

文章编号:1001-4888(2009)06-0598-07

# 加速度功率谱密度在钢桥损伤检测中的应用<sup>\*</sup>

李曰兵<sup>1</sup>, 邢爽<sup>1</sup>, 大岛俊之<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学 建筑工程学院, 吉林 132012; 2. 北见工业大学 土木工学科, 日本北见 090-8507)

**摘要:** 利用振动特性变化对结构进行无损检测, 是近期损伤检测领域的热门研究课题。振动特性能够反映结构的状态, 损伤的产生会导致桥梁某些振动参数的变化。为了研究应用加速度反应功率谱密度这一振动特性进行钢桥损伤识别方法, 本文采用废止铁路线钢桥为试件, 并人工预置 6 种工况损伤。利用正弦扫频波激励钢桥, 分析其损伤前后加速度反应功率谱密度的变化。实验结果表明, 利用加速度反应功率谱密度变化能够准确识别并定位钢桥损伤的位置。

**关键词:** 加速度功率谱密度; 损伤; 检测

**中图分类号:** U441<sup>+</sup>.4 **文献标识码:** A

## 0 引言

结构在使用过程中, 由于荷载与外界环境的长期作用, 不可避免地出现不同程度的损伤, 为了确保结构使用的安全性和耐久性, 通过一定的检测手段和方法对结构的健康水平进行评估, 已经成为国内外学术界和工程界的热点研究课题。

基于结构振动参数变化, 能应用于复杂结构并易于实现计算机自动在线监测的健康监测理论与实验方法得到了较快的发展。这种基于结构动力响应变化的无损健康检测技术, 根据研究的预期目标可分为如下几类<sup>[1]</sup>:

- 1) 检测损伤是否发生;
- 2) 检测损伤的发生并确定损伤位置;
- 3) 检测损伤的发生, 确定损伤位置, 并进一步确定损伤程度;
- 4) 检测损伤的发生, 确定其位置, 判断损伤程度, 并评估损伤对结构的危害性。

本文利用某废止铁路线路的百年钢桥为试件进行局部激振实验, 采用人工方法预置 6 种不同工况损伤, 利用损伤前后加速度反应功率谱密度(PSD)变化值, 成功检测到了损伤, 并准确定位了损伤发生的位置, 达到了上文所述第二阶段的研究预期。

## 1 原理

固有频率、振型等振动参数能够反映结构的状态。损伤的发生一般会导致结构刚度、质量、约束条件等物理特性的变化, 从而引起结构振动特性的变化。于是考虑利用监测结构振动参数的变化检测损伤并进一步确定损伤的位置<sup>[2]</sup>。

高速傅立叶变换是目前谱分析普遍采用的方法, 谱分析就是将时域表示的不规则变化函数, 改由频域表示并进行解析。通过实验采集的加速度反应数据为时域信号, 虽在数据采集瞬间即可知信号的幅值, 但如果将信号由时域表示改用频域表示, 可以更深刻的洞察信号以及产生信号的系统特征。这种

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009-07-07; 修订日期: 2009-09-23

**通讯作者:** 李曰兵(1980—), 男, 硕士, 助教, 从事结构损伤检测与防灾减灾方面的研究工作。E-mail: sdlybing@hotmail.com

转变的实现有两种方法:离散傅立叶变换(DFT)和快速傅立叶变换(FFT),由于 DFT 法需要长时间的计算处理,目前多采用 FFT 法<sup>[3]</sup>:

某一连续时域  $x(t)$ , 定义域为  $[0, T]$ , 则傅立叶谱转换  $X(f)$  为:

$$X(f) = \int_0^T x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

式中:  $i = \sqrt{-1}$ ;  $f$  为频率(Hz)。

这是一复杂函数, 式中各参数均采用工程单位(EU), 如  $\text{m/s}^2$ 、 $\text{g}$ 。功率谱为:

$$|X(f)|^2 = X(f) X^*(f) \quad (2)$$

式中,  $*$  表示复共轭, 单位为  $(\text{EU})^2$ 。功率谱密度为:

$$G_x(f) = \frac{2}{T} E[|X(f)|^2] \quad (3)$$

式中,  $E[\ ]$  表示某一频段  $f$  的  $n$  次样本均值。

损伤产生后, 结构上各点加速度反应功率谱密度发生变化, 根据各点加速度反应在不同频率时的变化值总和(Total change of PSD), 判断损伤是否发生, 并确定损伤发生位置。用  $G_i(f)$ 、 $G_i^*(f)$  分别表示损伤前、后  $f$  频段的功率谱密度值, 则该频段加速度反应功率谱密度变化量为<sup>[4]</sup>:

$$D_i(f) = |G_i(f) - G_i^*(f)| \quad (4)$$

按一定频率范围分割加速度反应数据成  $m$  段, 记为  $f_1 \sim f_m$ , 各加速度传感器在不同频段的功率谱密度变化值用矩阵表示为:

$$D = \begin{bmatrix} D_1(f_1) & D_1(f_2) & \cdots & D_1(f_m) \\ D_2(f_1) & D_2(f_2) & \cdots & D_2(f_m) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ D_n(f_1) & D_n(f_2) & \cdots & D_n(f_m) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $n$  为加速度传感器编号;  $m$  为某一频率段数据编号。

式(5)矩阵中各列元素表示同一频率、不同位置加速度传感器的 PSD 变化量, 由损伤导致的各传感器的 PSD 变化值可表示为:

$$\text{TotalChange} = \left\{ \sum_f D_1(f) \sum_f D_2(f) \cdots \sum_f D_n(f) \right\} \quad (6)$$

如果结构损伤程度较轻, 加速度反应的 PSD 变化值就会较小, 仅用此来确定损伤位置比较困难。为了准确定位损伤, 保留不同频段各传感器 PSD 变量的最大值, 其它传感器在该频段变为 0, 即保留式(5)中各列元素最大值, 并表示为  $M_i(f)$ , 列中其它元素均变为 0, 得矩阵  $M$ , 为了确定各加速度传感器 PSD 变量最大的次数, 再将矩阵  $M$  中的非 0 元素变为 1, 得矩阵  $C$ , 如式(7)所示:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & M_2(f_2) & 0 & \cdots & 0 \\ M_3(f_1) & 0 & 0 & \cdots & M_3(f_m) \\ 0 & 0 & M_4(f_3) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)中矩阵  $M$  行中各元素求和, 可得各传感器最大加速度 PSD 变量的总和, 如式(8)中矩阵  $SM$ , 矩阵  $C$  各行元素求和可得各传感器 PSD 为最大的总次数, 如式(8)中矩阵  $SC$  所示:

$$SM = \begin{bmatrix} \sum_f M_1(f) \\ \sum_f M_2(f) \\ \vdots \\ \sum_f M_n(f) \end{bmatrix} \quad SC = \begin{bmatrix} \sum_f C_1(f) \\ \sum_f C_2(f) \\ \vdots \\ \sum_f C_n(f) \end{bmatrix} \quad (8)$$

损伤指标(Damage\_Indicator\_0)用式(8)所示两矩阵的点乘表示:

$$Damage\_Indicator\_0 = \begin{Bmatrix} SM(1) \times SC(1) \\ SM(2) \times SC(2) \\ \vdots \\ SM(n) \times SC(n) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

损伤发生的位置为列矩阵(9)中数值最大元素所对应的加速度传感器附近。

为了更精确地定位损伤,分别求出(8)式中矩阵 SM、SC 的标准偏差  $\delta$ 、 $\lambda$ ,然后将(8)式 SM、SC 两矩阵中各元素分别减去  $2\delta$ 、 $2\lambda$ ,得新的列矩阵 SM2、SC2,将列矩阵 SM2、SC2 点乘,得损伤指标矩阵 damage\_indicator\_2。

