

基于随机动力响应时程统计指标的 结构损伤初步识别*

肖青松 雷家艳[†] 施伟 王子豪

(厦门大学 建筑与土木工程学院 厦门 361005)

摘要 本文以八层剪切型钢框架模型在白噪声激励作用下的随机振动实验为基础,分别从结构加速度响应的均值、方差、偏度、峰度、概率密度函数和累积分布函数等多个统计特征,对结构无损及 9 种模拟损伤工况进行识别.结果表明:结构随机振动加速度响应时程的偏度和峰度对结构损伤的表征效果不明显,而概率密度函数能初步判别损伤.方差指标在进行损伤判别的基础上,具有良好的损伤定位能力.

关键词 损伤识别, 统计特征, 随机振动, 加速度, 方差

DOI: 10.6052/1672-6553-2019-009

引言

结构损伤识别已成为土木工程领域的一个研究热点.经过近 30 年的研究,许多结构损伤识别方法的理论都较成熟^[1-5],在数值模拟和一定条件下的模型实验中识别效果良好.但由于噪声及环境的影响、结构动力测试数据的稀疏性和不完备性、建模误差、荷载变化及结构系统的时变性等因素,往往使结构的动力性态具有随机不确定性,各种结构损伤识别方法在实际工程中的应用还存在许多关键问题亟待解决.

直接基于结构时域动力响应分析的损伤识别方法,利用时域测量信号,直接构造损伤识别特征参数,不会因为频域分析的转化而丢失信息.因此,利用结构随机振动的动力实测时程数据,进行损伤识别,具有更加广泛的现实意义^[6].随机振动理论是从统计角度分析结构动力特性的典型方法,均值、方差、概率密度函数、相关函数(自相关函数及互相关函数)、功率谱密度函数等都是描述随机振动的重要统计参数^[7].相对于确定性的损伤识别技术,基于概率统计理论框架的损伤识别方法,能够更好地反映损伤问题的不确定性本质,是一种非常

有发展潜力的损伤识别方法^[8].地震工程界学者 Housner^[9] 曾经指出,基于概率的结构健康诊断不确定性方法的研究,有望成为解决大型土木工程结构健康诊断问题的一般方法.

对符合高斯正态分布规律的数据,均值和方差即可表示数据的统计特性,非正态分布的数据可采用更高阶矩,如三阶统计矩偏度和四阶统计矩峰度等来表示. Dyer^[10] 等将峰度值应用于机器故障诊断. Cacciola^[11] 等在悬臂梁的数值仿真中指出:偏度指标具有一定优势,但由于转动自由度对偏度很敏感,而目前的试验技术还无法测量结构的转动自由度,因此,研究仅停留在数值仿真阶段^[12].国内的一些学者^[13,14] 从振动信号统计特征的角度对结构损伤识别进行研究,将测点位移响应的方差、相关系数、回归系数和协方差等统计指标作为损伤因子,对损伤进行识别.已有的研究资料,鲜少利用随机振动加速度响应时程统计特征来进行结构损伤识别研究,而结构动力测试中普遍对动力加速度响应进行采集,因此,基于加速度响应统计特征的结构损伤识别方法,更加直接.本文以八层剪切型钢框架模型在随机白噪声激励下的动力实测数据为依据,分析各测点的加速度响应时程均值、方差、偏

2018-07-24 收到第 1 稿,2018-09-20 收到修改稿.

* 国家自然科学基金青年科学基金项目(51508486),福建省自然科学基金青年创新基金项目(2016J05136),厦门市交通基础设施智能管养工程技术研究中心开放基金项目(TCIMI201806)

[†] 通讯作者 E-mail: lejiaayan@xmu.edu.cn

度、峰度、概率密度函数及累积分布函数等,统计参数在无损伤及各损伤工况中的变化情况,研究各统计指标对结构损伤的表征情况,以实现结构损伤的初步识别。

1 统计特征指标的定义

根据随机振动理论,单自由度系统的随机运动方程可表示为:

$$\ddot{X} + 2\xi\omega_0\dot{X} + \omega_0^2 X = F_s(t) \quad (1)$$

式中 X 为系统随机响应, $F_s(t)$ 为系统的随机干扰, ξ 为系统的阻尼比, ω_0 为系统的固有频率, 可得出随机响应的均值为:

$$m_X(t) = \frac{m_{F_s}}{\omega_0^2} \left\{ 1 - e^{-\xi\omega_0 t} \left[\frac{\xi\omega_0}{\omega_d} \sin\omega_d t + \cos\omega_d t \right] \right\} \quad (2)$$

