



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.05.022

罗德河, 郑东健, 胡德华, 等. 基于传递率函数与信息熵的混凝土坝裂缝损伤识别指标[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 141-145, 155. LU O De he, ZHENG Dong-jian, HU De hua, et al. Crack damage identification index of concrete dam based on transmissibility function and information entropy[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 141-145, 155. (in Chinese)

基于传递率函数与信息熵的混凝土坝裂缝损伤识别指标

罗德河^{1,2,3}, 郑东健^{1,2,3}, 胡德华^{1,2,3}, 谢荣晖^{1,2,3}, 甘声玄^{1,2,3}

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 3. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098)

摘要: 混凝土坝运行过程中受到的振动激励信息一般难以精确获取, 基于传递率函数理论, 对混凝土坝施加一定的振动激励, 通过测得的动力响应信息计算传递率函数, 同时利用信息熵及互信息可以表征变量的信息特征及相关性, 提出了识别和定位结构损伤的指标。这种方法不需要获得外界的激励信息, 直接利用结构的响应信息提取损伤特征。混凝土重力坝的仿真和试验结果表明, 在损伤程度高于3%的情况下, 施加的振动激励能较好地实现损伤识别和定位, 并适用于单一损伤和多损伤; 根据结构特性合理优化布置测点可以实现局部损伤识别, 对混凝土坝的损伤检测有较好的实际应用价值。

关键词: 混凝土坝; 动力响应; 损伤识别; 传递率函数; 信息熵

中图分类号: TV 698.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)05-0141-05

Crack damage identification index of concrete dam based on transmissibility function and information entropy

LU O De he^{1,2,3}, ZHENG Dong-jian^{1,2,3}, HU De hua^{1,2,3}, XIE Rong hui^{1,2,3}, GAN Sheng xuan^{1,2,3}

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The concrete dam's vibration information during operation is hard to be measured accurately. Based on the transmissibility function theory, we applied vibration excitation to the concrete dam, and established the transmissibility function with the dynamic response information. In addition, since the information characteristics and the correlation of the variables can be represented by the information entropy and mutual information, we therefore proposed a new index to identify and locate structural damages. This method extracts damage characteristics directly from response information without obtaining the external vibration excitation information. The simulation and experimental results of the concrete gravity dam showed that when the damage degree was greater than 3%, the index could well realize damage identification and location, and it was suitable for both single damage and multiple damages. With reasonable arrangement of the measuring points according to the structural characteristics, the index can realize local damage identification, and has great practical application value in the damage detection of the concrete dam.

Key words: concrete dam; dynamic response; damage identification; transmissibility function; information entropy

收稿日期: 2016-02-16 修回日期: 2016-08-22 网络出版时间: 2017-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1918.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51579085; 51279052); 江苏省“六大人才高峰”项目(JY-008, JY003); 国家自然科学基金重点项目(51139001; 41323001); 中央高校基本科研业务费项目(2015B20714)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51579085; 51279052); Jiangsu's "Six Talents Summit" Project (JY-008, JY003); Key Projects of National Natural Science Foundation of China (51139001; 41323001); The Basic Scientific Research Project of Central University (2015B20714)

