

基于时频分析 S 变换的高层框架损伤识别研究

裴强¹, 刘小庆¹, 吴凯²

(1. 大连大学土木工程技术研究与开发中心, 辽宁 大连 116622; 2. 大连大学建筑工程学院, 辽宁 大连 116622)

摘要 目的 运用有限元软件模拟十二层框架结构损伤信息, 研究结构的损伤信息与损伤参数之间的关系, 提出识别高层框架结构损伤信息的新方法. 方法 采用 S 变换, 对有限元模型的加速度响应进行分析, 进而得出不同损伤情况下的损伤参数. 结果 当损伤位置确定时, 损伤程度指标与各层频率随时间变化的平均斜率大致呈线性关系. 当损伤程度确定时, 损伤位置指标与各层频率随时间变化的平均斜率大致也呈线性关系. 结论 S 变换识别的频率随时间变化的平均斜率与结构的损伤指标呈线性关系, 将这种关系函数化, 便可以依据损伤结构的加速度响应较为精确地识别结构的损伤程度以及损伤位置.

关键词 S 变换; 高层框架; 损伤识别; 数值算例

中图分类号 TU375 文献标志码 A

Experimental Study on Mechanical Characteristics of Horizontal Anchor in New Tubular Roof Method

PEI Qiang¹, LIU Xiaoqing¹, WU Kai²

(1. The R & D Center of the Civil Engineering Technology, Dalian University, Dalian, China, 116622; 2. School of Civil Engineering, Dalian University, Dalian, China, 116622)

Abstract: The finite element software is used to simulate damage information of 12-layer frame structure to study on the relationship between damage information and damage parameters of structures. A new method is proposed for damage identification of frame structure information. S-transform is used to analyze the acceleration effect of finite element model to obtain the damage parameters in different damage conditions. When the damage position is determined, the damage degree index and the average slope of each layer frequency with the change of time are approximately linearly correlated. The average slope of each layer frequency with the change of time in S-transform identification and the damage degree index are linearly correlated. The function of this kind of relation can be used to identify the damage degree and the damage position of the structure according to the acceleration response of the damage structure.

Key words: S transformation; high-level framework; damage identification; a numerical example

收稿日期: 2017-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478168, 51378085); 辽宁省自然科学基金项目(201602025); 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12541694)

作者简介: 裴强(1974—), 男, 教授, 博士, 主要从事地震工程方面研究.

高层框架结构已成为当今建筑的主体结构,然而由于各种环境作用、长期的荷载效应、建筑结构的疲劳老化等各种灾害因素的耦合作用,致使高层框架结构的系统损伤^[1].随着损伤的累积,建筑因承载能力下降而发生倒塌,严重者甚至威胁到人类的生命财产安全.若能提前检测结构的损伤,及时采取加固和维修措施,可以减少或者避免事故的发生.因此,实时监控、及时评估,早发现、早维修已成为高层框架结构应用过程中必不可少的环节^[2].高层框架结构的损伤识别已成为未来工程的必然要求.

由于传统的损伤识别只能识别平稳信号参数信息,对于非平稳信号的分析目前研究深度不够,从而限制了频域法识别结构损伤的范围.S变换作为时频分析的一种方法^[3-5],能同时在时域和频域内观察信号的演变,提供信号的局部时频特征,因而它不仅能够分析平稳信号,而且能够分析非平稳信号.笔者利用S变换对十二层框架结构损伤模型的加速度响应进行分析,得到不同损伤工况下的频率随时间变化的平均斜率.研究发现S变换识别的频率随时间变化的平均斜率与结构的损伤指标之间大致呈现出线性关系,将该种关系函数化,便可以较为准确地识别出高层框架结构损伤信息,从而为高层框架结构损伤识别提供一种有效的识别方法.

1 S变换损伤识别原理

以频率随时间变化斜率为损伤参数,定义结构刚度折减率为损伤程度指标、损伤层与结构总层数的比为损伤位置指标,研究结构的损伤参数与损伤程度指标和损伤位置指标之间的关系,由此建立损伤识别的流程图.并通过两个不同的损伤模型验证损伤识别方法的有效性.

