

文章编号:1673-2049(2019)04-0040-07

焊接空间结构节点焊缝拉裂损伤识别

刘 晖,朱胜男,申韶丁,王雪亮

(武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室,湖北 武汉 430070)

摘要:针对焊接空间结构节点易发生损伤和破坏的问题,为了识别焊接空间结构节点焊缝拉裂损伤,建立了节点焊缝拉裂损伤等效模型,考虑到焊接空间结构具有杆件和节点众多的特点,提出了损伤识别两步法。首先建立有焊缝拉裂损伤焊接球节点三维实体有限元模型,划分焊缝裂缝宽度,然后分析不同焊缝裂缝宽度与节点刚度系数之间的关系,最后将所获得的不同裂缝尺寸焊接球节点刚度系数等效为弹簧刚度,施加于结构杆件两端,成为杆端弹簧约束模型,即考虑节点焊缝拉裂损伤的等效有限元模型;建立等效模型后,采用两步法识别节点焊缝拉裂损伤位置,先对结构分区,用小波分析方法识别结构杆件有节点焊缝拉裂损伤发生的区域,然后基于等效模型提取应变模态作为损伤标示量,在损伤区域内具体定位有节点焊缝拉裂损伤发生的杆件。结果表明:焊缝拉裂损伤等效模型能够模拟实际结构节点焊缝拉裂损伤,所建立的节点焊缝损伤等效模型易于提取损伤标示量,采用两步法能够识别出焊接空间结构节点焊缝拉裂损伤位置。

关键词:焊缝拉裂;等效模型;损伤识别;空间结构;焊接节点

中图分类号:TU356

文献标志码:A

Identification for Weld Crack Damage of Spatial Structural Welded Joints

LIU Hui, ZHU Sheng-nan, SHEN Shao-ding, WANG Xue-liang

(Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge & Structure Engineering, Wuhan University of Technology,
Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: Aiming at the problem that the welded joints of space structures being prone to damage, in order to identify the weld crack damage of welded space structural joints, the equivalent model of weld damage was established, and a two-step damage identification method was proposed to consider the characteristics of welded space structures with many joints and bars. Firstly, the three-dimensional solid finite element model of spherical joints with weld crack damage was established, and the weld crack width was partitioned. Then the relationship between the weld crack width and the stiffness coefficient of joints was analyzed. Finally, the stiffness coefficient of welded spherical joints with different crack widths was equivalent to the stiffness of spring, which was applied to the end of the rod as a spring restraint. Therefore, the equivalent finite element model of crack damage of welded joints was established. After establishing the equivalent model, the two-step method was used to identify the location of weld damage joints. Firstly, the structure was divided into several zones, and the zone containing weld damage joints was identified by wavelet analysis method. Then, based on the equivalent model, the strain modes were extracted as damage indicators to locate the weld damaged joints in the

收稿日期:2018-10-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51438002,51078301)

作者简介:刘 晖(1972-),女,陕西咸阳人,教授,工学博士,E-mail:drliuh@263.net。

damaged zone. The results show that the equivalent model of weld crack damage can simulate the actual structural joint with weld crack damage. The proposed equivalent model of joint weld damage established is easy to extract damage indicators. The two-step method can identify location of the damaged joint of welded spatial structures.

Key words: weld crack; equivalent model; damage identification; spatial structure; welded joint

0 引言

大跨空间钢结构广泛应用于各种大型体育场馆、展览厅、剧院等建筑中,它是由节点和杆件组成,在风荷载作用下,节点受力复杂,易发生破坏。焊接空心球节点是中国空间钢结构中应用最为广泛的一种节点,其破坏形式主要是焊缝拉裂。焊缝拉裂损伤分析多基于焊缝连接处的精细有限元模型^[1-3],由于模型的复杂性,不仅计算耗时长,而且不能用简单的损伤标示量来直观表示焊缝连接处的拉裂损伤。另外,空间钢结构具有节点和杆件众多的特点,此类结构自振频率密集^[4],使得动力特性对结构损伤并不十分敏感^[5-9]。据此,提出了建立焊接空间钢结构节点焊缝拉裂损伤等效模型,获得节点不同刚度系数与不同裂缝宽度之间的关系,利用该模型能够提取焊缝节点拉裂损伤的标示量。考虑到结构杆件和节点众多的特点,采用两步法对结构进行损伤识别。第1步,在建立焊缝拉裂损伤等效模型基础上,分析外激励作用下结构节点加速度响应,采用小波变换方法合理划分结构子区域并确定布置传感器的节点,从而实现有限测点信息的结构损伤区域判定。第2步,在已被判定有节点焊缝拉裂损伤的区域中,采用应变模态分析法具体定位有节点焊缝拉裂损伤的杆件。这样可以减少计算分析工作量,而且易于在复杂焊接空间钢结构上实现损伤识别。数值算例说明焊缝拉裂损伤等效模型能够模拟实际结构节点焊缝拉裂损伤,采用先识别结构损伤区域再具体定位有节点焊缝拉裂损伤杆件的方法是可行的,为空间钢结构节点焊缝拉裂损伤识别提供了一种简便有效的方法。

