

文章编号: 1007-7294(2025)05-0807-13

基于 IFEM 的典型加筋板结构应变重构方法研究

许梦桐¹, 蒋镇涛², 汪雪良², 朱全华², 陈国材², 甘进¹

(1. 武汉理工大学 船舶海洋与能源动力工程学院, 武汉 430063; 2. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: 加筋板是船体结构的基本组成单元, 此类结构在服役过程中的安全可靠需重点关注。通过实时监测技术准确获取加筋板结构的应力、应变等物理参量, 可为船体结构的安全性评估与预报提供数据支撑。本文通过基于最小二乘变分原理的逆向有限元方法(IFEM)对船体加筋板结构进行应变场重构, 首先开展轴压加筋板数值仿真研究工作, 将仿真结果输入到逆向有限元算法中进行结构应变场重构, 其次通过设计不同的测点布置方案, 分析重构结果与仿真结果之间的误差, 并结合 Xgboost 算法为离散测点的数量和位置选择提供依据。结果表明: IFEM 可适用于船体加筋板结构的应变重构工作, 而通过适当的测点位置优化, 可在保持高精度逆有限元重构结果的同时, 大量减少逆有限元模型中的测点数量。本文研究结果可为船体结构健康监测及安全性评估提供技术支持。

关键词: 结构健康监测; 加筋板; 逆向有限元法; 应变重构; 数值计算.

中图分类号: U663.6 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.05.012

Strain reconstruction method of typical stiffened plate structures based on IFEM

XU Meng-tong¹, JIANG Zhen-tao², WANG Xue-liang², ZHU Quan-hua², CHEN Guo-cai², GAN Jin¹

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: Stiffened plates are the basic structural units of a ship hull, and the safety and reliability of such structures are of paramount importance during service. Therefore, accurate acquisition of physical parameters such as stress and strain in stiffened plate structures through real-time monitoring techniques can provide data support for the safety assessment and prediction of ship hull structures. By employing the inverse finite element method (IFEM) based on the least squares variational principle, strain-field reconstruction of stiffened plate structures was conducted. Initially, numerical simulations were performed on axially-loaded stiffened plates, and the simulation results were then input into the inverse finite element algorithm for strain field reconstruction. By designing different measurement point layout schemes, the errors between the reconstructed results and the simulation results were analyzed. Moreover, the Xgboost algorithm was applied to provide guidance for the selection of discrete measurement point quantities and locations. The results indicate that IFEM is applicable to strain reconstruction in stiffened plate structures of ship hulls, and by

收稿日期: 2024-11-22

基金项目: 船舶总体性能创新研究开放基金资助项目(32822229)

作者简介: 许梦桐(1999-), 男, 硕士研究生;

甘进(1982-), 男, 教授, 通讯作者, E-mail: ganjinwut@163.com。

optimizing the positions of measurement points, a significant reduction in quantity of measurement points in the inverse finite element model can be achieved while maintaining high-precision reconstruction results. The findings of this study can provide technical support for the health monitoring and safety assessment of ship hull structures.

Key words: SHM; stiffened plate; inverse finite element method(IFEM); strain reconstruction; numerical calculation

0 引言

船舶在航行过程中,可能会受到来自连续海浪的长期循环载荷以及短期极端载荷的影响,从而对其结构造成损伤,因此需要对船体结构的健康状态进行实时监测。逆向有限元方法(IFEM)是一种有前途的应变信息重构结构变形的的方法,IFEM不受外部载荷特性干扰,能够直接获得结构位移场。因此,IFEM是一种适用于船舶结构健康监测的高效方法,可以及时获取船舶关键区域的应变信息,是实现高性能、高可靠性、分布式结构应变的监测与反演技术,为快速获得船舶应变场分布信息提供支持。