作者简介: 罗德河(1991-), 男, 福建龙岩人, 主要从事大坝安全监测方面研究。E-mail: luodhehu@163.com

通讯作者: 郑东健(1965-), 男, 教授, 博导, 主要从事大坝安全监测方面研究。E-mail: zhengdj@hhu.edu.cn

大坝等水工混凝土结构作为流域上兴利除害的重要建筑物,其健康状况的实时获取与评估,对大坝的安全运行起到至关重要的作用。我国已建的大坝数量众多,截止 2005 年底^[1],在建和已建 30 m 以上的大坝共 4 860 座,混凝土坝数量占了 26.2%。经过长期运行后可能产生局部损伤,如果不能及时发现这些损伤,将会影响大坝的整体运行性能。据统计^[2,3],截止 2013 年,我国已建水库 97 246 座,其中病险水库大坝有 4.7 万余座,这些存在安全隐患的大坝,对发挥正常效益产生影响。因此,定期或实时获取混凝土坝的健康状况对大坝正常运行至关重要。近年来,国内外专家学者基于振动理论对结构损伤和定位进行了大量的研究^[4-7],并在各个领域得到了广泛的应用。FENG^[8]等对比和讨论了传递率函数与互相关分析方法,并对地铁隧洞的损伤进行识别;Chesne^[9]等研究了传递率函数在非离散体系中损伤识别的应用,并扩展到离散体系中;Zhu^[10]等利用多自由度的弹簧-质量-阻尼模型进行传递率函数的损伤敏感性分析;顾建祖^[11]等将经验模态分解与传递率函数结合用于检测玻璃幕墙损伤并取得一定效果;杨斌^[12]等对振动响应信息进行小波分解,对求解得到的多尺度振动传递率函数计算灰度矩向量,从而提取出损伤指标。基于结构动力响应信号进行损伤识别的方法,广泛应用于各领域,但是在土木水利工程中的应用还处在模态参数识别和损伤诊断的初步阶段^[13-15]。由于水工建筑物结构较复杂,对于这类大体积的混凝土结构而言,不容易施加激励,目前水工振动无损检测还没有形成一种适用性广的检测方法^[16]。在前人研究的基础上,将传递率函数理论应用到复杂的大体积混凝土结构中进行动力损伤诊断。对混凝土坝施加一定的振动激励,利用传递率函数,实现了利用动力响应信息研究混凝土坝等大体积结构的损伤识别。

1 基本理论

1.1 传递率函数

动力学中具有 n 个自由度的结构运动基本方程可以表示为

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (1)$$

式中: M , C , K 分别为质量矩阵, 阻尼矩阵及刚度矩阵; $x(t)$, $\dot{x}(t)$ 和 $\ddot{x}(t)$ 分别为 n 维位移、速度和加速度列向量; $f(t)$ 为 n 维外部激励列向量。

对式(1)进行傅里叶变换,进而可得到加速度列阵为

$$A(\omega) = -\omega^2 H(\omega) F(\omega) \quad (2)$$

式中: $H(\omega)$ 为结构系统的频响函数矩阵; $F(\omega)$ 为激励矩阵; ω 为频率。

在结构外部某一位置施加一定的振动激励,并且假设激励从 g 向 l 传递,分别测得各测点的加速度响应序列,传递率函数定义为

$$T_{gl}(\omega) = \frac{A_g(\omega)}{A_l(\omega)} = \frac{-\omega^2 H_g(\omega) F(\omega)}{-\omega^2 H_l(\omega) F(\omega)} = \frac{H_g(\omega)}{H_l(\omega)} \quad (3)$$

1.2 信息熵与互信息

信息熵作为一个随机事件的不确定性或无序度的度量,信息熵越大表示变量的离散程度越高^[17]。考虑一个具有 n 种结果的随机试验 X , 第 i 种结果出现的概率为 p_i , 且 $p_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ 。对于离散型随机变量 X , 可定义信息熵为^[18]

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (4)$$

式中: 如果 $c = 2$, 则熵 $H(X)$ 的单位为比特 (bit)。信息熵满足以下三个特征: (1) $H(X)$ 是 p_i 的连续函数; (2) $H(X)$ 满足可加性: 不同的信息来源可以叠加; (3) $H(\frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n})$ 是 n 的单调递增函数;

互信息表示两个或多个变量之间相互包含的信息量, 变量之间的信息。相关性越大, 则互信息越大。具有 n 种结果的随机试验 X 与具有 m 种结果的随机试验 Y , 设离散随机变量 (X, Y) 的联合概率分布为 p_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$), 边界概率密度分别为 p_i 和 p_j , 则 X 和 Y 的互信息 $I(X, Y)$ 定义为

$$I(X, Y) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} \log_2 \frac{p_{ij}}{p_i \cdot p_j} \quad (5)$$

