

# 利用三分量地震计检测自然载荷下桥梁结构响应特征<sup>\*</sup>

孟范宝<sup>1</sup>, 葛洪魁<sup>1</sup>, 陈海潮<sup>1</sup>, 王小琼<sup>1</sup>, 杨 微<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)非常规天然气研究院, 北京 102249; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要:** 基于环境激励信号的桥梁结构响应在线检测系统, 利用高灵敏度三分量宽频带地震计, 连续监测北京市四座典型在役桥梁在自然荷载作用下的微弱振动信号, 分别利用峰值法和互相关函数法获得了在役桥梁结构不同方向上的频谱特征及其结构响应特征。结果表明: (1) 三分量地震计能够准确可靠地连续记录宽频带范围内的环境激励的微弱振动信号, 非常适用于构建新型的桥梁结构响应检测系统; (2) 峰值法和互相关函数法都能够可靠地识别多阶桥梁模态频率, 互相关函数法的识别结果更为稳定; (3) 桥梁的模态频率受桥梁结构、材料、环境温度等多种因素影响, 桥梁不同方向的固有振动频率不同, 不同类型的桥梁的结构响应也存在显著差异。该桥梁结构响应检测技术为在役桥梁实时健康诊断打下了基础。

**关键词:** 桥梁结构响应; 环境激励信号; 频谱特征; 模态分析

**中图分类号:** V442

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)03-0519-07

## 0 引言

桥梁是重要的现代交通基础设施, 对于加强地区文化交流、促进社会经济发展具有重要作用。在长期的使用过程中, 由于环境侵蚀、材料老化等原因, 桥梁存在着不同程度的损伤和功能失效的隐患。地震、飓风、洪水等自然灾害、以及超限机动车、履带车、铁轮车等经过桥梁都有可能诱发桥梁倒塌, 从而造成巨大的经济损失(陈莉, 2012)。近实时地监测桥梁损伤状态, 对桥梁的健康状况进行综合评估, 是预防灾难性桥梁事故, 确保桥梁安全可靠运行的重要方面。因此桥梁安全健康检测对于保障大型桥梁的安全性和适用性具有非常重要的意义。

长期以来, 人们对于大跨桥的安全检测以人工方法为主(宋雨, 2003), 检查方式具有一定的主观性, 并且检查周期长, 难以实时地对桥梁的健康状况进行综合评估。另一种检查方式是用仪器和损伤识别技术进行自动损伤识别, 然而目前检测技术还有待完善, 缺乏统一的定量损伤指标, 亟需发展新型的检测技术和方法。

振动模态参数(频率、振型和阻尼等)是决定结构动力特性的主要参数, 具有简明、直观和

物理概念清晰等优点(赵骏, 2008)。准确识别桥梁结构模态参数及其变化, 对于桥梁健康监测和综合评价具有重要作用。固有频率是结构动力学特性的重要参数, 能反应结构自身属性和状态, 同时也是结构模态参数中最容易获得的参数。结构发生损伤会导致频率降低, 这一现象直接推动了与频率相关的敏感参数在结构识别中的应用(雷理, 2012)。Cawlye 和 Adams (1979) 最早利用频率数据对结构进行损伤识别, 通过特征值对结构物理参数的灵敏度分析, 得出结论: 结构发生损伤后的任意二阶模态频率之比仅是破损位置的函数, 与损伤大小无关(李睿, 2009; 杨乐杰, 2012)。Stubbs 等(1991)研究了利用共振频率识别结构损伤的灵敏度方法, 通过单元损伤指标的灵敏度分析, 使用了广义逆方法进行了结构损伤定位研究。Heam 和 Testa (1990)指出, 结构损伤后, 各阶频率变化按与最大频率变化归一化后, 任意两阶频率变化的比值, 是结构损伤位置的函数。Penny 等(1994)和袁颖(2005)对结构的各种损伤情况进行了数值模拟, 计算出由于模拟损伤引起的结构频率变化, 然后用最小二乘法来拟合模拟频率变化和实测频率改变, 认为拟合误差最小的损伤情况是结构的实际损伤状态。Salawu (1997)评述了土木工程领域应用固有频率作为诊

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2015-06-16.

