

基于混沌激励与吸引子几何分析的连接损伤状态识别*

裘群海 徐超 吴斌

(西北工业大学航天学院,西安 710072)

摘要 工程结构在使用寿命周期内,各种环境因素会导致连接部位出现损伤,从而威胁结构的完整性和功能性,甚至诱发安全事故.本文研究了一种利用混沌激励与吸引子几何特征进行连接损伤状态识别的方法,采用混沌振动信号激励待测结构,利用采集到的加速度响应时间序列信号进行相空间重构,并构造了一种基于吸引子局部方差计算的特征参量用于小程度连接损伤的识别,并对特征参量进行了统计分析计算.设计了悬臂梁连接损伤识别实验,通过控制固定端螺栓的预紧力来模拟连接损伤,利用上述方法对连接的损伤状态进行了识别.结果表明,本文方法能够有效识别连接的损伤状态,所构造的特征参量随损伤程度改变单调变化,特征参量能以一定置信度较好地地区分不同的损伤水平.

关键词 连接结构, 损伤, 状态识别, 混沌, 吸引子

引言

工程结构在使用寿命周期内,受到各种环境因素,如温度、振动、冲击等作用,连接结构可能出现滑动、分离和松脱等损伤现象,从而严重影响结构的完整性、功能性和安全性.因此,发展有效的理论和方法来准确地识别和监测在役结构连接的损伤状态,对于保证结构安全、避免重大安全事故和降低事故危害性具有重要的实际意义和应用价值.

基于振动分析的健康监测方法是实现自主化、智能化和在线式结构损伤识别的极具潜力的方法,正日益受到广泛的关注^[1].这类方法的基本思想是利用外部振动激励下待测结构系统的动力响应信息,借助统计分析、信号处理、系统辨识或动力学理论提取出表征结构状态的特征参量,并将其与参考状态对比,从而识别出结构当前的损伤状态.结构基本动态特性,如固有频率、模态振型、振型斜率、模态阻尼比、动柔度、频响函数、功率谱等,因具有物理概念清晰、计算简单等优点,在结构损伤识别中被大量用作特征参量.但是,这些参量大多依赖于对结构的线性化模型假设,且参量本身主要表征的是结构整体的动态特性,因此存在对小损伤状态识别灵敏度低或对非线性结构系统适用性差的问题^[2].

一般的,含损伤结构本质上都是非线性系统,特别是在某些损伤状态下,动力响应具有明显的非线性特征.基于非线性动力学理论的结构损伤识别方法近年来被提出并获得快速发展^[3].按照非线性动力学理论,系统可在相空间中描述.此类方法的基本思想是:首先利用非线性时间序列分析方法和系统动力响应信息,重构出与待测结构系统等价的吸引子,进而研究吸引子的几何特性,提取出与结构状态一一对应的特征参量,从而实现对损伤状态的识别.系统吸引子中包含有丰富的信息,在不同的几何尺度上研究就可能获得对不同量级损伤敏感的特征参量.基于非线性动力系统理论的损伤识别方既可以适用于线性系统,也可以适用于非线性系统.获得包含足够系统信息和维数尽可能低的吸引子对成功识别结构损伤至关重要.混沌振动信号具有宽频带和低维度的特点,非常适合用作结构系统的激励信号.混沌振动信号激励下的结构系统类似于混沌信号的“滤波器”,不同的结构状态对应不同的滤波参数.在不同的参数下,滤波后的混沌信号将表现出不同的吸引子几何特征.Badii R.等人首先证明经滤波器作用后的混沌信号会出现维数增加的现象^[4].Nichols J. M.等将该思想推广并应用于结构损伤识别中,以滤波后吸引子维数的变化作为损伤特征参量^[5].

我们在前期研究工作中^[6,7],利用混沌振动激励和吸引子李亚谱诺夫维数作为特征参量研究了螺栓连接结构的结合面损伤识别问题,发现表征吸引子整体统计特性的维数指标在识别结合面小程度损伤时灵敏度较差.本文通过分析吸引子的局部几何特性,提取出一种对结合面小程度损伤敏感的特征参量;设计了螺栓紧固悬臂梁连接损伤识别实验,引入固定端的连接损伤,验证了特征参量的有效性.