1.3 损伤指标

对坝体施加一定强度的振动激励, 假设激励由 g 向 l 传播, 分别测得各测点的加速度响应序列, 则可计算相邻两测点的传递率函数 T_{gl} 。若两测点间发生局部损伤, 则对振动波的传递产生一定的衰减作用, 因而相对于健康状态的结构, 传递率函数会发生变化。根据式(3), 健康状态与损伤状态下的传递率函数分别为

$$T_{gl}^h(\omega) = \frac{H_g^h(\omega)}{H_l^h(\omega)}, T_{gl}^d = \frac{H_g^d(\omega)}{H_l^d(\omega)} \quad (6)$$

可以将计算所得健康和损伤状态的传递率函数 $X_1 = [T_{12}^h(\omega)]'$, $X_2 = [T_{23}^h(\omega)]'$, \dots , $X_g = [T_{gl}^h(\omega)]'$; $Y_1 = [T_{12}^d(\omega)]'$; $Y_2 = [T_{23}^d(\omega)]'$, $Y_g = [T_{gl}^d(\omega)]'$ 视为离散随机变量。定义 X_k 和 Y_k 边界概率密度分别为 p_{ki}^h 与 p_{kj}^d , 其中相邻两个测点为一个测点对, X_k 表示第 k 个测点对的传递率函数。分别计算两

个传递率函数的信息熵,表示为

$$H(X_k) = - \sum_{i=1}^n p_{ki}^h \log_c p_{ki}^h,$$

$$H(Y_k) = - \sum_{j=1}^n p_{kj}^d \log_c p_{kj}^d \quad (7)$$

并计算 X_k 和 Y_k 的互信息

$$I(X_k, Y_k) = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{kij} \log \frac{p_{kij}}{p_{ki} \cdot p_{kj}}$$

当结构发生损伤时,传递率函数会发生变化,相应的信息熵与互信息值会发生变化,因此可定义损伤指标为

$$D = \frac{|H(X_k) - H(Y_k)|}{I(X_k, Y_k)} \quad (8)$$

本文建立混凝土重力坝有限元模型,模拟坝身裂缝损伤,对坝体施加振动激励,测得不同测点的加速度响应信息,并定位出损伤位置,验证了该损伤指标的可靠性。

2 数值模拟

2.1 模型简介

采用有限元分析软件建立混凝土重力坝二维有限元模型,坝高 80 m,坝底宽 60 m,上下游和基岩深各取 2 倍坝高。在输入振动激励时,应处理地基无限域问题,为了保证计算精度和稳定性,采用粘弹性人工边界进行分析^[19-20]。上游面等间距布置 10 个加速度传感器,坝体传感器布置及裂缝位置见图 1,模拟混凝土坝体损伤开裂时采用黏性界面单元(Cohesive Interface Element)^[21]。坝体及坝基的材料参数见表 1。

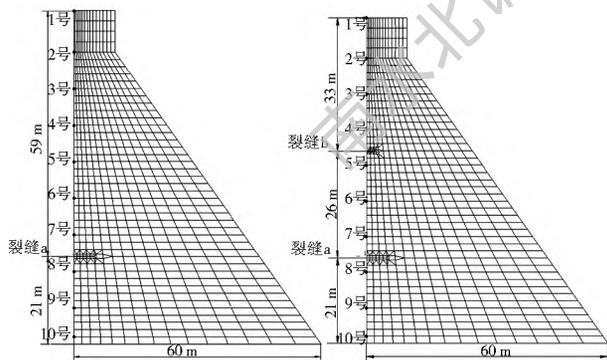


图 1 裂缝位置与测点布置

Fig. 1 Position of cracks and arrangement of measuring points

表 1 坝体与坝基材料参数

Tab. 1 Materials parameters of the dam and dam foundation

材料参数	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
坝体	2 400	31	0.167
坝基	2 500	20	0.25