1.1 参数定义

文中识别结构的损伤信息,采用一个损伤参数和两个损伤指标^[6].

(1) 频率随时间变化的平均斜率 k_f'

k_f' 为结构各层频率随时间变化斜率 k_f 的平均值:

$$k_f' = \frac{df}{dt}. \quad (1)$$

式中: f 为结构加速度响应分析得到的瞬时频率; df 为结构单位时间间隔内的频率变化量; t 为信号采样的时间; dt 为信号采样的时间间隔.

(2) 损伤程度指标 P_k

$$P_k = \frac{k^0 - k'}{k^0}. \quad (2)$$

式中: k^0 为结构损伤前的原始刚度; k' 为结构损伤后的现有刚度.

(3) 损伤位置指标 P_l

$$P_l = \frac{c_0}{c_n}. \quad (3)$$

式中: c_n 为结构的总层数; c_0 为结构损伤层(即损伤位置); P_l 为结构损伤位置指标.

1.2 S变换基本理论

S变换(ST)的理论是90年代由Stockwell等提出的,是STFT和WT的延伸^[7-8].2013年,周奎等^[9]利用一单跨两层钢结构试验模型的节点损伤信号,研究了S变换中每时能量最大值与节点损伤程度以及节点能量传递之间的关系.通过每时能量最大值能够识别出结构是否发生损伤以及损伤的程度.

S变换包含了STFT变换和WT变换的许多优点,它采用了一种新的函数,即与频率有关的高斯窗函数.S变换也有“相位校正”的连续小波变换的名称^[10].

信号 $h(t)$ 的S变换如下^[11-12]:

$$S(\tau, f) = e^{-i2\pi\tau f} W(\tau, f). \quad (4)$$

式中:参数 τ 用于控制窗函数在时间轴上的位置; $e^{-i2\pi\tau f}$ 用于校正相位; $W(\tau, f)$ 是基于特

殊母小波的连续小波变换^[13-15],公式如下:

$$W(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) w(t - \tau, f) dt. \quad (5)$$

式中: $W(t - \tau, f)$ 是一种不满足小波零均值条件的特殊意义上的母小波. 所以从这方面说, 该方法并非真正的小波变换.

$$S(\tau, f) = e^{-i2\pi f\tau} W(\tau, f) = e^{-i2\pi f\tau} \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) w(t - \tau, f) dt = e^{-i2\pi f\tau} \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f(t-\tau)} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f t} dt. \quad (7)$$

式中: $g(t, f) = \frac{|f|}{2\pi} e^{-\frac{t^2 f^2}{2}}$ 是调谐 Gauss 窗的一种函数, 这种函数具有归一化的特点:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|f|}{2\pi} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} dt = 1. \quad (8)$$

因此

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) d\tau = H(f). \quad (9)$$

其中, $H(f)$ 为信号 $h(t)$ 的傅里叶变换, 所以 S 变换的反变换如下:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) d\tau \right] e^{i2\pi f t} df. \quad (10)$$

由上述可知, S 变换能具有传统傅里叶变换结合的特点, 再加上自身优点, 能够很好地处理传统傅里叶变换处理不了的高层框架结构复杂的非平稳信号.

2 有限元模型介绍

笔者以十二层的单跨框架结构为有限元数值模型, 假设各楼层质量集中于楼板标高处, 将其等效为十二质点的弹簧体系(见图 1). 模型的相关参数: 每层集中质量为 $m = 1\,200\text{ kg}$, 层高为 $h = 3\,000\text{ mm}$, 层间侧移刚度为 $k = 2\,000\text{ kN/m}$. 可以利用振型分解法求取结构的自振频率. 前三阶固有频率分别为 $\omega_1 = 0.816\,0\text{ Hz}$ 、 $\omega_2 = 2.435\,0\text{ Hz}$ 、 $\omega_3 = 4.015\,7\text{ Hz}$. 建立 18 个不同损伤程度指标下的结构模型, 对不同的损伤结构模型施加 El Centro 地震波, 得到结构的加速度响应.

