

考虑信噪比和车-桥耦合效应的桥梁健康监测策略

何浩祥¹, 李晓飞^{1,2}, 闫维明¹, 马裕超¹

(1. 北京工业大学 建筑工程学院 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124;

2. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 大连 116026)

摘要: 为了舍弃大量信噪比低或无异常的数据, 节约计算资源并提高分析效率, 在理论依据的基础上实现具有针对性的桥梁健康监测, 提出了考虑信噪比和车-桥耦合效应的桥梁监测策略. 对监测信号成分进行分析, 指出为了实现监测策略, 需要根据车-桥耦合动力理论确定合理准确的监测阈值. 将车群等效为具有主体部分和耦合均布质量的时变动力模型, 建立桥梁结构与移动车群相耦合的动力平衡方程及其解析表达式. 以一实际简支梁健康监测为例, 根据车-桥耦合理论分析车群的均布质量、行驶速度以及振动频率对桥梁动力反应的影响, 并结合实际监测数据确定监测阈值, 实现监测策略. 实验结果表明该监测策略有效.

关键词: 健康监测; 海量数据; 信噪比; 车-桥耦合; 损伤识别

中图分类号: TU 311.3; TU 317⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-0037(2014)08-1263-07

Health Monitoring Strategy for Bridge Considering Signal-to-Noise Ratio and Vehicle-Bridge Interaction

HE Hao-xiang¹, LI Xiao-fei^{1,2}, YAN Wei-ming¹, MA Yu-chao¹

(1. Beijing Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: To abandon a large number of low signal-to-noise ratio data or normal data, the health monitoring strategy for bridge considering signal-to-noise ratio and vehicle-bridge interaction was proposed. Hence, the computing resources were saved effectively and the targeted monitoring based on theory was realized. The composition of the vibration signal was discussed, and the reasonable and accurate monitoring threshold was determined according to vehicles-bridge interaction dynamics. A time-varying dynamic car group model which included a main uniform parameters and coupling mass was established. The dynamic coupling equations for bridge and car group were established and the analytical expression was given. For example, the health monitoring for a simply supported beam was discussed. The dynamic response under different uniform mass, speed and vibration frequency of the car group was analyzed based on vehicles-bridge interaction theory. The monitoring threshold was determined according to simulated result and measured signal, and the monitoring strategy was realized. Results show that the monitoring strategy is feasible.

Key words: health monitoring; mass data; signal to noise ratio; vehicle-bridge interaction; damage detection

收稿日期: 2013-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108009); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20111103120022)

作者简介: 何浩祥(1978—), 男, 副研究员, 主要从事结构健康监测、结构抗震减震及结构力学方面的研究, E-mail: hhx7856@163.com

桥梁工程在长期运营过程中,会在车辆荷载以及诸如风荷载、雨荷载等环境因素的综合作用下产生抗力衰减和损伤积累,也会在地震和飓风等动力作用下产生突发性的严重损伤和破坏,最终导致其可靠性不满足使用要求。在重要桥梁上布置不同类型的传感器,通过健康监测对桥梁的健康状况进行实时或适时的监测,及时发现不同程度的损伤,不仅能确保桥梁的运营安全和提高管理水平,还可以掌握桥梁性能劣化的演变规律,促进桥梁工程的发展。因此,桥梁健康监测已成为桥梁工程中一个重要研究方向。目前,桥梁健康监测系统已经在世界范围内一些重要的桥梁工程中加以应用,并取得一定的成果^[1-2]。然而,桥梁健康监测是一个多领域跨学科的综合技术,它涉及桥梁工程、传感技术、测试技术、信号分析、计算机技术及网络通讯通信技术等多个研究方向,桥梁健康监测在传感器性能与信号传输、海量数据挖掘与处理、监测和安全评定理论与软件开发等方面都存在不足,对桥梁的环境因素考虑也不全面,亟需改进和发展。

由于桥梁服役环境复杂,且关键部位和截面较多,对桥梁进行健康监测时需要布置大量的传感器,对桥梁进行实时监测过程中将会采集大量数据,而采集、传输、存储和分析这些海量数据耗时长、效率低,若处理不当将严重阻碍健康监测系统的实时性和有效性,成为制约桥梁健康监测发展的瓶颈问题之一。为了克服上述问题,可以从数据压缩、数据库存储和监测策略等方面进行优化。为了节省数据存储和传输的成本,可以对监测数据进行压缩。Zhang等^[3]提出基于提升小波变化的数据压缩算法,该方法可以实现很高的压缩效率,但其是一种有损的压缩算法;鲍跃全^[4]提出了Bayesian压缩采样方法,该方法具有较好的精度和去噪能力,但更适合窄带过程,对宽带过程的信号压缩效率一般。林健富等^[5]提出结构健康监测中应注重监测数据的完整性、自动化管理和调用效率,从数据组织策略方面解决数据处理和使用效率等问题,充分优化数据管理系统。