式中 $\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$, m_{F_s} 为系统随机干扰均值。结构加速度响应的方差可表示为:

$$\sigma_X^2 = \frac{\pi S_0}{2\xi\omega_0} (\omega_d^2 - 3\xi^2\omega_0^2) = \frac{\pi S_0}{c} \left(k - \frac{c^2}{m} \right) \quad (3)$$

从公式(3)可知结构加速度响应的方差和结构的物理参数(质量、刚度等)及模态参数(阻尼、频率等)有关。当结构的刚度发生改变,而其他参数保持不变时,加速度响应的方差可作为损伤因子对结构进行损伤识别。

除了从基本统计特征量来分析结构损伤以外,本文还对加速度响应的概率密度函数和累积分布函数进行了分析讨论。连续型随机变量的概率密度函数(简称为密度函数)描述了随机变量取得某个确定值的可能性,而随机变量的取值落在某个区域之内的概率则为概率密度函数在这个区域上的积分。当概率密度函数存在的时候,累积分布函数是概率密度函数的积分。若 X 是一个连续型随机变量,并且 $f_X(x)$ 是它的概率密度函数,它的累积分布函数是 $F_X(x)$ 可表示为:

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(t) dt \quad (4)$$

将结构某一测点的加速度响应视为随机变量 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 对于离散性时间序列,其概率 $f_X(x)$ 并非连续可积函数,但可通过 X 值对应的统计频次除以总的测试数据总量计算得到。累计分布函数也可通过数值积分方法计算。且其各项统计特征指标可表达如下:

$$\text{均值} \quad \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5)$$

$$\text{方差} \quad \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (6)$$

$$\text{偏度} \quad S = \frac{m_3}{m_2^{3/2}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{3/2}} \quad (7)$$

$$\text{峰度} \quad K = \frac{m_4}{m_2^2} - 3 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^2} - 3 \quad (8)$$

其中 n 表示样本中的数据个数, \bar{x} 表示样本平均值, m_2 表示二阶样本中心矩,即样本方差, m_3 表示三阶样本中心矩, m_4 表示四阶样本中心矩。均值、方差、偏度和峰度等 4 个统计特征量可以分别对应加速度时程数据的 1 至 4 阶统计矩^[15]。

2 试验简介

如图 1 和图 2 所示,实验模型为一剪切型八层钢框架结构,每层框架平面边长为 350mm × 250mm,层高为 200mm。框架底部用螺栓锚固在地上,节点连接采用双排螺栓,可近似地认为框架连接为固结。激振点位于第三层框架处,振源是利用 RIGOL 公司生产的 DG-1022 信号发生器产生的白噪声激励。拾振设备采用 PCB 传感器,加速度传感器布设于框架每一层模拟楼板位置处。试验中对加速度响应的采样频率设为 128Hz,施加激励的时长为 32s,每种损伤工况下均施加了 10 种不同幅值的白噪声激励,因此每一种损伤工况下各楼板位置处的 8 各测点分别会采集到 10 条加速度时程,每条时程曲线的采样点数为 4096 个,整个试验共采集了 800 条加速度响应时程。各个统计量(均值、方差、偏度、峰度)均在此数据基础上计算得到。

模型结构采用的钢材弹性模量 $E = 2.0 \times 10^{11}$ pa, 密度 $\rho = 7.8 \times 10^3$ kg/m³。模型损伤通过改变柱钢片的刚度来实现,无损伤状态下,每层柱构件均采用规格为 200×30×3mm 的钢片,结构发生损伤时,用规格为 200×30×2.5mm 的钢片替换原来的柱构件。损伤程度由更换的柱钢片数量确定,通过减少柱钢片的侧向刚度模拟框架层间刚度的损失。



