

基于小波包能量谱的空间钢框架结构 两阶段损伤识别与定位研究

胡卫兵, 刘凌宇, 乔冠东, 文自刚

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 结构损伤的发生会改变结构的动力响应, 因此可以用结构动力响应的变化来识别结构损伤. 在将结构的动力响应与小波包能量谱相结合的基础上, 提出新的结构损伤识别指标能量谱均值偏差 ESAD (Energy Spectrum Average Deviation) 和节点层间位移总能量差变化率 EDRV (Energy difference rate of variation), 并通过数值模拟, 将其应用于一座四层两跨钢框架结构的损伤识别上, 进行有效性的验证. 分析表明: 第一阶段, 在较少的动力响应提取点的情况下, 指标 ESAD 能很好地识别出结构不同工况的损伤及初步判断损伤发生在结构的哪一侧位置, 并且该指标与损伤的严重程度成正比; 第二阶段, 根据损伤发生所在侧位的各层节点位移响应, 指标 EDRV 可以定位到损伤发生所在的层数.

关键词: 结构动力响应; 小波包能量谱; 钢框架结构; 损伤识别与定位

中图分类号: TU02

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)04-0492-6

Study for steel frame structures damage identification based on wavelet packet energy spectrum

HU Weibing, LIU Lingyu, QIAO Guandong, WEN Zigang

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Structural damage occurrence will change the structural dynamic response, so the change of structure dynamic response can be used to identify the structural damage. On the basis of combining dynamic response of the structure with the wavelet packet energy spectrum, a new structure damage identification indexes i.e. energy spectrum average deviation and the variation rate of total energy difference for node storey drift were presented, and verifying the validity of damage identification index was verified by finite element simulation of a four-layer and two cross steel frame structure. Analysis shows that: In the first stage, the index ESAD can help identify structural damage and determine the location to the different working conditions well, under the condition of a less dynamic response extraction point, and the index is positively correlated with the damage degree. In the second stage, according to the displacement response of each layer node in the side of damage occurred, the index EDRV can help locate layer which the damage occurred.

Key words: structure dynamic response; wavelet packet energy spectrum; steel frame structure; damage identification and location.

钢结构在服役期间, 在各种灾害因素的综合影响下, 会造成关键构件或部位局部损伤的积累, 最终可能导致整体结构的突然破坏, 造成巨大的经济损失和人员伤亡. 其中钢框架结构的损伤多发生于柱间支撑、梁柱节点位置, 对于空间钢框架结构, 能够确定损伤发生的方位与层数, 就可以实现损伤的定位.

结构的损伤会使其物理参数改变, 而物理参数的改变必然引起结构振动特性发生变化^[1], 所以可以由结构振动特性的变化来识别损伤. 传统的基于振动特性的结构损伤识别多通过结构的模态改变来进行, 比如频率、振型等^[2-3]; 但研究表明, 将频率等作为损伤指标有一些难以克服的缺点, 阻碍其工程应用^[1]. 丁幼亮等^[4-6]利用小波包能量谱与结构

动力响应相结合, 提出损伤指标能量比偏差 (ERVD), 进行了一系列的数值与试验研究. 基于小波包能量谱方法的 ERVD 指标可以很好地识别出结构的损伤, 但难于判定损伤发生的位置. Sun 等^[7]对结构响应进行小波包分析, 用小波包信号能量作为神经网络输入, 以此识别结构损伤. 基于小波包变换的能量变化率指标^[8]可以对工字型钢梁进行损伤识别与定位, 但不适用于空间三维的框架结构. 余竹等^[9]运用小波包能量曲率差的方法进行了梁体的损伤识别. 目前国内基于小波包能量谱的方法多用于损伤识别或者简单梁体的损伤定位, 对于空间钢结构的损伤定位的研究并不太多. 将小波包能量谱与结构动力响应相结合, 提出一种适用于钢框架结构的两阶段损伤识别方法, 并通过钢框架的

数值分析进行验证,该方法可以很好的识别出钢框架结构的损伤,并能判定损伤的位置.