**基金项目:** 北京市科学研究与研究生培养共建项目——自然载荷作用下北京市典型在役桥梁微震结构响应特征研究和中国科学院战略性先导科技专项(B类)——微震声发射监测系统研发(XDB10050203)联合资助。

断参数的结构评估方法,对损伤频率变化间的关系以及限制振动测试在损伤识别中的应用可能因素进行了讨论。其结论表明:基于固有频率的损伤识别方法对结构的常规评估是有用的,但也存在一些局限性。应用频率进行损伤识别,当损伤发生在低应力区域时可能是不可靠的,另外,两个不同位置程度相似的损伤可能引起相同的频率改变。仅根据固有频率的变化确定结构损伤的位置可能是不充分的(焦莉,2006)。

环境激励下的模态参数识别由于不需要外部激励设备且不影响正常交通,已经成为大型桥梁模态参数识别的主要方法(秦世强等,2012)。目前常用的方法包括时域法、频域法和时频分析法。频域法识别方法发展较早,主要包括峰值法和频域分解法,主要是通过傅里叶变换将时域数据转换到频域内,由振幅谱或功率谱密度的峰值确定模态参数。频域法的物理概念清晰,简单快捷,在模态分析中得到广泛应用(杜权,2009)。时域识别法直接利用时域内的数据建立方程,进而求解结构的模态参数。时域法能够避免频域识别法因傅里叶变换所带来的误差(如频率分解、泄漏和混淆现象等),一般能得到较精确的辨识结果,近年来逐渐成为研究热点,主要有序列分析法、随机减量法、NE<sub>x</sub>T方法、随机子空间法等(聂雪媛,丁桦,2012)。

本文实验中,笔者选取北京市区4座典型的大型在役桥梁为监测实验对象,在桥面上布置多个高灵敏度三分量宽频带地震计,连续监测桥梁受到车辆行驶、风载、气压等自然荷载激励的微弱振动信号。采用功率谱密度以及地震学中干涉测量方法,获得大型桥梁多阶模态频率,精确识别低阶模态频率,为将来桥梁结构动力特性检测和结构健康诊断打下基础。

## 1 监测设备与实验桥梁

监测实验采用高灵敏度三分量宽频带地震计 Guralp CMG-6TD。与常用的加速度传感器及普通的速度传感器相比,CMG-6TD 地震计具有灵敏度高(2 000 V/m/s)、频带宽(0.03~100 Hz)、监测动态范围大(138 dB)、自噪声低等优点,并且能够同时记录3个分量的振动信号。CMG-6TD 地震计体积小、功耗低、携带安装简便,不需要开

解锁,通电即开始工作,便于野外流动观测,广泛应用于流动地震观测、火山监测等科学研究,笔者将该类型宽频带地震计应用于桥梁监测中,记录环境激励下的微弱振动信号,分析其结构响应特征。

参与实验的桥梁分别是鲁疃西路大桥、昌平南环大桥、顺义潮白河大桥和百葛立交桥,表1中列出4座桥梁的基本特征。以鲁疃西路大桥为例,对监测系统的布设方式进行说明。鲁疃西路大桥位于北京市昌平区北七家未来科技城,桥身南北走向,全长568 m,桥面宽45 m。笔者在该桥桥面东侧的人行道上布置了8台地震计,台站间距约为100 m(图1a)。图1b为桥梁监测实验中架设的地震计,塑料桶用于保护地震计,以减少风等因素对地震计的干扰。所有地震计都利用GPS进行时间同步,地震计的采样率200 Hz,记录方式为连续记录,每座桥梁的监测时间为4~30 h。