1 基于混沌激励的结构损伤识别方法原理

对于一个待测结构与混沌输入 $F(x)$ 耦合的动力系统,其数学方程在状态空间中可表示为

$$\dot{x} = F(x), \quad \dot{z} = Az + Bx \quad (1)$$

式中 z 为一个 d 维的矢量,表示结构状态的响应(如速度、加速度等).系数矩阵 A 包含结构的质量、刚度、阻尼等系统特性.系数矩阵 B 为输入 x 的耦合矩阵,包含激励输入的方向和作用位置等信息.这里假设结构与激励的耦合是单向的,即结构响应 z 不会对激励输入产生反馈影响.根据状态空间理论,式(1)所描述的耦合动力系统可认为是一个受滤波作用的混沌系统,其中的结构就像是一个“滤波器”,而混沌激励输入将会受到结构的滤波作用.结构损伤状态的变化将导致滤波器参数的变化,进而使得滤波后的混沌信号表现出不同的动力学特性.在状态空间中,吸引子是系统动态特征的反映,通过研究信号吸引子的几何特征变化,就可能对结构不同的损伤状态进行识别.

2 基于吸引子局部几何分析的特征参量提取

较为直接的方式是选取吸引子统计不变量,例如李亚谱诺夫指数、关联维数等作为特征参量.但是,前期工作表明^[7],关联维数等统计不变量作为描述吸引子全局几何特性的特征量只能表征吸引子全局尺度上的特征变化,却无法表征由于小程度损伤引起的吸引子局部几何特性的变化.因此,为了提高特征参量对损伤的灵敏度,必须分析吸引子的局部几何结构,提取表征吸引子局部几何特性改变的新的特征参量.

本文通过对吸引子局部方差的计算构造了一种反映吸引子局部几何特性变化的特征参量,其具体计算步骤为:

步骤1:选取结构未损伤状态作为参考状态,对参考状态的响应时间序列,选取合适的延迟时间 T 和嵌入维数 m 重构出参考状态的吸引子,即

$$z(n) = (z(n), z(n+T), \dots, z(n+(m-1)T)) \quad (2)$$

步骤2:在重构的响应吸引子 $z(n)$ 上随机选取 N 个时间索引为 $P_n (n=1 \dots N)$ 基准点, z_{f, P_n} .

步骤3:构造与每个基准点范氏距离最近的 N_b 个时间索引为 $t_j (j=1 \dots N_b)$ 的邻近点组成的邻域.由于本文中所提取的特征参量表征的是吸引子局部几何特性的变化,应将时间相关的邻近点排除,故选择邻近点时不考虑距基准点一定时间窗长度 h 内的邻近点^[8].时间窗长度 h 可选为时间序列的自相关函数时间.从重构的响应吸引子中找到的第 n 个邻域可表示为

$$[z(t_j)_n] \quad t_j \leq (P_n - h) \text{ 或 } t_j \geq (P_n + h) \quad (3)$$

为方便起见,记为 Z_n .

步骤4:利用统计方法计算出每个邻域中 N_b 个邻近点所组成的样本的方差

$$V_n = \text{Var}(Z_n). \quad (4)$$

因为组成邻域的样本为多维数据,对于给定的邻域方差为各维分量方差之和

$$\text{Var}(Z_n) = \text{Var}\left(\sum_{i=1}^m p_i\right) = \sum_{i=1}^m \text{Var}(p_i) + 2 \sum_{i < j} \text{cov}(p_i, p_j) \quad (5)$$

式中 p_i 表示邻域中样本的某一维分量.

步骤5:将 N 个基准点的邻域方差求平均值即可获得平均吸引子局部方差

$$\Lambda = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_n \quad (6)$$

记为 ALAV (Averaged Local Attractor Variance), 将此值作为所要提取的表征连接损伤状态的特征参量值.