目前关于健康监测策略的研究尚不够充分,Okasha等^[6]建立了考虑桥梁全寿命周期的健康监测整体框架和计算平台,从而保证桥梁在不同技术状态下可以调整监测方案并进行加固维修;Kripakaran等^[7]提出针对桥梁健康监测中的不同目标可采用不同的监测策略,从而在桥梁正常运营及数据出现异常时均能保证监测性能。本文认为,桥

梁健康监测系统的性能、规模和成本需要根据桥梁的规模、监测重要性以及工程造价等因素合理确定,强调健康监测与日常检测的结合,灵活选择实时与适时监测模式是提高监测系统效率的基本原则。此外,还应充分考虑桥梁的具体形式、静动力特点以及监测设备的精度和稳定性,通过理论分析和有限元计算得到具体的量化指标,从而对监测进行有效的控制和指导。为此,本文提出了考虑信噪比和车-桥耦合效应的桥梁监测策略,并通过工程实例对该策略进行了分析和验证。

1 考虑信噪比和动力特性的健康监测策略

桥梁健康监测系统采集的信号精度是决定其监测水平高低的重要因素。通过传感器和数据采集仪获得的实测信号主要包括3种类型:1)由交通荷载所激发的结构振动信号,此类信号振幅较大,充分反映了结构的动力特性,是结构检测和监测分析的重点;2)自然环境激发的环境振动信号,发生源是场地微振动、风动、地震等自然作用,此类信号振幅较小,兼有随机性和结构动力特征,一般频带较宽,很多情况下需要对其进行抑制和分离;3)电磁干扰信号或噪声信号,其发生源是自然及电气电子设备的电磁干扰,根据具体情况,信号可能呈现突发性、瞬时性或周期性等特征,此类信号严重降低了数据的真实性和有效性,应力求剔除。

在以往传统的结构检测及监测中,一般要保证测试仪器在量程、灵敏度、分辨力及工作范围等性能参数上满足要求。其中,分辨力是指测试仪器能有效辨别的最小示值差,反映了仪器的信噪比强弱。一般要求最低可测信号电平与噪声电平比值的分贝值为 $20\lg(S/N) \leq 5$ dB。其中: S 为被测信号电平; N 为噪声电平^[8]。满足上述等式时的被测信号幅值称为最低可测振级,此时被测信号电压约为噪声电压的1.77倍。根据目前一般的健康监测仪器性能及桥梁实际动力特性,可以认为上述信噪比的要求较低,只能作为桥梁健康监测的基本要求和必要条件。

对电磁干扰信号或噪声信号进行去噪,凸显结构的振动信号,是结构健康监测中不可缺少的环节。通常情况下,可以采用各种滤波技术实现对电磁干扰信号进行部分削减,但由于电磁干扰信号与振动信号在频谱上有混叠,因此不能被完全剔除。此外,一般的滤波技术不能实现实时过滤且计算量较大,因此在实际数据监测和分析中,不能单纯采用滤波技术,还需要考虑海量数据处理和优化监测策略等

手段以实现最优的监测效益. 为了实现更精细的动力信号信噪比的量化要求, 需要根据桥梁实际情况和监测需求及能力, 结合车-桥耦合动力理论进行分析得出.

综合上述分析, 本文提出的基于信噪比和动力特性的桥梁健康监测优化策略如下: 从“保证结构全寿命周期安全”的要求出发, 根据结构状态、体系和形式以及经济条件合理地提出健康监测的需求, 选择适宜的监测仪器和软件系统, 实现健康监测与常规检测相结合、实时监测与适时监测相结合. 在满足以信噪比为主要指标的监测仪器性能参数的前提下, 根据监测的交通荷载数据(如桥上车辆数量、质量及速度等), 测算桥梁在环境振动和交通荷载下的动力特性, 并将不同情况下的有效振动幅值作为多级阈值, 判断是否启动数据滤波和损伤识别. 进行损伤识别后可以调整分析模型, 提出维护建议并调整监测策略. 策略流程见图 1. 该策略的优点为可以舍弃大量信噪比低或无异常的数据, 节约计算资源, 在理论依据的基础上实现具有针对性的监测.