混凝土坝在运行过程中,上游侧受水压力作用容易产生裂缝,因而在上游面布置测点。对混凝土坝施

加水平加速度振动波,加速度随时间变化过程图见图 2。由于实际中激励并不一定是平稳的,因此采用随机的振动激励,从而验证实际应用的可行性。

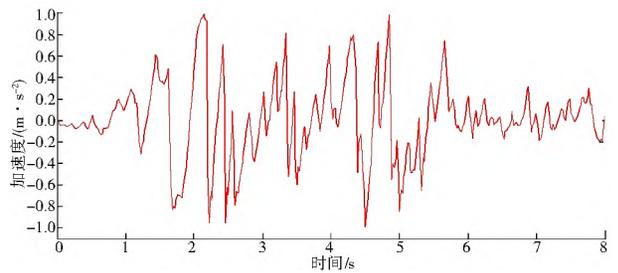


图 2 外部振动激励

Fig. 2 External vibration excitation

2.2 损伤情况设置与损伤识别

为了模拟裂缝出现的一般情况,设置了一条裂缝与两条裂缝的情况;同时对同一位置缝的不同深度进行研究,即对裂缝深度占该处坝宽的百分比(以下称损伤程度)进行敏感性分析,分析损伤指标对裂缝深度的敏感性,损伤情况设置见表 2。

表 2 模拟损伤情况及指标

Tab. 2 Simulated damage condition and index

损伤情况	损伤位置	损伤程度	损伤指标 D
N	a	12%	图 3
0	a	8%	图 3
0	a	4%	图 3
0	a	3%	图 5
0	a, b	a 处 10%, b 处 20%	图 4
0	a, b	a 处 10%, b 处 12%	图 4
×	a, b	a 处 6%, b 处 12%	图 4
0	a, b	a 处 3%, b 处 3%	图 5

将有限单元法计算所得的加速度响应添加一定的高斯白噪声(SNR= 40 db)以模拟实际环境噪声干扰下的观测数据。不同的损伤情况识别结果见图 3、图 4、图 5。图 3 可以看出,对于一条裂缝情况,当损伤程度高于 3% 时,损伤指标都能很好地定位出不同损伤情况下测点 7-8 之间存在损伤,其他未损伤测点对有一定的值,但都在较小的范围内,不影响总体的识别。同时损伤程度越大,相应的指标值也有所增大,说明该指标在一定程度上能判断损伤的程度。当结构存在多条裂缝且损伤程度高于 3% 时,如图 4 所示,不同损伤情况下的两组测点对 4-5,测点对 7-8 损伤指标较高,说明该处存在损伤。同时可以看出相同损伤程度情况下,测点 7-8 之间的损伤指标要高于测点 4-5 之间的损伤指标,这说明损伤敏感性由坝底向坝顶递减。从图 4 可以看出,当损伤程度小于 3% 时,不同损伤情况下的识别

精度较低, 说明对于微小损伤敏感性较低。

在实际应用中, 利用上述结论, 可以对测点布置进行优化从而可以更精确地判断损伤的位置与程度。如可以采用梅花形布置方式, 通过计算各相邻测点的损伤指标确定是否存在损伤, 这种方法可以检测出局部的损伤, 因而有一定的实际应用价值。

DY-600-5 型振动试验系统, DSPACE 数据采集系统进行试验, 采样频率为 4 000 Hz。为模拟损伤, 在靠近坝踵处设置人工缝, 考虑损伤程度为 15%、10%、5% 三种损伤情况, 分别对应损伤情况 \tilde{N} 、 $\tilde{0}$ 、 $\hat{0}$, 以及靠近坝顶与坝踵处分别设置 40% 和 15% 的损伤, 对应损伤情况 $\hat{0}$ 进行验证。