步骤6:利用步骤1中所用的延迟时间 T 和嵌入维数 m 值分别重构其他损伤状态下的响应吸引子,并利用步骤3中构造参考状态的 N 个邻域时所使用的邻近点时间索引 t_j 分别构造其他损伤状态下的响应吸引子上与参考状态对应的 N 个邻域,再按照步骤4、5 分别计算出不同损伤状态下响应吸引子的 ALAV.

比较不同损伤下的特征参量,就可能根据特征参量的变化实现对结构连接损伤状态的识别.

需要说明的是,上述计算方法中,要保证各损伤状态的结构动力响应信号是在同一混沌激励信号作用下以相同的采样频率采集获得的时间序列,以使得各组数据点之间在时间上是同步关系.在重构响应吸引子过程中,各组时间序列应选取相同的延迟时间 T 和嵌入维数 m .按照非线性动力学理论,嵌入维数的选取依据是保证重构吸引子在状态空间中完全打开,使重构的吸引子与原系统的动力学特性等价.然而,本文所构造的特征参量仅仅是利用了吸引子局部几何上的相对变化信息,故无需严格保证两者之间的动力学特性等价.为计算简单,嵌入维数 m 的选择可适当的取小些.延迟时间的选择原则是使重构的状态矢量的各维分量之间具有某种程度的独立但又不完全无关,以便它们能在重构的相空间中作为独立的坐标处理.由于耦合系统是非线性混沌系统,可采用平均互信息法计算获得合适的延迟时间以满足上面所述的要求^[8].

3 特征参量的统计分析

实际状态识别过程中,存在着测量噪声、环境变化等随机因素,使得由多组实验数据计算获得的特征参量往往具有一定的散布性.从统计的观点上看,在不同的损伤水平下,实验结果之间存在有差异,即使在损伤的同一水平下,实验结果之间也同样存在差异.因此,损伤状态的识别还要进一步确定特征参量的变化是由损伤水平的改变还是由随机干扰所引起的,以建立定量化的特征参量与损伤水平之间的关系.

这里,采用方差分析和假设检验的方法来研究特征参量的统计特性.若假设引起特征参量变化的唯一因素就是损伤水平的改变,且损伤水平的数目为 r ,第 k 个损伤水平下样本总体的均值为 μ_k ,则可以用单因素方差分析的方法建立如下的检验假设:

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_r \longleftrightarrow H_1: \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_r$ 中至少有两个不相等.

检验上述假设可以用 t 检验方法.在单因素方差分析中,如果接受 H_0 ,则表示因素的水平对实验结果无显著影响,即可认为结构没有发生损伤.如果拒绝 H_0 ,则表示不同损伤对特征参量有显著影响.此时,还需进一步对不同水平下样本总体的均值差 $\mu_i - \mu_k$ 作区间估计.如果实验结果服从正态

分布,可求得 $\mu_i - \mu_k$ 的置信概率为 $1 - \alpha$ 的置信区间为^[9]

$$\mu_i - \mu_k = (\bar{X}_i - \bar{X}_k) \pm t_{\alpha/2} \sqrt{\bar{Q}_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_k} \right)} \quad (7)$$

式中, \bar{X}_i, \bar{X}_k 为不同水平下样本总体均值; \bar{Q}_E 为样本总体方差的估计; n_i 和 n_k 为各水平下的样本数目; $t_{\alpha/2}$ 为给定显著性水平 α 下的 t 分布上侧分位数.

采用上述方差分析方法时,要注意两个隐含假设.一是因素的水平数目(这里为损伤状态)必须已知,这也是建立损伤状态区分的前提.连接的损伤状态可在实验室条件下通过严格控制预紧力矩的大小来模拟,因而可建立已知的离散损伤水平.二是式(7)是基于实验结果服从正态分布的条件建立的.实验中获得特征参量结果通常为小样本数据,无法准确计算样本的概率密度分布.这时,可依据中心极限定理,采用重采样、子采样等方法从样本集中随机抽取一定数目的样本组成子样本集,再将子样本集的均值作为新的样本,即可获得新的样本数据集合.之后,再利用高斯核密度估计方法就可计算出数据集的概率密度分布.下文的计算结果表明,样本是满足正态分布假设的.