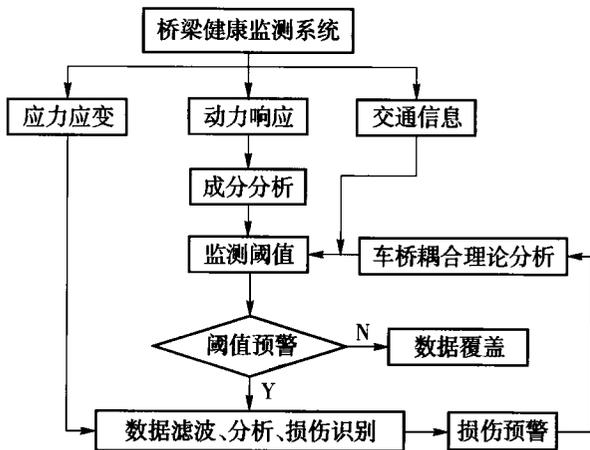


图 1 健康监测策略流程

Fig. 1 Flow chart for health monitoring strategy

2 车群-桥耦合运动方程

对桥梁进行健康监测前, 需要对桥梁动力特性及交通荷载的情况进行调查分析, 同时也要考虑车辆与桥梁的耦合特性, 进而进行损伤识别. 近年来, 国内外学者在车致桥梁振动理论方面进行了大量的研究^[9-12], 基于此类成果的损伤识别研究也逐渐开展^[13-15]. 目前的车桥耦合理论中关于车群与桥梁耦合的研究尚需深入, 本文将车群等效为具有主体部分和耦合均布质量的时变动力模型, 建立了桥梁结构与移动车群相耦合的动力平衡方程及其解析表

达式.

一般的桥梁结构在车辆竖向振动作用下的主要变形是弯曲变形, 在低频振动时可以忽略剪切变形以及截面绕中性轴转动惯量的影响^[10]. 如图 2 所示, 假设桥梁为等截面, 即弯曲刚度 D 为常数.

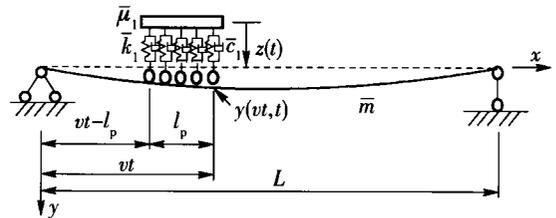


图 2 车群与桥梁耦合作用示意图

Fig. 2 Interaction of vehicle -structure under excitation

车群与结构的耦合作用及动力响应也可以通过将车群看作均匀移动质量荷载而直接求解微分方程的方法获得. 梁上的外加激励是由车群行走而引起的, 假设车群是由主体均布质量集度 $\bar{\mu}_1$ 、主体刚度 \bar{k}_1 、主体阻尼 \bar{c}_1 以及耦合均布质量集度 $\bar{\mu}_0$ 组成的体系. 设桥梁的动挠度为 $y(x, t)$, 车群主体质量的动位移为 $z(t)$, 分布长度为 l_p , 并假定车群以匀速 v 移动. 忽略在桥梁振动所引起的斜率上的车群附加加速度, 车群主体的动力平衡方程为

$$m_1 \ddot{z}(t) + \bar{k}_1 (z(t) - y(x, t)) + \bar{c}_1 (\dot{z}(t) - \partial y(x, t) / \partial t) = 0 \quad (1)$$

相应的车群行走激励下桥梁的动力平衡方程为

$$D \partial^4 y(x, t) / \partial x^4 + \bar{m} \partial^2 y(x, t) / \partial t^2 + c \partial y(x, t) / \partial t = p(x, t) \quad (2)$$

车群质量对桥梁动力作用 $p(x, t)$ 包括车群质量对桥梁的重力加载作用 $p_c(x, t) = (\bar{\mu}_0 + \bar{\mu}_1)g$ 、车群产生的惯性力 $p_i(x, t) = -\bar{\mu}_0 \partial^2 y(x, t) / \partial t^2$ 、车群刚度产生的反作用力 $p_s(x, t) = \bar{k}_1 [z(t) - y(x, t)]$ 和车群阻尼产生的反作用力 $p_D(x, t) = \bar{c}_1 [\dot{z}(t) - \partial y(x, t) / \partial t]$. $p(x, t)$ 可以表示为 $p(x, t) = [p_c(x, t) + p_i(x, t) + p_s(x, t) + p_D(x, t)] \{H[x - (vt - l_p)] - H(x - vt)\}$. 其中, $H(t)$ 为单位阶跃函数. 式(2)可按振型叠加法求解. 变换表达式为

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} q_i(t) \phi_i(x) \quad (3)$$

式中: $q_i(t)$ 为广义振型坐标; $\phi_i(x)$ 为振型函数.