El Centro 地震波是 1940 年 5 月 18 日美国 IMPERIAL 山谷地震(M7.1)在 El Centro

母小波公式如下^[16]:

$$w(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f t}. \quad (6)$$

结合式(4)~式(6)可得 S 变换公式如下:

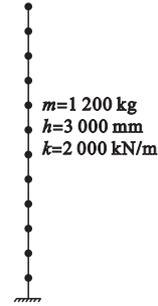


图 1 结构模型

Fig. 1 Structure model

台站记录的加速度时程, 它是广泛应用于结构试验及地震反应分析的经典地震记录. 其主要强震部分持续时间为 26 s 左右, 记录全部波形长为 54 s, 原始记录离散加速度时间间隔为 0.02 s, 其加速度时程曲线及傅里叶变换如图 2 和图 3 所示.

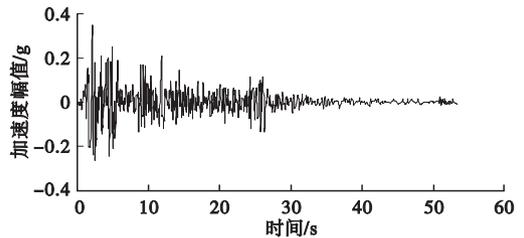


图 2 El Centro 波时程曲线

Fig. 2 The time history curve of El Centro wave

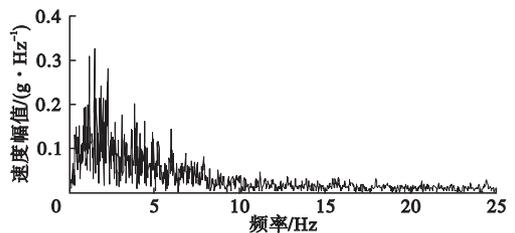


图 3 El Centro 波傅式变化曲线

Fig. 3 The Fourier curve of El Centro wave

3 高层框架结构损伤程度识别

为了研究结构的损伤程度指标与损伤参数之间的关系,采用控制变量法,固定结构的损伤位置为第四层,选取结构的损伤程度指标依次为 0, 0.05, 0.10, ..., 0.95, 建立了 18 个不同的损伤结构模型,并施加地震荷载,获取结构的加速度响应.对得到的加速度响应进行 S 变换,得到不同损伤指标 P_k 下结构的损伤参数 k'_f , 结果见表 1.

表 1 ST 识别的不同 P_k 下的 k'_f

Table 1 The k'_f under the different P_k by ST

| P_k | $k'_f/10^{-6}$ | P_k | $k'_f/10^{-6}$ |
|-------|----------------|-------|----------------|
| 0.05 | -1.096 | 0.50 | -1.874 |
| 0.10 | -1.104 | 0.55 | -2.045 |
| 0.15 | -1.125 | 0.60 | -2.150 |
| 0.20 | -1.157 | 0.65 | -2.220 |
| 0.25 | -1.235 | 0.70 | -2.797 |
| 0.30 | -1.393 | 0.75 | -2.807 |
| 0.35 | -1.504 | 0.80 | -2.802 |
| 0.40 | -1.594 | 0.85 | -2.431 |
| 0.45 | -1.712 | 0.90 | -3.648 |

从图 $4k'_f - P_k$ 曲线图中可以看出,当损伤程度指标在 0 ~ 0.65 时,ST 变换识别的损伤参数与损伤程度指标之间呈线性关系,当损伤程度指标大于 0.65 之后,呈非线性关系.