## 2 激振实验系统

基于加速度反应功率谱密度的损伤检测实验系统由对钢桥激振部分和加速度反应数据采集部分两大部分组成<sup>[5]</sup>,系统组成及仪器型号如图 1 所示。

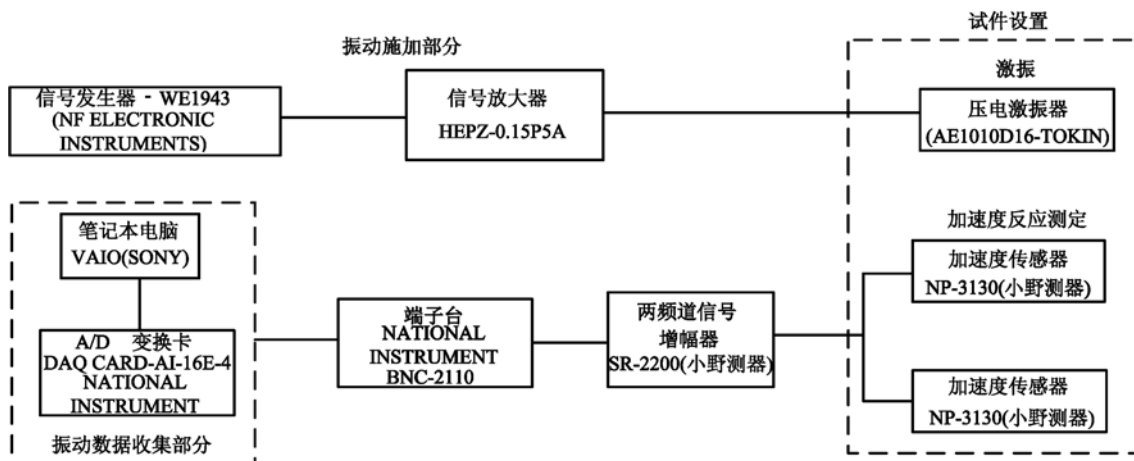


图 1 实验系统

Fig. 1 Experiment system

实验用钢桥建于 1909 年,长 3.55m,由两根 I 型钢主梁和 4 根槽钢横梁铆接而成。

振动施加部分由信号发生器、放大器、压电激振器组成。通过信号发生器设置激振波形、时间、频率等激振波参数,经过信号放大器放大激振信号,驱动压电激振器,从而实现对钢桥激振。本实验采用两台激振器,激振位置为两 I 形主梁腹板中心,利用其自身磁固定器吸附在主梁上。利用激振器上的调节螺旋可以改变其内弹簧弹力,从而设置激振器的激振力,如图 2 所示;利用火焰切割人工模仿损伤,如图 3 所示。

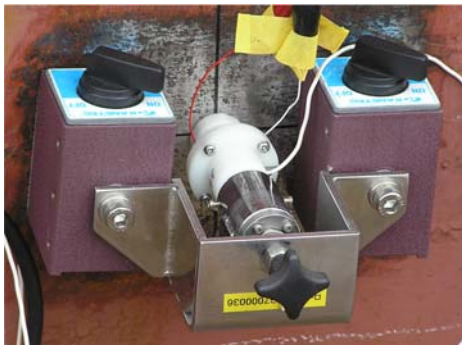


图 2 压电激振器

Fig. 2 Piezoelectric actuator



图 3 损伤预置

Fig. 3 Damage preset

钢桥加速度反应数据采集部分由压电加速度传感器、双频道信号增幅器、端子台、A/D 变换卡、笔记本电脑及其所带加速度反应数据采集软件 LabView 组成。实验中共设置 14 个加速度传感器(ch1~ch14)。激振器、加速度传感器的分布及预置损伤工况如图 4 所示。ch1、ch2、ch3、ch4、ch5 布置在另一侧主梁分别与 ch6、ch7、ch8、ch9、ch10 对应位置。损伤 D1~D3 的位置在第二根横梁下部，D4~D6 发生于主梁端部 30cm 处下翼缘，损伤程度如图 5 所示。