1 结构损伤指标的构建

1.1 损伤的识别与位置的初步判定

对结构动力响应 f 进行第 i 层小波包分解,响应信号在频域内划分为 2^i 个频带,令 $f(i, j)$ 表示第 i 层分解节点 (i, j) 上的结构响应,则结构动力响应 f 可表示为^[4]:

$f = \sum f(i, j) = f(i, 0) + f(i, 1) + \dots + f(i, 2^i - 1)$ (1)
第 i 层每个频带内结构响应 $f(i, j)$ 的小波包能量按下式计算^[4]

$$E(i, j) = \sum |f(i, j)|^2 \quad (j=0, 1, 2, \dots, 2^i - 1) \quad (2)$$

则结构动力响应在第 i 分解层的小波包能量谱向量为^[4]

$$E(i) = \{E(i, j)\} = [E(i, 0) \dots E(i, j) \dots E(i, 2^i - 1)]^T \quad (3)$$

在式(3)的基础上定义动力响应 $f(i, j)$ 在第 i 小波包分解层上的小波包能量谱总能量为

$$ES = \sum_{j=0}^{2^i-1} E_{i,j} \quad (j=0, 1, 2, \dots, 2^i - 1) \quad (4)$$

结构发生损伤后,在相同激励下损伤前后的结构动力响应有所改变,使响应信号在某些频段上发生增大或减小,继而引起动力响应的能量谱发生变化,所以可以结构动力响应的能量谱作为损伤识别参数,构建结构损伤识别指标.

文献[4、5]从理论与试验上论证了小波包能量谱对于损伤预警的适用性,并提出了能量比偏差(ERVD)的损伤预警指标:采用各特征频带相对于所有频带能量平均值的变化(能量比变化 ERV)作为损伤预警参数,在能量比变化的基础上定义了能量比偏差(ERVD)作为损伤预警指标.计算公式如下:能量比偏差 ERVD

$$ERVD = \sqrt{\sum_{k=1}^m (ERV_k - \overline{ERV})^2} \quad (5)$$

式中: \overline{ERV} 为特征频带能量比变化 ERV_k 的平均值.

在激励不变的情况下,完好结构的能量比变化理论上为 0,结构损伤后的能量比为一组均值大于 0,并且在均值上下波动的一组数列;而能量比偏差只表示了能量比变化偏离均值的离散程度,并未考虑其变化的均值对于损伤评判的作用.事实上,损伤越严重,结构响应信号的改变就越大,由此而

引起的完好结构与损伤结构之间的能量谱的变化就越大;这种变化包括能量在频谱上的重新分布,以及总能量的改变.其中,能量比偏差可以很好地揭示出能量的重新分布,而变化的均值则可以表征总能量的改变;将两者结合起来,能够更为全面的表示出结构的损伤状态.

考虑以上因素后,基于小波包能量谱方法重新定义一种结构损伤识别指标,首先,对小波包能量谱按下式进行归一化处理

$$I_j = \frac{E(i, j)}{\sum_{j=0}^{2^i-1} E(i, j)} \times 100 \quad (j=0, 1, 2, \dots, 2^i - 1) \quad (6)$$

式中: $E(i, j)$ 为动力响应第 i 层分解时第 j 个频带上的小波包能量, I_j 为归一化后的能量,即为第 j 个频带能量在总能量中所占的比重.通过对比归一化后的能量谱的变化(ESV)可以识别出结构的损伤状况

$$ESV = \{ESV_j\} = \{I_{uj} - I_{dj}\} \quad (7)$$

式中: ESV_j 为第 j 个频带的能量谱变化; I_{uj} 和 I_{dj} 分别为结构在完好状态和损伤状态下第 j 个频带归一化后的能量.