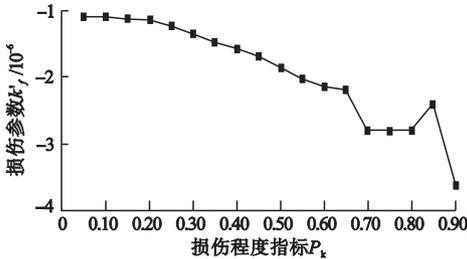


图 4 ST 变换分析的 $k'_f - P_k$

Fig. 4 The figure of $k'_f - P_k$ by ST

由上述规律知,倘若将 $k'_f - P_k$ 之间的关系公式化,便可以快速而准确的得到结构的损伤程度信息,结构损伤程度识别过程见图

5 ~ 图 7. 其中图 5 为求取损伤参数 k'_f 的过程,图 6 为建立损伤程度指标 P_k 与损伤参数 k'_f 之间的函数关系式,图 7 是利用当前损伤结构的损伤参数 k'_f 代入图 7 得到的函数关系式中,从而计算结构的损伤程度指标流程.

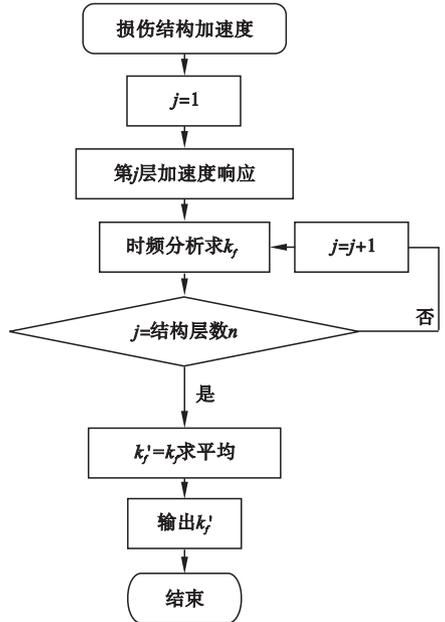


图 5 求 k'_f 流程

Fig. 5 Process of k'_f

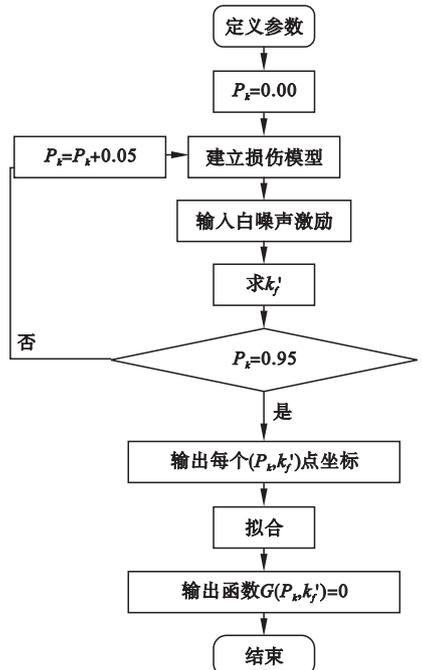


图 6 建立 $k'_f - P_k$ 函数流程

Fig. 6 Process of $k'_f - P_k$

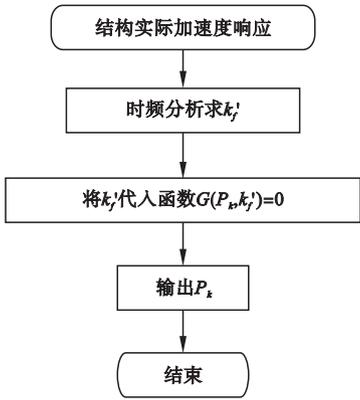


图 7 损伤程度识别流程

Fig. 7 Process of damage detection

4 高层框架结构损伤位置识别

为研究结构的损伤位置指标 P_i 与频率随时间变化的 k'_f 之间的关系, 固定结构的损伤程度指标为 0.5, 建立 12 个损伤模型, 其对应的损伤位置指标从 $1/12 \sim 12/12$. 同上一章相同, 对结构施加地震波得到结构的加速度响应, 利用 ST 变换对结构的加速度响应进行分析, 得到不同损伤位置下结构的频率随时间变化的 k'_f , 结果见表 2.