图 1 实验模型及加载设备

Fig 1 Experimental model and loading equipment

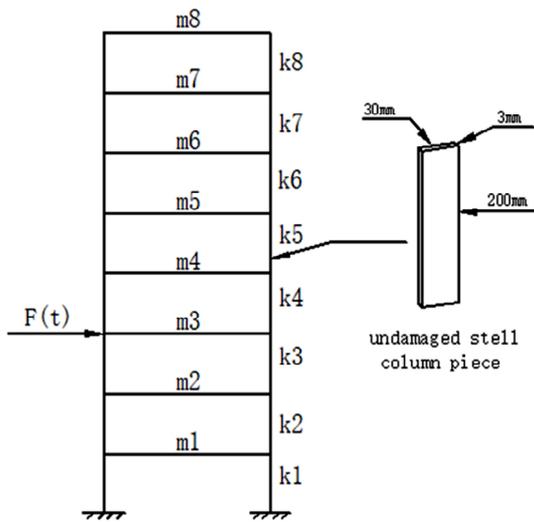


图 2 简化模型

Fig 2 simplified model

表 1 不同工况下各楼层的损伤程度

Table 1 Damage degree of each floor under different working conditions

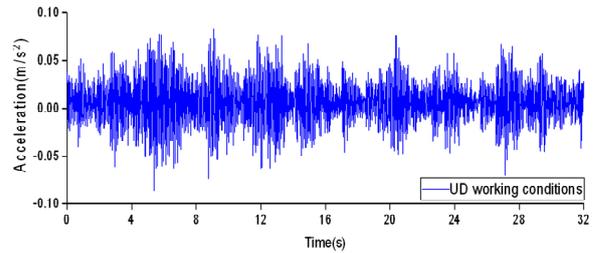
Damaged conditions	F1	F3	F4	F5	F6	F7	F8
UD							
D1		25					
D2		50					
D3				25			
D4				50			
D5						25	
D6						50	
D7		25		25			
D8		25				25	
D9				25		25	

Note: F—floor ,D—damage

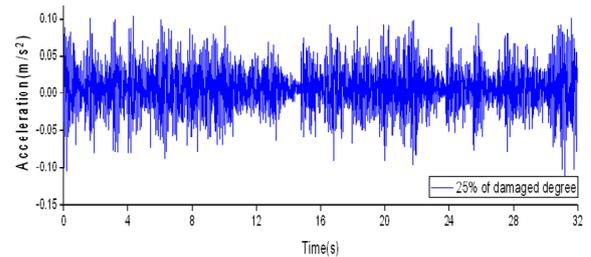
3 损伤识别情况分析

3.1 均值、方差、峰度及偏度的表现

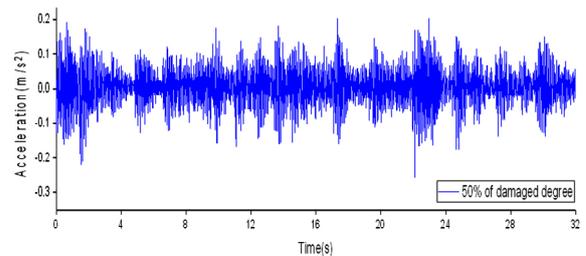
图 3 为同一激励作用下 UD、D1、D2 工况下第 3 层横梁位置处的加速度响应时程.由图可见,从无损到结构第三层侧向刚度损失 25% ,再到刚度损失 50% ,随着损伤程度增大,结构侧向刚度变得越小,结构的加速度响应幅值越大.



(a) 无损
(b) No damage



(b) 25%的损伤度
(b) 25% of damaged degree



(c) 50%的损伤度
(c) 50% of damaged degree

图 3 第 3 层位置处的加速度时程曲线

Fig.3 The acceleration time-history curves at the third layer

3.1.1 无损工况

图 4 为无损工况时,框架模型在 N1-N10 时不同随机激励下各楼板处加速度响应的均值、方差、偏度及峰度统计情况.(a) 图中不同激励对加速度响应的均值影响不大,各楼层响应均值很接近,变化趋势也基本一致.由于施加在结构上是理想白噪声激励,所以结构的加速度响应在理论上应是零均值.由于测试噪声等因素的影响,个别测点处的加速度均值有极小的浮动.