IFEM最早是由 Tessler 等^[1]提出,采用变分原理,以 Mindlin 中厚板理论和最小二乘变分原理为基础,建立截面应变与位移场之间的转换关系,开发了一种三节点逆壳单元(iMIN3)用于板壳结构的形状感测。随后这一方法被广泛应用于航空航天领域的结构健康监测中^[2-3]。为了在船舶与海洋结构变形监测领域实现 IFEM 的应用, Kefal 等^[4-7]提出了一种四节点四边形逆壳单元方法(iQS4)。Colombo 等⁸验证了 iQS4 方法在夹板损伤检测方面的适用性, Li 等^[9-11]则通过应用该方法进行海上风力涡轮机和圆柱壳结构的结构健康监测,随后 Abdollahzadeh 等^[12]成功地将 iQS4 应用于不同类型的简化船体结构,进行仿真分析和逆有限元位移重构,得到了准确度很高的变形重构结果。国内也有不少学者对 IFEM 方法进行了验证和应用。黄辉^[13]提出了基于中面应变理论的逆有限元方法,并在悬臂板结构上验证了其准确性;李婧^[14]通过 iQS4 的逆有限元方法开发了一套适用于船舶典型舱结构的在线监测系统,通过少量应变信息评估结构健康状况,验证了该方法的准确性和可行性,并开发了实时感知结构健康状态的监测系统;闫宏生等^[15]则研究了船体加筋板结构的位移重构问题,并通过优化测点数量和位置实现了高精度重构。这些研究结果表明,IFEM 在海洋结构变形监测领域有较广泛的应用前景。

本文基于以上的研究,进一步研究逆有限元法在实际结构中应用的可行性。以船体典型加筋板结构为研究对象,利用有限元软件 ABAQUS 对加筋板进行数值仿真分析,并提取相关目标节点应变信息来作为实际应变传感器的测量应变,对加筋板进行逆有限元应变重构以验证其重构精度,最后将 IFEM 与 Xgboost 拟合算法相结合,对离散测点进行拟合来重构全局应变场以验证其重构精度,为离散测点的数量和位置选取提供依据,从而为实际船体复杂结构应变重构和船体结构安全性评估提供理论基础和科学依据。

1 逆向有限元理论介绍

逆有限元法类似于有限元分析,将结构划分成有限个逆向单元,然后建立最小二乘微分方程,重构得到结构的位移分布。

图 1 为一四节点逆向单元(iQS4)^[4]示意图,局部坐标系原点位于单元形心处, θ_x 、 θ_y 、 θ_z 分别是绕着 x 轴负向、 y 轴正向和 z 轴正向的转角,单元厚度为 $2h$,节点 1、2、3、4 分别为单元的四个节点。由线弹性理论可知,结构表面应变 ϵ_s 可由式(1)表示为面内拉压应变 $e(u^e)$ 与弯曲应变 $k(u^e)$ 的线性组合。截面横向剪切应变 ϵ_s 由四节点单元形函数的偏导数矩阵 B_s^e 与单元节点位移矩阵 u^e 表示,如式(2)所示。

$$\varepsilon_b = e(u^e) + zk(u^e) = B_m^e u^e + zB_b^e u^e \quad (1)$$

$$\varepsilon_s = g(u^e) = B_s^e u^e \quad (2)$$

式中,形函数的偏导数矩阵 B_m^e 、 B_b^e 和 B_s^e 只与单元尺寸和节点位置坐标有关。

安装在结构上的传感器获得的离散应变是 IFEM 方法的基本输入。如图 2 所示,结构实测应变可表示为 $(\varepsilon_{xx}^+, \varepsilon_{yy}^+, \gamma_{xy}^+)_j$ 和 $(\varepsilon_{xx}^-, \varepsilon_{yy}^-, \gamma_{xy}^-)_j$, 下标 j 为单元内应变传感器个数,上标“+”和“-”分别表示结构的上、下表面, $2h$ 为结构厚度。测得的结构表面离散应变与结构平面应变以及弯曲应变之间的关系如式(3)~(4)所示。