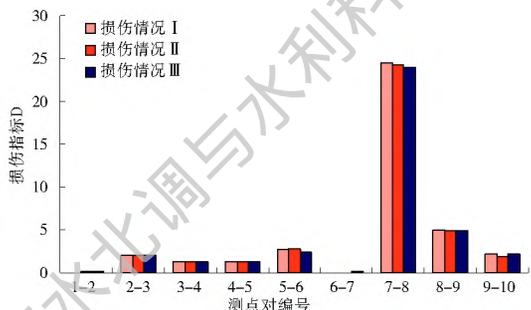


图 3 损伤情况 \tilde{N} 、 $\tilde{0}$ 、 $\hat{0}$ 下的损伤指标
Fig. 3 The value of the damage index under damage conditions of \tilde{N} , $\tilde{0}$, and $\hat{0}$



图 6 传感器布置及裂缝设置

Fig. 6 Sensors arrangement and the cracks settings

对模型施加高斯白噪声激励, 峰值为 0.5 g, 无损情况下各测点振动响应见图 7, 并对测得的各项传感器振动响应数据进行分析计算, 得到不同损伤情况下模型的损伤指标见图 8 和图 9。坝踵处各损伤情况的损伤定位结果见图 8, 可以看出, 5-6 测点对的损伤指标均较大, 表明测点对 5-6 间存在损伤, 与实际情况相一致, 随着损伤程度增加损伤指标也相应增加。两条裂缝情况损伤识别结果见图 9, 测点对 1-2 和测点对 5-6 的损伤指标均较大, 表明这两处存在损伤, 与实际情况一致, 说明损伤程度高于 3% 以上都能识别出。由于试验过程中可能受到外界干扰因素的影响, 因而未损伤处也有一定的损伤指标值, 但是整体来看对各损伤情况用本文定义的损伤指标能较好地识别和定位, 因而验证了该方法的可行性。

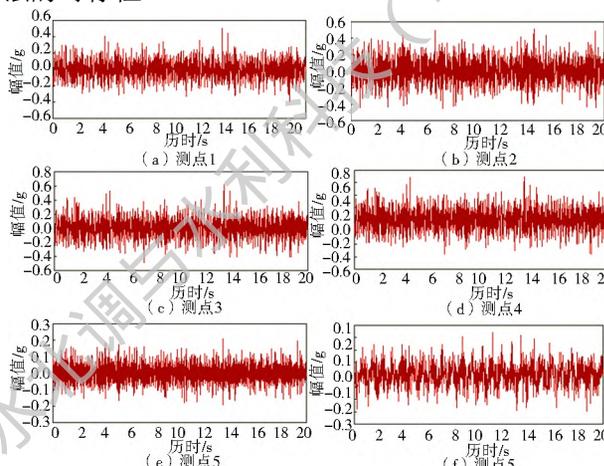


图 7 无损情况模型实测振动响应

Fig. 7 The measured vibration response of the undamaged model

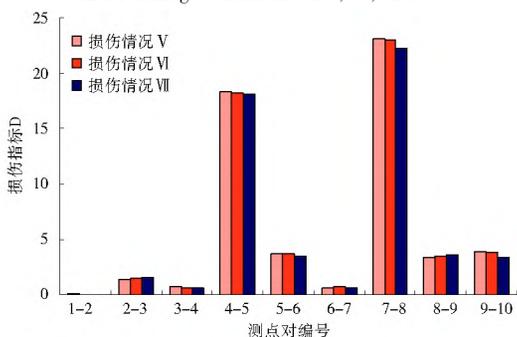


图 4 损伤情况 $\hat{0}$ 、 $\tilde{0}$ 、 \times 下的损伤指标
Fig. 4 The value of the damage index under damage conditions of $\hat{0}$, $\tilde{0}$, and \times

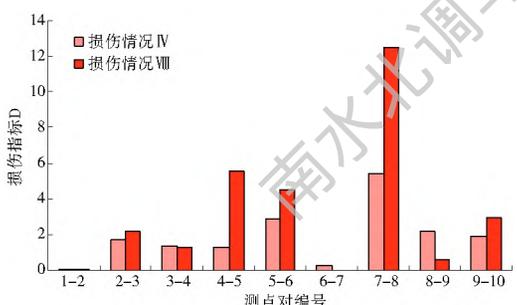


图 5 损伤情况 $\hat{0}$ 、 $\hat{0}$ 下的损伤指标
Fig. 5 The value of the damage index under damage conditions of $\hat{0}$ and $\hat{0}$

