration test data of a real bridge is adopted to extract the modal parameters. The field results are compared with those obtained from finite element analysis, and stochastic subspace identification. It has shown that the technique is capable of identifying the modal parameters of real bridges.

Key words: modal analysis; transmissibility; ambient vibration; power spectral estimation; bridge engineering

模态参数识别是结构动力学领域的一个重要组成部分, 也是进行结构状态评估、有限元模型修正、损伤识别和振动控制的基础和前提。目前常用的模态识别方法通常分为实验模态参数识别方法和工作模态参数识别方法^[1]。实验模态参数识别方

法需要测试结构的输入和输出信号^[2-3]。而在实际应用中, 一些工程结构尺寸庞大, 工作环境复杂, 难以有效地施加人工激励。因此, 仅基于结构响应的工作模态参数识别方法受到了更为广泛地关注, 并得到了卓有成效地应用^[4-7]。

收稿日期: 2016-07-21; 修改日期: 2016-11-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFE0113400); 国家自然科学基金项目(51408176, 51278163)

通讯作者: 任伟新(1960—), 男, 湖南长沙人, 长江学者特聘教授, 博士, 博导, 主要从事桥梁结构稳定与振动研究(E-mail: renwx@hfut.edu.cn).

作者简介: 孙 倩(1990—), 女, 安徽六安人, 博士生, 从事振动信号处理研究(E-mail: sqhorse90@126.com);

颜王吉(1985—), 男, 浙江金华人, 研究员, 博士, 硕导, 主要从事振动信号处理、系统识别和健康监测理论研究(E-mail: civilyanwj@gmail.com).

不同于实验模态分析,工作模态参数识别方法直接以作用于结构上的环境激励(如车辆、行人、风荷载等)作为系统的输入,无需人为对结构施加激励,仅根据系统输出数据即可完成模态识别^[2]。因此,运用这类方法不需要中断结构的正常使用状态,具有方便省时、安全性好等显著优势。常用的工作模态识别方法主要有峰值法(PP)^[8]、频域分解法(FDD)^[9]、随机子空间法(SSl)^[10-11]等。

由于环境激励下系统不可避免地受到有色噪声的影响,有时候甚至会受到谐波激励的影响。针对这一问题,Devriendt 与 Guillaume^[12]将响应传递比应用于系统的模态参数识别中,提出了一种基于响应传递比测试的模态参数识别方法。将响应传递比定义为同一载荷工况下的任意两测点快速傅里叶变换之比。他们从频响函数模态域表达出发,证明了系统极点处传递比函数与两测点的模态振型比值存在等价关系。为快速方便地识别模态频率,建立了任意两个不同载荷工况下传递比差值函数的倒数。可以证明,系统极点刚好是该差值函数的倒数之极点。基于此原理,联合不同载荷工况下的响应传递比,可识别出模态频率;再依据传递比函数在系统极点处的特性能够快速识别模态振型。随后 Devriendt 等又将该方法用于识别作用激励有谐波成分的系统模态参数,验证该方法对谐波干扰具有良好的鲁棒性^[13];并进一步推广到多点激励作用系统的参数识别^[12-14]。目前,一些学者已经将响应传递比的思想推广到响应功率谱传递比,并取得了一定的成果^[15-17]。

需要指出,响应传递比目前更多地被应用于人工激励下的参数识别,它在识别环境激励下土木工程结构参数的应用还相对较少。正是基于这样的考虑,本文研究了该方法在环境激励下桥梁结构模态参数识别中的应用。结合数值算例考虑了谐波激励的影响,将所识别得到频率与传统峰值法(PP)结果进行了对比。再运用常德白马公园虹桥环境振动试验得到的加速度响应进行结构模态参数识别,并将所得结果与有限元(FEM)计算值、随机子空间法(SSl)识别结果进行比较,评估传递比方法在桥梁工程结构工作模态参数识别中的有效性。

1 理论基础

1.1 响应传递比

对于结构的 i 测点和 o 测点($i \neq o$),响应传递比

可定义为:

$$T_{i,o}(\omega) = \frac{Y_i(\omega)}{Y_o(\omega)} \quad (1)$$

式中, $Y_i(\omega)$ 和 $Y_o(\omega)$ 分别为系统 i 点和 o 点响应 $y_i(m)$ 和 $y_o(m)$ 的傅里叶变换系数。其中, $m=0, 1, 2, \dots, N_m-1$, N_m 为每个通道的采样点数。

实际应用中,通常采用传递比函数 $T_{i,o}(\omega)$ 的估计,记为 $\hat{T}_{i,o}(\omega)$:

$$\hat{T}_{i,o}(\omega) = \frac{\hat{S}_{y_i y_o}(\omega)}{\hat{S}_{y_o y_o}(\omega)} \quad (2)$$

