

文章编号:1005-0523(2021)04-0008-10



温度变化下基于固有频率聚类分析的空间网格结构损伤诊断

韩庆华^{1,2,3}, 马乾³, 刘名³, 徐杰^{1,2,3}

(1. 天津大学中国地震局地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350; 3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350)

摘要:固有频率是损伤诊断方法提取的主要动力特征之一,其不仅与结构本身刚度有关,还极易受温度等环境因素的影响。提出了一种环境温度变化下基于固有频率聚类分析的空间网格结构损伤诊断方法。首先对结构固有频率的环境温度影响原理进行了公式推导,据此以一网架结构为研究对象,模拟了温度变化与损伤共同作用下的固有频率数据;进而对固有频率进行主成分分析(PCA),提取主成分重构残差进行模糊c均值聚类(FCM),实现结构损伤诊断。研究表明:环境温度通过引起热变形、改变材料特性和产生温度内力对固有频率产生影响;固有频率随温度变化的日常波动,将直接影响损伤的准确诊断,通过PCA-FCM聚类分析可在损伤诊断过程有效排除环境温度因素干扰,在健康基线未知情况下对损伤是否发生进行判别,并能对损伤程度进行准确识别。

关键词:固有频率;温度影响;空间网格结构;损伤诊断;主成分分析;模糊C均值聚类

中图分类号:TU311.4

文献标志码:A

本文引用格式:韩庆华,马乾,刘名,等.温度变化下基于固有频率聚类分析的空间网格结构损伤诊断[J].华东交通大学学报,2021,38(4):8-17.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2021.04.003

Damage Diagnosis of Space Grid Structure Based on Natural Frequency Clustering Analysis under Varying Temperature Effects

Han Qinghua^{1,2,3}, Ma Qian³, Liu Ming³, Xu Jie^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience of China Earthquake Administration, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of the Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Natural frequency is one of the main dynamic characteristics of damage diagnosis methods, which is not only related to the stiffness change of the structure itself, but also easily affected by environmental factors such as temperature. A natural frequency clustering analysis method is proposed, which is used for damage diagnosis of space grid structure under environmental changes. First, the influence of the natural frequency of the structure on the environmental temperature is derived. based on this analysis, a grid is used as the research object to simulate the natural frequency data under the condition of temperature changes and damage; then the principal component analysis (PCA) of the natural frequency is developed, and the structural damage diagnosis was realized by using fuzzy c-mean(FCM) clustering based on principal component reconstruction residuals. The research results show that the ambient temperature affects the natural frequency by causing thermal deformation,

收稿日期:2021-05-27

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U1935208);高等学校学科创新引智计划资助项目(1111110111);B20039(<http://www.cnki.net>)

作者简介:韩庆华(1971—),男,教授,博士,研究方向为大型公共建筑防灾减灾及智能监测。E-mail:qhhan@tju.edu.cn。

通信作者:徐杰(1982—),男,副教授,博士,研究方向为结构智能监测。E-mail:jxu@tju.edu.cn。

changing the material properties and generating temperature internal forces; the daily fluctuation of the natural frequency with temperature will directly affect the accuracy of damage diagnosis, and the PCA-FCM clustering can be used in the damage diagnosis process which can effectively eliminate the interference of environmental temperature factors, judge whether the damage occurs when the health baseline is unknown, and accurately judge the degree of damage.

Key words: natural frequency; temperature effect; space grid structure; damage diagnosis; PCA; FCM

Citation format: HAN Q H, MA Q, LIU M, et al. Damage diagnosis of space grid structure based on natural frequency clustering analysis under varying temperature effects[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(4): 8-17.

基于振动数据的模态分析是目前应用最为广泛的结构健康监测方法之一^[1], 由于结构损伤直接表现为结构特征参数(质量、刚度等)的改变, 而模态参数与结构特征参数直接相关, 可利用模态参数构造结构损伤诊断指标, 对结构进行损伤探查与安全预警^[2]。相对于振型和阻尼等模态参数, 结构固有频率测量更加容易, 且在监测时测点的位置相对独立, 需要传感器数量少, 是最为常用的损伤诊断指标之一。然而, 固有频率不仅与结构本身的属性有关, 还会受到温度等环境因素的影响, 固有频率的环境敏感性将直接导致损伤诊断结果的准确性^[3]。Cornwell 等^[4]对美国新墨西哥州的 I-40 桥进行了振动实验, 发现温度对该结构的固有频率影响相当显著, 其中 1 阶固有频率在 1 昼夜内发生了近 5% 的变化; Ni 等^[5]对香港汀九大桥的长期监测表明, 当温度在 3~53 °C 波动时, 结构第 1 阶与第 8 阶固有频率分别发生了 6.7% 和 1.7% 变化; Regni 等^[6]对一座 10 层的钢筋混凝土框架建筑长达 5 个月的观测也表明, 温度变化对结构前 3 阶固有频率均有明显的影响。近年来, 研究学者就环境温度变化下的基于损伤诊断方法进行了大量研究^[7-9], 但多数方法假设结构健康状态已知, 从而根据健康基线对结构未来服役状态进行判别, 当监测数据同时存在健康与损伤数据时, 则无法准确判别损伤是否已经发生。

网架等空间网格结构在长期服役过程中, 受太阳辐射、昼夜循环和季节更替等环境因素的综合作用, 结构的温度效应不容忽视^[10]。在损伤识别过程中, 如果不考虑温度等环境条件的变化, 可能导致假阳性或假阴性的识别结果。但相比于桥梁结构, 目前对空间网格结构固有频率的温度影响研究相对较少, 此外, 对于空间网格结构温度影响下的损