表 2 ST 识别的不同 P_i 下的 k'_f

Table 2 The k'_f under the different P_i by ST

| P_i | $k'_f/10^{-6}$ | P_i | $k'_f/10^{-6}$ |
|-------|----------------|-------|----------------|
| 1/12 | -2.21 | 7/12 | -1.62 |
| 2/12 | -2.18 | 8/12 | -1.51 |
| 3/12 | -2.12 | 9/12 | -1.28 |
| 4/12 | -2.05 | 10/12 | -1.12 |
| 5/12 | -1.92 | 11/12 | -1.09 |
| 6/12 | -1.76 | 12/12 | -1.10 |

从表 2 中可以看出, 随着损伤位置指标 P_i 的变大, ST 时频分析方法识别的损伤参数 k'_f 呈现出变大的趋势, 绘制 k'_f 与 P_i 的关系曲线如图 8 所示. 从图中可以看出, 随着损伤位置的升高, 损伤参数 k'_f 逐渐变大, 损伤参数 k'_f 越小, 结构损伤程度越严重, 这与损伤位置越高对结构的影响越小相吻合. 图中损伤参数 k'_f 与损伤位置指标 P_i 之间大致呈线性关系, 楼层的下半部分规律更明显.

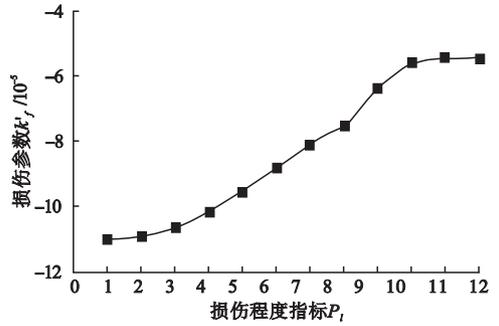


图 8 ST 变换分析的 $k'_f - P_i$

Fig. 8 The figure of $k'_f - P_i$ of ST

依据图 8 曲线便可以识别出结构的损伤位置信息. 具体识别流程图如图 9、图 10 所示. 图 9 为依据结构属性信息建立有限元模型, 通过数值模拟得到结构每层损伤参数与损伤位置指标之间的函数关系. 图 10 通过对传感器得到的结构加速度响应进行处理, 得到结构实际的损伤参数, 将其代入图 9 得到的公式中, 从而识别出结构的损伤位置信息.