4 实验设计和方法

为了验证上文所述的理论和方法,并将其应用于连接损伤状态的识别,设计了一套悬臂梁实验装置.实验装置示意如图1所示.悬臂梁材料为45号钢,尺寸为 $360 \times 10 \times 8 \text{mm}$,固定端连接部分长度为 80mm .振动激励电压信号选用 Lorenz 混沌系统的第一个状态分量值.于是,式(1)可展开为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= 16\varepsilon(x_2 - x_1), \\ \dot{x}_2 &= \varepsilon(40x_1 - x_2 + x_1x_3), \\ \dot{x}_3 &= \varepsilon(-4x_3 + x_1x_2), \\ \dot{z} &= Az + Bx \end{aligned} \quad (8)$$

式中,参数 ε 用于调整 Lorenz 吸引子振荡速度的快慢.激励信号采用四阶 Runge - Kutta 数值积分计算式(8)前三项获得,并由振动控制及数据采集系统中的 NI PCI - 6251 数采卡转换为模拟电压信号后经由功率放大器输出给激振器.激振器作用于悬臂梁距自由端 130mm 处,其输出的激振力由一个 CL - YD - 312 型压电式力传感器进行测量,测量信号先后经过阻抗交换器和恒流适调器进行信号

调理后送入振动控制及数据采集系统.混沌振动激励下结构的加速度响应由三个 CA-YD-1182 型压电式加速度传感器测量获得.实验中分别在悬臂梁自由端(ACH1),距离自由端 130mm(ACH2)以及 280mm(ACH3)处各安装一个加速度传感器.基于 Lab/Windows CVI 平台设计开发了本实验的振动控制及数据采集控制软件.

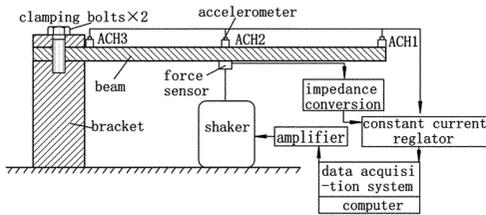


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setups

实验过程中通过同步改变悬臂梁固定端 2 颗螺栓预紧力矩的大小来模拟连接的损伤状态.取螺栓预紧力为额定值时为结构未损伤状态(参考状态),实验中通过力矩扳手给螺栓施加不同的力矩对螺栓预紧力进行调节.为保证螺栓预紧力的施加精度,每次实验前都重新对螺栓预紧力进行调节校准.本实验共选取五组典型连接状态,其中状态 1 为参考状态,其余四组作为损伤状态,如表 1 所示.

表 1 连接损伤状态

Table 1 Description of damage cases used

| Damage case | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------------|----|----|----|----|---|
| Clamping Moment/ $N \cdot m$ | 30 | 24 | 18 | 12 | 6 |

经比较,实验时选取参数 $\varepsilon = 10$,采样频率设为 1KHz,每通道采集长度为 10000 个数据点.对于每种连接损伤状态,在相同激励作用下重复实验各采集四组稳态条件下的加速度响应值,并依次编号.通过对加速度响应的相空间重构,计算分析五种典型状态下 ALAV 的变化.

5 实验结果与讨论

5.1 特征参数的计算

选取连接状态 1 的加速度响应时间序列为参考状态,利用平均互信息函数法计算获得参考状态响应时间序列的延迟时间 $T = 4$,由自相关函数计算获得时间窗长度 $h = 37$,为计算方便嵌入维数取 $m = 2$.利用上述参数,依据 3 中所述的特征参量提取方法分别对各个状态下 ACH1 的加速度响应时

间序列进行相空间重构,计算取 $N = 1000, N_b = 20$ 时各组加速度响应的特征参量 ALAV,并选取各组 ALAV 的平均值作为识别该状态的特征参量.为计算简便,在特征参量 ALAV 的计算过程中,只计算与参考状态实验组编号相同的加速度响应的特征参量 ALAV,故每种状态下可获得 4 组特征参量 ALAV.实验中混沌激励电压、激振力及加速度的典型时间响应历程曲线如图 2 所示.