1 等效模型建立

1.1 有裂缝焊接球节点精细有限元模型

空间钢结构节点刚度对结构内力和稳定性产生巨大影响,节点是空间受力体系,受力情况复杂。影响节点轴向刚度系数和弯曲刚度系数的主要因素是管径-球径之比及球壁厚^[10-12]。因此,只要管径-球径之比和球壁厚相近,就具有相似的节点轴向刚度

系数和弯曲刚度系数。根据钢网架焊接空心球节点标准^[13],焊接空心球节点的管径-球径比范围宜为 $0.3 \leq d/D \leq 0.5$ (d 为管直径, D 为球直径),这样根据不同球壁厚配合不同管径-球径比可分析不同规格节点轴向刚度系数和弯曲刚度系数,建立不同裂缝尺寸节点损伤的等效模型。

以焊接空心球 WS1204 (直径为 120 mm, 壁厚为 4 mm) 配合钢管为 $\phi 48 \times 3.5$ (外直径为 48 mm, 壁厚为 3.5 mm) 的节点为例,建立该焊接空心球节点的损伤等效模型。由于焊接空心球节点在单向受力时具有对称性,环向变形较小,故选取半球作为计算模型,在半球边缘处取固定边界。裂缝形式采用工程中出现最多的张开型表面穿透裂纹,裂纹剖面形状如图 1 所示,其中, 2θ 为裂纹开裂角度。三维裂纹实体建模将含裂纹结构划分为裂纹体和非裂纹体两部分^[14],裂纹体部分网格划分反映裂纹尖端奇异性,裂纹尖端附近利用 ANSYS 前处理命令 Kscon 定义裂纹尖端奇异性,同时调整 Kscon 命令参数,使裂尖面网格划分成均匀辐射状,如图 2(a) 所示。然后从面单元生成体单元,通过体扫略命令将已划分好的裂尖面沿裂纹深度方向扫略成体网格,此时裂尖单元为退化的 20 节点 Solid95 二次单元,为奇异单元,反映裂纹在应力作用下裂尖应变及应力的奇异性,如图 2(b) 所示。对裂纹外的过渡区域和其他剩余部分用 Lesize 命令控制划分尺寸大小,用 Smart 控制单元划分精细程度,由此完成整个节点单元划分^[11]。划分网格后的焊接空心球节点模型如图 3 所示。

1.2 裂缝尺寸与节点刚度系数的关系

节点焊缝开裂使得焊接空心球节点不再是刚性连接节点,张开型裂纹形状由裂纹深度和宽度决定,因此考虑这 2 个因素对焊接空心球节点刚度的影响。由于裂纹最大深度为管壁厚度,深度变化较小,而且对同裂纹宽度与不同裂纹深度的焊接空心球节点模型进行多次加载分析发现,轴向刚度系数和弯曲刚度系数变化都很小^[11],故忽略裂纹深度对焊接空心球节点刚度影响,只考虑裂纹宽度对焊接空心球节点刚度的影响。为了获取裂纹宽度与轴向刚度