以此为基础,定义了一种基于结构动力响应和小波包能量谱相结合的损伤识别指标,能量谱均值偏差(ESAD)

$$ESAD = \overline{ESV} \times \sqrt{\sum_{j=0}^{2^i-1} (ESV_j - \overline{ESV})^2} \quad (8)$$

$$\overline{ESV} = \frac{1}{2^i} \times \sum_{j=0}^{2^i-1} ESV_j \quad (j=0, 1, 2, \dots, 2^i - 1) \quad (9)$$

式中: \overline{ESV} 为各频带能量谱变化 ESV_j 的平均值.

由损伤发生而引起的响应信号改变量越大,响应信号的总能量变化以及能量的重分布也会随之愈加严重;而响应信号的改变量的大小一般与损伤的程度和离近损伤发生的位置相关;所以,根据 ESAD 的这一特性,不仅可以进行结构的损伤识别,还能够表征损伤的严重程度以及初步判定结构损伤发生的位置.

1.2 损伤所在层位置的确定

抗震规范^[10]中采用层间位移角作为衡量结构变形能力从而判别是否满足建筑功能要求的指标;高规^[11]中说明层间位移控制实际上是一个宏观的侧向刚度指标.在框架结构中,当框架某一层发生损伤时,必然导致该层侧向刚度的减小,使得该层的层间位移差变大.在结构的静力分析中,以层间

位移角来描述层间的抗侧刚度,而在结构的动力响应信号中,可以计算上下层节点位移响应的总能量的差值,从宏观上表征该层抗侧刚度的变化,进而可以确定损伤发生所在的层位置。

在式(3)的基础上定义钢框架结构第 m 层节点的动力响应 $f(i, j)$ 在小波包第 i 分解层上的小波包能量谱总能量为

$$ES_m = \sum_{j=0}^{2^i-1} E_{i,j} \tag{10}$$

对于钢框架结构,提取各层节点的位移响应,对位移响应进行小波包分解,由式(10)计算节点位移的总能量,则相邻层之间的节点层间位移总能量差可以表示为

$$ED_m = \begin{cases} ES_m - ES_{m-1} & m \geq 2 \\ ES_m & m = 1 \end{cases} \tag{11}$$

其中: m 表示为钢框架结构的某一层. 定义完好结构与损伤结构的节点层间位移总能量差的变化率为

$$EDRV_m = |(ED_{md} - ED_{mu})/ED_{mu}| \tag{12}$$

式中: ED_{mu} 、 ED_{md} 分别表示完好结构和损伤结构第 m 层的节点层间位移总能量差。

根据以上分析,文中提出的钢框架结构两阶段损伤识别方法为:第一阶段,利用 ESAD 指标识别结构的损伤,并初步判断损伤发生在钢框架结构的哪一侧位置;第二阶段:在第一阶段的基础上,由 EDRV 指标定位损伤发生的层位置。

2 数值模型与动力响应提取

2.1 结构损伤的有限元模拟

本文通过 Ansys 有限元软件对一座四层两跨钢框架结构进行模拟计算. 框架梁柱以及斜撑皆为 H 型钢,梁长 4 m,柱高 3.2 m,梁截面尺寸为 HN 400×200×8×13,柱截面尺寸为 HW 400×400×13×21,斜撑截面尺寸为 HW 150×150×7×11. 梁与柱用 beam188 单元模拟,梁柱节点采用刚接. 斜撑与柱子采用铰接,用 link10 单元模拟,每层在四周共设有 8 根斜撑. 钢材的弹性模量取 2.1×10^{11} N/m²,泊松比为 0.3,密度为 7 850 Kg/m³,柱子固定于基础. 建立钢框架的有限元模型如图(1)所示:为表述方便,以 z 轴正向为南侧, x 轴正向为东侧。