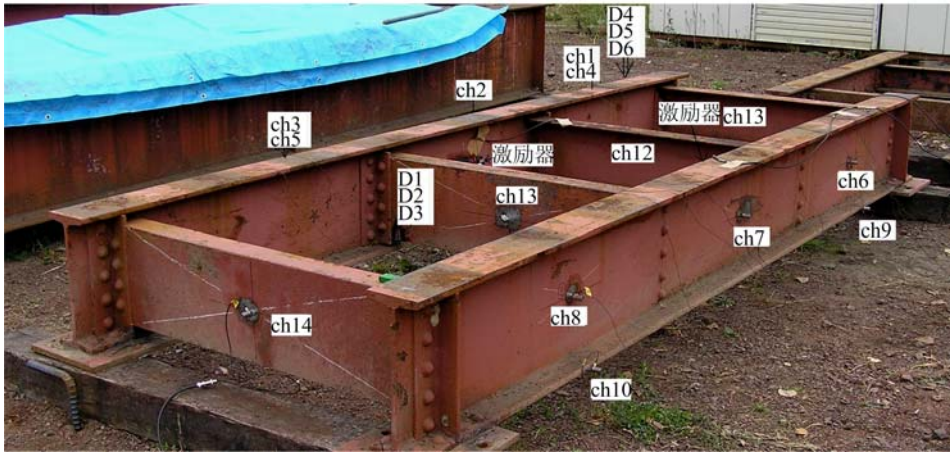


图 4 仪器布置及损伤工况

Fig. 4 Instruments positions and damage cases

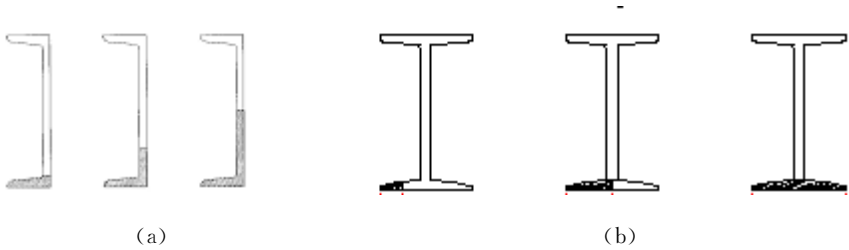


图 5 损伤工况 a) 横梁—损伤工况 1~工况 3, b) 主梁—损伤工况 4~工况 6

Fig. 5 Damage cases a) cases of damage introduced to cross beam, b) cases of damage introduced to main girder

### 3 实验方法

由于试件原址偏僻,开展振动实验比较困难,所以将试件运到郊区实验场后,简支于两根枕木上进行实验,如图 4 所示。依据损伤的位置与程度不同,共 7 种工况:健全状态 case0、损伤状态 case1~

case6,如图 4、图 5 所示。在每种工况下分别进行 5 次激振实验,加速度反应数据分别记为:D0\_1、D0\_2...D0\_5...D3\_1...D5\_1...D5\_5。

利用信号发生器设置激振波形为正弦扫频 sweep 波,激振时间 18s,激振频率 1Hz~700Hz。调整信号放大器电压至 100V,为保证实验人员安全及实验数据的准确,信号放大器接地。设置加速度反应数据采集软件 Labview 参数:数据采集频率 1600Hz、采集时间 20s,设置各加速度传感器校正系数。在采集加速度反应数据时,数据采集开始时间应稍早于激振开始时间,以保证采集数据的完整性。整个实验持续 6 天,为避免仪器拆装对激振力与加速度反应数据的影响,实验过程中不拆除激振器与传感器,直至实验全部结束。