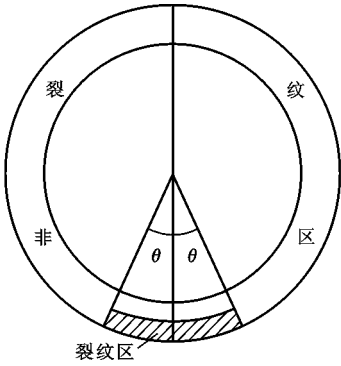


图 1 裂纹位置
Fig. 1 Crack Location

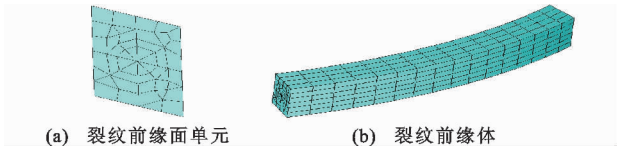


图 2 裂纹体网格划分
Fig. 2 Mesh Generation of Cracked Body

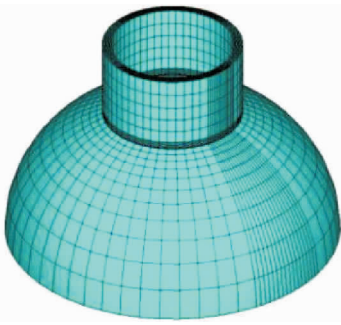


图 3 焊接空心球节点模型
Fig. 3 Model of Welded Hollow Ball Joint

系数和弯曲刚度系数之间的关系,在焊接空心球节点上施加轴力,得到焊接空心球节点中各节点的平均竖向位移 $\bar{\omega}$,轴力 F 与位移比值即为轴向刚度 $k = F/\bar{\omega}$ 。在球节点上施加弯矩 M ,当转角位移为 $\bar{\theta}$ 时,弯曲刚度 $k_e = M/\bar{\theta}$,可近似为 $k_e \approx M/(\bar{\omega}_+ - \bar{\omega}_-)/d^{[12]}$,其中 $\bar{\omega}_+$ 为竖向位移为正的节点平均位移值, $\bar{\omega}_-$ 为竖向位移为负的节点平均位移值。取裂纹深度为管壁厚的一半,改变裂纹宽度,得到焊接空心球节点轴向刚度系数和弯曲刚度系数,用最小二乘法进行曲线拟合,裂纹宽度 w_c ($w_c = x\pi r$, r 为钢管半径)与焊接空心球节点轴向刚度系数 K_N 的近似拟合表达式为

$$K_N = -2.0208 \times 10^8 x^3 + 4.3252 \times 10^8 x^2 - 2.9166 \times 10^8 x + 9.8818 \times 10^8 \quad (1)$$

裂纹宽度与焊接空心球节点弯曲刚度系数 K_M 的近似拟合表达式为

$$K_M = -1.7397 \times 10^5 x + 3.5366 \times 10^5 x^2 - 2.3697 \times 10^5 x + 6.0034 \times 10^5 \quad (2)$$

考虑到球形节点的特点,用弧度来表示裂缝宽度,则刚度系数拟合曲线如图 4 所示。

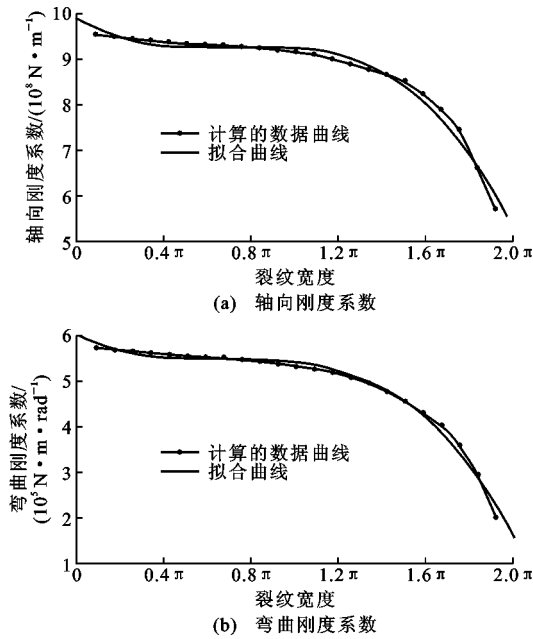


图 4 刚度系数拟合曲线

Fig. 4 Fitting Curves of Stiffness Coefficients

1.3 有裂缝节点等效有限元模型

节点等效模型一般采用分段等效刚度方法来考虑,杆件分为 3 个单元:中间单元和定长的两端单元。根据节点大小选定两端单元长度,并对两端梁单元惯性矩予以折减来考虑节点转动能力,不足之处在于要不断修改惯性矩折减系数和杆端长度^[15]。因此,本文采用 ANSYS 有限元分析软件提供的 Matrix27 单元来模拟有裂缝节点,忽略节点大小影响,考虑裂缝对焊接空心球节点刚度的影响,通过调节弹簧刚度变化来模拟节点刚度变化,采用等效单元模拟有裂缝节点的连接刚度。建立的有连接刚度节点等效模型如图 5 所示, AB 为梁单元,在 A 左端和 B 右端为 Matrix27 单元,通过调整 Matrix27 单元刚度矩阵中元素数值得到不同裂缝连接的节点,这种方法不仅可以考虑轴向刚度变化,还可以考虑弯曲刚度或扭转刚度变化。