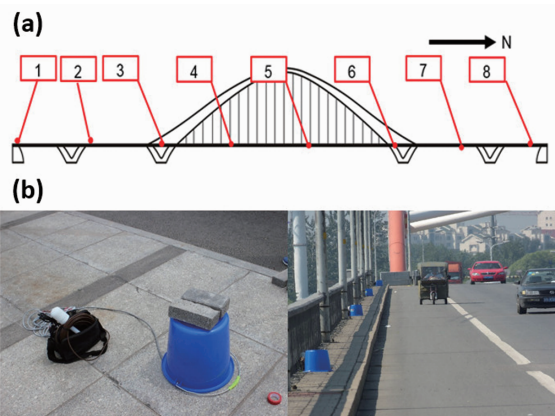


图1 鲁疃西路大桥整体结构示意图及布点位置(a)及布置在桥面上的地震计(b)

Fig. 1 Schematic diagram of the whole structure of the Lutanxilu bridge and the location of the corresponding measuring points (a), and the seismometer deployed on the bridge (b)

## 2 数据处理方法

本文采用了2种信号处理方法,一是利用常规的峰值法识别模态频率,二是采用背景噪声互相关函数识别模态频率。背景噪声互相关的基本原理是,在随机散射场的条件下,2个传感器记录信号的互相关函数是两点之间的格林函数。桥梁可以看成一块薄的平板,导波在其中的传播取决于平板的几何形状以及平板的力学性质,如弹性模量

表1 四座桥梁基本特征

Tab. 1 Basic characteristics of the four selected bridges

大桥	桥长/m	类型	走向	噪声环境
百葛立交桥	150	梁桥（老桥）、立交桥	东西	中
南环大桥	750	悬索桥（老桥）、跨河桥	东西	中
顺义潮白河大桥	600	梁桥（老桥）、跨河桥	东西	强
鲁幢西路大桥	650	梁桥（新桥）、跨河桥	南北	弱

等。尽管背景噪声互相关函数不一定收敛到格林函数，但是其仍然对介质状态非常敏感，有可能被用来监测结构健康状态。通常，我们利用导波的波速和衰减这2个物理量来刻画结构的健康状态。导波的速度测量能提供介质密度和刚度信息，而尾波干涉能够用来监测桥梁的细微波速变化（Duff *et al.*, 2014）。2个传感器之间的噪声互相关函数（Noise Correlation Function, NCF）可以通过计算传感器的长时间连续记录的信号，经过信号叠加及互相关函数计算公式得到，其中  $T$  为观测时间。

$$C_{ij}(t) = \int_0^T S_i(\tau) S_j(\tau+t) d\tau. \quad (1)$$

### 3 桥梁结构响应特征

#### 3.1 峰值法

图2是鲁幢西路大桥各测点的三分量功率谱密度，图3给出了桥梁监测实验中各桥梁主要测点的三分量功率谱密度。从监测实验的结果可以看出几个特点：

(1) 从图2a可以看出，5号测点（桥身中部）的垂直分量功率谱密度比2号测点（桥梁支点附近）高约3~4个数量级，具有非常高的信噪比，这是因为桥梁支点附近由于固定支点的影响，桥梁振动幅度较小。

(2) 图2的结果显示，不同分量上的多阶模态各不相同，垂直分量能够识别4个峰值（1.3 Hz、1.5 Hz、1.9 Hz、2.5 Hz），南北分量能够识别出3个明显峰值（1.3 Hz、1.9 Hz、2.5 Hz），东西分量能识别出3个明显峰值（1.9 Hz、2.5 Hz、3.5 Hz）。

(3) 从图3中不同桥梁的功率谱密度对比可以看出，不同桥梁的结果存在较大差异，这是由桥梁的结构特征决定的。百葛立交桥的信噪比最低，且各个方向上的低阶模态频率要高于其他桥梁的相应的低阶模态频率，这是由百葛立交桥的桥身