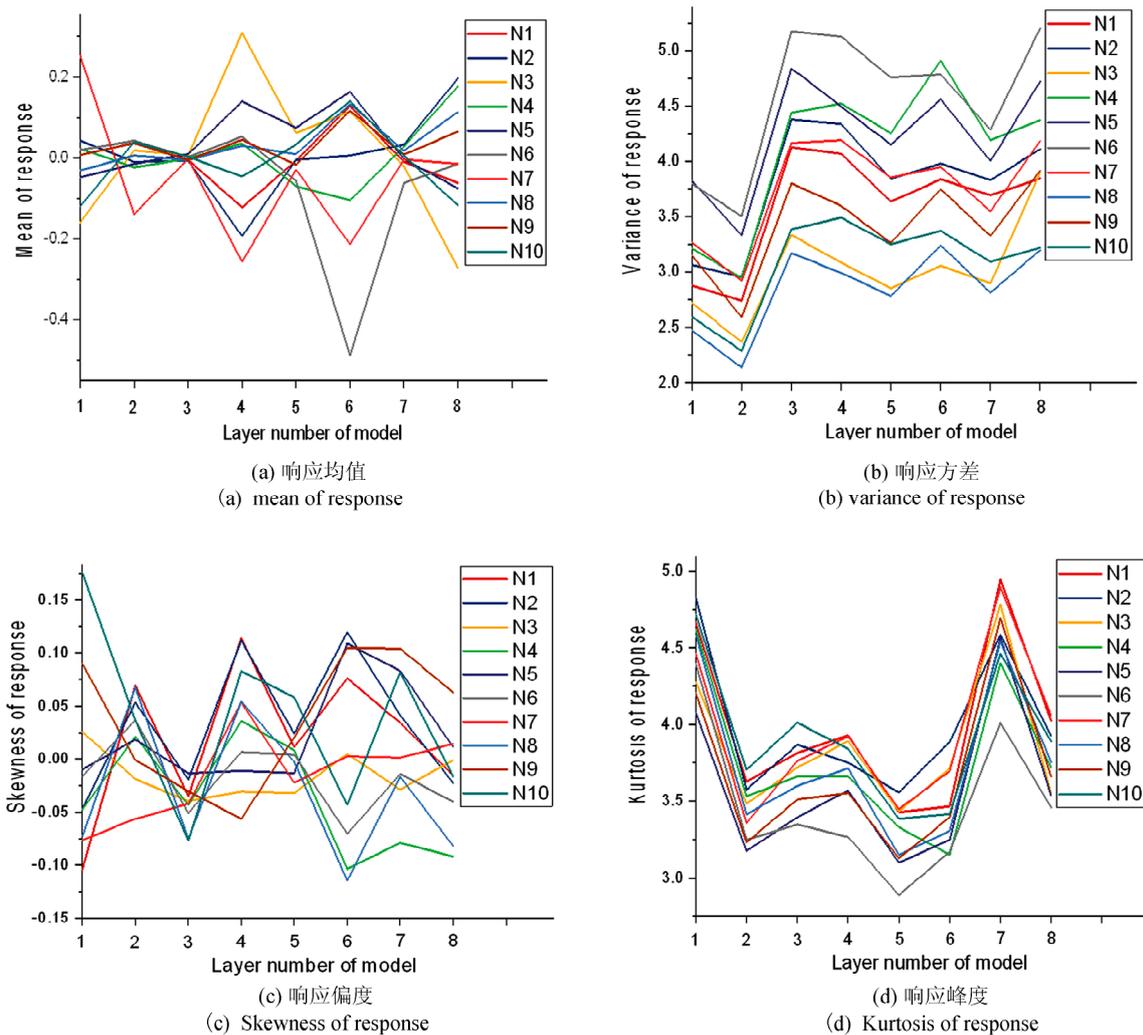


图4 无损工况在多种激励下的统计指标

Fig.4 Statistical indicators of nondestructive conditions under various excitation

不同激励作用下,结构加速度响应的方差曲线形状较为稳定,各楼层大致变化趋势保持一致.从图4(c)可以看出:各楼层响应的偏度值变化并不具备规律性,但是偏度值的绝对值均在0.2以内.根据偏度值的定义可知加速度的分布基本满足左右对称的规律.图4(d)中各楼层加速度响应的峰度值大致趋势基本保持一致,这证明该指标有规律可循,但在不同激励下各楼层相应的峰度值不相同.

3.1.2 单损伤工况

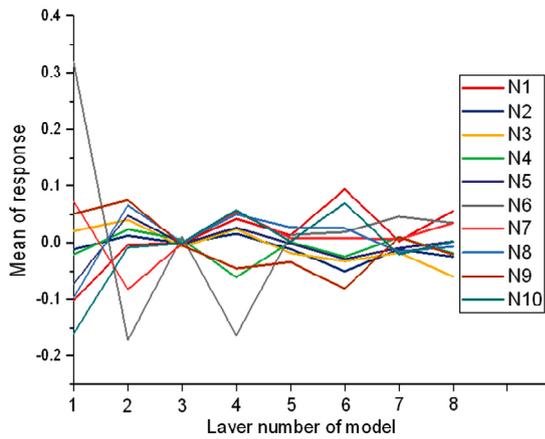
以D4工况为例,通过更换第五层的四根柱钢片,该层的侧向刚度降低50%.