伤诊断方法讨论更少报导。本文选取固有频率为损伤诊断指标, 阐明温度变化对固有频率影响的机理; 进而以某网架结构为例, 模拟温度变化和结构损伤共同作用下的固有频率长期监测数据, 通过对固有频率数据的主成分重构残差进行 FCM 聚类分析, 实现了结构的准确诊断, 研究结论可为空间网格结构的长期监测与损伤诊断提供参考。

1 温度变化对固有频率的影响机理

结构损伤诊断的目的是希望对结构监测响应的分析, 识别结构早期发生的局部构件损伤, 从而对结构进行保养和维护。虽然结构损伤与温度变化对固有频率的影响存在其各自特点, 但在结构的长期监测过程中, 温度变化对固有频率影响仍有可能掩盖局部损伤引起的变化, 从而影响损伤的准确诊断。温度变化对结构固有频率的影响主要来自几方面: 首先, 由于材料的热胀冷缩效应, 温度变化会导致结构发生变形, 改变结构的长度、横截面积、截面惯性矩等参数; 其次, 温度变化会导致材料特性发生改变; 另外, 由于支承等边界条件的存在, 结构的热变形会受到约束, 从而产生温度内力, 影响结构的动力特性; 此外, 由于温度内力与边界条件直接相关, 温度对结构支座刚度等约束条件的改变, 也会间接影响结构的自振特性, 例如环境温度过高导致伸缩缝过度膨胀而变形受阻等。下面用如图 1 所示 Euler-Bernoulli 梁模型为例, 说明温度对固有频率的影响原理。

梁的右端受轴向弹簧约束, 弹簧刚度 k , 假设结构受均匀升温 δT 作用, 结构的温度内力 N 可表示为

$$N = \frac{1}{\frac{1}{kL} + \frac{1}{EA}} \cdot \delta T \quad (1)$$

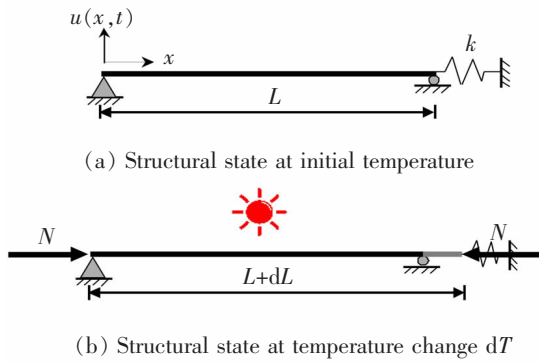


图1 Euler-Bernoulli 梁受温度作用示意图

Fig.1 Euler-Bernoulli beam subjected to temperature changes diagram

其中 L 为梁长度, α 为材料热膨胀系数。根据欧拉梁理论, 轴向荷载作用下, 结构的自由振动方程可表示为^[11]

$$EI \frac{\partial u^4(x,t)}{\partial x^4} + N \frac{\partial u^2(x,t)}{\partial x^2} - m \frac{\partial u^2(x,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

式中: $u(x,t)$ 表示梁在 t 时刻水平方向坐标 x 处的横向振动位移; I 为截面惯性矩; m 为结构线密度; E 为材料的弹性模量, 温度变化时材料的弹性模量可表示为

$$E(T) = E \cdot \left[1 + \frac{\delta E}{E} \right] = E \cdot [1 + \theta_E \cdot \delta T] \quad (3)$$

可得梁第 n 阶无阻尼弯曲振动频率为

$$f_n = \frac{(n\pi)^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{m} \left(1 + \frac{NL^2}{n^2\pi^2 EI} \right)}, n=1, 2, \dots, \infty \quad (4)$$

进行变分可得

$$\frac{\delta f_n}{f_n} = \frac{1}{2} [(1-2\Delta_1) \cdot \alpha + (1-\Delta_1) \cdot \theta_E + \Delta_1 \cdot \theta_N] \delta T \quad (5)$$

其中

$$\Delta_1 = \frac{\frac{NL^2}{n^2\pi^2 EI}}{1 + \frac{NL^2}{n^2\pi^2 EI}} \quad (6)$$

$$\frac{\delta L}{L} = \alpha \cdot \delta T; \frac{\delta I}{I} = 4\alpha \cdot \delta T; \frac{\delta m}{m} = -\alpha \cdot \delta T; \frac{\delta N}{N} = \theta_N \cdot \delta T \quad (7)$$

可以明显看出, 环境温度通过引起结构几何变形(α)、改变材料特性(θ_E)和产生温度内力(θ_N)三方面对固有频率产生影响, 进而影响损伤的准确诊断。

2 方法基本原理

2.1 主成分分析

主成分分析(PCA)是一种多元统计分析方法,

其基本思想是降维, 即在保证原始数据信息损失较少的前提下, 将高维相关变量转化为低维不相关变量, 新变量保留了原变量的大部分信息, 这些信息被称为原变量的主成分^[12]。PCA 剔除或减小响应特征中温度等环境因素影响的基本原理二维示意如图 2 所示^[13]。对原始数据 Y 的协方差矩阵做奇异值分解得到主成分矩阵 U

$$YY^T = U\Sigma^2U^T \quad (8)$$

式中: U 为正交矩阵, 矩阵中第 i 个列向量定义为 Y 的第 i 个主成分; Σ 为奇异值矩阵。

假设环境温度是影响结构响应特征变化的主要因素, 即结构响应的一阶主成分(PC1)是环境温度引起的。为了将原始数据 Y 投射到环境因素特征空间中, 利用主成分矩阵 U 的第一列建立转换矩阵 P_1 , 将原矩阵 Y 投影到一阶主成分转换矩阵 P_1 上, 得到环境因子特征空间