式中: $\hat{S}_{y_i y_o}(\omega)$ 为响应信号 $y_i(m)$ 与 $y_o(m)$ 的互谱估计; $\hat{S}_{y_o y_o}(\omega)$ 为 $y_o(m)$ 的自谱估计。本文采用经典谱估计中 welch 法对测点的响应信号进行功率谱估计。响应信号 $y_o(m)$ 自谱估计 $\hat{S}_{y_o y_o}(\omega)$ 为^[18]:

$$\hat{S}_{y_o y_o}(\omega) = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \frac{1}{MP} \left| \sum_{t=1}^M v(t) \tilde{y}_{o,k}(t) e^{-j\omega t} \right|^2 \quad (3)$$

其中: L 为数据块数量; $M = N_m / L$, 为每个数据块长度;下标 k 表示第 k 个数据块; $v(t)$ 为窗函数; $j^2 = -1$; P 为归一化因子,可表达为:

$$P = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M |v(t)|^2 \quad (4)$$

1.2 单点激励下响应传递比特性^[12]

当系统仅在系统 p 点输入时,

$$Y_i(\omega) = H_{i,p}(\omega) F_p(\omega) \quad (5)$$

式中, $H_{i,p}(\omega)$ 为反映 i 和 p 两点之间输出-输入关系的频响函数。将式(5)代入式(1),有:

$$T_{i,o}^{(p)}(\omega) = \frac{H_{i,p}(\omega) F_p(\omega)}{H_{o,p}(\omega) F_p(\omega)} = \frac{H_{i,p}(\omega)}{H_{o,p}(\omega)} \quad (6)$$

其中, $H_{i,p}(\omega)$ 和 $H_{o,p}(\omega)$ 可表示成:

$$H_{i,p}(\omega) = \frac{N_{i,p}(\omega)}{D(\omega)} \quad (7a)$$

$$H_{o,p}(\omega) = \frac{N_{o,p}(\omega)}{D(\omega)} \quad (7b)$$

其中, $D(\omega)$ 为公分母项,其多项式方程的根即为系统极点。因此,式(6)可进一步写成:

$$T_{i,o}^{(p)}(\omega) = \frac{H_{i,p}(\omega)}{H_{o,p}(\omega)} = \frac{N_{i,p}(\omega)}{N_{o,p}(\omega)} \quad (8)$$

式(8)表明,传递比函数的极点与频响函数 $H_{o,p}(\omega)$ 的零点存在一一对应关系。换言之,传递比函数极

点与系统极点不一致。 $T_{i,o}^{(p)}(\omega)$ 值仅依赖于激励的作用位置,与激励性质无关。

频响函数 $H_{i,p}(\omega)$ 的模态域形式:

$$H_{i,p}(\omega) = \sum_{r=1}^{N_r} \frac{\phi_{i,r} L_{p,r}}{j\omega - \lambda_r} + \frac{\phi_{i,r}^* L_{p,r}^*}{j\omega - \lambda_r^*} \quad (9)$$

式中: $\phi_{i,r}$ 为第 i 测点的第 r 阶模态振型分量; $L_{p,r}$ 为 p 点的第 r 阶模态参与分量; $*$ 表示共轭; λ_r 为系统第 r 个极点。

将式(9)代入式(6)中,令 $s = j\omega$ 并趋近系统极点,得到:

$$\lim_{s \rightarrow \lambda_r} T_{i,o}^{(p)}(\omega) = \frac{\phi_{i,r} L_{p,r}}{\phi_{o,r} L_{p,r}} = \frac{\phi_{i,r}}{\phi_{o,r}} \quad (10)$$

因此,对于单点激励系统,系统极点处 $T_{i,o}(\omega)$

值仅同两测点模态振型有关,与激励的性质和作用位置完全无关。

1.3 多点激励下响应传递比特性^[12-13]

在实际工作中,系统通常处于多点激励作用状态,且输入作用点的数量往往是未知的。为此,需要考虑多点激励作用的情况。当系统作用多点激励时,其传递比函数 $T_{i,o}(\omega)$ 为:

$$T_{i,o}(\omega) = \frac{Y_i(\omega)}{Y_o(\omega)} = \frac{\sum_{k=1}^n H_{i,k}(\omega) F_k(\omega)}{\sum_{k=1}^n H_{o,k}(\omega) F_k(\omega)} = \frac{\sum_{k=1}^n N_{i,k}(\omega) F_k(\omega)}{\sum_{k=1}^n N_{o,k}(\omega) F_k(\omega)} \quad (11)$$

在系统极点处,可以算出 $T_{i,o}(\omega)$ 的极限值为:

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow \lambda_r} T_{i,o}(\omega) &= \frac{\phi_{i,r} L_{1,r}^T F_1(\omega) + \phi_{i,r} L_{2,r}^T F_2(\omega) + \cdots + \phi_{i,r} L_{n,r}^T F_n(\omega)}{\phi_{o,r} L_{1,r}^T F_1(\omega) + \phi_{o,r} L_{2,r}^T F_2(\omega) + \cdots + \phi_{o,r} L_{n,r}^T F_n(\omega)} = \\ &= \frac{\phi_{i,r} [L_{1,r}^T F_1(\omega) + L_{2,r}^T F_2(\omega) + \cdots + L_{n,r}^T F_n(\omega)]}{\phi_{o,r} [L_{1,r}^T F_1(\omega) + L_{2,r}^T F_2(\omega) + \cdots + L_{n,r}^T F_n(\omega)]} = \\ &= \frac{\phi_{i,r}}{\phi_{o,r}} \end{aligned} \quad (12)$$

由式(11)可知,多点激励系统的 $T_{i,o}(\omega)$ 与单点激励时不同,它不仅与激励位置有关,而且和激励幅值有关。但是在系统极点处, $T_{i,o}(\omega)$ 的大小仍然只与两测点的振型比值有关,而与激励性质相独立。

2 模态参数识别

2.1 频率识别

基于传递比函数 $T_{i,o}(\omega)$ 在系统极点处的重要

特性,本节进一步介绍模态参数识别的基本过程。假定系统两个不同的激励工况为 p 和 q 。根据式(10)与式(12),系统在两个不同激励工况下的响应传递比函数满足:

$$\lim_{s \rightarrow \lambda_r} T_{i,o}^{(p)}(\omega) = \frac{\phi_{i,r}}{\phi_{o,r}} \quad (13a)$$

$$\lim_{s \rightarrow \lambda_r} T_{i,o}^{(q)}(\omega) = \frac{\phi_{i,r}}{\phi_{o,r}} \quad (13b)$$

构建任意两个激励工况作用下 $T_{i,o}(\omega)$ 的差值函数及其倒数:

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow \lambda_r} \Delta T_{i,o}^{(pq)}(\omega) &= \lim_{s \rightarrow \lambda_r} (T_{i,o}^{(p)}(\omega) - T_{i,o}^{(q)}(\omega)) = \\ &= \frac{\phi_{i,r}}{\phi_{o,r}} - \frac{\phi_{i,r}}{\phi_{o,r}} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\Delta^{-1} T_{i,o}^{(pq)}(\omega) = \frac{1}{\Delta T_{i,o}^{(pq)}(\omega)} = \frac{1}{T_{i,o}^{(p)}(\omega) - T_{i,o}^{(q)}(\omega)} \quad (15)$$

对单点激励系统,式(15)可进一步写成:

$$\begin{aligned} \Delta^{-1} T_{i,o}^{(pq)}(\omega) &= \frac{1}{\frac{H_{i,p}(\omega)}{H_{o,p}(\omega)} - \frac{H_{i,q}(\omega)}{H_{o,q}(\omega)}} = \\ &= \frac{H_{o,p}(\omega) H_{o,q}(\omega)}{H_{i,p}(\omega) H_{o,q}(\omega) - H_{i,q}(\omega) H_{o,p}(\omega)} = \\ &= \frac{N_{o,p}(\omega) N_{o,q}(\omega)}{N_{i,p}(\omega) N_{o,q}(\omega) - N_{i,q}(\omega) N_{o,p}(\omega)} \end{aligned} \quad (16)$$

由式(16)分析可以得到,多项式 $N_{i,p}(\omega) N_{o,q}(\omega) - N_{i,q}(\omega) N_{o,p}(\omega)$ 阶次高于公分母项阶次;也就是说,单点激励系统的 $\Delta^{-1} T_{i,o}^{(pq)}$ 极点数量多于系统极点数目。同样对于多点激励系统的 $\Delta^{-1} T_{i,o}^{(pq)}$,也存在上述问题。为降低选择虚假极点的风险,基于多个激励工况下响应传递比函数,构建 $n_e \times n_e$ 阶矩阵 $\mathbf{T}(\omega)$:

$$\mathbf{T}(\omega) = \begin{bmatrix} T_{1,u}^{(1)}(\omega) & \cdots & T_{1,u}^{(j)}(\omega) & \cdots & T_{1,u}^{(n_e)}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{i,u}^{(1)}(\omega) & \cdots & T_{i,u}^{(j)}(\omega) & \cdots & T_{i,u}^{(n_e)}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: u 为固定参考点; n_e 为系统工况个数。为了快速识别模态频率,引入矩阵奇异值分解理论。

对弱阻尼系统而言,当振动频率达到共振频率(系统极点)时, $\mathbf{T}(\omega)$ 的秩为 1,后 $n_e - 1$ 个奇异值均为零值,即奇异谱满足以下规律:

$$\begin{cases} \lim_{s \rightarrow \lambda_r} \sigma_1(\omega) \neq 0 \\ \lim_{s \rightarrow \lambda_r} \sigma_2(\omega) = \lim_{s \rightarrow \lambda_r} \sigma_3(\omega) = \dots = \lim_{s \rightarrow \lambda_r} \sigma_{n_c}(\omega) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