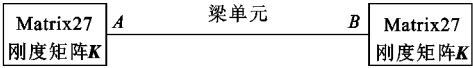


图 5 有连接刚度节点力学模型

Fig. 5 Joint Mechanical Model of Connection Stiffness

根据裂缝宽度与刚度系数的关系式,只需调整节点 Matrix27 单元刚度矩阵中对应的元素数值,就

能建立带裂缝的焊接空心球节点等效模型。

2 损伤识别方法

空间钢结构杆件有节点焊缝拉裂损伤诊断分为 2 步^[16-17]:第 1 步,先对结构进行分区并确定每个区域的代表节点(在此类节点上布设加速度传感器),然后根据测量代表节点的加速度响应分析确定有节点焊缝损伤杆件所在区域;第 2 步,采用应变模态法计算第 1 步中所确定损伤区域里所有杆件的单元应变模态差,依据应变模态差值的大小识别有节点焊缝损伤的杆件。

2.1 小波分析

小波变换是时间频率的局部化分析,通过伸缩和平移运算对信号或函数进行多尺度细化,能有效地从信号中提取信息^[16,18]。它是时间尺度分析和多分辨分析的一种新技术,可使信号所包含的重要信息显现出来。小波基函数是由尺度因子和位移因子为自变量的基本小波函数来产生,即

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (3)$$

式中: $\Psi(\cdot)$ 为基本小波函数; a 为尺度因子; b 为位移因子。

小波变换函数 $W_f(a, b)$ 就是将基本小波函数 $\Psi(x)$ 作位移 b 后,在不同尺度因子 a 和待分析信号 $f(x)$ 作内积,即

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (4)$$

小波变换的特点是具有可变的时频窗,当 a 的取值较大时,在时间轴上考察的范围就较大,因而在频域上相当于用低频小波对信号作概貌分析;当 a 的取值较小时,在时间轴上观察的范围较小,因而在频域上相当于用较高的频率作分辨率较高的局部分析。小波变换具有时域局部化的特性,利用其奇异性,可以将结构的微小损伤识别出来。

2.2 单元应变模态差法

当结构发生损伤时,损伤处的刚度会降低,损伤位置附近就会发生较为显著的应力重分布,从而在损伤处产生突变。这将引起损伤处应变模态的较大改变,出现明显峰值,所以通过对比损伤前后各阶应变模态,就能按应变模态差绝对值的大小来判定结构损伤位置^[19]。对于空间钢结构,由实测所得的某阶节点位移模态,可以求出与之相应的单元应变模态。

结构中两端节点 i, j 所组成的空间 k 杆件单元

应变 ϵ_k 表达式为

$$\epsilon_k = [(u_j - u_i)(x_j - x_i) + (v_j - v_i)(y_j - y_i) + (w_j - w_i)(z_j - z_i)]/L^2 + [(u_j - u_i)^2 + (v_j - v_i)^2 + (w_j - w_i)^2]/(2L^2) \quad (5)$$

式中: x_i, y_i, z_i 和 x_j, y_j, z_j 分别为节点 i 和 j 在整体坐标系里的坐标; u_i, v_i, w_i 和 u_j, v_j, w_j 分别为节点 i 和 j 在整体坐标系里的位移; L 为杆单元长度。

忽略高阶项影响,则有

$$\epsilon_k = [(u_j - u_i)(x_j - x_i) + (v_j - v_i)(y_j - y_i) + (w_j - w_i)(z_j - z_i)]/L^2 \quad (6)$$

单元应变模态差的绝对值对局部损伤比较敏感,可用于结构损伤识别。损伤识别标示量定义为

$$\Delta\epsilon_m = |\epsilon_m^u - \epsilon_m^d| \quad \left. \begin{aligned} \Delta\epsilon_m(k) &= |\epsilon_m^u(k) - \epsilon_m^d(k)| \quad k=1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $\epsilon_m^u(k), \epsilon_m^d(k)$ 分别为结构损伤前后第 k 个单元第 m 阶模态的应变值; N 为杆件总数。

当只有单根杆件发生节点焊缝损伤时,最可能发生损伤的就是 $\Delta\epsilon_m(k)$ 值最大的那根杆件;当有多根杆件发生节点焊缝损伤时,最有可能发生损伤的是 $\Delta\epsilon_m(k)$ 值有显著变化的杆件。