$$\hat{X} = P_1 Y \quad (9)$$

进而将新数据 \hat{X} 重新映射到原始数据空间

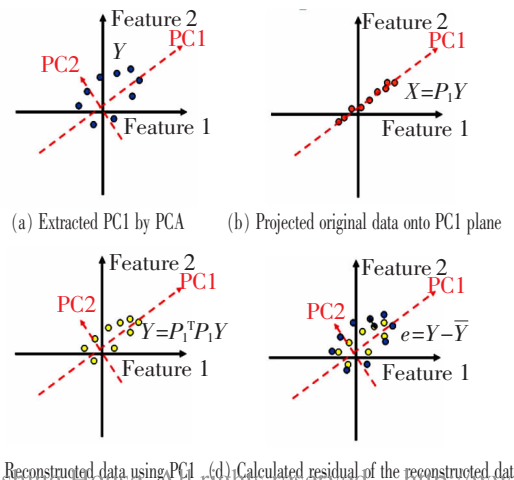
$$\hat{Y} = P_1^T P_1 Y \quad (10)$$

重构数据与原始数据的残差 e 表示为

$$e = Y - \hat{Y} \quad (11)$$

主成分重构残差 e 包括了剔除温度以外的其它影响因素的信息。

将固有频率 f 作为损伤诊断的结构响应特征, 为了排除环境因素干扰, 利用固有频率的一阶主成分重构残差进行聚类分析, 从而有效地对损伤进行诊断。



(c) Reconstructed data using PC1 (d) Calculated residual of the reconstructed data

图2 主成分分析原理的二维示意图

Fig.2 A 2D diagram of the PCA

2.2 模糊 c 均值聚类

模糊控制是自动控制中常用的方法之一,其原理是模糊数学和模糊逻辑。模糊控制通过引入隶属度函数,定义[0,1]之间的实数来描述中间状态。模糊 c 均值聚类(FCM)聚类是一种基于模糊理论的聚类方法,其允许每个数据点以不同隶属度属于多个类。FCM 聚类的最小化目标函数可表示为^[14]

$$J_m = \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^N \mu_{ij}^m \|x_i - c_j\|^2 \quad 1 < m < \infty \quad (12)$$

式中: D 为样本点数量; N 为聚类数量; x_i 为第 i 个数据点,其可具有 d 个维度的特征; c_j 为第 j 个聚类中心,相应的也可以具有 d 个维度; μ_{ij} 为 x_i 属于 c_j 类的隶属度; m 为控制模糊重叠度的模糊划分矩阵系数。FCM 的聚类计算过程见图 3。

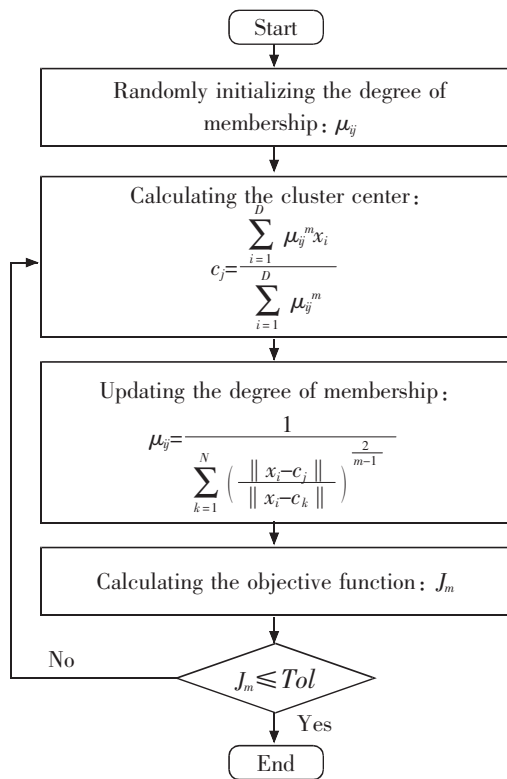


图 3 模糊 c 均值聚类计算过程

Fig.3 Clustering calculation process of FCM

3 空间网架损伤诊断数值模拟

3.1 结构简介

以天津市某中学活动中心的楼面网架结构为例,建立有限元数值模型,通过模拟损伤与温度变化,说明本文提出的环境温度变化下基于固有频率

PCA-FCM 聚类分析的空间网格结构损伤诊断的过程,如图 4~图 5 所示。该楼面的结构形式为正方四角锥组合网架,平面尺寸为 37.2 m×27.6 m,网格数为 14×10,网格高度 1.65 m。钢材型号均采用 Q235B 钢,主要钢构件型号如表 1 所示。网架下弦短跨方向设预应力拉索;上弦设置带肋混凝土板,板厚 7 cm,肋梁高 13 cm,混凝土强度 C40。采用“脉动法”对该网架的固有频率、阻尼比等动力参数进行现场监测^[15],测试所用的主要测量仪器如图 6 所示^[16]。最终测试得到该结构的前 4 阶固有频率分别为 3.320,6.836,9.767 Hz 和 11.330 Hz。

表 1 主要构件尺寸

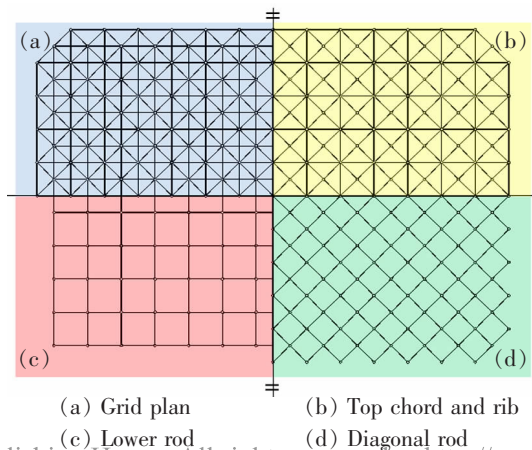
Tab.1 Component type and dimensions

Component type	Dimensions
Prestressed anchorage	Φ12
Lower rod	Φ159×10
Diagonal rod	Φ114×5
Welding ball of lower chord	D350×14
Welding ball of upper chord	D500×10