因此, 不难得出:

$$\lim_{s \rightarrow \lambda_r} \frac{1}{\sigma_i(\omega)} = \infty, i \neq 1 \quad (19)$$

式(19)表明, 选择第*i*个奇异值($i \neq 1$), 并取其倒数即可识别出系统的模态频率, 操作方法类似于传统的峰值法, 此处不再赘述。当系统激励存在谐波干扰时, 在谐波频率处传递比函数值将与极点处的传递比等于振型比不同, 它不再趋向于某一固定值。因此, 对应的传递比矩阵 $\mathbf{T}(\omega)$ 的秩理论上将不再为 1, 则至少有一个 $1/\sigma_i(\omega)$ ($i \neq 1$) 在谐波频率处不会出现峰值。换言之, 传递比方法可以有效降低识别谐波激励引起的虚假模态的风险。

2.2 振型识别

系统极点处两测点的振型分量值 $\phi_{i,r}$ 和 $\phi_{o,r}$ 可由响应传递比函数直接确定。模态振型识别可先固定一参考点 *j*, 并设定其振型值 $\phi_{j,r}$ 为 1, 然后联合系统各测点的传递比函数构建向量:

$$\{T_{1,j}, T_{2,j}, \dots, 1, \dots, T_{n_o,j}\} \quad (20)$$

即可获得系统 *r* 阶振型向量 $\{\phi_{1,r}, \phi_{2,r}, \dots, 1, \dots, \phi_{n_o,r}\}$ (n_o 为系统输出测点数)。

2.3 操作流程

基于多载荷工况下响应传递比测试模态识别流程如图 1 所示。

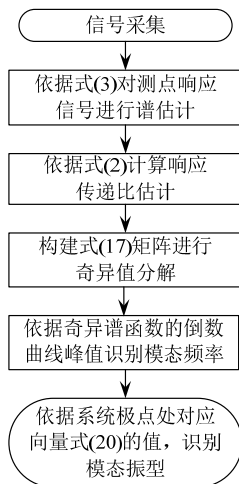


图 1 响应传递比识别流程图

Fig.1 Flowchart of transmissibility-based modal analysis

3 数值算例

图 2 所示为等截面简支梁, 截面面积为 $1.81 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, 跨度 5 m, 弹性模量 $E=32 \text{ GPa}$, 惯性矩

$I=4.88 \times 10^{-6} \text{ m}^4$, 密度 $\rho=2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。结构采用平面梁单元模拟, 共离散成 8 个等间距单元, 包含 9 个节点。

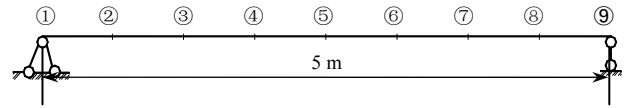


图 2 简支梁数值模拟

Fig.2 Simulated simply-supported beam

为了考察基于传递比测试方法对谐波输入的鲁棒性, 本算例考虑以下 3 种工况: 1) 工况 1: 白噪声加一段 1.97 min 的幅值 20 N、频率 5 Hz 的正弦波构成的激励, 作用于测点⑤; 2) 工况 2: 白噪声加一段 1.97 min 的幅值 10 N、频率 5 Hz 的正弦波构成的激励, 作用于测点⑤和③; 3) 工况 3: 白噪声加一段 1.97 min 的幅值 100 N、频率 5 Hz 的正弦波构成的激励(如图 3 所示), 作用于测点⑦。其中各工况下除两端支座测点外, 其余各测点均作用白噪声激励。各测点的竖向加速度响应可通过有限元计算得到, 信号采样频率为 100 Hz, 采样时间均为 4 min。

