

应用灰色关联度分析检测结构损伤的位置和程度^{*}薛松涛^{1,2} 钱宇音¹ 陈 镭¹ 王远功¹

(1 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092 2 近畿大学 理工学部建筑学科, 日本大阪)

摘 要 开发结构健康监测系统是结构损伤识别的一个重要课题。由于建筑结构具有很多不确定因素, 通过模式分析识别结构损伤的精度很难保证。提出一种灰色关联度分析应用于结构损伤检测的数值方法。通过测量结构的频率, 建立可能损伤频率和实际损伤频率的关联度的关联序, 并找出最优序列, 逐次迭代逼近来确定结构的损伤位置和损伤程度。对多种工况进行了框架结构模型的数值模拟。结果表明: 对于层间剪切结构, 通过测量结构频率变化运用本方法可以准确地确定结构的损伤位置和损伤程度。

关键词: 灰色关联度分析, 关联度, 关联序, 损伤参数识别, 框架结构

中图分类号: TU323.5 **文献标识码:** A

0 引 言

灰色系统理论是邓聚龙于 1982 年提出的, 目前已成功应用于工程控制、经济管理、生态系统、农业系统等领域。

在结构故障诊断领域, 一个结构可以看作一个系统, 结构的振动是系统的输出, 通过振动监测与分析可以推断结构的状态, 在该系统中, 影响结构振动的各因素之间及各因素与振动参数之间的关系, 各因素与振动能量、振动频率之间不存在明确的数学关系, 因此, 结构是一个灰色系统, 通过振动的监测与分析判断结构状态的过程, 是一个灰色系统白化的工程, 可以用灰色系统理论来研究。

近年来已有一些研究者把灰色系统理论运用于结构故障诊断^[1,2], 但这些研究都只能确定损伤位置, 很难确定损伤程度。本文提出把灰色关联度分析应用于剪切型结构损伤检测, 通过测量结构的频率, 建立可能损伤频率和实际损伤频率的关联度的关联序, 并找出最优序列, 采用逐次迭代逼近来确定结构的损伤位置和损伤程度。

1 灰色关联度分析

关联度是事物之间、因素之间关联性的“量度”, 它通过从随机性的时间序列中找到关联性, 从而为因素分析、预测的精度分析提供依据, 为决策提供基础, 为主要因素的判断提出方法途径。因此, 如何合理定义关联度及其计算方法具有重要的意义。

令 X 为灰关联因子集, $x_0 \in X$ 为参考序列, $x_i \in X$

为比较序列, $x_0(k), x_i(k)$ 分别为 x_0 与 x_i 的第 k 点的数, 若 $r(x_0(k), x_i(k))$ 为实数, 则

$$r(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r(x_0(k), x_i(k))$$

为 $r(x_0(k), x_i(k))$ 的平均值。当下述 4 点

- 1 规范性 $0 < r(x_0, x_i) \leq 1, \forall k, r(x_0, x_i) = 1 \Leftrightarrow x_0 = x_i, r(x_0, x_i) = 0 \Leftrightarrow x_0, x_i \in \Phi, \Phi$ 为空集
- 2 偶对称性 $x, y \in X, r(x, y) = r(y, x) \Leftrightarrow X = \{x, y\}$
- 3 整体性 $x_j, x_i \in X = \{x_\sigma \mid \sigma = 0, 1, \dots, n\}, n \geq 2,$
 $r(x_j, x_i) \neq r(x_j, x_j)$
- 4 接近性 $|x_0(k) - x_i(k)|$ 越小, $r(x_0(k), x_i(k))$ 越大满足后, 则称 $r(x_0, x_i)$ 为 x_i 对于 x_0 的灰关联度, 称 $r(x_0(k), x_i(k))$ 为 x_i 对于 x_0 的灰关联系数, 记为 $\xi_{0i}(k)$, 上述条件亦称为灰关联四公理^[3]。

绝对关联度^[4] 其基本思想为按照序列曲线变化态势的接近程度来计算关联度, 对于离散数据列, 所谓两曲线的接近程度, 是指两时间序列在对应时段上曲线的斜率的接近程度, 若两曲线在各时段上斜率相等或相差较小, 则二者的关联系数就大; 反之, 就小。其计算方法如下:

$$\zeta(k+1) = \frac{1}{1 + |\Delta y_0(k) - \Delta y_i(k)|}, \quad k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (1)$$

$$r(x_0, x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n \zeta(k) \quad (2)$$