3 数值分析

为了验证有裂缝焊接空心球节点等效模型能够用于两步法识别节点焊缝拉裂损伤,建立了如图 6 所示的焊接空间钢结构(标出上下弦杆的编号)。鉴于该结构完成仿真分析后要进行试验验证,因此为了制作方便和满足实验室场地限制等,该结构长、宽、高分别取为 3, 1.8, 1.85 m。1.85 m 的高度包括支柱高度 1.5 m 和网架上下弦高度 0.35 m。空心球规格为 WS1204。下弦网格数为 5×3 , 上弦为 4×2 , 杆件均采用 $\phi 48 \times 3.5$, 弦杆净长度为 0.54 m, 腹杆净长度为 0.335 m。4 个角点为固端支座, 支柱采用 $\phi 60 \times 3.5$ 的圆形钢管, 净高度为 1.5 m, 钢的弹性模量为 206 GPa, 密度为 $7\,850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 泊松比为 0.3。

采用 ANSYS 有限元分析软件建立模型, 杆件采用 Beam88 单元, 球节点质量采用 Mass21 单元来等效。对带裂缝的焊接球节点, 采用单元 Matrix27 来模拟其节点焊缝损伤。该模型共有 43 个节点和 124 个单元。

焊缝拉裂损伤程度为球节点与杆件焊接处有 90° 裂缝, 即裂缝宽度为 $90\pi r/180$ 时, 采用 Matrix27 单元模拟带裂缝球节点等效模型, 根据式(1)和式(2)计算得到 Matrix27 单元参数。建立有节点焊缝

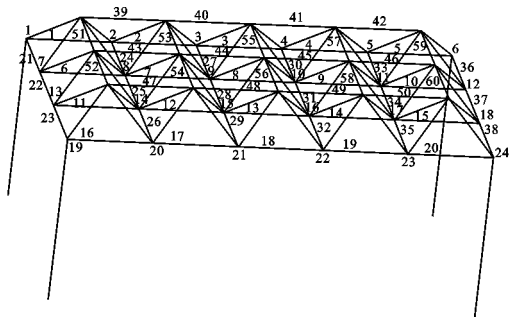


图 6 结构节点和弦杆编号

Fig. 6 Number of Structural Nodes and Chords

损伤等效有限元模型,在此有限元模型基础上模拟不同工况的结构节点焊缝拉裂损伤进行识别。待识别的损伤工况如表 1 所示。

表 1 损伤工况

Tab. 1 Damage Cases

工况	损伤位置	损伤节点所在区域	对应损伤杆件编号
工况 1	节点 2 内侧	A 区	杆件 24
工况 2	节点 2 内侧, 节点 5 内侧	A 区, B 区	杆件 24, 杆件 33

首先根据小波分析杆件有节点焊缝损伤影响范围^[20-21],将结构分成 A 区和 B 区,代表节点分别为节点 8 和节点 17,如图 7 所示。

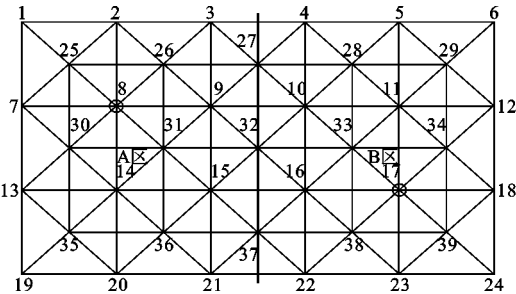


图 7 网架结构分区

Fig. 7 Partition of Grid Structure

计算 A 区节点 8 和 B 区节点 17 在初始位移下的加速度响应,进行小波分析来判断损伤是发生在 A 区还是 B 区。

单一损伤工况识别结果如图 8 和表 2 所示。从图 8 可以看出,A 区节点 8 加速度响应小波分析奇异值大于 B 区节点 17 的加速度响应小波分析奇异值,说明 A 区中杆件有节点焊缝损伤发生。由表 2 可知,A 区中杆件 24 的 1 阶应变模态差为 3.64×10^{-5} ,远大于其他杆件,说明杆件 24 有节点焊缝损伤的可能性最大,识别结果与单一损伤工况情况相符。

复合损伤工况识别结果如图 9 和表 3,4 所示。

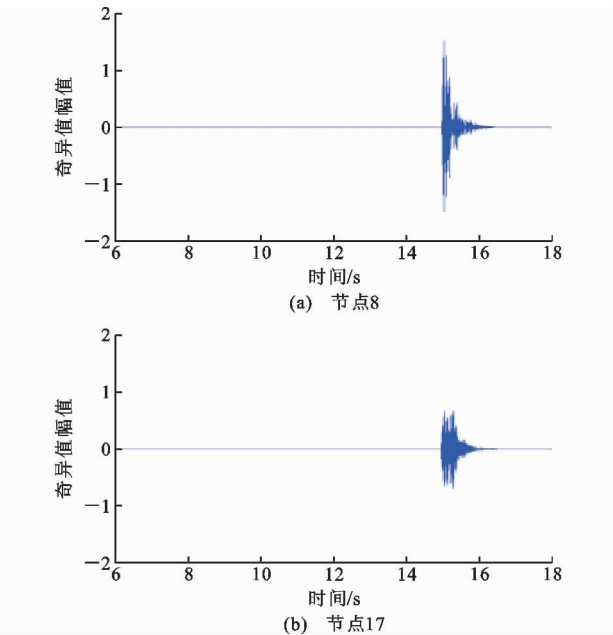


图 8 单一损伤工况下节点 8,17 加速度响应的小波分析结果

Fig. 8 Wavelet Analysis Results of Acceleration Responses of Node 8,17 Under Single Damage Working Condition

