

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.016



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 基于模态参数的改进构型张弦梁结构 损伤识别方法

任宜春, 陈静, 蒋友宝, 周浩

(长沙理工大学桥梁与建筑绿色建造及维护湖南省重点实验室, 长沙 410114)

**摘要:**为研究适用于下弦与撑杆改进构型张弦梁结构各杆件类型的损伤识别方法,降低无损伤杆件的误判率,提出一种基于结构模态的子构件曲率变化损伤识别指标,并通过对简支梁结构的分析证明该指标的有效性。采用有限元软件 ANSYS 建立下弦与撑杆改进构型张弦梁结构分析模型,通过减小杆件单元弹性模量的方式模拟杆件损伤;考虑到结构对称且复杂的特点,分别在跨中、1/4 跨及近支座端杆件处设置单损伤、多损伤及小损伤程度的损伤工况,采用子构件改进的曲率绝对差指标和提出的基于结构模态的子构件曲率变化指标进行损伤识别对比分析。结果表明:基于结构模态的子构件曲率变化指标可实现结构单损伤、多损伤的精准定位,且对损伤程度较小的工况也非常敏感,可作为下弦与撑杆改进构型张弦梁结构损伤识别的有效方法。

**关键词:**张弦梁结构;下弦;撑杆;损伤识别;模态参数

**中图分类号:**TU323.3;TU311.41 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)02-0172-08

## Damage identification method of beam string structures with improved configuration based on modal parameters

REN Yichun, CHEN Jing, JIANG Youbao, ZHOU Hao

(Hunan Provincial Key Laboratory of Green Construction and Maintenance of Bridges and Buildings, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, P. R. China)

**Abstract:** In order to clarify the damage identification method applicable to each member type of beam string structures with an improved configuration of lower chords and struts, and to reduce misjudgments at non-damaged members, this paper proposes a damage identification index based on sub-component curvature variation and structural modes. The validity of the index was illustrated by analyzing a simply supported beam structure with a simple structural form. The finite element software ANSYS was used to establish the analysis model of beam string structures with an improved configuration of lower chords and struts. The damage of the members was simulated by reducing the elastic modulus of the member elements. Considering the symmetry

**收稿日期:**2023-11-27

**基金项目:**国家自然科学基金(52378126);湖南省自然科学基金杰出青年基金(2022JJ10050)

**作者简介:**任宜春(1969-),女,副教授,主要从事工程结构损伤诊断研究,E-mail:ryc\_is\_me@163.com。

蒋友宝(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:jiangybseu@163.com。

**Received:** 2023-11-27

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52378126); The Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Hunan Province (2022JJ10050)

**Author brief:** REN Yichun (1969-), associate professor, main research interest: damage diagnosis of engineering structures, E-mail: ryc\_is\_me@163.com.

JIANG Youbao (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: jiangybseu@163.com.

and complexity of the structure, damage conditions of single damage, multiple damage, and small damage level were set up on the members at the mid-span, quarter-span, and near the bearing ends, respectively. The improved curvature absolute difference index of sub-components and the sub-component curvature variation based on structural mode proposed in this paper were used for the comparative analysis of damage identification. The findings demonstrate that the index of sub-component curvature variation based on structural modes can achieve the precise localization of single and multiple damages in the structure. This index is also highly sensitive to slight damage, making it an effective method for identifying damage to beam string structures with an improved configuration of lower chords and struts.

**Keywords:** beam string structures; lower chords; struts; damage identification; modal parameters

张弦梁结构由于其自重较轻、形态优美等独特优势被广泛应用于大跨度公共建筑中,具有很大发展空间<sup>[1]</sup>。针对传统张弦梁结构抗连续倒塌性能较差等问题,蒋友宝等<sup>[2]</sup>通过改进其部分构件形式,提出了一种下弦与撑杆改进构型张弦梁结构,并对其静力性能、承载能力等方面进行了数值模拟与模型试验,结果表明,该结构冗余度较高,抗连续倒塌性能较好<sup>[3]</sup>。随着服役时间的增长,结构将出现安全评估与维修加固的需求,建筑结构因局部损伤而导致倒塌的事件时有发生<sup>[4]</sup>。张弦梁结构尤其是下弦与撑杆改进构型张弦梁结构规模大、杆件繁多、受力机理复杂,难以用肉眼识别局部微小的损伤,如果不及及时进行干预,往往会影响其正常工作,甚至造成巨大的安全事故及严重的经济损失。因此,对此类在役结构进行损伤识别具有重要的现实意义。