3 模型试验

为了验证本文所提出方法的可行性, 按照几何相似原则制作混凝土重力坝模型, 试验模型的材料采用混凝土砂浆, 质量密度为 2 100 kg/m³。坝体横截面底部宽 42.45 cm, 坝顶宽 4.2 cm, 高 57.6 cm, 利用振动台试验数据进行验证。坝体上游面布置 6 个单向压电式加速度传感器, 设置单一裂缝和两条裂缝损伤情况, 裂缝及传感器布置见图 6。用

在实际应用中,根据结构特点合理的布置传感器,通过采集系统可以获得坝体的响应信息,并采集不同测点的振动响应信息分别计算损伤指标并结合实际情况分析,从而可以及时发现大坝异常。

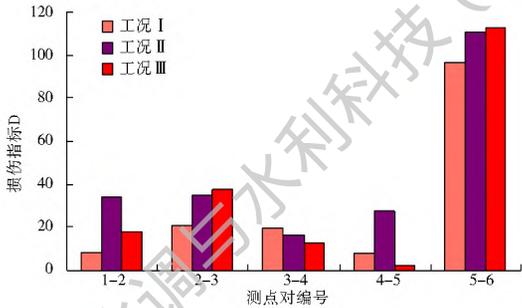


图8 试验损伤情况 \tilde{N} 、 $\hat{0}$ 、 $\hat{0}$ 下的损伤指标
Fig. 8 The value of the damage index under test conditions of \tilde{N} , $\hat{0}$, and $\hat{0}$

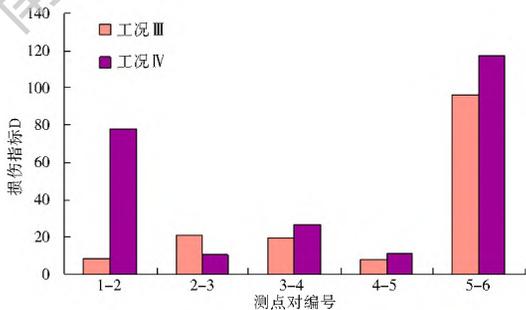


图9 试验损伤情况 $\hat{0}$ 、 $\hat{0}$ 下的损伤指标
Fig. 9 The value of the damage index under test conditions of $\hat{0}$ and $\hat{0}$

4 结语

(1) 利用传递率函数和信息熵理论提出了适用于混凝土坝损伤信息识别损伤指标,并通过数值仿真与模型试验验证了该指标的可行性。

(2) 对于损伤程度高于3%的情况,对单一裂缝和多条裂缝本文提出的损伤指标都能较好地识别,并且不同位置的损伤互不影响。

(3) 在实际应用中,还应进行传感器的优化布置、诊断系统的建立,将这种损伤检测方法应用于实际工程中,仍有许多工作需要做。

参考文献(References):

[1] 贾金生,袁玉兰,郑瑾莹,等.中国水库大坝统计和技术进展及关注的问题简论[J].水力发电,2010,36(1):6-10. (JIA Jinsheng, YUAN Yulan, ZHENG Cuiying, et al. Dam construction in China: statistics, progresses and concerned issues [J]. Water Power, 2010, 36(1): 6-10. (in Chinese))

[2] 中华人民共和国水利部.第一次全国水利普查公报[M].北京:中国水利水电出版社,2013:3-4. (The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin of first national census for water [M]. Beijing: China WaterPower Press,

2013: 3-4. (in Chinese))

[3] 杨杰,郑成成,江德军,等.病险水库理论分析研究进展[J].水科学进展.2014(01):148-154. (YANG Jie, ZHENG Chengcheng, JIANG Dejun, et al. Research advances in risk assessment and enforcement of unsafe reservoirs [J]. Advances in Water Science. 2014(01): 148-154. (in Chinese))