以去除某些部位的斜撑来模拟损伤的发生,为了验证该指标对于钢框架结构不同损伤部位及程度下的适用性,表 1 设置了 7 种工况

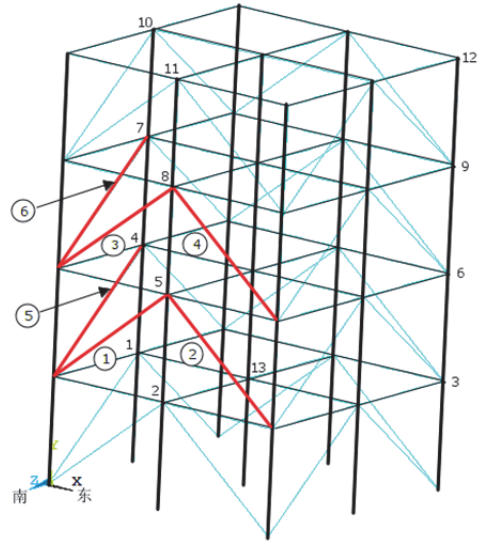


图 1 钢框架结构有限元模型
Fig.1 Finite element model of steel frame structure

表 1 钢框架结构的模拟工况
Tab.1 Simulation cases of steel frame structure

模拟 工况	工况描述	工况对应的斜 撑编号
1	完好结构	—
2	去除二层南侧西部一跨的斜撑	①
3	去除二层南侧两跨的斜撑	①、②
4	去除二层和三层南侧两跨的斜撑	①、②、③、④
5	去除二层西侧南部一跨的斜撑	⑤
6	工况 2+去除三层西侧南部一跨的 斜撑	①、⑥
7	去除三层南侧西部一跨的斜撑	③

2.2 结构动力响应的提取

对结构采用瞬态动力分析,在第一层中心第 13 节点施加在 x 、 z 平面内且与 x 轴、 z 轴成 45 度角方向的激振力. 激振力采用白噪声激励,其时程曲线与功率谱曲线如图 2.为了验证提出的识别与定位的方法,各工况采用同一荷载激励。

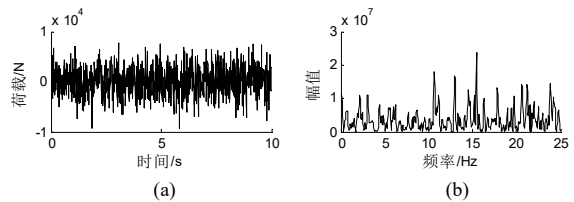


图 2 激振力的时程(a)与功率谱(b)
Fig.2 Time-history(a) and power spectrum(b)
of vibration force

以每层的西侧中点、南侧中点以及东北角点的 x 和 z 向为结构动力响应的提取点向,从有限元分析结果中提取对应节点的位移响应信号;该布置可以涵盖模型中纵向与横向各榀框架的响应信号. 各层对应的节点编号如表 2

表 2 响应提取点布置
Tab.2 The arrangement of response extraction point

层数	西侧中点	南侧中点	东北角点	提取方向
1	1	2	3	x 、 z 向
2	4	5	6	x 、 z 向
3	7	8	9	x 、 z 向
4	10	11	12	x 、 z 向

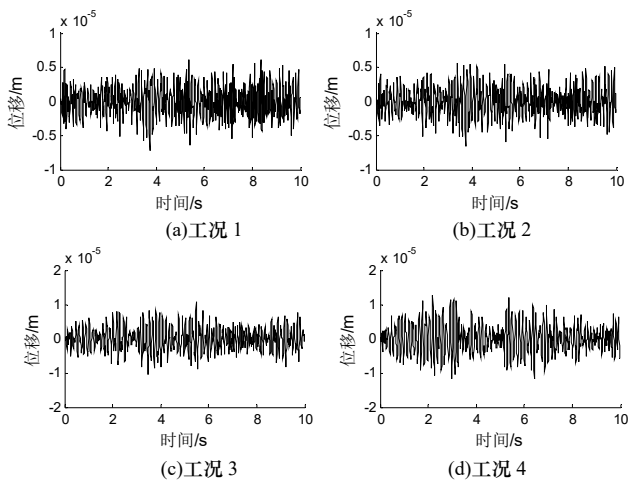


图 3 第 5 节点 x 向位移响应
Fig.3 The x direction displacement response of node 5

工况 1 至工况 4 下第 5 号点的 x 向位移响应时程如图 3; 从图中可以看出, 不同工况下相同节点的位移响应是有所不同的, 但是单纯依靠位移响应信号的不同难以判定钢结构的损伤状况, 需对其进一步的进行小波包处理.