其中 $\Delta y_0(k) = y_0(k+1) - y_0(k)$
 $\Delta y_i(k) = y_i(k+1) - y_i(k)$
 $y_i(k) = x_i(k) \delta_i(1), \quad i = 0, 1, 2, \dots, m$

* 国家杰出青年科学基金资助项目 (批准号: 59925820)

收稿日期: 2003-06-03

第一作者 薛松涛 男, 博士, 教授, 博导, 1963 年生

$$\Gamma = (r_{ij}) = \begin{bmatrix} r(x_0, x_{11}) & r(x_0, x_{12}) & \cdots & r(x_0, x_{1m}) \\ r(x_0, x_{21}) & r(x_0, x_{22}) & \cdots & r(x_0, x_{2m}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r(x_0, x_{n1}) & r(x_0, x_{n2}) & \cdots & r(x_0, x_{nm}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

在灰色关联度矩阵中取出最大值 $r(x_0, x_{st}) = \max(r_{ij})$ ，即其对应的频率 ω_A^s 是与实测频率 ω_i 关联度最大的，则从频率 ω_A^s 对应的刚度矩阵 K_A^s 中便可确定损伤位置(第 s 层)和损伤程度(损伤比例为 $t\delta$)。

对于多损伤结构，假设结构不同处的损伤时间是有先后，通过在线监测频率变化，把根据监测值得到的损伤刚度矩阵作为下一个监测值计算时的无损伤刚度矩阵，重新构成(9)的 K_p^{ij} ，然后重复以上步骤，这样即使损伤是发生在不同位置也可以检测出来。