[4] 闫桂荣,段忠东,欧进萍.基于结构振动信息的损伤识别研究综述[J].地震工程与工程振动,2007,27:95-103. (YAN Guirong, DUAN Zhongdong, OU Jiping. Review on structural damage detection based on vibration data [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2007, 27: 95-103. (in Chinese))

[5] 王术新,姜哲.基于结构振动损伤识别技术的研究现状及进展[J].振动与冲击,2004,23(4):99-102. (WANG Shuxin, JIANG Zhe. Present developing situation and research advances in the field of structural damage detection [J]. Journal of vibration and shock, 2004, 23(4): 99-102. (in Chinese))

[6] 高维成,刘伟,邹经湘.基于结构振动参数变化的损伤探测方法综述[J].振动与冲击,2004,23(4):1-7. (GAO Weicheng, LIU Wei, ZOU Jingxiang. Damage detection methods based on changes of vibration parameters: A summary review [J]. Journal of vibration and shock, 2004, 23(4): 1-7. (in Chinese))

[7] 刘济科,汤凯.基于振动特性的损伤识别方法的研究进展[J].中山大学学报:自然科学版.2004(6):57-61. (LIU Jike, TANG Kai. Advances of vibration based damage identification methods [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunatseni. 2004(6): 57-61. (in Chinese))

[8] Feng L, Yi X, Zhu D, et al. Damage detection of metro tunnel structure through transmissibility function and cross correlation analysis using local excitation and measurement [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2015, 60: 59-74.

[9] Chesn S, Deraemaeker A. Damage localization using transmissibility functions: A critical review [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2013, 38(2): 569-584.

[10] ZHU D, Yi X, WANG Y. Sensitivity analysis of transmissibility functions for structural damage detection [C]. Proc SPIE, 2011, 7983: 79832M.

[11] 顾建祖,郝文峰,骆英,等.基于固有模态函数振动传递率的结构损伤识别[J].建筑科学与工程学报,2011,28(1):27-32. (GU Jianzu, HAO Weifeng, LUO Ying, et al. Structural damage identification based on intrinsic mode function vibration transmissibility [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(1): 27-32. (in Chinese))

[12] 杨斌,刘吉彪,程军圣.基于多尺度振动传递率函数和灰度矩相对熵的损伤识别方法[J].中国机械工程.2015(12):1639-1644. (YANG Bin, LIU Jibiao, CHENG Junsheng. Damage identification based on multi-scale transmissibility function and grey moment relative entropy [J]. China Mechanical Engineering, 2015(12): 1639-1644. (in Chinese))

[13] 李火坤,张建伟,李松辉.基于模态应变能的水工泄流结构损伤识别研究[J].人民黄河.2012,34(1):113-116,119. (LI Huokun, ZHANG Jianwei, LI Songhui. Damage detection of flood discharge structure based on modal strain energy [J]. Yellow River. 2012, 34(1): 113-116, 119. (in Chinese))

(下转第155页)