将式(3)代入式(2), 并将每一项乘以第 n 阶振型函数, 沿桥梁全长进行积分, 并考虑振型的正交性, 采用振型分解法并联合式(1) 得到桥梁与车群的耦合系统动力方程组, 利用逐步积分法进行求解,

可以获得桥梁在车群作用下的第 n 阶振型下反应. 对于多跨连续桥梁或悬索桥和斜拉桥等类型的桥梁, 由于振型复杂, 需要采用有限元方法进行模态分析获得相关振型. 对于简支梁可以采取以下解析方法求解.

简支梁的第 n 阶振型为 $\phi_n = \sin \frac{n\pi v}{L} \left(t - \frac{l_p}{2v} \right)$,

沿桥梁全长积分, $p(x, t)$ 分项积分的结果为

$$p_c(x, t) = \int_{v-l_p}^u (\bar{\mu}_1 + \bar{\mu}_2) g \sin \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{2(\bar{\mu}_0 + \bar{\mu}_1)gL}{n\pi} \sin \frac{n\pi l_p}{2L} \sin \frac{n\pi v}{L} \left(t - \frac{l_p}{2v} \right) \quad (4)$$

$$p_1(x, t) = - \sum_{i=1}^{\infty} \bar{\mu}_0 \ddot{q}_i(t) \int_{v-l_p}^u \sin \frac{i\pi x}{L} \sin \frac{n\pi x}{L} dx = - \frac{\bar{\mu}_0 L}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \ddot{q}_i(t) \Phi_{in} \quad (5)$$

其中

$$\Phi_{in} = \frac{1}{i-n} \left[\cos \frac{(i-n)\pi v}{L} \left(t - \frac{l_p}{2v} \right) \sin \frac{(i-n)\pi l_p}{2L} \right] - \frac{1}{i+n} \left[\cos \frac{(i+n)\pi v}{L} \left(t - \frac{l_p}{2v} \right) \sin \frac{(i+n)\pi l_p}{2L} \right]$$

$$p_s(x, t) = \frac{2\bar{k}_1 L z(t)}{n\pi} \sin \frac{n\pi l_p}{2L} \sin \frac{n\pi v}{L} \left(t - \frac{l_p}{2v} \right) - \frac{\bar{k}_1 L}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} q_i(t) \Phi_{in} \quad (6)$$

$$p_D(x, t) = \frac{2\bar{c}_1 L \dot{z}(t)}{n\pi} \sin \frac{n\pi l_p}{2L} \sin \frac{n\pi v}{L} \left(t - \frac{l_p}{2v} \right) - \frac{\bar{c}_1 L}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \dot{q}_i(t) \Phi_{in} \quad (7)$$

令 $\omega_n = \frac{n^2 \pi^2 \sqrt{EI/m}}{L^2}$ 为结构第 n 阶圆频率,

$c_n = 2\bar{m}\xi_n \omega_n$ 为第 n 阶振动阻尼. 将式(2)两边同除以 $\bar{m}L/2$ 并整理可得车群激励下梁板结构第 n 阶振型动力平衡方程的标准形式

$$\begin{aligned} & \left[\ddot{q}_n(t) + \frac{2\bar{\mu}_0}{m\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \ddot{q}_i(t) \Phi_{in} \right] + \\ & \left[2\xi_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \frac{2\bar{c}_1}{m\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \dot{q}_i(t) \Phi_{in} \right] + \\ & \left[\omega_n^2 q_n(t) + \frac{2\bar{k}_1}{m\pi} \sum_{i=1}^{\infty} q_i(t) \Phi_{in} \right] - \\ & \frac{4}{n\bar{m}\pi} \sin \frac{n\pi l_p}{2L} \phi_n \left[\bar{k}_1 z(t) + \bar{c}_1 \dot{z}(t) \right] = \\ & \frac{4(\bar{\mu}_0 + \bar{\mu}_1)g}{n\bar{m}\pi} \sin \frac{n\pi l_p}{2L} \phi_n \quad (8) \end{aligned}$$