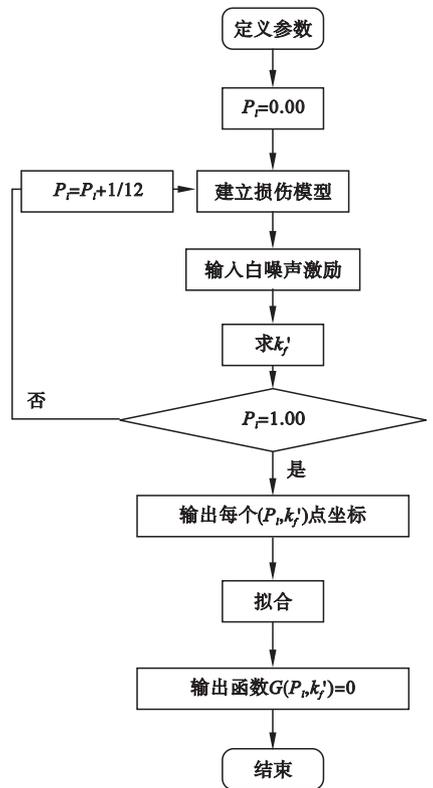


图 9 $k'_f - P_i$ 函数流程

Fig. 9 Process of $k'_f - P_i$

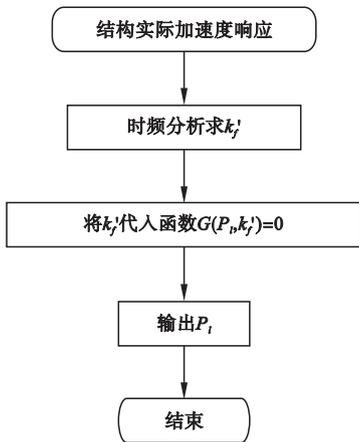


图10 损伤位置识别流程

Fig. 10 Process of damage detection

表3 有限元数值算例识别结果

Table 3 The detection of finite element

| $k'_f/10^{-6}$ | 损伤程度公式 | 损伤程度 | 损伤位置公式 | 损伤位置 |
|----------------|---|-------|--|-------|
| -2.045 | $P_k = -(k'_f \times 10^5 + 0.0758)/0.2480$ | 0.519 | $P_l = -(k_f \times 10^5 + 0.2694)/0.1878$ | 4.137 |

6 结论

(1) 当损伤位置确定时, 损伤程度指标与各层频率随时间变化的平均斜率大致呈线性关系。当损伤程度确定时, 损伤位置指标与各层频率随时间变化的平均斜率也大致呈线性关系。将上述两种关系函数化, 便可以依据损伤结构的加速度响应较为精确地识别结构的损伤程度以及损伤位置。

(2) 采用公式化的 ST 损伤识别方法对给定损伤位置的有限元数值算例进行损伤识别, 识别的损伤位置为第四层, 损伤程度指标为 50%。该识别结果与有限元数值算例假定的损伤信息相吻合, 验证了该损伤识别方法在有限元数值算例损伤识别中的有效性。

(3) 与传统的损伤识别方法相比, ST 识别方法将损伤指标与结构的损伤参数公式化, 从而精确地计算出结构的损伤指标; 传统的损伤识别方法均是通过损伤前后结构参数的变化识别结构的损伤严重程度和损伤位置, ST 只需要提供结构损伤后各层的加速度

5 验证损伤识别的方法

为了验证上述损伤识别方法的有效性, 建立结构在第四层损伤程度指标为 50% 时的有限元模型。分别建立了损伤位置固定在第四层时, 损伤参数与损伤程度指标之间的函数关系 $G(P_k, k'_f) = 0$; 和损伤程度固定为 50% 时, 损伤参数与损伤位置指标之间的函数关系 $G(P_k, k'_f) = 0$ 。函数关系式及损伤识别结果见表 3。从表 3 可以看出, 识别的损伤程度为 0.519, 损伤位置为第四层, 这与有限元假定的损伤信息相吻合。

数据便可以计算出结构的损伤指标。

参考文献

- [1] 徐灵基, 杨益新, 杨龙. 水下线谱噪声源识别的波束域时频分析方法研究[J]. 物理学报, 2015, 64(17): 189-199.
(XU Lingji, YANG Yixin, YANG Long. Research on beamfield time frequency analysis of underwater line spectrum noise source identification [J]. Physical journal, 2015, 64 (17): 189-199.)
- [2] 邵忍平, 曹精明, 李永龙. 基于 EMD 小波阈值去噪和时频分析的齿轮故障模式识别与诊断[J]. 振动与冲击, 2012, 31(8): 96-101.
(SHAO Renping, CAO Jingming, LI Yonglong. Gear fault pattern recognition and diagnosis based on EMD wavelet threshold denoising and time-frequency analysis [J]. Vibration and shock, 2012, 31 (8): 96-101.)
- [3] 宫宇新, 何满潮, 汪政红, 等. 岩石破坏声发射时频分析算法与瞬时频率前兆研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 787-799.
(GONG Yuxin, HE Manchao, WANG Zhenghong, et al. Acoustic emission frequency analysis of algorithm and instantaneous frequency of precursor research of rock mechanics and engineering [J]. Journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32 (4): 787-799.)
- [4] 李宏坤, 张学峰, 徐福健, 等. 基于时频分析的欠定信号盲分离与微弱特征提取[J]. 机械工程学报, 2014, 50(18): 14-22.