如图5(a),损伤前后各楼层加速度响应均值基本上保持在零左右.而图5(b)中在不同激励作用下的结构各测点加速度响应方差,在第4层和第5层之间发生了急剧变化,而此时结构损伤恰好发

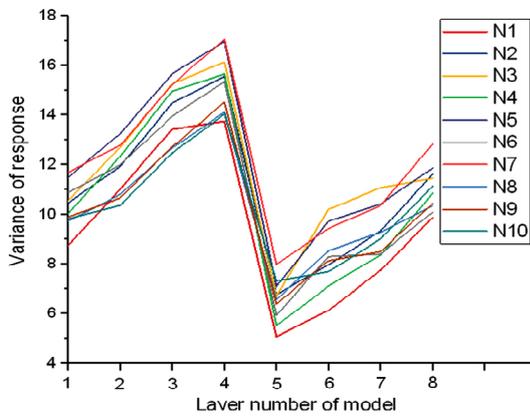
生,在第5层位置,可见方差指标有良好的损伤定位表现.然而,损伤前后偏度值的变化依然极为不规律,峰度值的变化也并不具备明显规律.通过其他工况下的数据分析也同样表明,偏度和峰度的统计特征无明显规律,在此不再赘述.

图6为D6损伤工况下(即第7层柱刚度损失50%)10种不同激励作用下每层楼板位置处加速度响应的方差分析结果.与D4工况类似,结构加速度响应方差在第7层位置处发生很大改变,再次说明方差的损伤表征能力.

在其他单损伤工况的分析中发现,结构加速度响应的方差对于损伤程度敏感,不同的损伤程度下方差值发生较为明显的变化.但值得指出的是,方差值的变化情况并不符合某种单调的规律,方差指标不能用来对损伤进行程度量化.



(a) 响应均值
(a) mean of response



(b) 响应方差
(b) variance of response

图 5 D4 工况加速度响应的均值和方差

Fig.5 Mean and variance of acceleration response under the D4 working condition

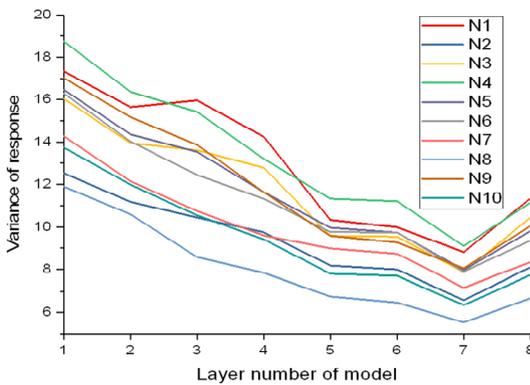


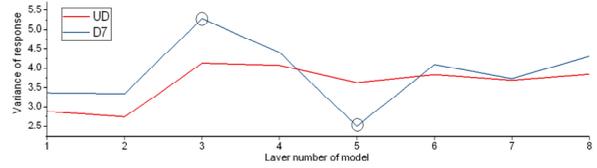
图 6 D6 工况下加速度响应的方差

Fig.6 variance of acceleration response under the D6 working condition

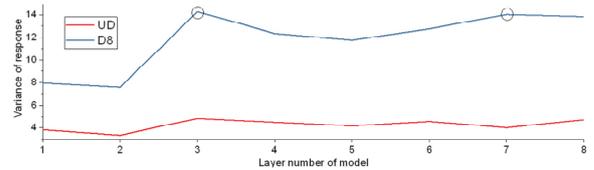
3.1.3 多损伤工况

在单损伤工况中,方差指标表现了较好的损伤判别以及损伤定位的功能.针对 D7、D8 和 D9 三种多损伤工况,分别计算在其中一种激励下无损和多

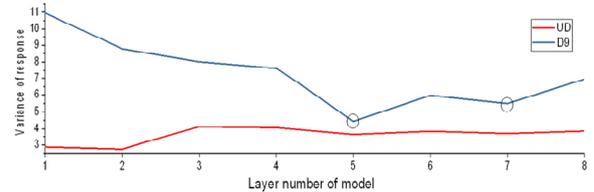
损工况下结构各楼层加速度响应的方差值,结果如图 7 所示.