对于简支梁桥, 如果广义坐标取 n 项, 整体自由

度将从无穷多个简化为 n 个, 系统运动方程的 n 阶表达式可以由式(1)转化为

$$\begin{aligned} & \bar{\mu}_1 \ddot{z}(t) + \bar{c}_1 \dot{z}(t) + \bar{k}_1 z(t) - \bar{c}_1 \sum_{i=1}^n \dot{q}_i(t) \phi_i(x) - \\ & \bar{k}_1 \phi_n \sum_{i=1}^n q_i(t) \phi_i(x) = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

将式(8)和式(9)联立, 得到桥梁与车群的耦合系统动力方程组. 对于简支梁, 如果位移级数取 n 项, 则桥梁的广义自由度为 n , 加上车群主体的自由度, 系统运动方程的 $n+1$ 阶矩阵表达式为

$$M \ddot{U} + C \dot{U} + KU = F(t) \quad (10)$$

式中广义位移向量 $U = [q_1, q_2, \dots, q_n, z]^T$. 广义的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵以及力向量分别为

$$M = \begin{bmatrix} 1 + \rho_M \Phi_{11} & \rho_M \Phi_{12} & \cdots & \rho_M \Phi_{1n} & 0 \\ \rho_M \Phi_{21} & 1 + \rho_M \Phi_{22} & \cdots & \rho_M \Phi_{2n} & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \rho_M \Phi_{n1} & \rho_M \Phi_{n2} & \cdots & 1 + \rho_M \Phi_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \bar{\mu}_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C = \begin{bmatrix} 2\xi_1 \omega_1 + \rho_C \Phi_{11} & \rho_C \Phi_{12} & \cdots & \rho_C \Phi_{1n} & -\rho_C \phi_1 \\ \rho_C \Phi_{21} & 2\xi_2 \omega_2 + \rho_C \Phi_{22} & \cdots & \rho_C \Phi_{2n} & -\rho_C \phi_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \rho_C \Phi_{n1} & \rho_C \Phi_{n2} & \cdots & 2\xi_n \omega_n + \rho_C \Phi_{nn} & -\rho_C \phi_n \\ -\bar{c}_1 \phi_1 & -\bar{c}_1 \phi_2 & \cdots & -\bar{c}_1 \phi_n & \bar{c}_1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$K = \begin{bmatrix} \omega_1^2 + \rho_K \Phi_{11} & \rho_K \Phi_{12} & \cdots & \rho_K \Phi_{1n} & -\rho_K \phi_1 \\ \rho_K \Phi_{21} & \omega_2^2 + \rho_K \Phi_{22} & \cdots & \rho_K \Phi_{2n} & -\rho_K \phi_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \rho_K \Phi_{n1} & \rho_K \Phi_{n2} & \cdots & \omega_n^2 + \rho_K \Phi_{nn} & -\rho_K \phi_n \\ -\bar{k}_1 \phi_1 & -\bar{k}_1 \phi_2 & \cdots & -\bar{k}_1 \phi_n & \bar{k}_1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$F(t) = [\rho_F \phi_1, \rho_F \phi_2, \dots, \rho_F \phi_n, 0]^T \quad (14)$$

式中: $\rho_M = \frac{2\bar{\mu}_0}{m\pi}$; $\rho_C = \frac{2\bar{c}_1}{m\pi}$; $\rho_K = \frac{2\bar{k}_1}{m\pi}$; $\rho_F = \frac{4(\bar{\mu}_0 + \bar{\mu}_1)g}{n\bar{m}\pi}$.

$$\sin \frac{n\pi l_p}{2L}; \Phi_{nm} = \phi_n \phi_m; \phi_n = \sin \frac{n\pi v}{L} \left(t - \frac{l_p}{2v} \right)$$

由于车群在桥梁上移动, 其耦合质量和系统动力方程组中的系数 Φ_{mn} 都在不断地变化, 使系统运动方程组成为时变系统的多阶微分方程组, 一般只能采用逐步积分法求解. 从式(10)可以看出, 对桥梁动力响应影响较大的因素包括车群的质量、刚度以及行驶速度等. 对于实际的桥梁结构, 车群分布

长度 l_p 与结构长度相同, 因此下文主要针对该种情况进行研究.