基于动力特性的损伤识别方法已被广泛应用于大型结构损伤识别研究中,下弦与撑杆改进构型张弦梁结构连接较复杂,具有类似承弯结构的动力特性。目前,关于结构损伤识别的研究主要集中在梁式结构、板式结构和多层框架结构等简单结构<sup>[5-7]</sup>,而针对张弦梁结构等大跨度空间结构的研究较少。Pandey等<sup>[8]</sup>提出了一种基于曲率模态的损伤识别方法;曲率模态是承弯振动结构的固有特性,相较于振型模态等参数,其对结构局部特征变化更加敏感。曾滨等<sup>[9]</sup>通过对比模态置信因子法、坐标模态置信因子法和曲率模态法证明了曲率模态法对张弦桁架结构损伤识别效果较好,但未研究其撑杆损伤的工况,无法说明曲率模态法对结构各杆件类型的适用性。余自若等<sup>[10]</sup>验证了频率变化率和正则化频率变化率指标对张弦结构具有较高的适用性,但无法对结构对称位置进行损伤识别。曾滨等<sup>[11]</sup>将数据融合方法与曲率模态改变率、模态柔度差曲率指标相结合,有效解决了单指标识别精度低的问题;但数据融合会降低部分损伤位置的识别概率,易造成漏判,且该方法未考虑撑杆以及上部桁架腹杆的损伤工况,所识别的损伤位置仅能精确到

损伤杆件所在区间,无法定位具体的损伤杆件。

总体而言,在对跨度大、杆件连接及截面形式复杂或异形的整体结构开展损伤识别时,现有方法往往未考虑指标对结构各杆件类型的适用性,或存在局部构件识别效果不理想等问题。笔者基于曲率模态理论,结合子结构基本思想,提出一种适用于下弦与撑杆改进构型张弦梁结构各杆件类型的损伤识别指标;以H型钢简支梁结构为例进行分析,验证该指标的有效性;建立下弦与撑杆改进构型张弦梁结构有限元模型并模拟多种损伤工况,对比分析该指标与其他损伤识别指标的效果。

## 1 损伤识别指标的提出

### 1.1 基于模态参数的损伤识别方法

根据承弯构件弯曲静力关系相关理论<sup>[12]</sup>可得

$$\frac{M(x)}{EI(x)} = \rho(x) = \frac{y(x)'''}{(1 + y(x)')^2} \quad (1)$$

式中: $M(x)$ 、 $EI(x)$ 、 $\rho(x)$ 分别为梁任意截面的弯矩、抗弯刚度、曲率响应; $y(x)$ 为梁任意截面 $y$ 方向的振动位移响应。根据弯曲变形小挠度原理可得

$$\rho(x) = y(x)'''' \quad (2)$$

根据模态振型叠加理论可得

$$y(x) = \sum_{i=1}^{\infty} q_i \varphi_i(x) \quad (3)$$

式中: $q_i$ 、 $\varphi_i(x)$ 分别为第 $i$ 阶广义振型坐标、模态振型函数。

对于形式复杂的结构,通过其局部构件的模态参数就能评估相应构件的损伤<sup>[13]</sup>。将传统的子结构基本思想<sup>[14]</sup>引入大型复杂结构的损伤识别中,将复杂结构分解为若干个子构件,定义子构件的中点及两端点为关键节点,取各关键节点的位移模态 $\varphi(r)$ ( $r$ 为关键节点数量),组成结构整体第 $i$ 阶位移模态信息 $\Phi_i$ 。

$$\Phi_i = [\varphi_i(1), \varphi_i(2), \varphi_i(3) \cdots \varphi_i(r-1), \varphi_i(r)] \quad (4)$$

参考李萍等<sup>[15]</sup>针对测点间距对曲率模态求解影

响的研究,根据模态置信准则,对子构件曲率观测点进行优化布置。基于此,提出子构件第*i*阶曲率的概念:取各子构件的中点作为第*i*阶曲率观测点,相应子构件的第*i*阶曲率值 $\varphi_i''(m)$ 可通过中心差分法<sup>[16]</sup>由该子构件的3个关键节点位移模态近似计算得到,进而组成结构第*i*阶曲率信息 $\Phi_i''$ 。

$$\varphi_i''(m) = \frac{\varphi_i(m^-) - 2\varphi_i(m) + \varphi_i(m^+)}{\left[\frac{l(m)}{2}\right]^2} \quad (5)$$

$$\Phi_i'' = [\varphi_i''(1), \varphi_i''(2) \cdots \varphi_i''(m-1), \varphi_i''(m)] \quad (6)$$

式中: $\varphi_i(m)$ 、 $\varphi_i(m^-)$ 、 $\varphi_i(m^+)$ 分别为第*m*个子构件中点、左右两端点的第*i*阶位移模态值; $l(m)$ 为第*m*个子构件的长度; $m$ 为结构子单元数量。

由式(3)、式(6)可知,当*x*取各子单元中点时,曲率响应 $\rho(m)$ 可表示为子单元曲率观测点各阶曲率值 $\varphi_i''(m)$ 的叠加。

$$\rho(m) = \frac{M(m)}{EI(m)} = \sum_{i=1}^{\infty} q_i \varphi_i''(m) \quad (7)$$

假设损伤不改变子构件的质量和截面形状,只引起局部弹性模量*E*的降低,定义 $\eta(m)$ 为子构件损伤程度。若结构局部某一子构件发生损伤,则其抗弯刚度 $EI(m)$ 下降,由式(7)可知,损伤子构件的曲率值 $\varphi_i''(m)$ 会发生突变,故抗弯刚度 $EI(m)$ 的变化位置与 $\varphi_i''(m)$ 的突变位置一一对应。