跨度较小这一原因引起的。同时也发现南环大桥（悬索桥）在纵向和横向分量上相应的低阶模态频率高于潮白河大桥（梁桥）相应的低阶模态频率。

由检测结果可知，固有频率是桥梁本身的一个特性，不随车辆交通等外部因素影响，但不同桥梁的固有频率存在一定的差异，差异大小依据

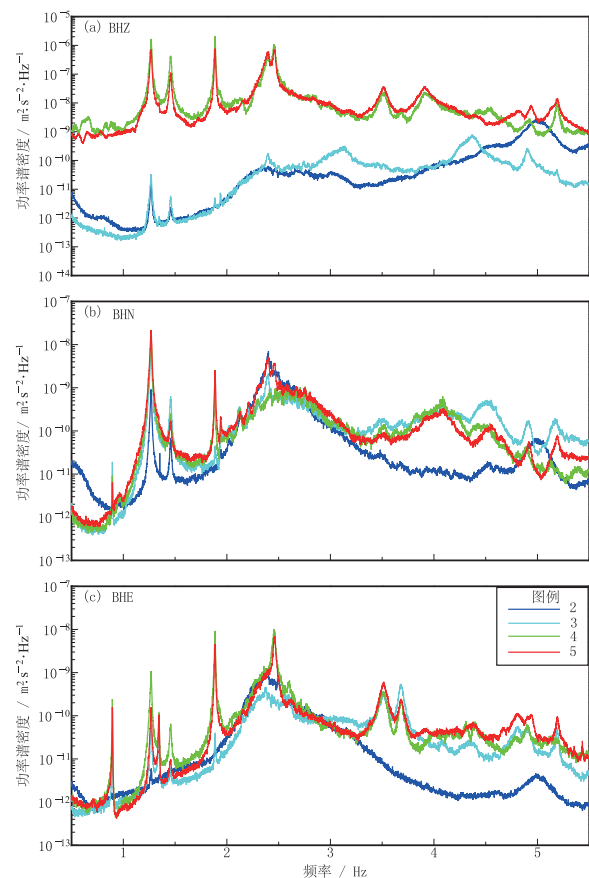


图2 鲁幢西路大桥各测点的BHZ垂直分量(a)、BHN南北分量(b)和BHE东西分量(c)的功率谱密度

Fig. 2 The power spectral density of the BHZ vertical (a), the BHN north-south (b) and the BHE east-west (c) components for each measuring point of the Lutuanxilu Bridge

桥梁的类型、跨度等其他因素而定。一般来说,桥梁桥身长度越短,其固有频率越高。由于直接对台站进行频谱分析会受到桥梁不同位置以及观测点的影响,因此我们又进行了台站之间的互相关处理来提高信噪比,排除外界噪音干扰。

3.2 噪声互相关函数法

利用每个测点的三分量连续波形记录,计算所有可能的台站对的相应分量的噪声互相关函数。图 4a、b 是鲁疃西路大桥监测实验中所有台站对的东西分量和南北分量噪声互相关函数随台站间距