3 实例分析

对某跨径 30 m 钢筋混凝土简支 T 梁桥进行健康监测, 桥梁外部几何尺寸为: 板宽为 12.5 m, 梁高为 1.8 m, 等效截面惯性矩为 0.80 m^4 . 桥梁的等效弹性模量为 $3.5 \times 10^6 \text{ MPa}$, 折算后的主梁质量密度为 $3.61 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. 在桥梁的跨中及对称位置上安装了 5 个伺服式加速度计及 5 个倾角仪, 用以采集桥梁的动力响应信号; 在桥面上安装了 2 道相距 8 m 的压电薄膜传感器, 用以采集交通信号并分析得到具体的车型、轴重和车速. 在 T 梁内部及表面安装了光纤光栅应变传感器, 用以监测桥梁关键部位的受力情况.

应用本文建立的车-桥耦合分析方法对桥梁进行数值分析, 研究交通荷载对桥梁动力特性的影响. 定义车群耦合质量比为耦合均布质量集度与车群整体均布质量集度之比. 图 3 为主体均布质量集度为 30 t/m 、行驶速度为 15 m/s 时, 不考虑车群耦合质量以及车群耦合质量比为 0.3 时的桥梁加速度反应时程结果. 从中可以看出, 考虑车群耦合质量比后的桥梁动力反应略小, 但不明显. 根据经验, 正常分析时取耦合质量比为 0.15 比较合理. 考虑均布质量对桥梁动力反应的影响, 计算耦合质量比为 0.15、主体均布质量集度分别为 5 t/m 和 10 t/m 的车群在 10 m/s 速度下的桥梁位移时程与加速度时程, 结果如图 4 所示. 从图 4 中可以看出, 在车群作用下, 车载的增大使桥梁动力反应也增大, 且桥梁的动力反应呈类周期性波动.

图 5 为主体均布质量集度为 5 t/m 的车群在不同竖向频率和速度下使桥梁产生的加速度最大幅值曲线. 图 6 和图 7 分别为主体均布质量集度为 10 t/m 的车群在不同速度下和不同频率下的桥梁位移最大幅值曲线族和加速度最大幅值曲线族. 结合以上结果可以看出, 当汽车的竖向频率大于 0.4 Hz 后, 车群与桥梁的耦合作用趋于平稳. 随着车群的行驶速度增大, 桥梁的位移和加速度反应基本呈增大趋势, 但波动变化也比较明显, 车-桥耦合作用不容忽视, 需要将行车速度作为重要指标进行深入分析.

图 8 为实际监测时采集到的无车时和通车时的桥梁加速度信号. 实测的环境振动信号与电磁干扰信号幅值总和在 $\pm 1.0 \text{ mm/s}^2$ 范围内, 而车致桥梁振动加速度幅值一般在 $\pm 0.05 \text{ m/s}^2$ 范围内, 与数值分