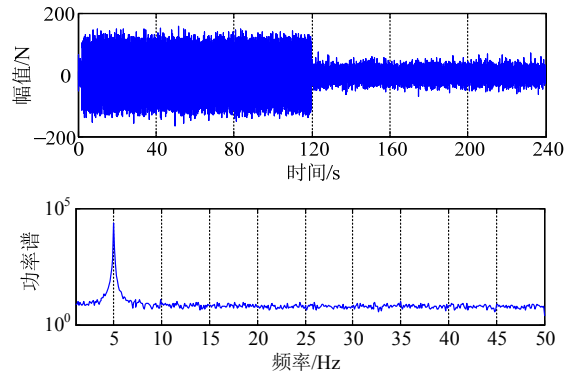


图 3 工况 3 输入

Fig.3 Input of case 3

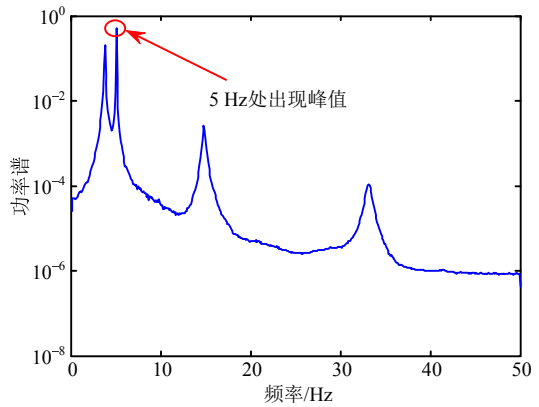
分别运用传统峰值法(PP)和响应传递比方法进行模态参数识别, 并将两种方法识别结果进行对比, 频率识别结果如表 1 所示。融合 3 种不同工况下响应信号, 得到图 4(a)和图 4(b)所示 PP 法和传递比方法识别频率的峰值曲线。对比结果表明, PP 法

表 1 频率识别结果汇总 /Hz

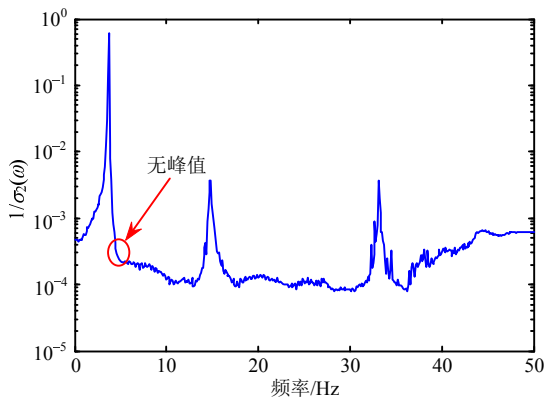
Table 1 Identified modal frequencies of two cases

模态	理论值	基于传递比测试	PP
1 阶竖向	3.691	3.709	3.744
	—	—	5.000
2 阶竖向	14.765	14.844	14.804
3 阶竖向	33.247	33.106	33.122

注: “—” 表示未识别谐波激励频率。



(a) 峰值法



(b) 基于传递比测试方法

图4 频率识别结果

Fig.4 Identification of modal frequencies

识别的结果中存在谐波输入引起的虚假模态, 而基于传递比测试方法可以有效避免这类虚假模态的识别。

4 环境激励试验验证

常德白马公园虹桥(图5所示)为四跨曲线钢箱梁斜拉人行桥, 全长120 m, 跨径布置为27 m+2×33 m+27 m。该桥运营前进行了环境振动试验,

试验共分为8个测组, 每组12个测点, 其中两侧竖向测点6个, 横向水平测点3个, 参考测点3个(编号分别为 $15_{v,l}$ 、 $15_{v,r}$ 、 15_h , 此处 v 代表竖向, l 代表桥左侧, r 代表桥右侧, h 代表水平向)。试验采样频率500 Hz, 采样时长为15 min, 每组测试2次。现场测试照片如图6所示。实测的详细方案参见文献[19—21]。全桥加速度传感器布置情况如图7所示。



图5 虹桥全景图

Fig.5 Overview of rainbow bridge



(a) 传感器粘贴



(b) 动态数据采集系统

图6 现场测试

Fig.6 On-site dynamic test

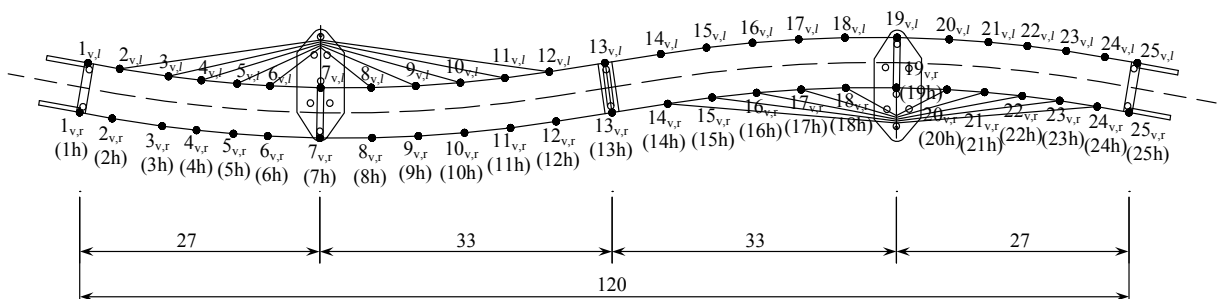
图7 全桥加速度传感器布置图(v 表示竖向, h 表示横向, l 、 r 分别代表桥左右两侧)

Fig.7 Accelerometer instrumentation of the bridge(v stands for the vertical direction, h stands for the horizontal direction, l and r represent the left and right sides of the bridge, respectively)