(a) UD与D7工况
(a) UD and D7 working condition



(b)UD与D8工况
(b) UD and D8 working condition



(c) UD与D9工况
(c) UD and D9 working condition

图 7 无损及多损伤工况下各楼层加速度响应方差

Fig.7 Variance of structural acceleration response under undamage and multiple damage conditions

方差指标在 D7 工况中的第 3 层和第 5 层损伤位置处变化明显;也在 D8 工况中的第 3 层和第 7 层损伤位置处变化明显;还在 D9 工况的第 5 层和第 7 层位置处变化明显.由此可见,加速度响应的方差指标在结构多损伤工况下识别效果也较为理想.

3.2 基于概率密度函数的损伤识别

概率密度函数的计算,直接通过对样本做核密度估计得到.图 8 是框架结构第 3 层横梁位置处在无损及单损伤工况下(即 UD、D1 和 D2 工况)的加速度响应概率密度和累积分布函数分析结果.由图可见,随着结构损伤程度的增加,概率密度函数和累积分布函数都出现了很明显的变化,并具有一定的规律.概率密度函数随着结构损伤的增加,曲线变得越来越平缓,峰度值明显下降;累积分布函数曲线也具有相同的变化趋势.为进一步了解单损工况下其它楼层位置处加速度相应的概率密度函数及累积分布函数的变化规律,分别于图 9 中列出了第五层、第七层在无损及不同损伤程度下的分析结果,得出与图 8 同样的结果:随着损伤程度的增大,各测点的加速度概率密度曲线峰值降低,曲线变得越来越平缓.

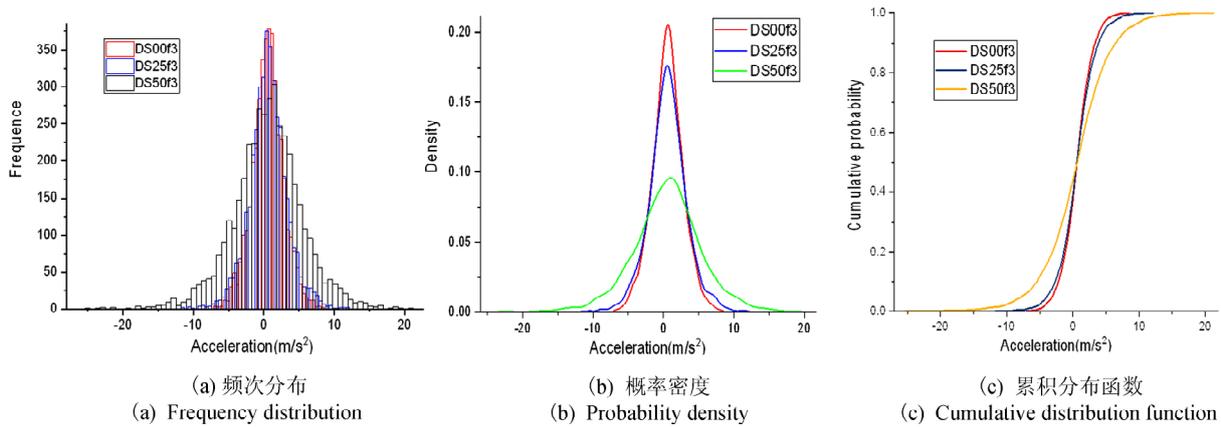


图8 UD、D1-D2 工况下第3层加速度响应统计分布

Fig.8 Statistical distribution of the 3rd layer acceleration response under UD and D1-D2 working conditions