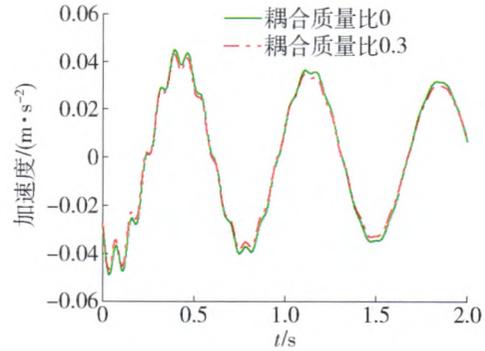


图 3 车群与桥梁耦合作用对比

Fig. 3 Comparison of Interaction of vehicle-structure

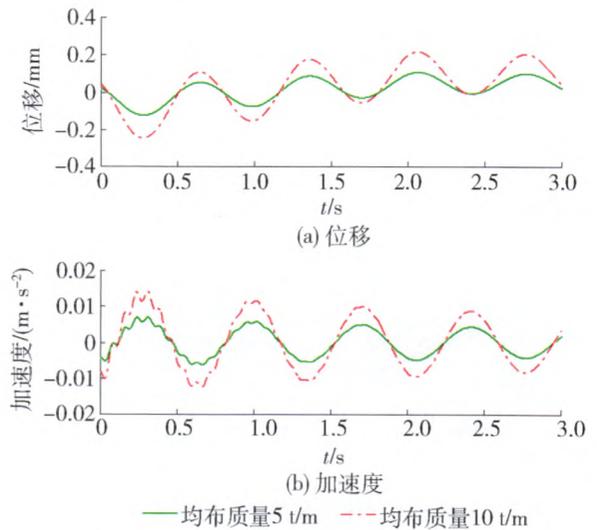


图 4 不同车速下桥梁动力响应时程对比

Fig. 4 Dynamic responses of bridge with different vehicle speed

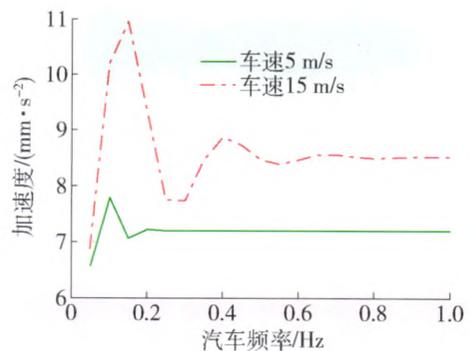


图 5 不同速度下桥梁加速度最大幅值曲线

Fig. 5 Maximum acceleration for different speed

析结果相吻合. 综合考虑监测需求、路面不平顺度和环境因素等实际条件以及初步监测结果, 该桥梁健康监测的监测阈值选取如下: 当加速度幅值小于 $\pm 5.0 \text{ mm/s}^2$ 或位移幅值小于 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 时不启动模态分析功能, 反之则选取适当的数据, 利用随机子空

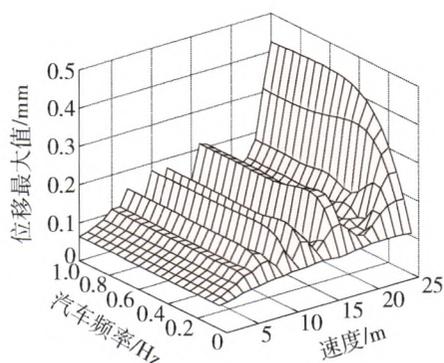


图6 车群在不同速度和频率下的桥梁位移最大幅值曲线族

Fig. 6 Family of curves of maximum displacement for frequency and speed

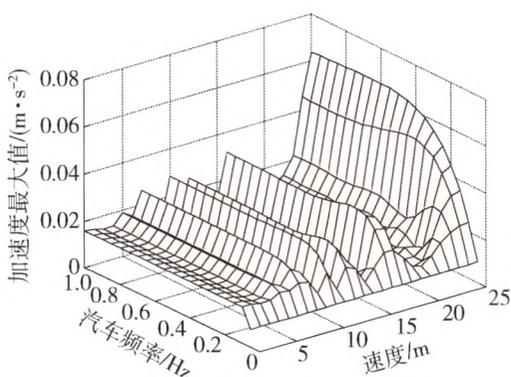


图7 车群在不同速度和频率下的桥梁加速度最大幅值曲线族

Fig. 7 Family of curves of maximum acceleration for frequency and speed

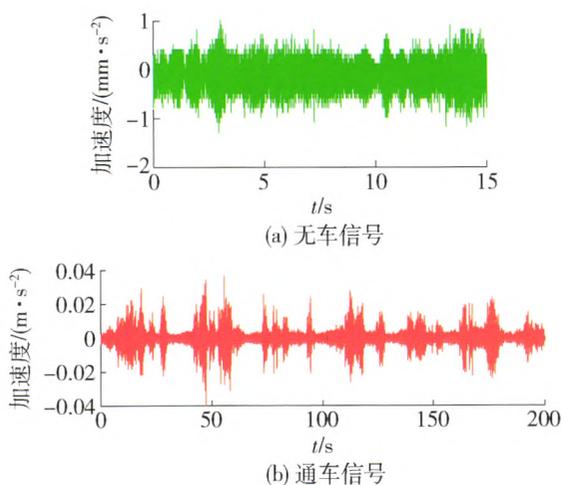


图8 无车时和通车时的桥梁加速度信号对比

Fig. 8 Bridge acceleration signals with or without vehicle

间等方法进行模态分析,获得桥梁的前3阶频率、振型和阻尼比;当加速度幅值小于 $\pm 10 \text{ mm/s}^2$ 或位移

幅值小于 $\pm 0.18 \text{ mm}$ 时不启动损伤识别功能,反之则选取适当的数据进行损伤识别,分析桥梁可能发生的损伤位置和程度,并将相关数据长期存储.按照上述监测策略,可以只保留重要的数据并进行分析,在保证健康监测效果的前提下有效地节约了资源.例如,该健康监测系统连续运行24 h下,原始数据库增加存储量为504.15 M,采用本文的监测策略进行存储之后存储量仅为57.06 M,而实际分析所用有效数据和所得结论均一致.