表 2 单一损伤工况下 A 区各杆件 1 阶应变模态差

Tab. 2 The First Order Strain Mode Difference of Bars in A Region Under Single Damage Working Condition

杆件编号	1 阶应变模态差	杆件编号	1 阶应变模态差	杆件编号	1 阶应变模态差
1	5.27×10^{-8}	21	2.26×10^{-6}	40	4.51×10^{-12}
2	1.62×10^{-6}	22	4.03×10^{-7}	43	8.26×10^{-11}
3	1.39×10^{-9}	23	1.71×10^{-6}	44	1.54×10^{-10}
6	1.67×10^{-6}	24	3.64×10^{-5}	47	1.67×10^{-6}
7	1.29×10^{-9}	25	8.51×10^{-7}	48	2.55×10^{-11}
8	1.67×10^{-6}	26	4.91×10^{-7}	51	1.50×10^{-6}
11	1.67×10^{-6}	27	9.72×10^{-7}	52	1.25×10^{-6}
12	1.67×10^{-6}	28	4.83×10^{-7}	53	1.01×10^{-7}
16	1.68×10^{-6}	29	1.70×10^{-7}	54	3.57×10^{-8}
17	1.67×10^{-6}	39	4.38×10^{-10}	55	1.61×10^{-8}

从图 9 可以看出,A 区节点 8 和 B 区节点 17 的加速度响应小波分析奇异值都较大,说明 A 区和 B 区中杆件都有节点焊缝损伤发生。由表 3,4 可知,A 区中杆件 24 和 B 区中杆件 33 的 1 阶应变模态差分别为 3.59×10^{-5} 和 3.60×10^{-5} ,远大于其他杆件,说明杆件 24 和杆件 33 有节点焊缝损伤的可能性最大。识别结果与复合损伤工况情况相符。

4 结 语

(1)考虑到焊接空间钢结构节点焊缝拉裂是其

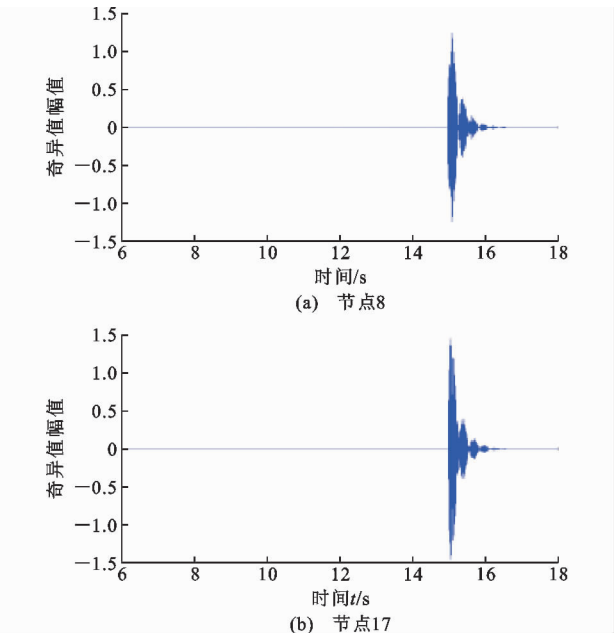


图 9 复合损伤工况下节点 8,17 加速度响应的小波分析结果

Fig.9 Wavelet Analysis Results of Acceleration Response of Nodes 8,17 Under Compound Damage Working Condition

表 3 复合损伤工况下 A 区各杆件 1 阶应变模态差
Tab.3 The First Order Strain Mode Difference of Bars in A Region Under Compound Damage Working Condition