- 特性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2014(1): 33-38. (CHEN Yarr mei, MOU Xiarr you, CHENG Lar yan, et al. Impacts of the baffle shape of the ring-wing bridge pier on vertical hydraulic characteristics [J]. Hydro Science and Engineering, 2014(1): 33-38. (in Chinese)) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2014.01.007
- [19] 王祚, 牟献友, 李春江, 等. 不同流量下环翼形防冲板结构优化试验[J]. 水利水运工程学报, 2015(2): 44-49. (WANG Zuo, MOU Xiarr you, LI Churr jiang, et al. Experimental studies on structure optimization of ring-wing scour plates under different discharges [J]. Hydro Science and Engineering, 2015(2): 44-49. (in Chinese)) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2015.02.007
- [20] 李春江, 牟献友, 王祚, 等. 桥墩防冲板结构控制因素及其优化研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 109-112. (LI Churr jiang, MOU Xiarr you, WANG Zuo, et al. Study of pier scour plate structural control factors and optimization [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(6): 109-112. (in Chinese))
- [21] 胡旭跃, 祖小勇, 程永舟, 等. 圆端形桥墩侧向紊流宽度的试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2009(3): 8-13. (HU Xu yue, ZU Xiao yong, CHENG Yong zhou, et al. Experimental study of lateral turbulent flow width at round ended pier [J]. Hydro Science and Engineering, 2009(3): 8-13. (in Chinese))
- [22] 庄元, 刘祖源. 桥墩紊流宽度的试验研究[J]. 中国航海, 2007(3): 5-9, 44. (ZHU ANG yuan, LIU Zir yuan. Experimental investigation on turbulent flow width around bridge pier [J]. Navigation of China, 2007(3): 5-9, 44. (in Chinese))
- [23] 赵殿英, 田伟平, 张义青. 桥墩局部冲刷的护坦减冲防护[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, 18(4): 161-164. (ZHAO Diarr ying, TIAN Wei ping, ZHANG Yr qing. Local scour at piers and protection with apron [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1998, 18(4): 161-164. (in Chinese))
- [24] 王虹, 王连接, 邵学军, 等. 连续弯道水流紊动特性试验研究[J]. 力学学报, 2013, 45(4): 525-534. (WANG Hong, WANG Liarr jie, SHAO Xue jun, et al. Turbulence characteristics in consecutive bends [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(4): 525-534. (in Chinese)) DOI: 10.6052/0459-1879-12-345

(上接第 145 页)

- [14] 顾培英, 陈厚群, 李同春, 等. 基于损伤应变模态的结构损伤识别直接指标法[J]. 自然科学进展. 2007(02): 240-247. (GU Peiying, CHEN Hou qun, LI Tong chun, et al. Direct index method of structural damage identification based on damage strain modal [J]. Progress in Natural Science, 2007(02): 240-247. (in Chinese))
- [15] 练继建, 李松辉. 基于支持向量机和模态参数识别的导墙结构损伤诊断研究[J]. 水利学报. 2008(06): 652-658. (LIAN Jir jian, LI Song hui. Damage diagnosis of spillway guide wall based on rapport vector machine and modal parameter identification [J]. Journal of Hydraulic Engineering. 2008(06): 652-658. (in Chinese))
- [16] 王山山, 任青文. 基于振动理论的水工结构无损检测技术研究综述[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(5): 550-556. (WANG Shan shan, REN Qing wen. A review of vibration theory based nondestructive detection technique for hydraulic structures [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(5): 550-556. (in Chinese))
- [17] 鲍际刚. 信息·熵·经济学[M]. 经济科学出版社, 2013. (BAO Jir gang. Information entropy and Economics [M]. Beijing: Economic Science Press, 2013. (in Chinese))
- [18] 张继国, Vijay P. Singh. 信息熵_理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (ZHANG Jir guo, Vijay P. Singh. Information entropy_ theory and application [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012. (in Chinese))
- [19] 郝明辉, 张艳红, 陈厚群. 基于 ABAQUS 的黏弹性人工边界在重力坝分析中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报. 2012(2): 120-126. (HAO Ming hui, ZHANG Yarr hong, CHEN Hou qun. Application of viscous spring artificial boundary in dynamic response analysis of gravity dam with ABAQUS [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research. 2012(2): 120-126. (in Chinese))
- [20] 刘晶波, 杜义欣, 闫秋实. 粘弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(增): 37-42. (LIU Jing bo, DU Yr xin, YAN Qir shi. The implementation of viscous spring dynamic artificial boundary and earthquake input in general FEM software [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering. 2007, 27(S): 37-42. (in Chinese))
- [21] 徐海滨, 杜修力, 杨贞军. 基于预插黏性界面单元的 Koyna 重力坝强震破坏过程分析[J]. 振动与冲击, 2014(17): 74-79. (XU Har bin, DU Xiur li, YANG Zher jun. Seismic failure analysis of Koyna gravity dam using cohesive interface elements [J]. Journal of vibration and shock, 2014(17): 74-79. (in Chinese))