张开银等<sup>[17]</sup>利用曲率模态绝对差作为桥梁结构的损伤定位指标。对损伤前后的第*i*阶曲率作差,可消除部分子构件损伤前后第*i*阶曲率值均较大这一现象的干扰,进而放大损伤识别效果,具体算式为

$$\Delta\varphi_i''(m) = |\varphi_{0i}''(m) - \varphi_{di}''(m)| \quad (8)$$

式中: $\varphi_{0i}''(m)$ 、 $\varphi_{di}''(m)$ 分别为子构件*m*损伤前后的第*i*阶曲率值。

### 1.2 改进的曲率绝对差指标

某些单元损伤前后的模态振型方向会改变,使得曲率模态绝对差指标失效。为此,朱岩等<sup>[16]</sup>提出更为敏感、精确的损伤定位指标,以修正数值模拟的偏差,即改进的曲率模态绝对差。根据以上推导可得子构件第*i*阶改进的曲率绝对差指标 $\Delta\Phi_i''(m)$ 。

$$\Delta\Phi_i''(m) = \left| |\varphi_{0i}''(m)| - |\varphi_{di}''(m)| \right| = \left| \frac{|\varphi_{0i}''(m)|\eta(m)}{(1-\eta(m))} \right| \quad (9)$$

### 1.3 基于结构模态的子构件曲率变化指标

由式(9)可知,在某阶曲率节点(即 $\varphi_{0i}''(m) = 0$ )处,无论损伤多严重, $\varphi_{0i}''(m)$ 、 $\varphi_{di}''(m)$ 和 $\Delta\Phi_i''(m)$ 始

终为0,因此 $\Delta\Phi_i''(m)$ 指标对某阶曲率节点处损伤不敏感甚至失效。由于各阶模态节点不尽相同,且测试过程易受所处试验环境的影响,使得模态信息中包含各种干扰,因此,可综合利用多阶模态信息来克服单阶模态的不足,进而提出一种新的损伤识别指标,即基于结构模态的子构件曲率变化指标,记为 $PNM^j$ 。

在某一损伤工况下,利用 $\Delta\Phi_i''(m)$ 的最小值 $\Delta\Phi_i''(m)_{\min}$ 与最大值 $\Delta\Phi_i''(m)_{\max}$ 对 $\Delta\Phi_i''(m)$ 指标进行归一化处理,得到子构件第*i*阶归一化改进曲率绝对差指标,记为 $\Delta\Phi_i''(m)_{\text{NM}}$ ;将各阶 $\Delta\Phi_i''(m)_{\text{NM}}$ 指标对应相乘,即可得到各子构件的 $PNM^j$ 指标。

$$\Delta\Phi_i''(m)_{\text{NM}} = \frac{\Delta\Phi_i''(m) - \Delta\Phi_i''(m)_{\min}}{\Delta\Phi_i''(m)_{\max} - \Delta\Phi_i''(m)_{\min}} \quad (10)$$

$$P'_{\text{NM}} = \prod_{i=1}^j \Delta\Phi_i''(m)_{\text{NM}} \quad (11)$$

式中: $P'_{\text{NM}}$ 为 $PNM^j$ 指标; $j$ 为模态阶数; $\prod_{i=1}^j \Delta\Phi_i''(m)_{\text{NM}}$ 表示 $\Delta\Phi_i''(m)_{\text{NM}}$ 值从第1阶到第*j*阶的连乘。

由式(11)可知: $PNM^1$ 对应为子构件第1阶归一化的改进曲率绝对差指标 $\Delta\Phi_1''(m)_{\text{NM}}$ 。归一化处理提高了计算精度,使 $\Delta\Phi_i''(m)_{\text{NM}}$ 指标的数值在(0,1)内变化,从而使结构各阶模态的损伤指标识别结果具有可比性。 $PNM^j$ 指标在计算时无需用到所有频率和振型,且实际结构在测量时也不能得到所有模态,通常前1~3阶模态容易准确测得,故忽略3阶以上模态。

## 2 $PNM^j$ 指标的有效性验证

以结构形式简单的简支梁为例进行分析,验证基于结构模态的子构件曲率变化指标 $PNM^j$ 的有效性。

### 2.1 模型简介

参考文献[18]中的某H型钢简支梁,将其划分为10个子构件并建立ANSYS模型,见图1。分别在近支座端和跨中位置设置不同损伤工况(见表1),通过改变预设损伤位置对应单元的弹性模量来模拟损伤。

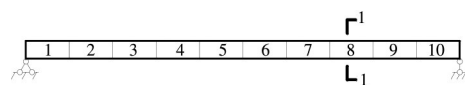


图1 简支梁结构

Fig. 1 Simply supported beam

### 2.2 损伤识别指标分析

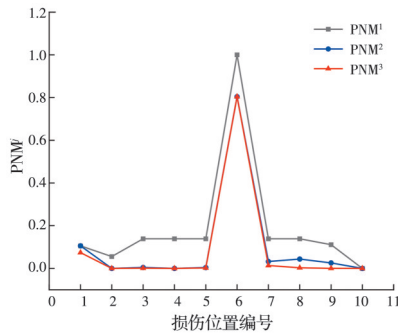
基于简支梁损伤前后的前3阶模态振型,根据式(11)计算得到 $PNM^j$ 指标,结果如图2所示。