杆件 编号	1 阶应变 模态差	杆件 编号	1 阶应变 模态差	杆件 编号	1 阶应变 模态差
1	6.73×10^{-8}	21	6.07×10^{-7}	40	1.67×10^{-6}
2	1.63×10^{-6}	22	4.00×10^{-7}	43	1.98×10^{-10}
3	2.79×10^{-9}	23	8.62×10^{-8}	44	3.85×10^{-10}
6	9.81×10^{-10}	24	3.59×10^{-5}	47	8.03×10^{-10}
7	2.21×10^{-9}	25	8.68×10^{-7}	48	3.14×10^{-10}
8	6.48×10^{-10}	26	1.10×10^{-7}	51	3.88×10^{-7}
11	1.67×10^{-6}	27	1.35×10^{-6}	52	1.37×10^{-7}
12	1.17×10^{-9}	28	5.50×10^{-7}	53	4.58×10^{-3}
16	1.67×10^{-6}	29	7.05×10^{-8}	54	9.91×10^{-8}
17	1.66×10^{-6}	39	1.67×10^{-6}	55	9.51×10^{-10}

主要损伤形式,提出采用 Matrix27 单元来建立不同焊缝宽度节点损伤等效有限元模型,提取节点焊缝损伤标示量。在此基础上,采用小波分析和应变模态差相结合的两步法进行损伤诊断。

(2)分析裂缝宽度对结构节点轴向刚度系数和弯曲刚度系数的影响,以此确定 Matrix27 单元刚度矩阵中对应元素数值,从而建立节点焊缝损伤等效有限元模型,这样可提出节点焊缝拉裂损伤标示量用于损伤识别。

(3)将结构划分成若干区域,用小波分析法识别有节点焊缝损伤发生的区域。在有损伤发生的区

表 4 复合损伤工况下 B 区各杆件 1 阶应变模态差
Tab.4 The First Order Strain Mode Difference of Bars in B Region Under Compound Damage Working Condition

杆件 编号	1 阶应变 模态差	杆件 编号	1 阶应变 模态差	杆件 编号	1 阶应变 模态差
4	1.70×10^{-6}	30	1.34×10^{-6}	42	1.67×10^{-6}
5	6.73×10^{-8}	31	5.51×10^{-7}	45	3.85×10^{-10}
9	2.21×10^{-9}	32	7.45×10^{-8}	46	1.98×10^{-10}
10	9.81×10^{-10}	33	3.60×10^{-5}	49	3.14×10^{-10}
13	2.48×10^{-10}	34	8.68×10^{-7}	50	8.03×10^{-10}
14	1.17×10^{-9}	35	1.05×10^{-7}	56	1.02×10^{-9}
15	1.67×10^{-6}	36	5.88×10^{-7}	57	4.91×10^{-8}
18	8.83×10^{-10}	37	3.98×10^{-7}	58	1.01×10^{-7}
19	1.67×10^{-6}	38	5.72×10^{-8}	59	3.86×10^{-7}
20	1.67×10^{-6}	41	1.67×10^{-6}	60	1.35×10^{-7}

域,采用应变模态差方法进行具体定位有节点焊缝拉裂损伤的杆件。

(4)数值算例表明,采用所提方法建立的有节点焊缝拉裂损伤等效有限元模型比较简单,可以方便地提取节点焊缝损伤标示量,采用两步法识别结构节点焊缝损伤方法是可行的,且具有较少的计算分析工作量,为以后的试验验证奠定了理论基础。

参考文献:
References:

[1] 王悦东,葛 巍,李向伟. 焊接接头疲劳寿命评估中板厚参数的影响分析[J]. 大连交通大学学报,2017,38(1):30-33.
WANG Yue-dong, GE Wei, LI Xiang-wei. Effect Analysis of Plate Thickness Parameter in Evaluation of Welded Joints Fatigue Life[J]. Journal of Dalian Jiaotong University,2017,38(1):30-33.

[2] 王 宁,薛素铎,李雄彦. 壳单元单层网壳模型的损伤本构模型研究[J]. 空间结构,2014,20(2):15-22,63.
WANG Ning, XUE Su-duo, LI Xiong-yan. Study on Damage Constitutive Model Used in the Fine Reticulated Shell Model[J]. Spatial Structures,2014,20(2):15-22,63.

[3] 刘海锋,罗尧治,许 贤. 焊接球节点刚度对网壳结构有限元分析精度的影响[J]. 工程力学,2013,30(1):350-358,364.
LIU Hai-feng, LUO Yao-zhi, XU Xian. Rigidity of Welded Hollow Spherical Joints on Finite Element Analysis Precision of Reticulated Shells[J]. Engineering Mechanics,2013,30(1):350-358,364.