3 损伤识别分析

3.1 损伤识别以及位置初判

依据文献[6]提出的范数熵方法, 对小波函数及小波包分解层次进行了选择, 选用 db30 小波, 分解层次为 6 层.

分别提取工况 1、2、3、4 下节点 5 的 x 向位移时程, 按式(1)至(3)进行小波包分解计算, 得到小波包能量谱如图 4. 再按式(4)计算小波包能量谱的总能量, 如图 5. 从图(4)中可以明显的看出工况 1 与工况 2、3、4 的能量谱在频带上的分布与幅值有明显的差别, 印证了结构发生损伤后造成其能量在频率上发生重新分布. 图 5 验证了损伤发生后不仅会造成能量在频带上的重新分布, 还会导致总能量的增大.

由式(6)得到归一化能量谱后, 按式(7)计算工况 2、3、4 相对于工况 1 的归一化能量谱差值变化 ESV 以及变化的均值, 如图 6; 从图 6 可以看出不同工况相对于工况 1 的 ESV 值在频带上的分布、最大值以及其均值都有所不同, 其中包含有丰富的损伤信

息, 可以以 ESV 作为动力参数建立损伤识别指标, 表征结构的损伤状态.

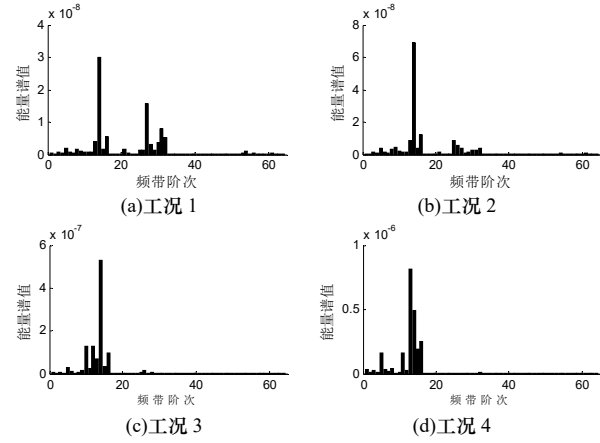


图 4 第 5 节点 x 向位移响应小波包能量谱
Fig.4 Wavelet packet energy spectrum at x direction displacement response of node 5

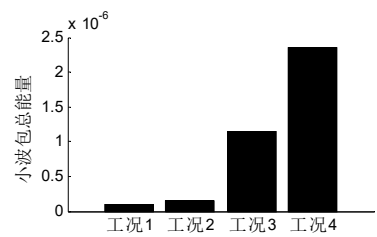


图 5 第 5 节点 x 向位移小波包总能量
Fig.5 Total energy of wavelet packet at x direction displacement response of node 5

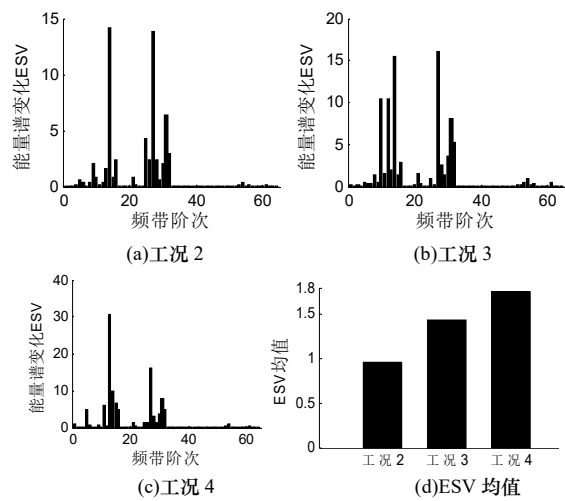


图 6 第 5 节点 x 向位移归一化能量谱的变化 ESV 及 ESV 均值
Fig.6 Variation ESV and average value of x direction displacement normalized energy spectrum of node 5