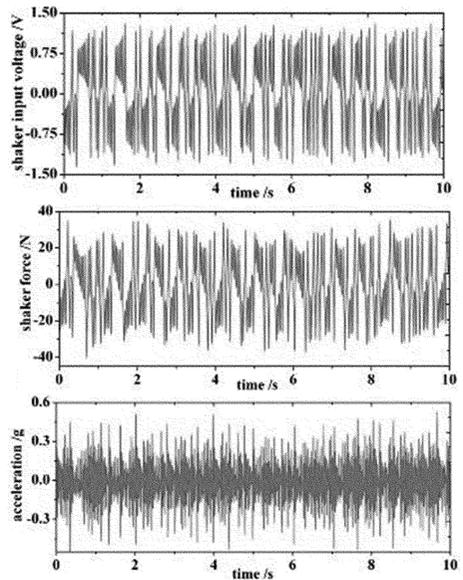


图2 参考状态下的典型时间历程曲线

Fig. 2 Representative time series in the baseline damage case

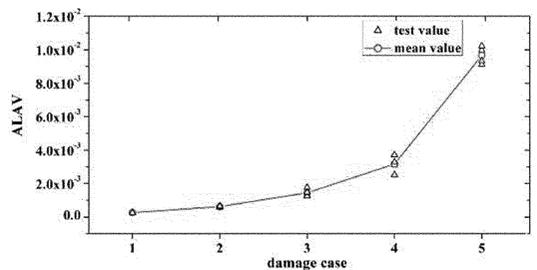


图3 不同实验状态下的 ALAV 变化曲线

Fig. 3 ALAV values at each damage case

不同状态下的 ALAV 变化曲线如图 3 所示.由图可知,以连接状态 1 为参考状态,其它四种状态的 ALAV 在相同激励作用下相对于参考状态都发生了明显的改变,即随着固定端螺栓预紧力的减小,加速度响应的 ALAV 单调增大,故特征参量 ALAV 能够表征并区分不同的损伤状态,可应用于连接状态的识别.

5.2 特征参数的统计分析

选取通道 ACH1 的加速度响应值作为特征参

量统计分析的原始计算数据. 为提高实验结果的样本数目, 在每种实验状态下采集的4组实验数据中添加 $N(0, 0.001)$ 的高斯白噪声. 因此每种实验状态下的实验数据共8组, 在每种损伤水平下可计算获得包含64个特征参量的原始数据集. 利用重采样对每种状态的原始数据集中随机抽取20个单元组成子样本集, 并将子样本集的均值作为新的特征参量值, 生成样本容量为1000的新数据集, 并以此代替原始数据集. 利用高斯核密度估计方法计算五种状态下的新数据集的概率密度分布函数, 如图4所示. 从图中可知, 各损伤水平下的特征参量数据集的概率密度分布呈现出明显的正态分布, 而且各分布曲线可以明显的区别.