3 数值模拟算例

为了验证应用灰色关联度分析检测结构损伤的

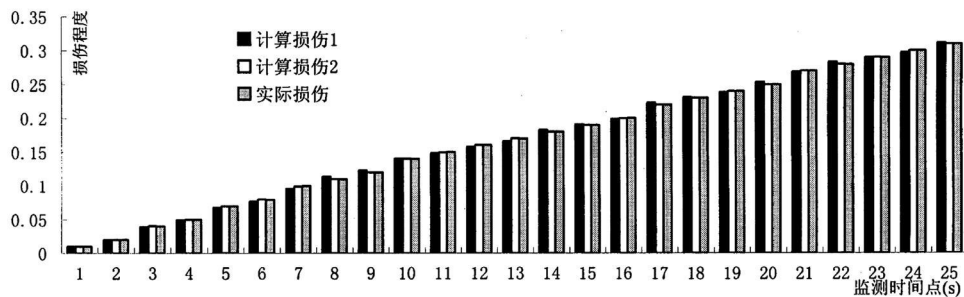


图 1 十二层框架结构模型单损伤识别结果与实际情况比较

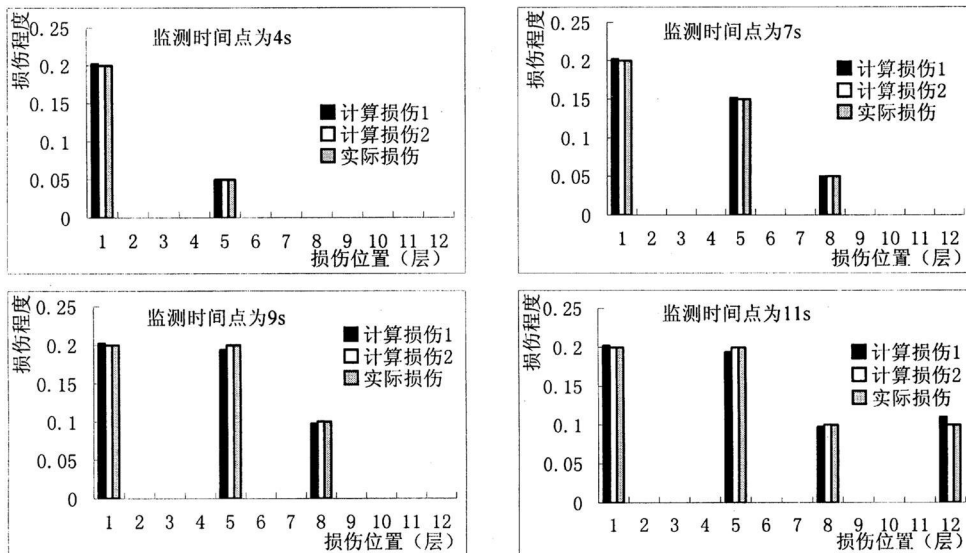


图 2 十二层框架结构模多损伤识别结果与实际情况比较

在上图中，“实际损伤”是指在不同监测点模拟损伤使得层刚度降低的实际降低率，“计算损伤 1”是指通过结构的频率应用灰色关联度分析检测结构损伤

方法，进行数值模拟分析。

设有一个 12 层的剪切结构，每一层的刚度和质量相同，层间刚度 $K = K_1 = K_2 = \cdots = K_{12} = 6 \times 10^{10} \text{ N/m}$ ，每一层的质量 $M = 9 \times 10^5 \text{ kg}$ 。

在模拟结构的损伤时，认为结构的质量没有变化，只有刚度发生变化。数值模拟时，考虑结构第 5 层(自下而上)单损伤和第 1、5、8、12 层多损伤的情况，损伤程度以 $\Delta K_i / K_i$ 比值的大小来表示。

在第 5 层单损伤的情况下，应用灰色关联分析进行检测的损伤识别结果如图 1 所示。

在下图中，“实际损伤”是指在 25 个监测点依次增加损伤使得层刚度降低的实际降低率，“计算损伤 1”是指通过结构的频率应用灰色关联度分析检测结构损伤的方法取 $\delta = 0.01$ 时计算所得的层刚度降低率，“计算损伤 2”是指取 $\delta = 0.001$ 。

在第 1、5、8、12 层多损伤的情况下，应用灰色关联度分析进行检测，其中四个监测时间点的损伤识别结果如图 2 所示。

的方法 $\delta = 0.01$ 时计算所得的层刚度降低率，“计算损伤 2”是指取 $\delta = 0.001$ 。

从图 1 的比较结果可以看出，在结构单损伤的情况

下,通过实测结构的频率,应用灰色关联度分析检测结构损伤的方法,可以准确确定结构损伤发生的位置;同时,给出结构损伤的程度。在取 $\delta=0.01$ 时,25个监测点的最大误差为 4.105 3%,平均误差为 1.347 1%;在取 $\delta=0.001$ 时,最大误差为 1.205 2%,平均误差为 0.181 9%。 δ 取得越小,损伤识别精度越高,但计算量也随之增大。

从图 2 的比较结果可以看出,在结构多损伤的情况下,通过在线监测频率变化,应用灰色关联度分析检测结构损伤的方法,可以准确确定结构损伤发生的位置;同时,给出结构损伤的程度。在监测点 a 时是第一和第五层有损伤,在监测点 b, c 时第八层也有了损伤,在监测点 d 时增加了第十层的损伤。随着损伤位置的增多和损伤程度的加大,该检测方法依然有效。

4 结 论

1) 只需要测得结构的频率,并不要求振型等其它模态参数,便可以对此类结构是否损伤做出判断,

不仅可以判断结构是否有损伤,而且可以判断损伤的位置以及损伤的程度。

2) 对于单损伤结构,可以准确识别结构损伤的位置和损伤程度,而且精度随着所取参数 δ 的变小而提高,但计算量也随之增大。

3) 对于多损伤结构,通过在线监测频率变化,应用灰色关联度分析检测结构损伤的方法,可以把发生在不同位置的损伤都检测出来。

参 考 文 献

- 1 耿立恩,潘旭峰,李晓雷,祝嘉光.灰色系统理论在机械故障诊断决策中的应用.北京理工大学学报,1997 17(2)
- 2 刘永宏,徐敏.灰色 AB_0 型关联分析故障诊断方法与模糊诊断方法的比较.上海交通大学学报,1992 26(6)
- 3 邓聚龙.灰色系统基本方法.武汉:华中理工大学出版社,1987
- 4 梅振国.灰色绝对关联度及其计算方法.系统工程,1992 10(5)
- 5 张德文,李应明.一种普遍性元素型修正法——排列方程法.强度与环境,1989.6