- (LI Hongkun, ZHANG Xuefeng, XU Fujian, et al. Blind separation and weak feature extraction of underdetermined signals based on time-frequency analysis[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2014, 50 (18): 14 - 22.)
- [5] 裴强, 吴爽, 薛志成. ANSYS 中黏弹性人工边界实现方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(2): 209 - 215.
(PEI Qiang, WU Shuang, XUE Zhicheng. ANSYS method for the realization of viscoelastic artificial boundary [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32 (2): 209 - 215.)
- [6] 裴强, 郭少霞, 崔迪. STFT 变换在高层框架结构地震损伤程度识别中的应用[J]. 地震研究, 2017, 40(2): 264 - 270.
(PEI Qiang, GUO Shaoxia, CUI Di. STFT transformation in the identification of seismic damage degree of high rise frame structure [J]. Earthquake research, 2017, 40 (2): 264 - 270.)
- [7] 王国新, 鲁建飞. 地震动输入的选取与结构响应研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(1): 15 - 22.
(WANG Guoxin, LU Jianfei. Selection and structural response [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28 (1): 15 - 22.)
- [8] GAO Jingwei, WANG Ruichen, ZHANG Rui. A novel fault diagnosis method for rotating machinery based on S transform and morphological pattern spectrum[J]. Journal of the brazilian society of mechanical sciences and engineering, 2016, 38 (6): 1575 - 1584.
- [9] 周奎, 郭耀. 基于 S 变换的结构损伤信号处理[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(4): 65 - 69.
(ZHOU Kui, GUO Yao. The structural damage signal based on S transform is used to deal with [J]. Journal of architectural science and engineering, 2013, 30 (4): 65 - 69.)
- [10] SALEH H, AOUNI A L. Application of time frequency analysis for automatic hidden corrosion detection in a multilayer aluminum structure using pulsed eddy current[J]. NDT and E international, 2012, 47: 70 - 79.
- [11] D'AMBROSIO S, FERRARI A, GALLEANI L. In-cylinder pressure-based direct techniques and time frequency analysis for combustion diagnostics in IC engines[J]. Energy conversion and management, 2015, 99: 299 - 312.
- [12] KAZUHIRO Y, NOBORU O, MAIKO K, et al. Estimation of parasympathetic nerve function during sleep in patients with obstructive sleep apnea by instantaneous time - frequency analysis[J]. sleep medicine, 2014, 15(1): 33 - 41.
- [13] SAU-LON J H, YANG Wenlong, LI Huajun. A robust high-resolution method for the time - frequency analysis of vortex-induced-vibration signals[J]. Journal of fluids and structures, 2014, 51: 255 - 280.
- [14] 向玲, 唐贵基, 胡爱军. 旋转机械非平稳振动信号的时频分析比较[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 42 - 45, 220.
(XIANG Ling, TANG Guiji, HU Aijun. Time frequency analysis of non-stationary vibration signals of rotating machinery compare [J]. Vibration and shock, 2010, 29(2): 42 - 45, 220.)
- [15] 孙海亮, 瞿艳阳, 袁静, 等. 非抽样多小波和 Hilbert-Huang 时频分析在行星减速器早期故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2013, 49 (3): 56 - 62.
(SUN Hailiang, ZI Yanyang, YUAN Jing, et al. Non sampling wavelet and time-frequency analysis of Hilbert-Huang reducer early fault diagnosis[J]. Journal of mechanical engineering on the planet, 2013, 49 (3): 56 - 62.)
- [16] 庞存锁, 刘磊, 单涛. 基于短时分数阶傅里叶变换的时频分析方法[J]. 电子学报, 2014, 42 (2): 347 - 352.
(PANG Cunsuo, LIU Lei, SHAN Tao. Time frequency analysis method based on short time fractional fourier transform[J]. Electronic journal, 2014, 42(2): 347 - 352.)
- [17] ISHIDA T, KANAGAWA T, KANAORI Y. Source distribution of acoustic emissions during an in-situ shear test; implications for an analog model of seismogenic faulting in an inhomogeneous rock mass [J]. Engineering geology, 2010, 110(3/4): 66 - 76.