环境激励作用下测点 $13_{v,l}$ 加速度时程如图8所示。本文将实测数据均分成4段, 每段数据代表一

个激励工况下实桥的响应记录, 系统工况数 $n_e=4$ 。对测组1得到的结构响应数据进行谱估计, 并获得

系统响应传递比,再对响应传递比矩阵进行奇异值分解,得到如图 9 所示测组 1 的奇异值倒数 $1/\sigma_2(\omega)$ 曲线,其中图 9(a)、图 9(b)分别为 $N_m=225000$ (时长 7.5 min)和 $N_m=15000$ (时长 5 min)时对应曲线。图 9(a)中有 4 个显著峰值,依此识别出结构前四阶竖向模态频率。比较图 9(a)和图 9(b)发现,谱估计使用的采样量越大,基于响应传递比方法的识别曲线峰值越明显,本文采用 $N_m=225000$ 。

依据相同的方法,对其他各测组的响应信号进行识别,得到的频率结果如表 2 所示,表中后两列分别为各测组模态频率算术平均值和融合 8 个测组得到的识别结果。从表 2 的模态频率来看,根据不同测组的数据所识别的同阶频率间基本一致。其中,由于测组 6 记录信号质量问题,测组 6 第 3 阶竖向频率未能很好地识别。模态识别过程中发现,结合多个测组数据运用传递比方法,在识别模态频率方面比仅利用单个测组数据可靠性更好,可以避免某些模态遗漏;同时结合多个测点响应数据信息可得到更好的识别结果。

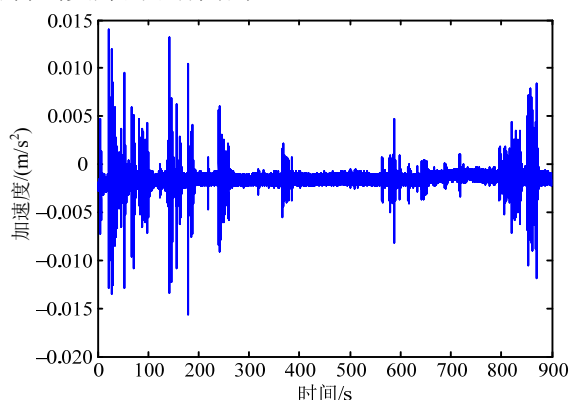
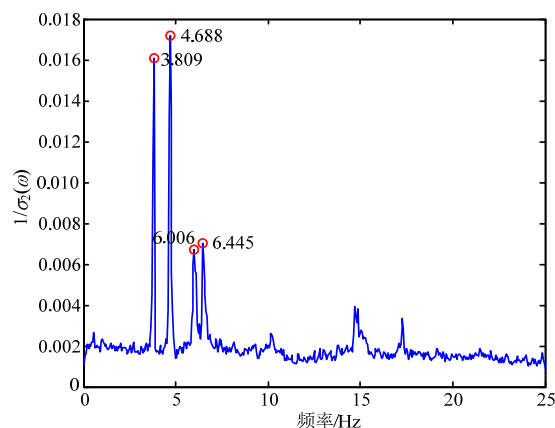
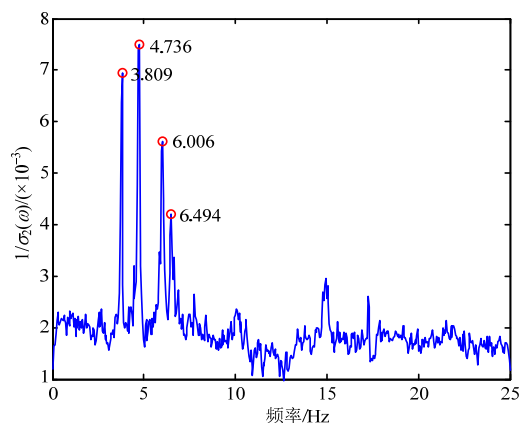


图 8 测点 $13_{v,l}$ 加速度响应时程

Fig.8 The acceleration measurements of location $13_{v,l}$



(a) $N_m=225000$



(b) $N_m=150000$

图 9 测组 1 奇异值倒数 $1/\sigma_2(\omega)$ 曲线

Fig.9 Plots of the third inverse singular value for setup 1

文献[20]利用通用有限元软件,对该桥进行了有限元动力特性的理论分析。需要说明的是,由于模型的复杂性,建模过程中难以避免对结构的材料属性、边界条件等方面进行了一系列假定。因此,文献[20]参考实测结果对模型进行了调整(model calibration),得到文中的有限元计算结果。