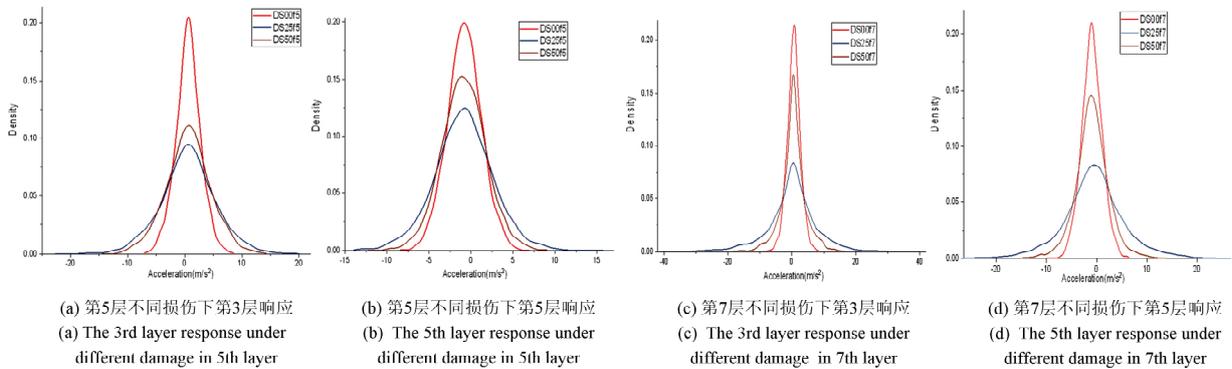


图9 各种工况下概率密度函数拟合曲线

Fig.9 Fitting curve of probability density function under various working conditions

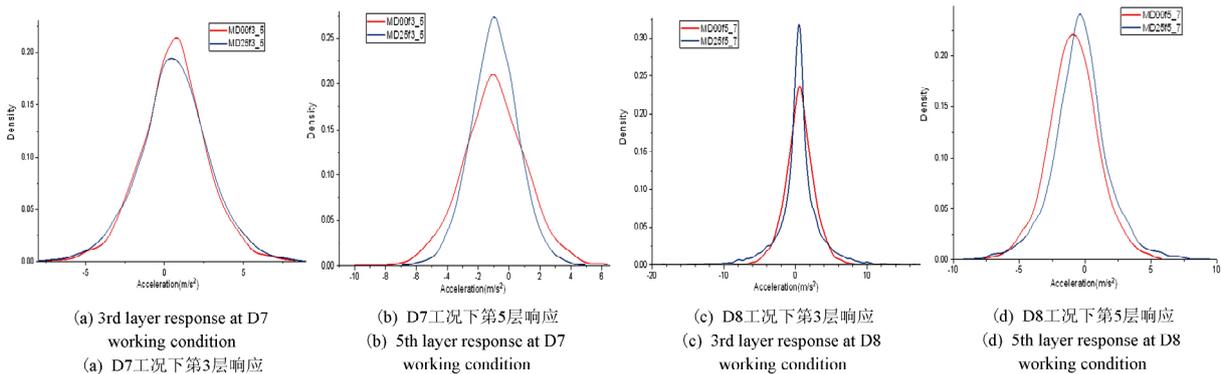


图10 D7、D8 分别与 UD 工况下响应对比

Fig.10 Fitting curve of probability density under D7 and D8 working condition

以 D7、D8 工况为例,对多损伤工况下的结构加速度响应时程的概率密度函数展开分析,结果如图 10 所示。

概率密度函数拟合曲线的变化对结构损伤具有一定的表征能力,但综合单损及多损工况的分析结果表明:仅根据概率密度函数无法判断损伤发生

的所在位置。

4 结论

本文从白噪声激励作用下结构随机振动加速度时域响应的统计分析出发,分析了八层剪切型框架模型加速度响应在不同工况下的均值、方差、峰

度、偏度、概率分布密度及累积概率密度等指标,在结构损伤的初步识别中得出如下几点结论:

(1) 加速度响应的均值、峰度值和偏度值,即结构响应的一阶矩、三阶矩和四阶矩并不具备明显的损伤指征.

(2) 利用结构加速度响应的方差指标,能够较较好地进行单损和多损工况下的损伤判别和损伤定位.

(3) 概率密度函数和累积概率密度可作为是否发生损伤的初步判别依据,但由于其计算数据来源于单点测试数据,因而不具有损伤的定位能力.

(4) 在其他随机激励作用下,结构动力响应统计指标的损伤表征能力还需进一步的研究.