由图2可知: $PNM^j$ 指标在损伤位置达到峰值,

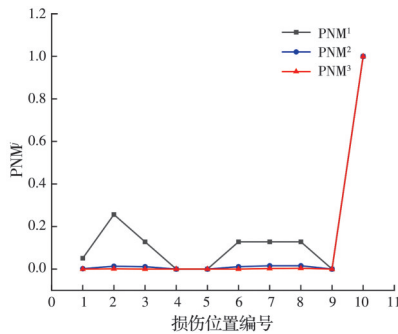
表 1 简支梁损伤工况设置

Table 1 Damage condition settings of simply supported beam

工况	损伤位置	损伤程度/%
N1	无损	0
N2	6	30
N3	10	30



(a) 工况 N2



(b) 工况 N3

图 2 PNM<sup>i</sup> 指标识别结果

Fig. 2 Identification results of PNM<sup>i</sup> index

且基本消除了结构近支座端因约束作用产生的“边端效应”影响<sup>[18]</sup>,能精准定位损伤。

### 3 改进构型张弦梁结构损伤识别分析

#### 3.1 模型简介

分析模型参考上海源深体育馆屋盖结构中的单榀传统张弦梁结构<sup>[19]</sup>,按 12:1 的比例进行缩尺简化;采用新型交叉撑杆替代单一竖向撑杆<sup>[2-3]</sup>,并对前期设计的结构模型截面尺寸进行优化,最终得到下弦与撑杆改进构型张弦梁结构。该结构的下拉

索穿过下弦杆下端耳板的钢丝绳孔,如图 3(1-1 剖面图)所示。采用 ANSYS 软件建立有限元分析模型,各杆件的设计参数见表 2。

表 2 结构模型杆件尺寸

Table 2 Sizes of the structural members

类型	截面	规格
上弦杆	方形	30 mm×20 mm×2.0 mm
下弦杆	方形	20 mm×20 mm×1.5 mm
上撑杆	圆管	16 mm×1.5 mm
下撑杆	圆管	18 mm×1.5 mm

为验证下弦与撑杆改进构型张弦梁结构模型的可靠性,对模型进行动力试验,试验现场如图 4 所示,前 3 阶频率的试验结果与数值模拟结果见表 3。由表 3 可知,数值模拟与试验结果的最大误差在 5% 以内,验证了该有限元模型的准确性。

将下弦与撑杆改进构型张弦梁结构按各杆件交点划分为 40 根杆件,按杆件在结构中的位置将其分为上弦杆、下弦杆、上撑杆、下撑杆 4 种类型,并对各类杆件进行命名与编号:1~9 为上弦杆(SXG),10~16 为下弦杆(XXG),17~28 为上撑杆(SCG),29~40 为下撑杆(XCG)。将各杆件设为子构件,取其中点和两端点作为关键节点,提取 61 个关键节点的模态信息。

将原结构在使用阶段的荷载等效为节点荷载,采用施加初应变的方式对拉索施加预应力。通过改变预设损伤杆件对应单元的弹性模量来实现刚度折减,从而模拟杆件损伤。为充分考虑不同类型杆件损伤的随机性,同时结合结构对称且复杂的特点,考虑到单一损伤工况下不同杆件损伤可能产生相同或相似的模态响应,分别在跨中、1/4 跨、近支座端的上下弦杆和上下腹杆上设置单损伤、多损伤及小程度损伤 7 种损伤工况(见表 4),各损伤杆件的位置如图 3 所示。

#### 3.2 损伤识别指标对比分析

##### 3.2.1 单损伤工况的损伤定位

分别采用子构件前 3 阶改进的曲率绝对差指标  $\Delta\Phi_{ij}''(x)$  和基于结构模态的子构件曲率变化指标

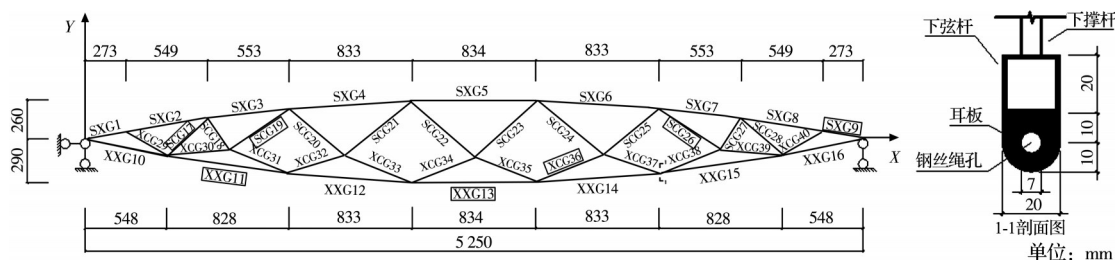


图 3 杆件编号及损伤杆件位置示意图

Fig. 3 Member numbering and damaged member location diagram



图 4 动力试验现场  
Fig. 4 Dynamic test site

表 3 前 3 阶频率对比

Table 3 Comparison of the first three frequencies

阶数	数值模拟/Hz	试验结果/Hz	误差/%
1	46.344	46.875	1.13
2	117.43	120.117	2.23
3	134.75	128.906	4.53