表 2 不同测组下模态频率识别结果

/Hz

Table 2 Identified modal frequencies from different setups

模态	测组编号								均值	综合测组
	1	2	3	4	5	6	7	8		
1 阶竖向	3.809	3.809	3.760	3.809	3.760	3.760	3.809	3.711	3.778	3.760
2 阶竖向	4.688	4.688	4.688	4.688	4.688	4.688	4.736	4.688	4.694	4.688
3 阶竖向	6.006	6.006	5.957	6.006	6.006	—	6.152	6.055	6.027	6.055
4 阶竖向	6.445	6.543	6.445	6.543	6.494	6.543	6.494	6.543	6.506	6.494

注:“—”表示未能识别的频率。

将识别的模态参数同采用 SSI 和有限元计算所识别结果比较如表 3 所示。图 10 和图 11 分别为传递比方法与有限元分析得到的桥梁前四阶竖向振型。对比基于响应传递比方法所识别结果与常用识别方法得到的模态参数,结果表明响应传递比方法

能够较好地识别实桥的工作模态参数。



(a) 1 阶竖向

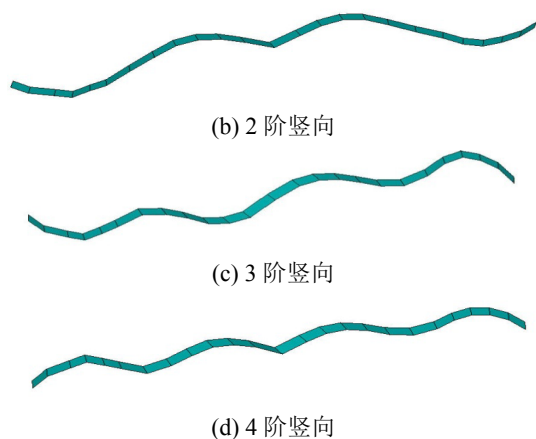


图 10 传递比方法识别振型示意图

Fig.10 Identified modal shapes using the vibration response transmissibility

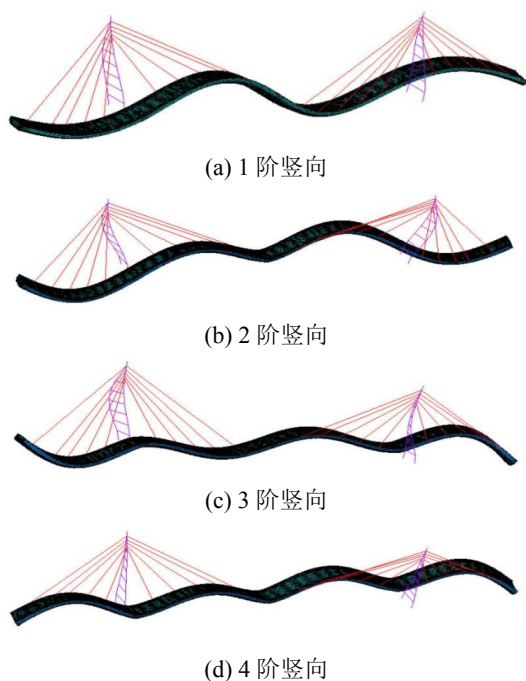


图 11 有限元分析识别振型示意图

Fig.11 Identified modal shapes using FEM

表 3 识别模态参数与 SSI 及有限元结果对比

Table 3 Identified modal parameters and comparison with the frequencies from SSI and finite element analysis

模态阶数	基于传递比测试	SSI		FEM ^[20]	
		频率/Hz	MAC	频率/Hz	MAC
1 阶竖向	3.760	3.780	0.9985	3.630	0.9865
2 阶竖向	4.688	4.697	0.9987	4.611	0.9971
3 阶竖向	6.055	6.046	0.9793	6.056	0.9384
4 阶竖向	6.494	6.502	0.9967	6.538	0.9713

5 结论

本文研究了基于响应传递比的模态参数识别方法在环境激励下桥梁结构模态参数识别中的应

用。响应传递比在系统极点处具有与输入无关的良好特性,因此融合多个荷载工况下的响应传递比可以快速判断出系统的固有频率,进而根据传递比向量可以直接识别出振型。利用一简支梁数值算例和实桥环境激励试验算例验证该方法,表明了算法的可行性和准确性。主要结论包括:

(1) 当外部激励存在谐波成分时,与传统基于功率谱的峰值法不同,基于传递比的模态参数识别方法可以更有效地降低识别谐波激励引起的虚假模态的风险。

(2) 实桥环境激励试验算例中响应传递比方法所识别结果、有限元分析结果以及 SSI 识别结果对比表明,本文方法能够较好地运用于环境激励下桥梁结构的模态参数识别。

(3) 结合多个测组数据构建多个矩阵分别求得奇异谱的倒数,将不同测组的奇异谱倒数加权叠加可识别出更加可靠的结果,这给将来的工程应用提供了建议。

需要指出,传递比方法本质上属于频域模态识别方法,与其他频域方法一样,其识别精度会受到功率谱估计精度的影响。因此,如何提高谱估计的精度来进一步提高响应传递比识别方法仍然是一个值得研究的内容。