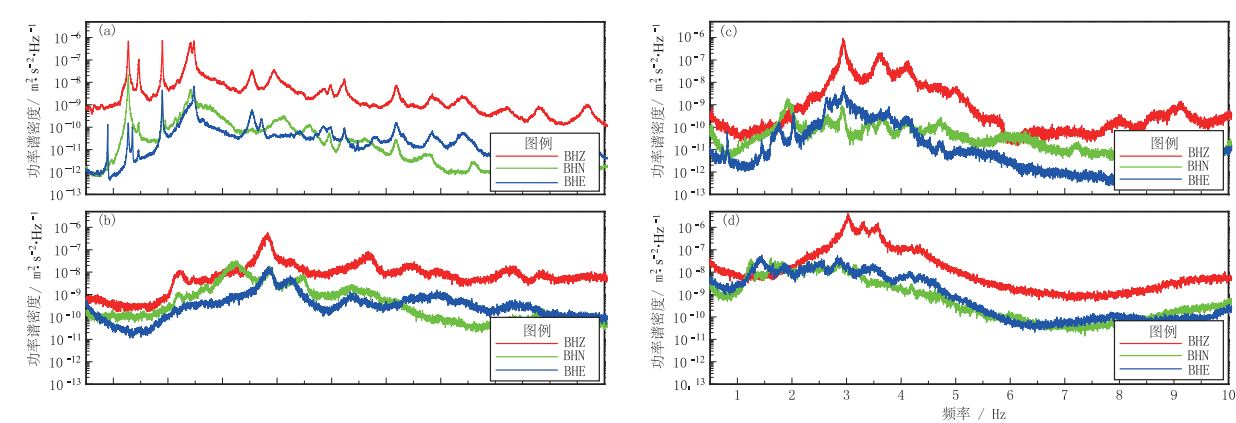


图 3 不同监测桥梁的三分量功率谱密度  
(a) 鲁疃西路大桥 5 号测点; (b) 百葛立交桥 4 号测点; (c) 南环大桥 4 号测点;  
(d) 潮白河大桥 4 号测点

Fig. 3 The power spectral density of three components of different bridges  
(a) the No. 5 measuring point on the Lutuanxilu Bridge; (b) the No. 4 measuring point on the Baige Overpass Bridge; (c) the No. 4 measuring point on the Nanhuan Bridge;  
(d) the No. 4 measuring point on the Chaobaihe Bridge

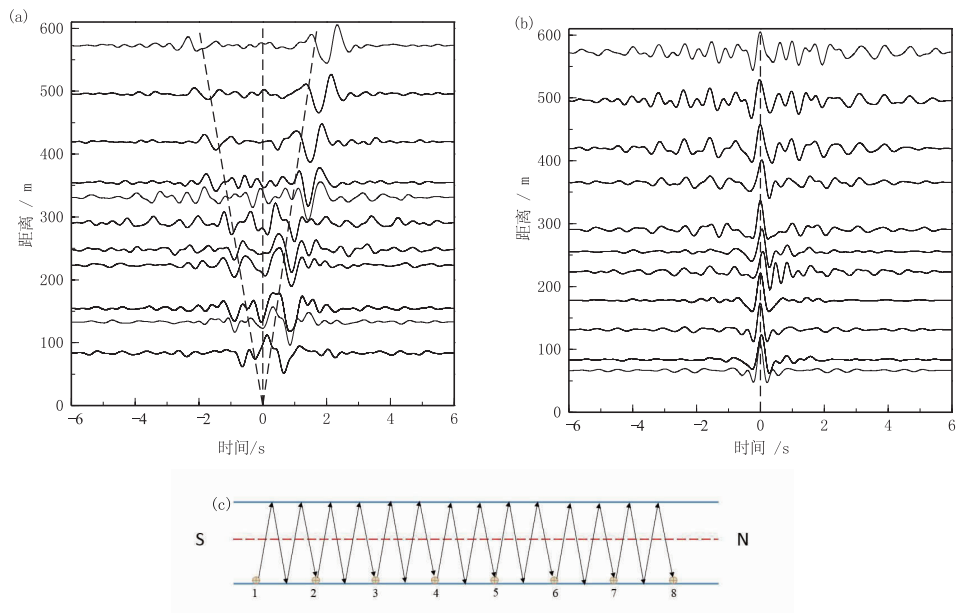


图 4 鲁疃西路大桥东西分量 (a)、南北分量 (b) 噪声互相关函数及结构波在桥面的传播示意图 (c)

Fig. 4 Noise cross-correlation functions of the east-west (a) and north-south (b) components of the Lutuanxilu Bridge and the schematic diagram of the propagation of structural wave on the bridge deck (c)



的变化。从图 4a 可以看出, 在  $t > 0$  (因果信号) 和  $t < 0$  (非因果信号) 时均存在明显的信号。因果信号要比非因果信号强, 呈现明显非对称性, 这可能由地震计布置在桥梁的一侧, 车辆来往的噪音不对称这一原因引起的。然而互相关函数信号的视速度基本一致, 约为 350 m/s, 这可能是一种桥梁结构波, 图 4c 是结构波在桥梁上的传播过程示意图。与噪声互相关函数的东西分量不同, 噪声互相关函数南北分量在  $t = 0$  处存在较强信号, 这说明地震波不同分量的地震波传播存在明显的差异。我们也发现噪声互相关函数垂直分量与南北分量基本一致, 形成这种现象的可能原因是, 大跨度桥梁不仅存在上下方向的振动, 而且存在垂直于其走向的水平方向的扭动。