以下验证损伤识别指标 ESAD 的损伤识别效果并与 ERVD 相比较. 工况 2、3、4 同为结构 x 向南侧发生损伤, 只是损伤程度不同; 提取二层南侧第 5 号点 x 向位移响应, 进行 ERVD 和 ESAD 的计算, 如图 7

从图中可以看出, ERVD 和 ESAD 都能够很好

的识别出结构的损伤,并表征出损伤的严重程度.但是在相同损伤工况下,指标 ESAD 的数值大于 ERVD,并且随着损伤程度的增加,ESAD 指标的增长速率也较 ERVD 更快.说明 ESAD 因考虑能量谱变化的均值作用后,在损伤程度上相对于 ERVD 更具敏感性.

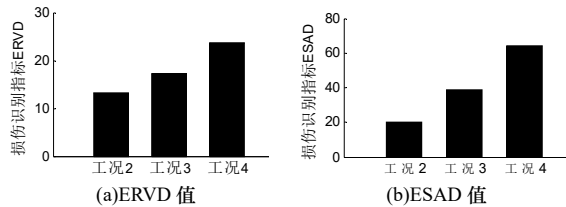


图7 第5号点 x 向位移响应的 ERVD 和 ESAD 值
Fig.7 The value of ERVD and ESAD of x direction displacement response of node 5

以下验证 ERVD 和 ESAD 对于初步判定损伤位置的能力.分别提取第二层所有响应提取点的位移响应,计算 ERVD 及 ESAD 值,如图 8、9.

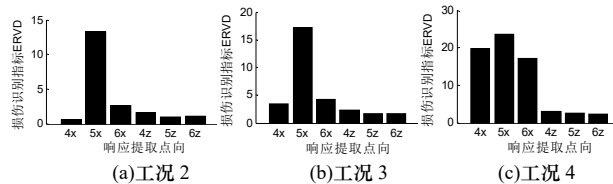


图8 二层响应提取点的 ERVD 值
Fig.8 ERVD value of response extraction point at second layer

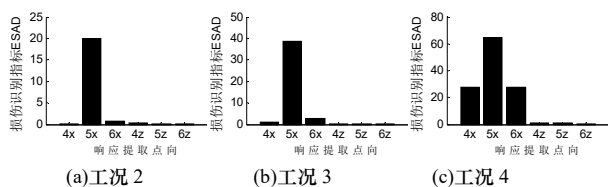


图9 二层响应提取点的 ESAD 值
Fig.9 ESAD value of response extraction point at second layer

图 8 中,对于工况 2、3,对照表 2 可以看出 x 向南侧(节点 5)的 ERVD 值明显大于其他方位的指标值,说明损伤发生在 x 向的南侧;但对于工况 4, x 向南侧北侧及中侧数值都很大并较接近,不能明显的说明是 x 向南侧发生损伤.这是因为空间框架的三维整体作用,当 x 向南侧斜撑去除较多时,对整个结构 x 向的刚度影响较大,使得 x 向不同侧的动力响应都有所变化.只考虑能量重分布的 ERVD 指标难以识别出损伤所发生的位置.

但从图 9 可以看出,考虑了能量谱变化均值后的 ESAD 指标可以很好地识别出工况 2、3、4 发生损伤的位置.对于工况 4,这是因为 x 向南侧斜撑去除较多时, x 向各侧能量重分布的情况大体相同,但南侧的总能量变化最大.