## 4 实验结果

以 case3 为例分析实验数据。损伤前后加速度传感器 ch13 的加速度反应波形如图 6 所示。

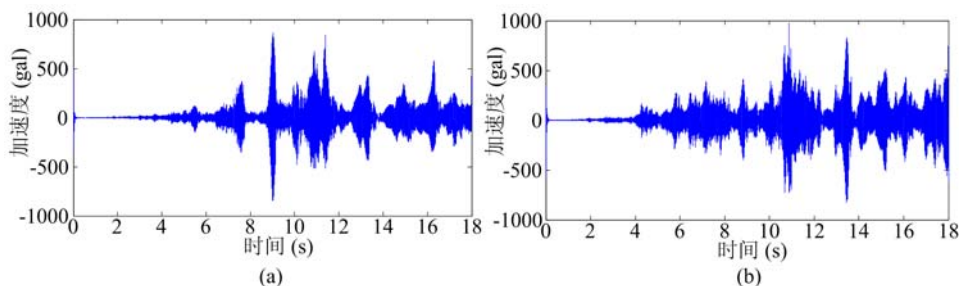


图 6 损伤前后传感器 13 加速度反应波形 a) 工况 0 b) 工况 3

Fig. 6 Acceleration response spectrum shapes of channel 13 before and after damage a) case0 b) case3

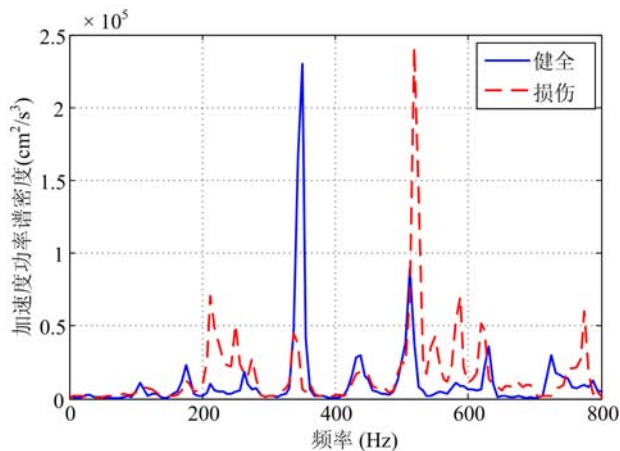


图 7 损伤前后 ch13 加速度反应功率谱密度曲线

Fig. 7 PSD curves of acceleration response from channel 13 before and after damage

损伤前后各加速度传感器的功率谱密度变化值如图 8 所示。损伤位置预测指标如图 9 所示。

图 8 显示,损伤产生后各传感器 PSD 变化值发生了较大变化,由此可知损伤的发生。相同工况下各次实验之间的 PSD 变化值的微小变化是由噪音等的环境变化引起的。损伤指标柱状图 9 显示,损伤发生在传感器 ch13 附近。

经过分析,对于其它工况,同样较好地检测到了损伤的产生,并正确判定了损伤发生的位置。

## 5 结论

通过实验,探索了利用加速度反应功率谱密度变化进行钢桥损伤识别与定位的途径。这一方法较超声波及射线方法的优点在于,不但能够检测到结构表面的损伤,而且能够检测到大型结构的内部损