对于 8 个地震计依次进行互相关处理, 图 5 分别给出了鲁疃西路大桥监测实验的 1 号和 8 号测点、2 号和 7 号测点台站对的垂直、南北和东西分量互相关函数的振幅谱。从图中可以看出, 在所有台站对的互相关函数中, 垂直分量的互相关函数都能明显识别出  $f = 1.3$  Hz 和  $f = 1.5$  Hz 峰值。在部分南北分量和东西分量的互相关函数分量也能识别出  $f = 1.3$  Hz 处的频率峰值。除了前面 2 阶的模态频率外, 还可以识别出后续的部分模态频率, 如  $f = 2.5$  Hz 处模态频率, 与峰值法获得的模态频率的结果基本一致, 但不同之处在于互相关

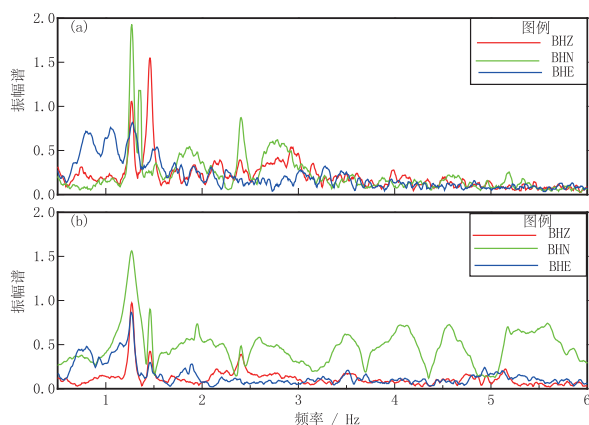


图 5 鲁疃西路大桥测点对互相关函数振幅谱

(a) 测点对 1 和 8; (b) 测点对 2 和 7

Fig. 5 Amplitude spectral of the noise cross-correlation of measuring point pairs for the Lutuanxilu Bridge

(a) measuring point pairs of 1 and 8;

(b) measuring point pairs of 2 and 7

获得的结果受台站位置的影响较小, 所有台站对都能得到较清晰的结果。

为了验证结果的可靠性, 我们根据测点 1 和测点 8 不同时间段的垂直分量噪声互相关函数, 得到了  $f = 1.3$  Hz 和  $f = 1.5$  Hz 处, 前二阶模态频率 ( $f = 1.3$  Hz 和  $f = 1.5$  Hz) 随时间的变化 (图 6a)。同时, 给出了峰值频率处的振幅谱值随时间的变化 (图 6b)。可以看出, 前二阶模态频率非常稳定, 基本不随时间变化, 这说明基于环境激励的噪声互相关方法能够可靠地提取桥梁的低阶模态频率。噪声互相关函数的频谱峰值随时间变化,