表 4 有限元模拟损伤工况

Table 4 Damage conditions in finite element simulation

工况	类型	损伤杆件	损伤程度/%
N1	无损	无	0
N2	单损伤	SXG9	30
N3	单损伤	XCG36	30
N4	小损伤	SXG6	10
N5	小损伤	SCG21	10
N6	多损伤	SCG19、SCG26	40、50
N7	多损伤	SXG21、SXG4、XXG13	60、50、30

PNM<sup>i</sup> 对下弦与撑杆改进构型张弦梁结构进行单损伤识别。考虑表 4 中工况 N2、N3, 分别在结构近支座端 SXG9 和跨中部 XCG36 处模拟损伤。

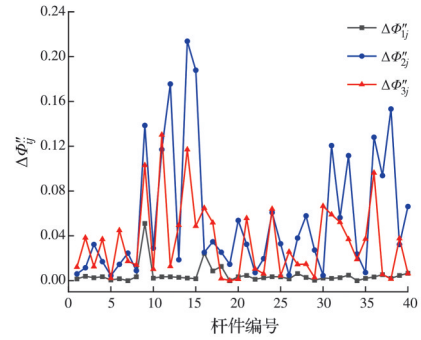
1) 基于  $\Delta\Phi''_j(x)$  指标的损伤定位。根据式(9) 计算得到  $\Delta\Phi''_j$  指标, 通过观察该指标发生突变的位置来判断结构发生损伤的位置, 如图 5 所示。

由图 5(a) 可见,  $\Delta\Phi''_{1j}$ 、 $\Delta\Phi''_{2j}$ 、 $\Delta\Phi''_{3j}$  指标均在损伤位置 SXG9 处出现峰值; 其中  $\Delta\Phi''_{1j}$  指标仅在非损伤杆件 XXG16(该杆件于支座端与损伤杆件 SXG9 相交) 处产生明显误判, 而  $\Delta\Phi''_{2j}$ 、 $\Delta\Phi''_{3j}$  指标波动较大, 在大量非损伤杆件处产生不可忽视的干扰。

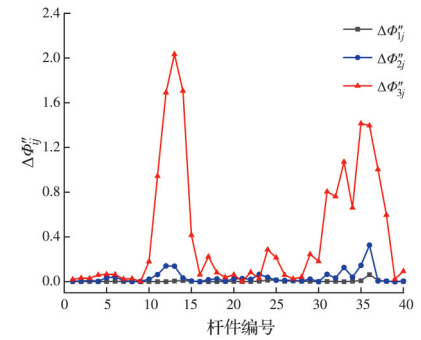
由图 5(b) 可见,  $\Delta\Phi''_{1j}$ 、 $\Delta\Phi''_{2j}$  指标均在损伤位置 XCG36 处出现峰值;  $\Delta\Phi''_{1j}$  指标在该处峰值较小, 仅能勉强判断出此处为损伤杆件;  $\Delta\Phi''_{2j}$  指标在与损伤杆件临近的非损伤杆件 XXG13 等位置产生误判;  $\Delta\Phi''_{3j}$  指标虽在该处出现峰值, 但整体已失效。

$\Delta\Phi''_j$  指标在某些与损伤杆件临近或对称的非损伤杆件处出现无规则的突起, 造成损伤位置误判甚至指标失效。 $\Delta\Phi''_j$  指标整体波动较小, 但在损伤杆件处峰值不明显。随着模态阶数的递增,  $\Delta\Phi''_j$  指标识别效果变差。限于篇幅, 对比分析仅考虑子构件第 1 阶改进的曲率绝对差指标  $\Delta\Phi''_j$ 。

2) 基于 PNM<sup>i</sup> 指标的损伤定位。由于  $\Delta\Phi''_j$  指标



(a) 工况 N2



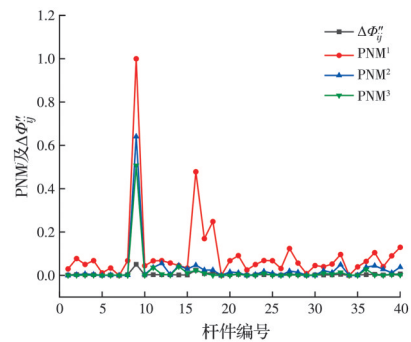
(b) 工况 N3

图 5 单损伤工况下  $\Delta\Phi''_j$  指标识别结果

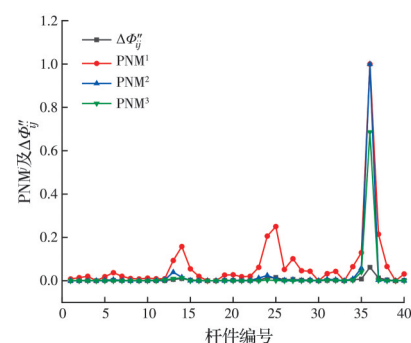
Fig. 5 Identification results of  $\Delta\Phi''_j$  index under single damage condition