《振动与冲击》第五任编辑委员会

名 誉 主 任: 胡海昌 黄文虎 陆鑫森

主 任: 陈 进

副 主 任: 恽伟君 郑兆昌 王文亮 朱继梅

编 委: 丁 康 于德介 王建华 史铁林 朱光汉 邢誉峰 庄表中

庄国华 刘 杰 李玉龙 李春祥 杨炳渊 杨绍普 陈德成

陈树辉 陈力奋 吴兴世 吴 晓 沈其栋 佟德纯 应怀樵

毕勤胜 邵亚声 张 文 张令弥 张 雷 张泉南 张相庭

金咸定 周建平 周 岱 孟 光 宓为建 林宝阳 欧进萍

郑万泔 郑效忠 胡 敬 赵 威 姚起杭 骆 剑 顾 明

洪钟瑜 徐立义 徐少华 奚德昌 高金吉 郭营川 郭 欣

崔建忠 黄迪南 屠良尧 章永强 傅志方 蒋伟康 翟婉明

特 约 编 委: 刘少瑜 张志成

编 辑 部:

主 编: 恽伟君

副 主 编: 朱继梅

编辑部成员: 赵伯林 陈伟梅 张文嘉 郑克平

APPLICATION OF GREY INCIDENCE ANALYSIS TO DETERMINE DEGREE AND LOCATION OF STRUCTURAL DAMAGE

Xue Songtao^{1,2} *Qian Yuyin*¹ *Chen Rong*¹ *Wang Yuangong*¹

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction Tongji University Shanghai, 200092

2. Department of Architecture School of Science and Engineering Kinki University Osaka Japan)

Abstract Development of health monitoring system has become an important task for structure damage identification. Since many indeterminate factors exist in the process of building structure damage detection, the method merely using modal analysis to identify damage is of poor precision. A method applying the grey incidence analysis to structural damage identification is presented, which uses only frequency measurement to establish the order of grey incidence between the measured frequency and the frequency of possible damage, and to find out the optimum sequence, then by successive iteration to determine the degree and location of structure damage. Numerical simulations for frame structures are carried out in which many different cases are considered, including single-damage and multi-damage with different degrees and locations. The results show that for shear buildings, damage degree and location can be clearly determined.

Key words grey incidence analysis, degree of grey incidence, incidence order, damage parameter identification, frame structure

ROLLER BEARING FAULT DIAGNOSIS BASED ON HILBERT MARGINAL SPECTRUM

Yang Yu *Yu Dejie* *Cheng Junsheng*

(College of Mechanical and Automotive Engineering Hunan University, Changsha 410082)

Abstract Hilbert-Huang Transform (HHT) is a new and self-adaptive signal processing method which is suitable for non-linear and non-stationary process. By applying HHT to the signal, the Hilbert marginal spectrum which can reflect accurately the signal amplitude changes with the frequency. Aiming at the non-stationary characteristics of bearing faulty signals, a roller bearing fault diagnosis method based on Hilbert marginal spectrum is put forward. The feature energy function based on Hilbert marginal spectrum is introduced, which is served as the fault feature vectors of roller bearings. Meanwhile, M-distance criterion function is established to identify the fault pattern. The analysis results from roller bearing signals with inner-race or out-race faults show that the diagnosis approach could extract fault characteristics effectively.

Key words roller bearing, Hilbert marginal spectrum, feature energy function, distance criterion function, fault characteristic

NUMERICAL SIMULATION OF ANTI-SHOCK BEHAVIOR OF SHIP CONSIDERING THE FLUID-STRUCTURE INTERACTION IN FEM

*Wang Yu*¹ *Zhou Pu*^{2,3} *Liu Dongyue*¹ *Hua Hongxin*² *Shen Rongyin*²

(1. Navy research center Beijing 100073; 2. State Key Laboratory of Vibration,

Shock & Noise Shanghai Jiao Tong University Shanghai 200030; 3. 711 institute Shanghai 200011)

Abstract The 3-dimension model of ship in water is built by virtue of FEA software ANSYS. The numerical analysis of anti-shock behavior of ship is carried out considering fluid-structure interaction and the result proves the possibility of numerical simulation for complex structure with fluid-structure interaction by FEA software ANSYS.