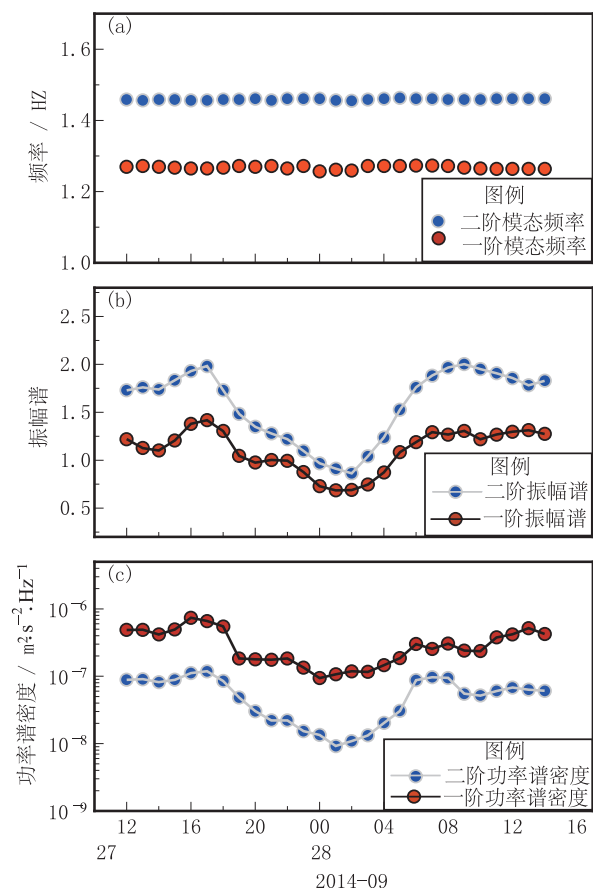


图 6 2014 年 9 月鲁疃西路大桥测点 1 和测点 8 垂直分量前两阶模态频率 (a)、对应的峰值幅度 (b) 及 5 号测点垂直分量在模态频率处的功率谱密度 (c) 随时间变化

Fig. 6 Modal frequency of the first two orders of vertical component of measuring point 1 and 8 of the Lutuanxilu Bridge on Sep., 2014 (a) and its corresponding peak amplitude (b) and power spectral density of vertical component of the No. 5 measuring point at the modal frequencies (c) varied with time

频谱峰值幅度白天高、晚上低,呈现明显的日变化,这可能与温度的日变化有关。图 6c 中给出了 5 号测点在这 2 个二阶模态频率处的垂直分量功率谱密度值随时间变化情况,由于车流量的变化,功率谱密度也呈现一定的日变化特征。尽管车流量的变化可能也会影响振幅谱峰值,然而另一项研究表明,桥梁结构的波速也呈现明显的日变化特征,并且与环境温度有显著的相关性 (Chen *et al.*, 2015)。因此,笔者认为环境温度变化可能是振幅谱峰值变化的主要原因。

## 4 结论与讨论

桥梁结构响应特征是桥梁健康诊断的重要基础。车辆行驶、风载、气压等对桥梁施加了自然载荷,引起桥梁结构的微振响应,为桥梁检测提供了激励信号。基于环境激励的桥梁结构响应检测方法,由于具有成本低、不影响正常交通通行、能够进行连续监测等优点,近年来快速发展。本文发展建立一套新型的基于环境激励信号的桥梁结构响应检测系统,并且选择北京市区 4 座典型在役桥梁开展了桥梁结构响应检测实验。利用高灵敏度三分量地震计连续监测环境噪声激励下的桥梁微弱振动信号,分别利用峰值法和互相关函数法获得了监测桥梁 3 个方向上的桥梁频谱结构响应特征,为在役桥梁实时健康诊断打下基础。监测结果表明:

(1) 本次监测实验采用的宽频带三分量地震计,具有灵敏度高、响应频带宽、动态范围大等优点,能够准确可靠地记录宽频带范围内的环境激励的微弱振动信号,非常适用于构建新型的桥梁结构响应检测系统;

(2) 峰值法和互相关函数法都能够获得桥梁的多阶模态频率,其中互相关函数法由于采用了波形互相关、叠加等方法,能够更加稳定可靠地获得桥梁的低阶模态频率;

(3) 对于大跨度桥梁,由于垂直于桥梁走向的扭动,存在沿该方向水平传播的结构波;

(4) 桥梁的模态频率受桥梁结构、材料、环境和温度等多种因素影响,桥梁不同方向的固有振动频率不同,不同类型的桥梁结构响应也存在显著差异。本次监测实验中相对较短的梁桥低阶模