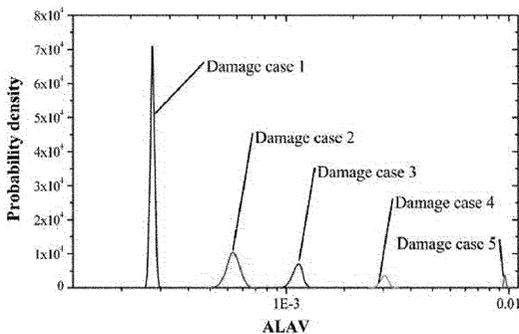


图4 各损伤状态下 ALAV 的概率密度分布估计曲线

Fig. 4 Probability density estimations for data at all damage cases

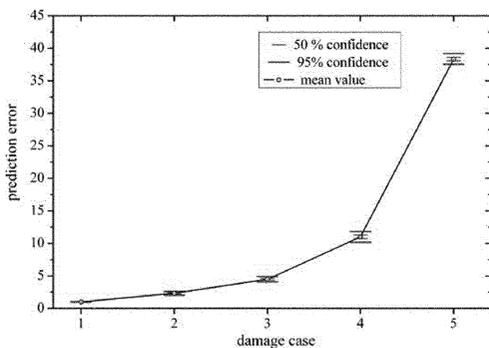


图5 50%和95%置信度下的ALAV随损伤状态变化曲线

Fig. 5 ALAV values at both 50% and 95% confidence cases

为定量分析各数据集分布之间的差异, 根据式(7)计算了五种损伤状态之间的10组置信度为95%的置信区间. 计算结果表明各损伤水平之间都存在着显著差异. 基于各损伤水平下的ALAV的概率密度分布数据, 计算获得置信度为50%和95%下的ALAV随损伤状态变化的曲线, 如图5所示. 从图中可以清楚地看到, 在50%和95%置信限之间, 各损伤状态下的ALAV相互之间都能有效的区

分, 且随着损伤程度的增加, 损伤状态的识别越容易. 特征参量的统计分析表明, 特征参量变化是损伤状态改变的结果, 特征参量能以一定置信度区分不同的损伤水平.

6 结论

本文研究了基于混沌振动激励和吸引子几何特性分析的连接损伤状态识别方法, 提取了基于吸引子局部方差的特征参量, 并设计了悬臂梁连接损伤状态识别实验进行了实验验证. 研究结果表明:

(1) 本文的方法和所构造的基于吸引子局部方差的特征参量, 可以表征吸引子的局部几何特征的变化, 能够有效地识别出连接的损伤状态.

(2) 特征参量变化是损伤状态改变的结果, 特征参量能以一定置信度区分不同的损伤水平.

进一步的研究可考虑应用反馈控制提高实验的精度, 并进一步研究吸引子的精细结构, 以构造出灵敏度更好的损伤特征量.

参 考 文 献

- 1 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 properties. *Journal of Dynamics and Control*, 2006, 4(1): 84~87 (in Chinese))
- 2 Todd M D, Nichols J M, Nichols C J, et al. An assessment of modal property effectiveness in detecting bolted joint degradation: theory and experiment. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 275: 1113~1126
- 3 Worden K, Farrar C R, Haywood J, et al. A review of nonlinear dynamics applications to structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 2008, 15: 540~567
- 4 Badii R, Broggi G, Dertghetti B, et al. Dimension increase in filtered chaotic signals. *Physical review letters*, 1988, 60(11): 979~982
- 5 Nichols J M, Virgin L N, Todd M D, et al. On the use of attractor dimension as a feature in structural health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2003, 17(6): 1305~1320
- 6 裘群海, 张振军, 徐超. 一种采用混沌振动信号激励识别连接状态的方法. 振动与冲击, 2010, 29(s): 13~15 (Qiu Q H, Zhang Z J, Xu C. A method for identification

- of joint damage using chaotic excitation. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(s): 13 ~ 15 (in Chinese))
- 7 Qunhai Qiu, Chao Xu, Bin Wu. Structural damage detection through chaotic interrogation and attractor analysis. *Advanced Materials Research*, 2011, 163-167: 2515 ~ 2520
- 8 Kantz H, Schreiber T. *Nonlinear time series analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002
- 9 师义民,徐伟,秦超英等. 数理统计(第三版). 北京:科学出版社,2009(Shi Y M, XU W, Qin C Y. *Mathematical Statistics*, Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese))

STRUCTURAL JOINT DAMAGE IDENTIFICATION BASED ON CHAOTIC EXCITATION AND ATTRACTOR GEOMETRIC PROPERTY *

Qiu Qunhai Xu Chao Wu Bin

(College of astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract By using chaotic excitation and attractor geometric property analysis, a method to identify the joint damage was presented. A chaotic excitation signal was used to interrogate the structure, and the measured structural response attractor was reconstructed in state space. A new feature based on the attractor local variance was extracted and used to identify the damage. An experimental cantilevered beam for the joint damage identification was designed, and the joint damage conditions were quantified by varying the fastener preload. The approach was applied to detect five different joint damage conditions. The results indicate that this approach can be used to identify the joint damage and the feature is monotonic varying with the damage condition changes.

Key words structural joint, damage, condition identification, chaos, attractor