存在误判情况, 根据式(11) 计算得到 PNM<sup>i</sup> 指标, 并将  $\Delta\Phi''_j$  指标与之进行对比, 见图 6。

由图 6 可见: PNM<sup>1</sup>、PNM<sup>2</sup>、PNM<sup>3</sup> 指标均在工



(a) 工况 N2



(b) 工况 N3

图 6 单损伤工况下 PNM<sup>i</sup> 指标与  $\Delta\Phi''_j$  指标识别结果对比

Fig. 6 Comparison of identification results of PNM<sup>i</sup> index and  $\Delta\Phi''_j$  index under single damage condition

况预设损伤杆件处出现明显峰值,且基本消除了结构近支座端因具有约束作用而产生的“边端效应”影响<sup>[18]</sup>;PNM<sup>2</sup>、PNM<sup>3</sup>指标在非损伤位置处趋于平滑,基本能消除 $\Delta\Phi_{ij}''$ 指标在非损伤杆件处产生的误判,且在损伤杆件处峰值较明显,弥补了低阶模态下 $\Delta\Phi_{ij}''$ 指标在损伤杆件位置峰值不明显的缺陷;PNM<sup>3</sup>指标在非损伤杆件处比PNM<sup>2</sup>指标更平滑,识别精度略高于PNM<sup>2</sup>指标。

### 3.2.2 小损伤工况的识别效果

为研究PNM<sup>j</sup>指标在杆件损伤程度较小时的识别效果,设置工况N4、N5,损伤程度为10%。计算得到 $\Delta\Phi_{ij}''$ 指标与PNM<sup>j</sup>指标,结果分别见图7、图8。

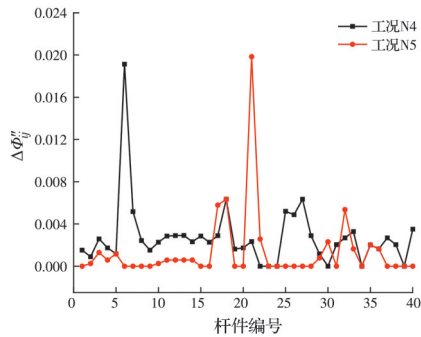
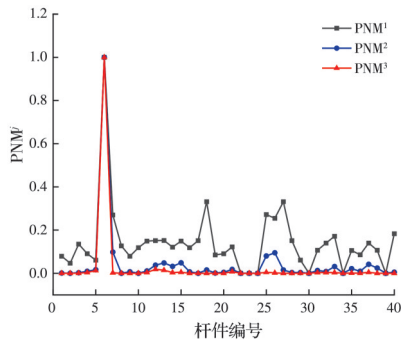
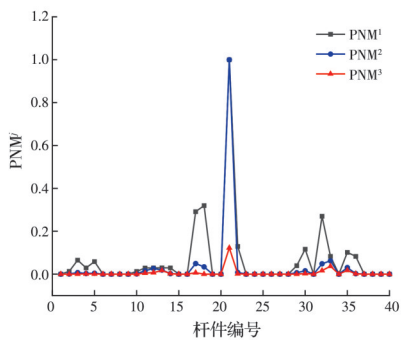


图 7 小损伤工况下 $\Delta\Phi_{ij}''$ 指标识别结果

Fig. 7 Identification results of  $\Delta\Phi_{ij}''$  index under small loss condition



(a) 工况 N4



(b) 工况 N5

图 8 小损伤工况下 PNM<sup>j</sup>指标识别结果

Fig. 8 Identification results of PNM<sup>j</sup> index under small damage condition

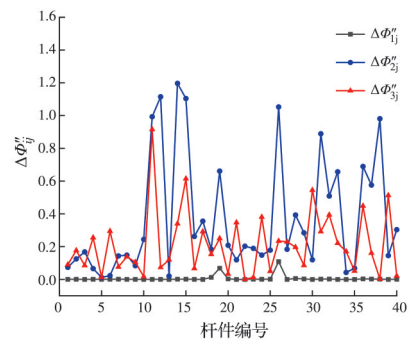
由图7可知, $\Delta\Phi_{ij}''$ 指标分别在SXG6、SCG21处出现峰值,与工况N4、N5预设损伤杆件位置一致,但在大量非损伤杆件位置的波动较大,易产生误判。

由图8可见,PNM<sup>2</sup>、PNM<sup>3</sup>指标明显比PNM<sup>1</sup>指标平滑,基本消除了非损伤杆件处的波动,可得到精确无误的损伤定位结果。

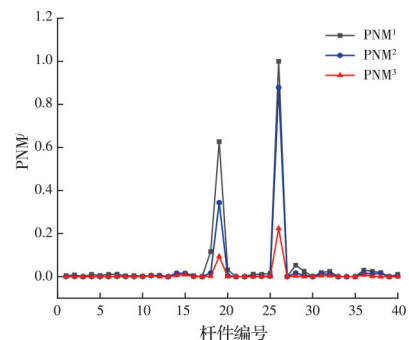
$\Delta\Phi_{ij}''$ 指标对于损伤程度较小的工况定位不准确,在非损伤杆件处的干扰和误判概率较大。PNM<sup>2</sup>、PNM<sup>3</sup>指标在损伤程度较小的工况下也可实现结构损伤的精准定位,能弥补 $\Delta\Phi_{ij}''$ 指标在小损伤程度工况下误判干扰大的缺陷,且PNM<sup>3</sup>指标比PNM<sup>2</sup>指标在非损伤处更平滑,识别效果更好。