态频率明显低于大跨度悬索桥相应的低阶模态频率,并且模态频率处的互相关函数振幅谱峰值呈现与环境温度变化相关的日变化特征。

## 参考文献:

- 陈莉. 2012. 公路桥涵工程试验检测技术探索[J]. 科技创新与应用, (26): 224 - 224.
- 杜权. 2009. 考虑 SSI 的钢管混凝土框架结构模态参数识别研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学.
- 雷理. 2012. 一种基于小波的结构损伤识别方法研究[J]. 工程地球物理学报, 9(2): 238 - 240.
- 李睿. 2009. 基于动力特性的桥梁损伤识别方法研究[D]. 西安: 长安大学.
- 焦莉. 2006. 基于数据融合的结构损伤识别[D]. 大连: 大连理工大学.
- 聂雪媛, 丁桦. 2012. 基于随机减量技术的模态参数识别方法探讨[J]. 机械科学与技术, 29(8): 1 - 5.
- 秦世强, 蒲黔辉, 施洲. 2012. 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, 31(2): 95 - 100.
- 宋雨. 2003. 文晖大桥健康监测与评估管理系统主要问题研究[D]. 杭州: 浙江大学.
- 杨乐杰. 2012. 基于频率、模态分析的钢桁梁架故障特征试验研究[D]. 长沙: 中南大学.
- 袁颖. 2005. 桥梁结构损伤识别方法的相关问题研究[D]. 大连: 大连理工大学.
- 赵骏. 2008. 基于环境振动的结构模态参数识别方法及其软件实现[D]. 大连: 大连理工大学.
- Cawley P, Adams R D. 1979. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 14(12): 49 - 57.
- Chen H C, Ge H K, Meng F B, *et al.* 2015. Monitoring the modal frequency and velocity variations of bridges under ambient excitation [J]. Earthquake Research in China, 29(4): 554 - 566.
- Duff A L, Hamdi S E, Ostiguy P C, *et al.* 2014. Comparison of scale factor estimators for ultrasonic temperature monitoring: Application to structural health monitoring [J]. Applied Acoustics, 76(1): 346 - 358.
- Hearn G, Testa R B. 1994. Modal Analysis for Damage Detection in Structures [J]. Journal of Structural Engineering, 117(10): 3042 - 3063.
- Penny J E T, Friswell M L, Garvey S D, *et al.* 1992. The Automatic Choice of Measurement locations for Dynamic Testing [J]. Aiaa Journal, 32(2): 407 - 414.
- Stubbs N, Broome T H, Osegueda R. 1990. Nondestructive construction error detection in large space structures [J]. Aiaa Journal, 28(1): 146 - 152.
- Salawu O S. 1997. Detection of structural damage through changes in frequency: a review [J]. Engineering structures, 19(9): 718 - 723.

## Response Characteristic of Bridge Structural under Natural Loads Detected by Using Three-component Seismometer

MENG Fanbao<sup>1</sup>, GE Hongkui<sup>1</sup>, CHEN Haichao<sup>1</sup>, WANG Xiaoqiong<sup>1</sup>, YANG Wei<sup>2</sup>

(1. *The Uncoventional Natural Gas Institute, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*)

(2. *Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China*)

### Abstract

We developed a set of bridge structural response online detection system based on ambient vibrating signal, and used high-sensitivity three-component broadband seismometer (CMG-6TD) to continuously monitor the tiny ambient vibrating signal of four typical in-service bridges in Beijing which was under the natural loading. Then we obtained the spectrum characteristic and structural response characteristic of four typical in-service bridges in different direction by the peak amplitude method and cross-correlation function technique respectively. The results show that: (1) The three-component broadband seismometer can continuously record accurate, reliable and tiny ambient vibrating signal in broadband range, and thus, which is extremely suitable for establishing a bridge structural response online detection system. (2) Both peak amplitude method and noise cross-correlation function technique can identify the modal frequencies of multi-step bridges, and the identification result obtained by the noise cross-correlation function technique is more stable. (3) The modal frequency of the bridge are influenced by many factors, such as the bridge structure, materials and ambient temperature etc. . As a consequence, the natural vibration frequencies of bridge are all different in vertical and the horizontal directions. Moreover, the structural responses of different type of bridge also show distinct difference. The developing bridge structural response detection technology could be the basis of the real-time health of the exciting bridge.

**Key words:** bridge structural response; ambient vibrating signal; spectrum characteristic; modal analysis