为了验证 ESAD 对于多种工况损伤识别的适用性,分别提取工况 2、5、6 下二层各响应提取点的位移响应,进行 ESAD 计算,结果如图 10;从图中可以识别出工况 2 为 x 向南侧发生损伤,工况 5 为 z 向西侧发生损伤,工况 6 为 x 向南侧以及 z 向西侧同时出现损伤;对照图 1 及表 1、2,证明识别的结果与损伤工况的设定相同.说明 ESAD 指标对于单侧或两侧同时出现损伤的情况都具有很好的识别效果.

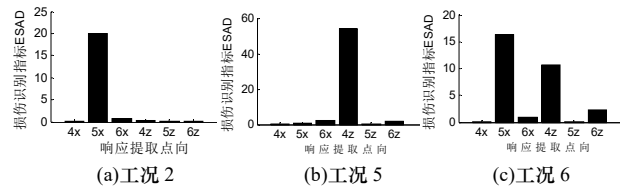


图10 二层响应提取点 ESAD 值
Fig.10 The ESAD value of the second layer response extraction point

提取工况 2 各层响应提取点的位移,计算其对应的损伤识别指标 ESAD 值,如下图 11;发现 1 至 4 层都能很好的识别出损伤的发生并能判定损伤发生的方位,只是在数值上有所不同.所以该指标应用时,可以只在某一层相应位置布置位移传感器就可以识别出结构的损伤及损伤发生的大体方位.

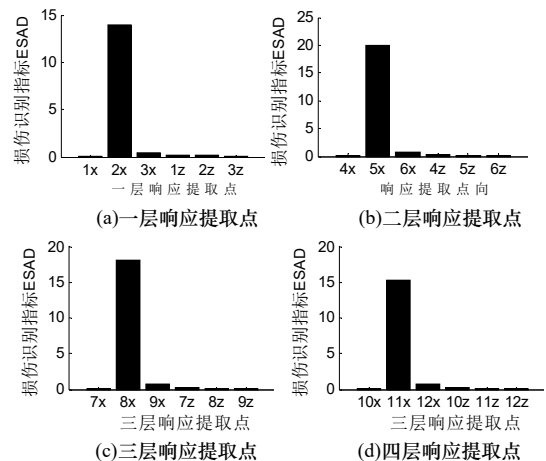


图11 工况2 不同层响应提取点 ESAD 值
Fig.11 ESAD value of different layers response extraction point of case 2

3.2 损伤层数的确定

工况 2、4、7 同样都是 x 向南侧发生损伤,工况 2、7 分别为 2、3 层出现损伤,工况 4 为 2、3 层同时发生损伤.分别提取工况 2、4、7 下 x 向南侧各层节点的位移响应,按式(12)计算 EDRV 值,验证该指标是否能够确定发生损伤所在层的位置.计算结果如图 12.

从图 12 中可以很明显的看出工况 2 为第 2 层出现损伤,工况 4 的损伤发生在第 2、3 层,工况 7

则为第3层出现损伤;识别效果与工况设定相同.表明EDRV指标可以定位单层损伤以及两层同时出现损伤的情况.

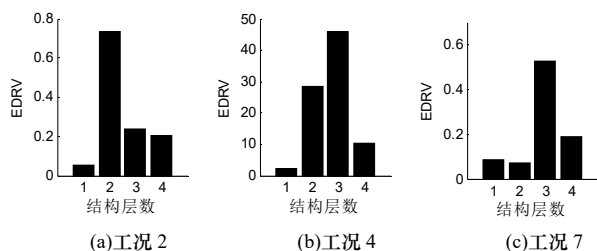


图12 x 向南侧各层节点位移响应 EDRV 值

Fig.12 The displacement response EDRV value of each layer at x direction of south side

基于以上分析,建立基于小波包能量谱的空间钢框架结构两阶段损伤识别与定位方法,首先提取结构某层所布设测点的位移响应,由ESAD指标发现损伤,并判定损伤发生所在的方位;其次,提取损伤所在一侧各层的位移响应,计算EDRV值来定位损伤发生在结构的哪一层.