图 4 空间网架的实际结构图

Fig.4 Site map of the space grid structure



(a) Grid plan (b) Top chord and rib
(c) Lower rod (d) Diagonal rod

图 5 网架结构平面布置示意图
Fig.5 Schematic diagram of the grid structure

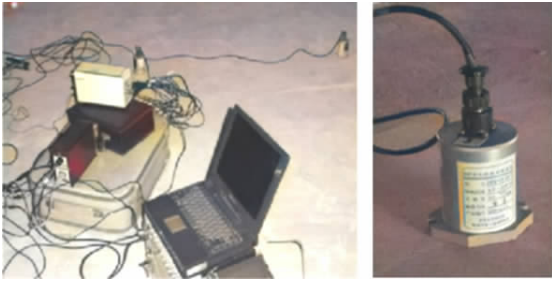


图6 现场动力测试照片

Fig.6 Photos of field vibration tests

3.2 结构有限元模型建立与修正

根据原始设计资料,采用 ANSYS 有限元软件建立该结构的初始有限元模型。混凝土肋梁采用 BEAM188 单元模拟,混凝土楼板采用 SHELL181 单元模拟,下弦杆和腹杆采用 LINK8 单元模拟,钢索采用 LINK180 单元模拟;屋面找平层通过集中质量方式加在上弦节点,材料参数设置如表 2 所示,约束采用四边三向铰接。采用随机子空间方法进行模态计算,得到结构的前 4 阶模态频率与振型(仅绘制下弦节点)如图 7 所示。初始有限元模型参数与实际结构的物理参数存在误差,导致有限元模型计算的结构模态特征与实测模态特征存在一定差异,为使二者之间的差异最小化,对初始有限元模型进行进一步修正。修正过程采用遗传算法^[7]迭代调整上弦节点附加节点质量、钢材弹性模量、混凝土弹性模量和混凝土密度 4 个有限元模型参数,优化的目标函数如式(13)所示

$$\min F(\theta) = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{f_i^C - f_i^M}{f_i^M} \right)^2 = \sum_{i=1}^4 \left[\frac{F_i(\theta) - f_i^M}{f_i^M} \right]^2 \quad (13)$$

$$\text{s.t. } lb_{\theta} = [1.20, 0.90, 0.85, 0.85]; ub_{\theta} = [1.40, 1.00, 1.05, 1.15]$$

式中: θ 为待修正的有限元模型参数系数; f_i^C 和 f_i^M 分别为第*i*阶有限元模型计算结构模态频率与监测模态频率; $F_i(\theta)$ 为关于 θ 的隐函数; lb_{θ} 和 ub_{θ} 分别为 θ 的下限与上限向量。修正后的前 4 阶模态频率计算值与实测值对比如图 8 所示,可以看出,修正后的计算频率与实测频率非常接近,满足工程分析需要。

表 2 初始有限元模型的材料参数

Tab.2 Material parameters of the initial FEM

Parameter type	Steel	Concrete	Steel cable
Young's modulus E/MPa	2.06×10^5	3.25×10^4	1.5×10^5
Poisson's ratio ν	0.3	0.2	0.3
Density $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7 850	2 400	7 850

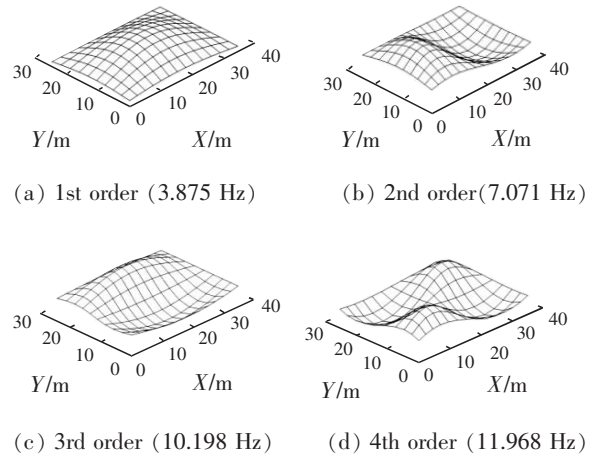


图7 修正前的前 4 阶模态频率与振型

Fig.7 The first 4 modes before being updated

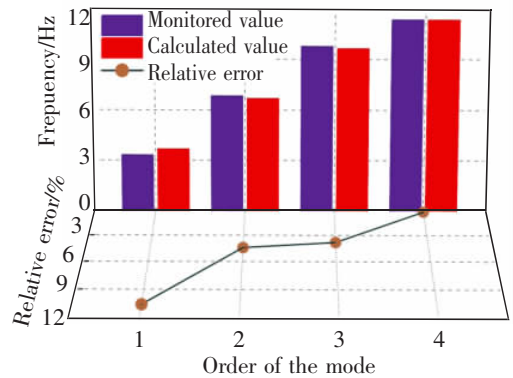


图8 修正后的频率计算值与监测值对比

Fig.8 Comparison of calculated frequency values (after being updated) and monitored values