$$e_\varepsilon^{e,j} = \frac{1}{2} \left(\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^+ \\ \varepsilon_{yy}^+ \\ \gamma_{xy}^+ \end{Bmatrix}_j + \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^- \\ \varepsilon_{yy}^- \\ \gamma_{xy}^- \end{Bmatrix}_j \right) \quad (j = 1, \dots, n) \quad (3)$$

$$k_\varepsilon^{e,j} = \frac{1}{2h} \left(\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^+ \\ \varepsilon_{yy}^+ \\ \gamma_{xy}^+ \end{Bmatrix}_j - \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^- \\ \varepsilon_{yy}^- \\ \gamma_{xy}^- \end{Bmatrix}_j \right) \quad (j = 1, \dots, n) \quad (4)$$

式中, $e_\varepsilon^{e,j}$ 为中厚板中性面拉压应变, $k_\varepsilon^{e,j}$ 为中厚板中性面弯曲应变,下标 ε 表示实际所测得离散应变值。

因此,应变向量 ε_j^e 可表示为

$$\{\varepsilon_j^e\} = \{e_\varepsilon^{e,j}\} + z\{k_\varepsilon^{e,j}\} \quad (5)$$

对于薄壳结构的变形而言,横向剪切应变 $g_\varepsilon^{e,j}$ 的影响远小于平面应变和弯曲应变。由于大多数海洋结构通常适合用薄壳来建模,因此通常忽略实测横向剪切应变。

IFEM 求解结构位移场的核心是构造最小二乘误差函数,当误差函数达到最小值时,即意味着实测应变与理论应变之间的差异最小,此时求得的单元节点位移场就对应于结构在实测应变状态下的实际变形情况。

单元内理论应变与实测应变的误差函数包含平面应变、弯曲应变以及横向剪切应变三个部分,可表示为

$$\phi_e(u^e) = \|e(u^e) - e^\varepsilon\|^2 + \|k(u^e) - k^\varepsilon\|^2 + \lambda \|g(u^e) - g^\varepsilon\|^2 \quad (6)$$

式中, λ 为罚参数 ($0 < \lambda < 1$), 其大小与测量数据与理论分析结果之间的相关程度有关,代表着结构所承受弯曲应变、平面拉压应变和横向剪切应变之间的比例关系。误差函数里的范数计算表达式如式(7)~(9)所示:

$$\|e(u^e) - e^\varepsilon\|^2 = \frac{1}{n} \iint_{A^e} \sum_{j=1}^n (e(u^e)_j - e^\varepsilon_j)^2 dx dy \quad (7)$$

$$\|k(u^e) - k^\varepsilon\|^2 = \frac{2t^2}{n} \iint_{A^e} \sum_{j=1}^n (k(u^e)_j - k^\varepsilon_j)^2 dx dy \quad (8)$$

$$\|g(u^e) - g^\varepsilon\|^2 = \frac{1}{n} \iint_{A^e} \sum_{j=1}^n (g(u^e)_j - g^\varepsilon_j)^2 dx dy \quad (9)$$