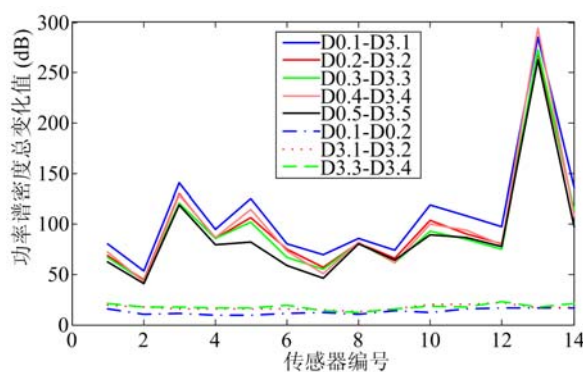


图8 各传感器加速度反应 PSD 总变化值

Fig. 8 Total change of PSD from different sensors

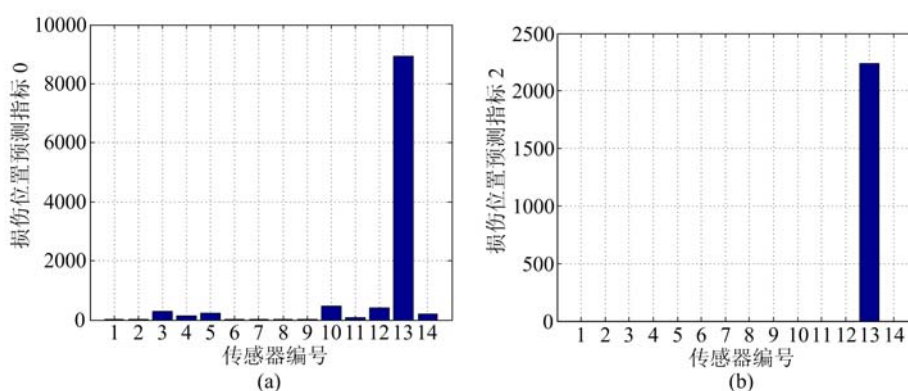


图9 损伤指标 a)损伤指标0 b)损伤指标2

Fig. 9 Damage indicator a) damage\_indicator\_0 b) damage\_indicator\_2

伤,并便于实现结构健康状况的实时在线监测,节约很多的人力物力。今后,就基于这一方法的桥梁实时监测系统的开发;如何利用人工方法更精确的模拟钢结构微裂缝、微孔洞与微缺陷等损伤;加速度传感器设置数量及位置优化;对其他结构如混凝土结构的监测;利用环境振动如地震波、车辆、风等引起的结构振动,监测结构健康状态;对这一技术的实用化开发等方面都需要做进一步的努力和研究。

#### 参考文献:

- [1] 山崎智之,大岛俊之,三上修一等. 局部振動による鋼材接合部の損傷に関する研究[C]. 日本:応用力学論文集, 2002,5(8) (Yamazaki T, Oshima T, et al. Study on damage detection on steel connections based on local vibration [C]. Japan: Proceedings of Applied Mechanics, 2002, 5(8))
- [2] Beskhyroun S, Oshima T. A numerical analysis of structural damage detection using changes in the curvature of power spectral density[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 51A(3).
- [3] Kim J T, Stubbs N. Crack detection in beam-type structures using frequency data[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 259(1):145-160.
- [4] Beskhyroun S, Oshima T, et al. Damage detection and localization on structural connections using vibration-based damage identification methods[J]. Journal of Applied Mechanics, 2003, 6(8):1055-1064.
- [5] Oshima T, et al. Study on damage evaluation of joint in steel member by using local vibration excitation[J]. Journal of Applied Mechanics, 2002, 5: 837-846.

## Damage Detection of Steel Bridge Based on Acceleration Power Spectral Density

LI Yue-bing<sup>1</sup>, XING Shuang<sup>1</sup>, Oshima T<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. School of Civil Engineering, Kitami Institute of Technology, Kitami 090-8507, Japan)

**Abstract:** Non-destructive testing of structure with the change of vibration characteristics attracted much attention in recent years. The basic idea of this method is that the vibration characteristics can reflect the state of the structure, and damages can cause changes of bridge vibration parameters. In order to study the method detecting steel bridge damages based on the power spectral density (PSD) of acceleration response, a disused railroad bridge in Japan was adopted as specimen, and six cases of damage were introduced to it in advance. The bridge was actuated by sinusoid sweeping frequency wave, and then the power spectral density differences between the undamaged and damaged bridge were analyzed. Experimental results show that the steel bridge damages can be detected and located by the changes of acceleration PSD.

**Keywords:** acceleration power spectral density; damage; detection