3.3 温度与损伤作用下的监测数据模拟

3.3.1 温度变化对固有频率影响模拟

基于修正后的有限元模型,模拟温度变化对网架结构固有频率的影响。由第 1 节分析可知,环境温度主要通过产生几何变形、改变材料特性和产生温度内力 3 方面对固有频率产生影响,通过以下设置模拟上述影响:设置混凝土和钢材的线膨胀系数均为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,以此模拟材料的热胀冷缩的热变形效应;对于温度引起的材料特性的变化,尽管有许多关于材料在高温下(通常是由火灾产生)行为的研究,但鲜有关于环境温度范围内弹性模量变化的研究,本文采用弹性模量与温度之间的关系如图 9 所示;对于温度内力,假设钢构件两端固结约束时,温度每变化 1°C 将产生约 2.50 MPa 的轴向应力,对于支座附近等受约束较强的构件,

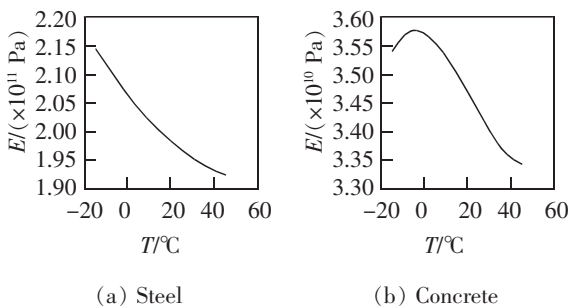


图 9 弹性模量与温度之间的关系

Fig.9 The relation Ship between the Young's modulus and temperature

温度变化将产生显著的结构内力,在有限元模拟中应加以考虑,通过先施加温度预应力,再进行模态分析的方式考虑温度内力对结构模态参数的影响。

3.3.2 温度与损伤工况设置

模拟监测期为 2 年的环境温度下的固有频率变化,温度数据来自天津市 2019—2020 年逐小时环境温度数据,共 17 520 组。在模拟中为了更加接近实际情况,考虑到在监测过程中日间结构温度可能会受到日照等非均匀温度场影响,选取每天夜晚 0 点的假设频率监测数据作为测试结果,对温度数据逐天取值,共 730 组用于分析,温度范围为 -11~29 °C。为了对比结构损伤前后各种参数的变化,假设结构损伤发生于监测期 2019 年下半年,之后损伤以半年为间隔逐步趋于严重,即将 2019/1/1~2019/6/30 采集到的样本作为健康状态数据(HC),2019/7/1~2020/12/31 采集到样本分为 3 段分别作为轻微(DC1)、中度(DC2)和严重(DC3)3 种程度的结构损伤状态数据,如图 10 所示。结构损伤通过减小下弦杆单元弹性模量模拟,选取如图 11 网架中部标红的 4 根下杆和 4 根斜腹杆为损伤模拟的对象,以弹性模量 E 同时下降 50%,70% 和 90% 分别模拟 DC1、DC2 和 DC3 共 3 种程度的结构损伤。同时为了考虑实际监测过程中的其它不确定性因素,在固有频率仿真数据中,按照式(13)添加噪声:

$$f_i = \hat{f}_i + \beta \cdot R(\hat{f}_i) \cdot N(0,1) \quad (13)$$

式中: \hat{f}_i 与 f_i 代表添加噪声前后的结构第 i 阶固有频率; $N(0,1)$ 为服从标准正态分布的随机数; $R(\cdot)$ 为均方根; β 为噪声水平系数,本文取 0.1%。

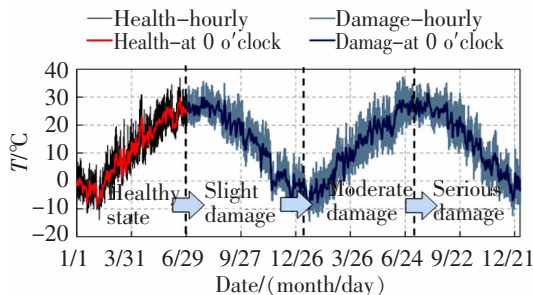


图 10 结构健康与损伤状态温度数据

Fig.10 Temperature data of structural health and damage state

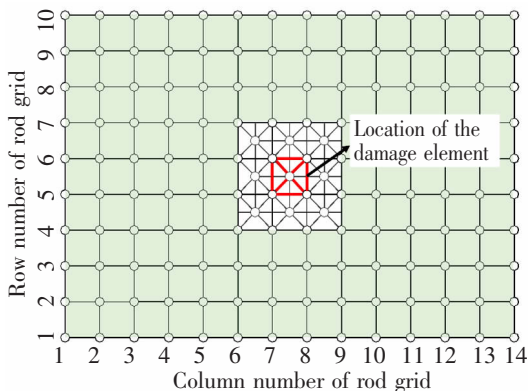


图 11 模拟损伤的杆件位置示意

Fig.11 The position of the simulated damage element

4 基于 PCA-FCM 聚类的损伤诊断

4.1 温度变化对损伤诊断的影响分析

以结构健康 HC 工况和发生轻微损伤 DC1 工况下的 2 阶固有频率为例,网架结构一年内固有频率变化及其与温度关系如图 12 和图 13 所示。可以看出,结构损伤前后固有频率均会随着温度的变化而发生明显波动,温度与固有频率呈近似线性关系,线性相关度在 0.85 以上。随着温度的升高,固有频率减小,温度每升高 1 °C 前 4 阶固有频率降低约 0.09%。另外,从图 12 可以看出,结构发生轻微损伤后并未引起固有频率的“阶越”式突变,根据固有频率时序数据并不能很好诊断出损伤是否发生,图 13 也表明,损伤后的固有频率数据样本大多位于健康工况 95% 置信区间,环境变化很大程度掩盖了对局部损伤的准确诊断。