### 3.2.3 多损伤工况的损伤定位

为研究PNM<sup>j</sup>指标对多损伤工况的识别效果,在结构的半跨、全跨分别考虑同类型/不同类型杆件、共节点/不共节点杆件的组合损伤形式,设置N6、N7两种杆件组合多损伤工况。对各工况分别计算,得到结构的 $\Delta\Phi_{ij}''$ 指标与PNM<sup>j</sup>指标,结果见图9、图10。



(a) 工况 N6 下 $\Delta\Phi_{ij}''$ 指标识别结果



(b) 工况 N6 下 PNM<sup>j</sup>指标识别结果

图 9 多损伤工况 N6 下的指标识别结果

Fig. 9 Identification results of indexes under multi-damage condition N6

由图9(a)可知, $\Delta\Phi_{1j}''$ 、 $\Delta\Phi_{2j}''$ 指标均在工况N6的损伤杆件SCG19、SCG26处出现两个峰值,但 $\Delta\Phi_{ij}''$ 指标峰值较小, $\Delta\Phi_{2j}''$ 指标在大量非损伤杆件处波动

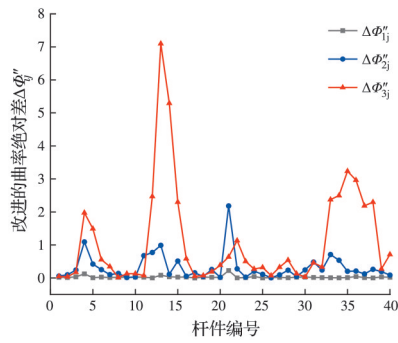
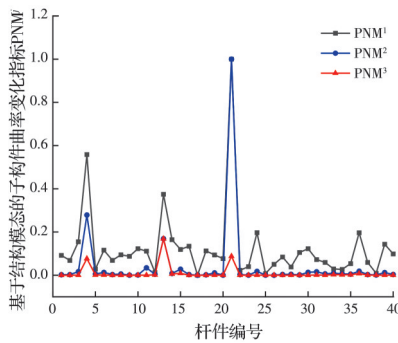
(a) 工况 N7 下  $\Delta\Phi_{ij}''$  指标识别结果(b) 工况 N7 下  $PNM^l$  指标识别结果

图 10 多损伤工况 N7 下的指标识别结果

Fig. 10 Identification results of indexes under multi-damage condition N7

较大; $\Delta\Phi_{ij}''$  指标未出现峰值,整体呈现无规律波动,完全失效。

由图 10(a)可知, $\Delta\Phi_{ij}''$  指标在工况 N7 损伤杆件 SXG4、XXG13、SCG21 处出现 3 个微小峰值; $\Delta\Phi_{ij}''$  指标虽同样出现 3 个峰值,但在非损伤杆件处波动较大; $\Delta\Phi_{ij}''$  指标在非损伤杆件 XCG35 处出现第 2 个峰值,产生明显误判。

由图 9(b)、10(b)可知, $PNM^1$ 、 $PNM^2$ 、 $PNM^3$  指标在各工况损伤杆件处均出现明显峰值;其中, $PNM^1$  指标在非损伤杆件处波动较大, $PNM^2$ 、 $PNM^3$  指标在非损伤杆件处趋于平滑,基本消除了  $\Delta\Phi_{ij}''$  指标产生的误判。

由此可见, $\Delta\Phi_{ij}''$  指标在非损伤杆件处会产生不可忽视的误判,甚至出现指标完全失效的情况。对比可知, $PNM^1$  指标在非损伤杆件处波动较大,损伤定位效果一般; $PNM^2$ 、 $PNM^3$  指标可对结构多损伤组合工况实现精准定位,基本消除  $\Delta\Phi_{ij}''$  指标的误判,且  $PNM^3$  指标在非损伤杆件处比  $PNM^2$  指标更平滑。

## 4 结论

提出基于结构模态的子构件曲率变化指标,并将其应用于改进构型张弦梁结构的损伤识别分析。

主要结论如下:

1) 基于结构模态的子构件曲率变化指标综合考虑了多阶模态信息,基本消除了高阶模态下子构件改进曲率绝对差指标产生的误判,弥补了其在低阶模态下损伤杆件处峰值不明显的缺陷;同时,该指标能基本消除近支座端因约束作用产生的“边端效应”。

2) 基于结构前 2 阶模态和前 3 阶模态的子构件曲率变化指标能对小损伤工况实现精准定位,解决了小损伤信号易被“弱化”的问题,且基于前 3 阶模态的指标识别精度更高。

3) 对于结构形式对称且复杂的下弦与撑杆改进构型张弦梁结构,当其跨中、1/4 跨、近支座端处各杆件出现单损伤工况或者其半跨、全跨出现多损伤组合工况时,基于结构模态的子构件曲率变化指标的损伤识别效果均较准确。