参考文献:

- [1] 禹丹江. 土木工程结构模态参数识别[D]. 福州: 福州大学, 2006.
Yu Danjiang. Modal parameter identification of civil engineering structures-theory, implementation and applications [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006. (in Chinese)
- [2] 任伟新. 环境振动系统识别方法的比较分析[J]. 福州大学学报:自然科学版, 2001, 29(6): 80—86.
Ren Weixin. Comparison of system identification methods using ambient vibration measurements [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2001, 29(6): 80—86. (in Chinese)
- [3] 刘宇飞, 辛克贵, 樊健生, 崔定宇. 环境激励下结构模态参数识别方法综述[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 46—53.
Liu Yufei, Xin Kegui, Fan Jiansheng, Cui Dingyu. A review of structure modal identification methods through ambient excitation [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(4): 46—53. (in Chinese)
- [4] 谭德先, 周云, 米斯特, 易伟建, 谢利民, 蒋运忠. 环境激励下高层建筑结构模态测试与有限元建模分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(9): 41—50.

- Tan Dexian, Zhou Yun, Mi Site, Yi Weijian, Xie Limin, Jiang Yunzhong. Ambient vibration dynamic test and finite element analysis for high-rise buildings [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(9): 41—50. (in Chinese)
- [5] 韩建平, 郑沛娟. 环境激励下基于快速贝叶斯 FFT 的实桥模态参数识别[J]. *工程力学*, 2014, 31(4): 119—125.
- Han Jianping, Zheng Peijuan. Modal parameter identification of an actual bridge by fast Bayesian FFT method under ambient excitation [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(4): 119—125. (in Chinese)
- [6] 常军, 任永辉, 陈忠汉. 环境激励下结构损伤识别的综合指标法试验研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(7): 130—135.
- Chang Jun, Ren Yonghui, Chen Zhonghan. Experimental investigation of structural damage identification by combination index method under ambient excitation [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(7): 130—135. (in Chinese)
- [7] 李晰, 张德义, 闫维明, 陈彦江. 基于环境激励的钢管混凝土拱桥工作模态识别及修正[J]. *工程力学*, 2013, 30(9): 81—88.
- Li Xi, Zhang Deyi, Yan Weiming, Chen Yanjiang. Operational model identification and calibration of CFST arch bridge based on ambient excitation [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(9): 81—88. (in Chinese)
- [8] Bendat J S, Piersol A G. *Engineering applications of correlation and spectral analysis* [M]. 2nd ed. New York, John Wiley & Sons, 1993.
- [9] Brinker R, Zhang L, Andersen P. Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition [J]. *Smart Materials and Structures*, 2001, 10(3): 441—455.
- [10] Van Overschee P, De Moor B. *Subspace Identification for linear systems: Theory-implementation-applications* [M]. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [11] Peeters B, De Roeck G. Reference-based stochastic subspace identification in civil engineering [J]. *Inverse Problems in Engineering*, 2000, 8(1): 47—74.
- [12] Devriendt C, Guillaume P. The use of transmissibility measurements in output-only modal analysis [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(7): 2689—2696.
- [13] Devriendt C, De Sitter G, Vanlanduit S, Guillaume P. Operational modal analysis in the presence of harmonic excitations by the use of transmissibility measurements [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(3): 621—635.
- [14] Devriendt C, Guillaume P. Identification of modal parameters from transmissibility measurements [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 314(1): 343—356.
- [15] Yan W J, Ren W X. Operational modal parameter identification from power spectrum density transmissibility [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2012, 27(3): 202—217.
- [16] Yan W J, Ren W X. Use of continuous wavelet transmissibility approach for structural operational analysis [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2012, 139(9): 1444—1456.
- [17] Yan W J, Ren W X. An enhanced power spectral density transmissibility (EPSDT) approach for operational modal analysis: Theoretical and experimental investigation [J]. *Engineering Structures*, 2015, 102: 108—119.
- [18] Welch P D. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms [J]. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, 1967, 15(2): 70—73.
- [19] 李志刚. 基于模型修正的人行桥动力性能评估[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- Li Zhigang. *Dynamic assessment of pedestrian bridge by model updating* [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [20] 魏锦辉. 基于静动力数据的桥梁有限元模型修正研究[D]. 长沙: 中南大学, 2015.
- Wei Jinhui. *Finite element model updating of bridge structures based on static and dynamic test data* [D]. Changsha: Central South University, 2015. (in Chinese)
- [21] 万华平. 结构动力不确定性及其随机模型修正方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2015.
- Wan Huaping. *Study on uncertainty in structural dynamics and stochastic model updating* [D]. Changsha: Central South University, 2015. (in Chinese)