4.2 损伤诊断结果分析

以结构发生轻微损伤 DC1 工况为例,说明本文提出的 PCA-FCM 聚类分析方法在判断损伤是否发生时的有效性。HC 工况和 DC1 工况下 1 阶和 2 阶

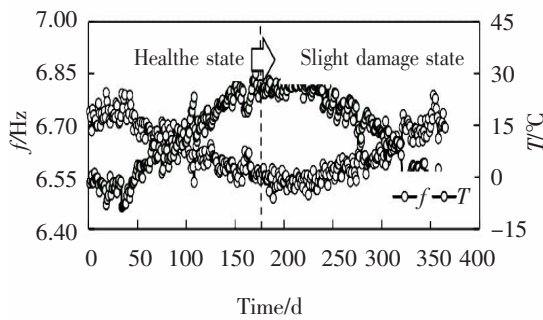


图 12 固有频率一年内变化

Fig.12 Natural frequency changes within 1 year

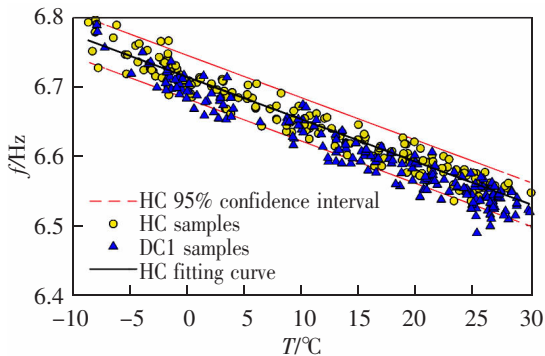


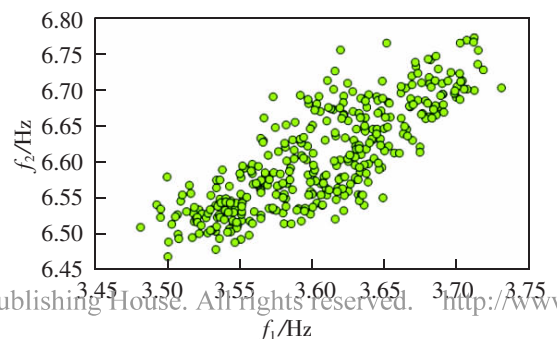
图 13 固有频率与温度的关系

Fig.13 Relationship between natural frequency and temperature

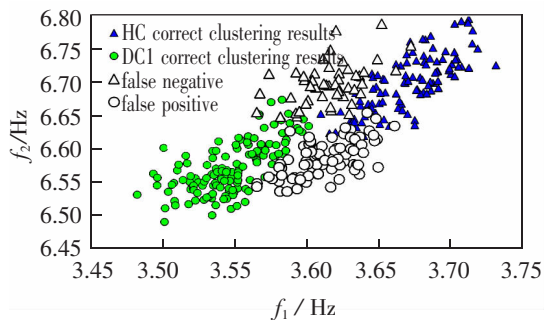
固有频率的原始数据样本如图 14(a)所示。由图 14(a)可以看出,健康和损伤工况下结构的固有频率数据非常接近,在实际健康监测过程中,采集到的数据并不能提前预判损伤是发生,即数据中可能同时包含结构健康和损伤状态的数据样本,此时判断损伤的健康工况基线未知,根据原始数据并不能直接判别损伤是否发生。对数据进行 FCM 聚类分析,其中隶属度矩阵指数 m 取 2,优化目标最大迭代次数取 100,迭代终止条件 Tol 取 10^{-5} 。值得注意的是,聚类分析属于无监督学习方法,只能将数据分成几类,而无法区分哪一类是损伤工况,本文基于以下两个先验事实对健康与损伤数据加以区分:一是结构损伤的发生是一个不可逆过程,即结构状态只能从健康到轻微损伤,再到严重损伤,通过聚类结果与固有频率的测试数据的时间顺序加以对比,可区分哪一类属于损伤数据;二是损伤发生后结构刚度下降,固有频率减小,在如图 14 所示的 1 阶和 2 阶固有频率坐标中,损伤工况数据理论上位于健康工况数据左下方。直接利用固有频率数据样本进

行 FCM 聚类分析的结果如图 14(b)所示,可以看出,受环境温度变化的影响,损伤诊断结果存在较大误差,包括结构发生损伤未被正确诊断(假阴性结果)和结构未发生损伤被误判为损伤(假阳性结果)。对固有频率先进行 PCA,利用主成分重构残差进行 FCM 聚类分析,得到聚类结果标签后,将固有频率原始数据按照标签分类绘制,结果如图 14(c)所示,可以看出 PCA-FCM 聚类分析结果中假阴性与假阳性结果明显减少,很大程度降低了温度影响,可以较为真实地反映结果的真实损伤状态。