[4] 冼耀强,刘伯权,丁江澍. 世纪莲体育中心动力特性及反应谱分析[J]. 建筑科学与工程学报,2011,28(3):

- 106-112.
- XIAN Yao-qiang, LIU Bo-quan, DING Jiang-shu. Dynamic Characteristics of Century Lotus Stadium and Response Spectrum Analysis[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(3): 106-112.
- [5] KAVEH A, ZOLGHADR A. An Improved CSS for Damage Detection of Truss Structures Using Changes in Natural Frequencies and Mode Shapes [J]. Advances in Engineering Software, 2015, 80: 93-100.
- [6] KIM N I, LEE S, AHN N, et al. Damage Identification of Truss Structures Based on Force Method[J]. Advances in Applied Mathematics and Mechanics, 2015, 7(2): 229-244.
- [7] MONTAZER M, SEYEDPOOR S M. A New Flexibility Based Damage Index for Damage Detection of Truss Structures [J]. Shock and Vibration, 2014, 2014: 460692.
- [8] ZHANG Z, SHANKAR K, MOROZOV E V, et al. Vibration-based Delimitation Detection in Composite Beams Through Frequency Changes [J]. Journal of Vibration and Control, 2016, 22(2): 496-512.
- [9] 吴 多, 刘来君, 张筱雨, 等. 基于曲率模态曲线变化的桥梁损伤识别[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2): 119-126.
- WU Duo, LIU Lai-jun, ZHANU Xiao-yu, et al. Bridge Damage Identification Based on Curvature-mode Curve[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(2): 119-126.
- [10] 刘永健, 姜 磊, 王康宁. 焊接管节点疲劳研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5): 1-20.
- LIU Yong-jian, JIANG Lei, WANG Kang-ning. Review of Fatigue Behavior in Welded Tubular Joints [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5): 1-20.
- [11] 丁丽娟. 带裂缝焊接空心球节点等效有限元模型研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- DING Li-juan. Study of Equivalent Finite Element Model of Welded Hollow Ball Joint with Crack[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [12] 闫翔宇, 齐国材, 马 青. 空间网格结构焊接空心球节点刚度研究综述[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2017, 50(增): 84-94.
- YAN Xiang-yu, QI Guo-cai, MA Qing. State-of-the-art of Research on the Stiffness of Welded Hollow Spherical Joints in Spatial Grid Structure[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2017, 50(S): 84-94.
- [13] JG/T 11—2009, 钢网架焊接空心球节点[S].
- JG/T 11—2009, Welded Hollow Spherical Node of Space Grid Structures[S].
- [14] 瞿伟廉, 鲁丽君, 李 明. 带三维穿透裂纹结构的有限元实体建模方法[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(1): 87-90.
- QU Wei-lian, LU Li-jun, LI Ming. Solid Modeling Method for Structure with 3-D Straight Through Crack[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(1): 87-90.
- [15] 李丽娟, 车伟娴, 杨笑梅, 等. 半刚性连接网壳结构的有限元分析[J]. 空间结构, 2008, 14(1): 43-49, 39.
- LI Li-juan, CHE Wei-xian, YANG Xiao-mei, et al. Finite Element Analysis of Reticulated Shells with Semi-rigid Connections[J]. Spatial Structures, 2008, 14(1): 43-49, 39.
- [16] LIU H, WANG X L, QU W L. Research on Two-step Damage Detection Method for Complex Gird Truss Structure Under Wind Load[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 256-259: 1131-1138.
- [17] KIM N I, KIM H, LEE J. Damage Detection of Truss Structures Using Two-stage Optimization Based on Micro Genetic Algorithm[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(9): 3687-3695.
- [18] LIEW K M, WANG Q. Application of Wavelets Theory for Crack Identification in Structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(2): 152-157.
- [19] 殷志祥, 许宗敏. 基于应变模态差的索桁架-索网结构损伤识别[J]. 建筑结构, 2016, 46(7): 99-103.
- YIN Zhi-xiang, XU Zong-min. Damage Identification of Cable Truss-cable Net Structure Based on Strain Mode Difference[J]. Building Structure, 2016, 46(7): 99-103.
- [20] 刘 晖, 胡 雄, 周 强, 等. 有限测点信息的网架结构风致损伤区域识别方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(4): 455-460.
- LIU Hui, HU Xiong, ZHOU Qiang, et al. Research on Method of Damage Area Identification of Space Truss Structure Under Wind Load Based on Limited Measurement Information[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(4): 455-460.
- [21] 刘 晖, 王 钱, 陈世超, 等. 网架结构节点焊缝损伤识别 2 步法[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(12): 7-13.
- LIU Hui, WANG Qian, CHEN Shi-chao, et al. A Two-step Method for Identifying Weld Damage of Grid Structure Connections[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(12): 7-13.