## 参考文献

- [1] LEE S, SEO M, KIM S M, et al. Effects of design parameters on the static responses of two-way beam string structure [J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2023, 51(11): 6374-6392.
- [2] 蒋友宝, 周浩, 康维, 等. 基于抗连续倒塌性能的张弦梁结构撑杆构型与数值验证[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(增刊 1): 186-194.
- [3] 蒋友宝, 陈奕琳, 张梦华, 等. 下弦与撑杆改进构型张弦梁结构抗连续倒塌动力试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(4): 178-187.
- [4] JIANG Y B, CHEN Y L, ZHANG M H, et al. Dynamic experimental study on anti-progressive collapse of beam string structure with improved configuration of lower chord and strut [J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(4): 178-187. (in Chinese)
- [5] ADAM J M, PARISI F, SAGASETA J, et al. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century [J]. *Engineering Structures*, 2018, 173: 122-149.
- [6] HU Q, ZHOU N F, CHEN H, et al. Bayesian damage identification of an unsymmetrical frame structure with an improved PSO algorithm [J]. *Structures*, 2023, 57: 105119.
- [6] LI J W, YU L, QI T R, et al. Structural damage

- identification based on quadratic optimization of objective functions with modal residual force and weighting strategy [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2024, 37(1): 04023089.
- [7] DAHAK M, TOUAT N, KHAROUBI M. Damage detection in beam through change in measured frequency and undamaged curvature mode shape [J]. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2019, 27(1): 89-114.
- [8] PANDEY A K, BISWAS M, SAMMAN M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, 145(2): 321-332.
- [9] 曾滨, 周臻, 赵军, 等. 张弦桁架结构基于模态参数的损伤识别[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(增刊1): 134-138. ZENG B, ZHOU Z, ZHAO J, et al. Damage identification of truss string structure based on modal parameters [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(Sup 1): 134-138. (in Chinese)
- [10] 余自若, 孙振亚, 张明波, 等. 基于模态参数的铁路站台张弦结构损伤识别[J]. *铁道工程学报*, 2017, 34(7): 84-90. YU Z R, SUN Z Y, ZHANG M B, et al. Damage identification of beam string structure on the railway platform based on modal parameter [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(7): 84-90. (in Chinese)
- [11] 曾滨, 周臻, 张庆方, 等. 基于数据融合的张弦桁架损伤识别方法与试验研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(8): 28-37, 86. ZENG B, ZHOU Z, ZHANG Q F, et al. Analytical and experimental research on damage identification of cable-stayed arch-truss based on data fusion [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(8): 28-37, 86. (in Chinese)
- [12] NGUYEN D H, ABDEL WAHAB M. Damage detection in slab structures based on two-dimensional curvature mode shape method and Faster R-CNN [J]. *Advances in Engineering Software*, 2023, 176: 103371.
- [13] 邓焱, 严普强. 桥梁结构损伤的振动模态检测[J]. *振动测试与诊断*, 1999, 19(3): 3-9. DENG Y, YAN P Q. Structural damage detection of bridges using vibration modal measurements [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 1999, 19(3): 3-9. (in Chinese)
- [14] 吴多, 刘来君, 秦煜, 等. 基于子构件曲率模态变化的桥梁损伤识别研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2018, 34(1): 31-41. WU D, LIU L J, QIN Y, et al. Study on the bridge damage identification based on the curvature mode change of the sub-components [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2018, 34(1): 31-41. (in Chinese)
- [15] 李萍, 张劲泉, 王磊. 测点间距对曲率模态检测结构损伤的影响分析及解决方法[J]. *建筑结构*, 2023, 53(16): 130-137. LI P, ZHANG J Q, WANG L. Influence analysis and solution of measure-point distance on structural damage detection by curvature modal [J]. *Building Structure*, 2023, 53(16): 130-137. (in Chinese)
- [16] 朱岩, 蒋青桔. 曲率模态参数法在张弦结构定量损伤识别中的研究和应用[J]. *工业建筑*, 2022, 52(10): 71-77. ZHU Y, JIANG Q J. Research and application of the curvature modal parameter method in quantitative damage identification of string structures [J]. *Industrial Construction*, 2022, 52(10): 71-77. (in Chinese)
- [17] 张开银, 孙峙华, 邹晓军, 等. 桥梁结构损伤识别的曲率模态技术[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2004, 28(6): 855-858. ZHANG K Y, SUN Z H, ZOU X J, et al. Curvature mode technique of damage identification for beam bridge structure [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2004, 28(6): 855-858. (in Chinese)
- [18] 刘红波, 王龙轩, 马子达, 等. 分段小波分析与改进粒子群算法的两阶段桁架结构损伤识别[J]. *建筑科学*, 2023, 39(7): 28-36. LIU H B, WANG L X, MA Z D, et al. Segmented wavelet analysis and improved particle swarm optimization for two-stage truss structure damage identification [J]. *Building Science*, 2023, 39(7): 28-36. (in Chinese)
- [19] 薛伟辰, 刘晟, 苏旭霖, 等. 上海源深体育馆预应力张弦梁优化设计与试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(1): 16-23. XUE W C, LIU S, SU X L, et al. Design optimization and experimental study on prestressed beam string of Shanghai Yuanshen Arena [J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29(1): 16-23. (in Chinese)

(编辑 朱备)