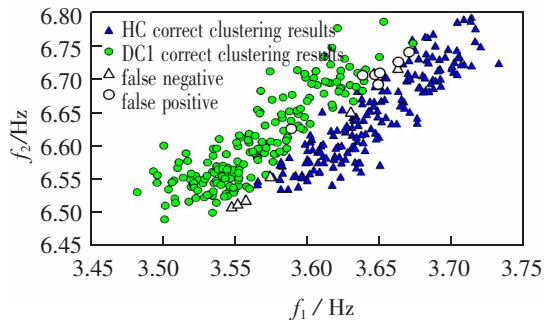
进一步设置聚类数为 4,验证本文方法在损伤程度识别中的有效性。4 种工况下 1 阶和 2 阶固有频率的原始数据样本及其真实分类如图 15 所示,对比可以看出,在实际监测中,由于环境的影响,不同损伤程度数据较为重叠,难以通过直接观察将健康工况与损伤工况加以区分。图 16(a)为 PCA 处理前利用原始数据进行 FCM 分析结果,可以看出直接利用固有频率聚类的效果较差,根据聚类结果绘制混淆矩阵如图 16(b)所示,其聚类的总精确度仅为 41.72%,较难将损伤进行准确识别。对固有频率数据进行主成分分析,其 1 阶和 2 阶固有频率的重构残差如图 17 所示,可以看出主成分重构残差一定程度剔除了温度影响,但受噪声等不确定因素干扰,仍较难根据重构残差直接判断损伤类别。利用 FCM 对主成分重构残差数据进行聚类分析,得到聚类结果标签后,将固有频率原始数据按照标签分类绘制,结果如图 18 所示,将其与图 15(b)对比可以看出,本文提出的 PCA-FCM 方法可以有效识别结构轻微、中度和严重 3 种不同程度的损伤,根据聚类结果绘制混淆矩阵如图 18(b)所示,其聚类的总精确度达 96.99%,有效排除了环境温度对损伤诊断的干扰。



(a) Samples of original data



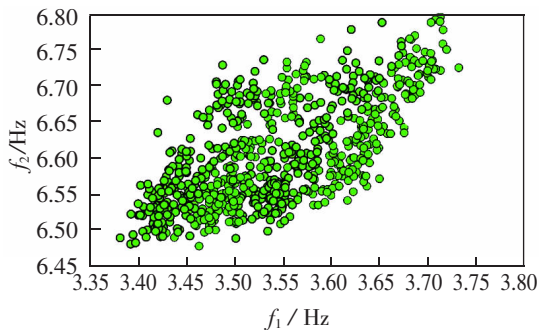
(b) Clustering results using FCM before PCA



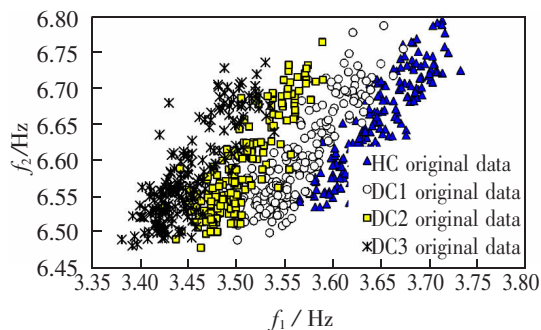
(c) Clustering results using PCA-FCM

图 14 HC 和 DC1 工况的聚类结果

Fig.14 Clustering results of HC and DC1



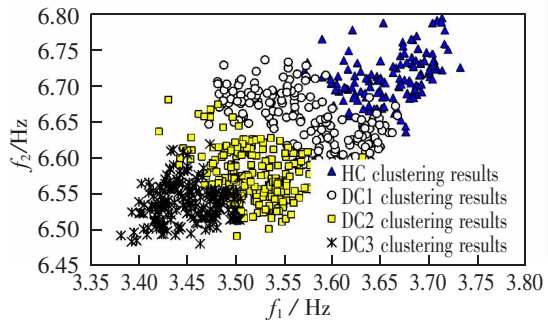
(a) Samples of original data



(b) Real classification of original data

图 15 多种损伤工况的原始数据

Fig.15 Original data of multiple damage conditions



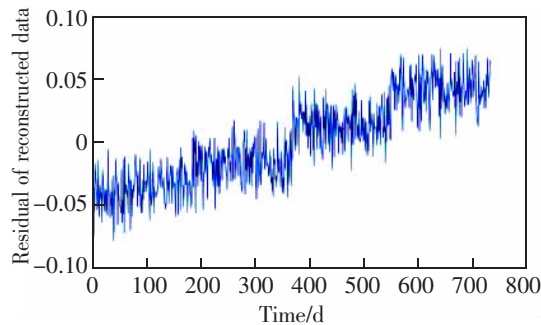
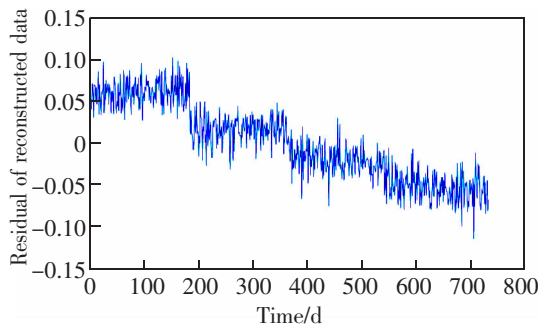
(a) Clustering results using FCM before PCA

		Clustering results			
		HC	DC1	DC2	DC3
Real condition	HC	82	69	31	0
	DC1	38	44	100	1
	DC2	4	43	61	75
	DC3	0	37	28	118
Precision		66.13%	22.80%	27.73%	60.82%
		33.87%	77.20%	72.27%	39.18%

(b) Precision using FCM before PCA

图 16 多损伤工况 PCA 前 FCM 聚类结果和精确度

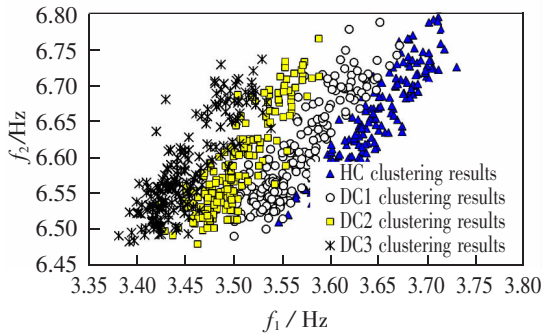
Fig.16 Clustering results and precision of multiple damage conditions before PCA using FCM



(a) PCA residual of reconstructed data of the 1st order frequency (b) PCA residual of reconstructed data of the 2nd order frequency