参 考 文 献

- Ren W X, Roeck G D. Structural damage identification using modal data. I: Simulation Verification. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(1): 87~95
- Ren W X, Roeck G D. Structural damage identification using modal data. II: Test Verification. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(1): 96~104
- 李忠献, 杨晓明, 丁阳. 基于结构响应统计特征的神经网络损伤识别方法. *工程力学*, 2007, 24(9): 1~7 (Li Z X, Yang X M, Ding Y. Damage identification neural network method based on statistical property of structural responses. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(9): 1~7 (in Chinese))
- 李学平, 余志武. 基于动力特性的结构损伤识别方法. *动力学与控制学报*, 2006, 4(1): 84~87 (Li X P, Yu Z W. Structural damage identification method based on dynamic characteristics. *Journal of Dynamics and Control*, 2006, 4(1): 84~87 (in Chinese))
- 胡焕, 洪嘉振, 刘铸永. 基于频响函数扩展修正的 Benchmark 结构损伤识别. *动力学与控制学报*, 2010, 8(3): 213~218 (Hu H, Hong J Z, Liu Z Y. Damage identification for benchmark structure with model updating method based on FRF expansion. *Journal of Dynamics and Control*, 2010, 8(3): 213~218 (in Chinese))
- 雷家艳, 姚谦峰, 雷鹰, 等. 基于随机振动响应互相关函数的结构损伤识别试验分析. *振动与冲击*, 2011, 30(8): 221~224 (Lei J Y, Yao Q F, Lei Y, et al. Structural damage detection method based on correlation function analysis of vibration measurement data. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(8): 221~224 (in Chinese))
- 李炜明, 朱宏平, 丁烈云, 等. 基于试验加速度响应的统计损伤辨识方法. *振动与冲击*, 2010, 29(8): 107~110 (Li W M, Zhu H P, Ding L Y, et al. Statistical damage identification method based on test of acceleration response. *Vibration Testing and Diagnosis*, 2010, 29(8): 107~110 (in Chinese))
- 宗周红, 牛杰, 王浩. 基于模型确认的结构概率损伤识别方法研究进展. *土木工程学报*, 2012, 45(8): 121~130 (Zong Z H, Niu J, Wang H. A review of structural damage identification methods based on the finite element model validation. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(8): 121~130 (in Chinese))
- Housner G W, Bergman L A, Caughey T K, et al. Structural Control: Past, Present and Future. *Journal of Engineering Mechanics*, 1997, 123(9): 897~971
- Dyer D, Stewart R M. Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis. *Journal of Mechanical Design*, 1978, 100(2): 229
- Cacciola P, Impollonia N, Muscolino G. Crack detection and location in a damaged beam vibrating under white noise. *Computers & Structures*, 2003, 81(18): 1773~1782
- 朱军华, 余岭. 基于时间序列分析与高阶统计矩的结构损伤检测. *东南大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(1): 137~143 (Zhu J H, Yu L. Detection of structure injury based on Ts analysis. *Journal of Southeast University (Natural Science)*, 2012, 42(1): 137~143 (in Chinese))
- 杨小森, 闫维明, 陈彦江, 等. 基于振动信号统计特征的损伤识别方法. *公路交通科技*, 2013, 30(12): 99~106 (Yang X S, Yan W M, Chen Y J, et al. Damage detection method based on statistics characteristics of vibration signal. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30(12): 99~106 (in Chinese))
- 闫维明, 顾大鹏, 陈彦江, 等. 基于加速度响应相关性的结构损伤识别方法. *振动与冲击*, 2013, 32(14): 82~86 (Yan W M, Gu D P, Chen Y J, et al. Structural damage identification method based on correlation of acceleration response. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(14): 82~86 (in Chinese))
- Zhang J, Xu Y L, Li J, et al. A new statistical moment-based structural damage detection method. *Earthquake Engineering & Engineering Vibration*, 2008, 12(1): 445~466

TIME-BASED STOCHASTIC DYNAMIC RESPONSE STATISTICAL CHARACTERISTICS FOR PRELIMINARY IDENTIFICATION OF STRUCTURAL DAMAGE*

Xiao Qingsong Lei Jiayan[†] Shi Wei Wang Zihao

(*School of Architecture & Civil Engineering, Xiamen University, Fujian 361005, China*)

Abstract Based on the white noise random vibration experiment of an 8-story steel shear building model, the structural undamaged and 8 damaged cases were analyzed from the structural acceleration responses' mean, skewness, kurtosis, probability density function(PDF) and cumulative distribution function(CDF) respectively. The results demonstrated that the difference of skewness and kurtosis is not obvious to structural damage, but the acceleration probability density function could be used for preliminary damage identification to determine whether the damage has happened or not, and the statistical characteristics of variance could locate the damages.

Key words damage identification, statistical property, vibration test, random vibration, acceleration response

Received 24 July 2018, revised 20 September 2018.

* The project supported by the NSFC(51508486), Natural Science Foundation of Fujian Province(2016J05136), Xiamen Engineering Technology Center for Intelligent Maintenance of Infrastructures(TCIMI201806).

[†] Corresponding author E-mail: leijiayan@xmu.edu.cn