4 结论

1) 在桥梁健康监测中对监测数据进行有效的选取、去噪、分析和存储具有重要的工程应用价值.本文通过对信号组成进行分析,并建立桥梁结构与移动车群相耦合的动力平衡方程及其解析表达式,提出了考虑信噪比和车-桥耦合效应的桥梁监测策略.该策略的优点为可以舍弃大量信噪比低或无异常的数据,节约计算资源.

2) 对实际简支梁桥进行监测分析,结果表明:车载和车速是影响桥梁动力反应的主要因素,其影响需要根据车-桥耦合动力理论和实际监测结果进行深入研究;将理论分析与实测结果结合,可以确定监测阈值,从而对具有不同重要性的数据采取相应的分析技术,实现健康监测策略,提高健康监测系统的成本-效益比.

参考文献:

- [1] PINES D J, AKTAN A E. Status of structural health monitoring of long-span bridges in the United States [J]. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2002, 4 (4): 372-380.
- [2] 李惠, 周文松, 欧进萍, 等. 大型桥梁结构智能健康监测系统集成技术研究 [J]. *土木工程学报*, 2006, 39 (2): 46-52.
LI Hui, ZHOU Wen-song, OU Jin-ping, et al. A study on system integration technique of intelligent monitoring systems for soundness of long-span bridges [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39 (2): 46-52. (in Chinese)
- [3] ZHANG Y, LI J. Wavelet-based vibration sensor data compression technique for civil infrastructure condition monitoring [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2006, 20(6): 390-399.
- [4] 鲍跃全. 结构健康监测的数据压缩采样与损伤识别融合方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2009.

- BAO Yue-quan. Compressive sampling for structural health monitoring and damage detection methods based on information fusion [D]. Harbin: School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [5] 林健富,程瀛,黄建亮,等. 大型建筑结构健康监测的海量数据处理与数据库开发研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(12): 55-59.
LIN Jian-fu, CHENG Ying, HUANG Jian-liang, et al. Massive data processing in large-scale structural health monitoring and the corresponding database development [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(12): 55-59. (in Chinese)
- [6] OKASHA N M, Dan FRANGOPOL M. Computational platform for the integrated life-cycle management of highway bridges [J]. Engineering Structures, 2011, 33(5): 2145-2153.
- [7] KRIPAKARAN P, Ian SMITH F C. Configuring and enhancing measurement systems for damage identification [J]. Advanced Engineering Informatics, 2009, 23(4): 424-432.
- [8] 杨学山. 工程振动测量仪器和测试技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 2001: 169-171.
- [9] 刘伯权,黄华,刘鸣. 简支梁桥在车辆荷载谱作用下的动力分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 76-80.
LIU Bo-quan, HUANG Hua, LIU Ming. Dynamic analysis of simply supported beam bridges under vehicle load spectrum[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 76-80. (in Chinese)
- [10] 夏禾,张楠. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 140-153.
- [11] 李小珍,张黎明,张洁. 公路桥梁与车辆耦合振动研究现状与发展趋势[J]. 工程力学, 2008, 25(3): 230-240.
LI Xiao-zhen, ZHANG Li-ming, ZHANG Jie. State-of-the-art review and trend of studies on coupling vibration for vehicle and highway bridge system[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3): 230-240. (in Chinese)
- [12] KWASNIEWSKI L, LI H, WEKEZER J, et al. Finite element analysis of vehicle-bridge interaction [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42(11): 950-959.
- [13] LU Z R, LIU J K, HUANG M, et al. Identification of local damages in coupled beam systems from measured dynamic responses [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 326(1/2): 177-189.
- [14] 付春雨,单德山,李乔. 基于车致振动响应的铁路桥梁损伤位置识别[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(5): 719-725.
FU Chun-yu, SHAN De-shan, LI Qiao. Damage location identification of railway bridge based on vibration response caused by vehicles [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(5): 719-725. (in Chinese)
- [15] 战家旺,夏禾,张楠. 基于在线振动响应的桥梁损伤识别方法[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(3): 38-62.
ZHAN Jia-wang, XIA He, ZHANG Nan. Damage identification method for bridges using online vibration responses [J]. China Railway Science, 2011, 32(3): 38-62. (in Chinese)

(责任编辑 刘 潇)