图 17 多损伤工况的 PCA 重构残差

Fig.17 PCA residuals of reconstruction data of multiple damage conditions



(a) Clustering results using PCA-FCM

		Clustering results			
		HC	DC1	DC2	DC3
Real condition	HC	174	8	0	0
	DC1	5	174	3	0
	DC2	0	0	181	1
	DC3	0	0	0	179
Precision		97.21%	95.63%	96.28%	99.44%
		2.79%	4.37%	3.72%	0.56%

(b) Precision of clustering results using PCA-FCM

图 18 多损伤工况的 PCA-FCM 聚类

Fig.18 Clustering of multiple damage conditions using PCA-FCM

5 结论

考虑环境温度变化对基于固有频率的影响,提出了一种 PCA-FCM 聚类分析方法,用于自然环境变化下的空间网格结构的损伤诊断。通过某网架结构有限元数值模拟,对方法的有效性进行了研究,得出以下结论:

1) 温度变化主要通过改变结构材料特性,产生热变形以及温度内力来改变结构固有频率。

2) 温度与固有频率呈近似线性关系,线性相关度在 0.85 以上,随着温度的升高,空间网架固有频率减小,温度每升高 1 °C 前 4 阶固有频率降低约 0.09%。

3) 结构发生轻微损伤后并不能引起固有频率时序数据的“阶越”式突变,固有频率随温度变化的日常波动,将直接影响损伤的准确诊断。

4) 受环境温度变化的影响,直接利用固有频率数据的聚类分析结果进行损伤诊断存在较大误差,包括结构发生损伤未被正确诊断(假阴性结果)和结构未发生损伤被误判为损伤(假阳性结果)。

5) 对固有频率进行主成分分析,提取主成分重构残差进行模糊 C 均值聚类,可在损伤诊断过程有效排除环境温度因素干扰,在健康基线未知情况下对损伤是否发生进行判别,并能对损伤程度进行准确诊断,总精确度达 96.99%。

参考文献:

[1] 卢哲超,周宇,李骏鹏,等.轨道交通基础结构振动响应监测和分析[J].华东交通大学学报,2021,37(1):41-46.

rail transit infrastructure vibration response[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 37(1): 41-46.

[2] DAS S, SAHA P, PATRO S K. Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: a review[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2016, 6(3): 477-507.

[3] HAN Q, MA Q, XU J, et al. Structural health monitoring research under varying temperature condition: a review [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2021, 11(3): 1-25.

[4] CORNWELL P J, FARRAR C R, DOEBLING S W, et al. Environmental variability of modal properties[J]. Experimental Techniques, 1999, 23(6): 45-48.

[5] NI Y Q, HUA X G, FAN K Q, et al. Correlating modal properties with temperature using long-term monitoring data and support vector machine technique[J]. Engineering Structures, 2005, 27(12): 1762-1773.

[6] REGNI M, AREZZO D, CARBONARI S, et al. Effect of environmental conditions on the modal response of a 10-story reinforced concrete tower[J]. Shock and Vibration, 2018(7): 1-16.

[7] XU M Q, WANG S Q, LI H J. A residual strain energy based damage localisation method for offshore platforms under environmental variations[J]. Ships & Offshore Structures, 2019, 14(7): 747-754.

[8] SHOKRANI Y, DERTIMANIS V K, CHATZI E N, et al. On the use of mode shape curvatures for damage localization under varying environmental conditions[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(4): 1-20.

[9] 常鹏,王英剑,吴云峰,等.基于主成分分析的温度敏感性结构损伤识别[J].振动工程学报,2019,32(2):48-54.

CHANG P, WANG Y J, WU W F, et al. Damage identification of temperature-sensitive structure based on principal

- component analysis[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2019,32(2):48-54.
- [10] 张智升. 大跨度空间结构温度效应研究[D]. 天津:天津大学,2016.
ZHANG Z S. Study on temperature effect of long span space structure[D]. Tianjin:Tianjin University,2016.
- [11] GILLICHA G R,FURDUIA H,WAHABB M A,et al. A robust damage detection method based on multi-modal analysis in variable temperature conditions[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*,2019,115:361-379.
- [12] YAN A M,KERSCHEN G,BOE P D,et al. Structural damage diagnosis under varying environmental conditions-Part I:A linear analysis[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*,2005,19(4):847-864.
- [13] JIN S S,CHO S,JUNG H J. Adaptive reference updating for vibration-based structural health monitoring under varying environmental conditions[J]. *Computers & Structures*,2015,158(10):211-224.
- [14] 颜永逸. 基于模糊聚类和时间序列的结构损伤识别方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2018.
Yan Y Y. Reaserch on the structural damage identification method based on the fuzzy clustering algorithm and time series model[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [15] 韩庆华,裴波,王成博,等. 预应力组合网架结构的自振特性分析及现场测试[J]. *地震工程与工程振动*,2004,24(2):118-124.
HAN Q H,PEI B,WANG C B,et al. Analysis of natural vibration characteristics and testing on construction site of pre-stressed composite space truss[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*,2004,24(2):118-124.
- [16] 裴波. 预应力组合网架结构的理论分析及试验研究[D]. 天津:天津大学,2004.
PEI B. Theoretical analysis and experimental study of pre-stressed composite space truss[D]. Tianjin:Tianjin University,2004.
- [17] 谢海龙. 遗传算法在桥梁有限元模型修正中的应用[J]. *石家庄铁道大学学报(自然科学版)*,2018,31(1):33-38.
XIE H L. Application of genetic algorithm in bridge finite element model updating[J]. *Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition)*,2018,31(1):33-38.

(责任编辑:刘棉玲)