4 结论

将结构动力响应与小波包能量谱方法相结合,建立损伤识别指标ESAD和EDRV.提出一种适用于空间钢框架结构的两阶段损伤识别与定位方法:首先,运用ESAD指标识别损伤的发生并确定损伤所在的方位;其次,使用EDRV指标定位损伤所在的层数.研究表明:

(1)在考虑能量谱变化均值后的损伤识别指标ESAD较ERVD指标在损伤程度的表征上更为敏感.

(2)相比于ERVD指标,ESAD可以很好地识别出损伤所在的方位.

(3)层间节点位移总能量差值变化率指标EDRV能够在ESAD识别出损伤方位后,确定损伤所在的层数.

(4)提出的方法对于不同侧不同层位置共同发生损伤的情况进行验证,识别结果与损伤工况设定相同,取得良好的效果.

建立在损伤前后激励不变的情况下,对于可由激振器施加恒定荷载的钢框架结构有一定的应用价值.但是在环境激励下,基于小波包能量谱方法的钢框架结构损伤识别与定位仍需进一步的研究.

参考文献 References

[1] 朱宏平,余璟,张俊兵.结构损伤动力检测与健康监测

研究现状与展望[J].工程力学,2011,28(2):1-11.

ZHU Hongping, YU Jing, ZHANG Junbing. A summary review and advantages of vibration-based damage identification methods in structural health monitoring[J]. Engineering Mechanics,2011,28(2):1-11.

[2] ZONG Z H, WANG T L, HUANG D L, et al. State-of-the-art report of bridge health monitoring [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2002,30(2):117-152.

[3] SHI Z Y, LAW S S, ZHANG L M. Structural damage localization from modal strain energy change [J]. Journal of Sound and Vibration, 1998,218(5):825-844.

[4] 丁幼亮,李爱群,廖长青.基于小波包能量谱的结构损伤预警方法研究[J].工程力学,2006,23(8):42-48.

DING Youliang, LI Aiqun, LIAO Changqing. Investigation on the structural damage alarming method based on wavelet packet energy spectrum[J]. Engineering Mechanics,2006,23(8):42-48.

[5] 丁幼亮,李爱群.基于小波包分析的 Benchmark 结构损伤预警试验研究[J].工程力学,2008,25(11):128-133.

DING Youliang, LI Aiqun. Experimental research on structural damage alarming of benchmark structure using wavelet packet analysis[J]. Engineering Mechanics, 2008,25(11):128-133.

[6] 刘涛,李爱群,丁幼亮,等.基于小波包能量谱的结构损伤预警方法试验研究[J].振动与冲击,2009,28(4):4-9.

LIU Tao, LI Aiqun, DING Youliang, et al. Experimental study on structural damage alarming method based on wavelet packet energy spectrum[J]. Journal of Vibration and shock,2009,28(4):4-9.

[7] SUN Z, CHANG C C. Structural damage assessment based on wavelet packet transform [J]. Journal of Structural Engineering, 2002,128(10):1354-1361.

[8] 韩建刚,任伟新,孙增寿.结构损伤识别的小波包分析试验研究[J].振动与冲击,2006,25(1):47-50.

HAN Jiangang, REN Weixin, SUN Zengshou. Damage detection and identification of structures in laboratory based on wavelet packet analysis[J]. Journal of Structural Engineering, 2006,25(1):47-50.

[9] 余竹,夏禾,Goicolea J M,等.基于小波包能量曲率差法的桥梁损伤识别试验研究[J].振动与冲击,2013,32(5):20-25.

YU Zhu, XIA He, GOICOLEA J M, et al. Experimental study on bridge damage identification based on wavelet packet energy curvature difference method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,32(5):20-25.

[10] (GB50011-2010).建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

(GB50011-2010). Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China architecture & building press, 2010.

[11] (JGJ3-2010).高层建筑混凝土结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

(JGJ3-2010). Technical specification for concrete structures of tall building[S]. Beijing: China architecture & building press, 2010.

(编辑 吴海西)