式中, $n > 0$ 是单元内应变传感器的数量,积分域 A^e 为单元内整个区域。

对误差函数关于位移向量求偏导,

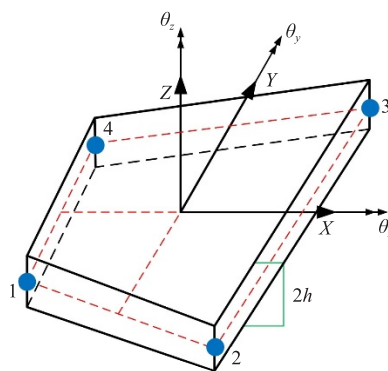


图 1 四节点逆壳单元

Fig.1 Four node inverse shell element

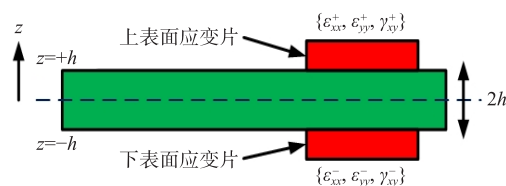


图 2 实测结构上下表面离散应变

Fig.2 Discrete strain measured on upper and lower surfaces of the structure

$$\frac{\partial}{\partial u^e} \phi_e(u^e) = k^e u^e - f^e = 0 \quad (10)$$

式中, k^e 与 f^e 表达式为

$$k^e = \iint_{A^e} \left(\begin{array}{c} (B_m^e)^T B_m^e + (2h)^2 (B_b^e)^T B_b^e + \\ \lambda (B_s^e)^T B_s^e \end{array} \right) dx dy \quad (11)$$

$$f^e = \iint_{A^e} \left(\begin{array}{c} (B_m^e)^T e_s^{e,j} + (2h)^2 (B_b^e)^T k_s^{e,j} + \\ \lambda (B_s^e)^T g_s^{e,j} \end{array} \right) dx dy \quad (12)$$

对于复杂曲面结构, 每个单元内建立的局部坐标系方向互不相同, 因此需要将各个单元局部坐标系统一转换到整体结构坐标系。先根据局部坐标系与整体坐标系里各个坐标轴方向的偏差角度来求解坐标转换矩阵 T^e , 再将单元矩阵按照式(13)~(14)进行矩阵运算以完成坐标变换。

$$\bar{f}^e = T^e f^e \quad (13)$$

$$\bar{u}^e = T^e u^e \quad (14)$$

根据式(10)、(13)~(14)可得

$$\bar{k}^e = (T^e)^T k^e T^e \quad (15)$$

式(13)~(15)中 k^e 、 f^e 、 u^e 均为整体坐标系下所对应的表达式。

为了结合结构位移边界约束条件, 使得结构内各个逆向单元之间满足变形协调条件, 统一求解结构上所有单元的各个节点的所有自由度, 将转换成整体坐标系后的单元矩阵, 按照标准的有限元总体矩阵组装步骤进行组装, 如式(16)~(18)所示。

$$\mathbf{K} = \sum_{e=1}^{nel} \bar{k}^e = \sum_{e=1}^{nel} (T^e)^T k^e T^e \quad (16)$$

$$\mathbf{F} = \sum_{e=1}^{nel} \bar{f}^e = \sum_{e=1}^{nel} T^e f^e \quad (17)$$

$$\mathbf{U} = \sum_{e=1}^{nel} \bar{u}^e = \sum_{e=1}^{nel} T^e u^e \quad (18)$$

式中, 上标 nel 为逆向单元个数, T^e 为坐标转换矩阵。

所有单元矩阵组装成结构总体矩阵后, 最终可得

$$\mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (19)$$

式中, 等号左边的 \mathbf{K} 矩阵是一个对称矩阵, 与应变测量点所在逆向单元的单元节点位置和应变测量点位置有关; 而等号右边的 \mathbf{F} 矩阵, 与结构表面的实时应变测量值有关, 故在变形监测的过程中需要进行实时更新。结合单元边界条件, 消除结构的整体刚体位移, 系数矩阵 \mathbf{K} 将简化为一个正定矩阵, 求逆后可得到所有单元节点的位移 \mathbf{U} 。求解得到单元节点的位移 \mathbf{U} 后, 根据式(1)求得结构的应变场, 最终实现对结构的应变重构。

2 加筋板应变场重构与数值验证

2.1 数值计算模型的建立

加筋板是典型的船舶结构单元, 实现加筋板结构应变场重构, 能够为船舶服役安全评估提供技术支撑。本文基于 ISSC 分析报告, 选取了如图 3 所示的纵向双跨距加筋板结构, 其横向两跨距为“1/2+1+1/2”的模型作为本节的研究对象。

该板架结构的材料为 Q235, 弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa, 泊松比 $\mu = 0.3$ 。加筋板的边界条件如图 4 所示, 加载端为固支边界, 纵向边界为自由边界。

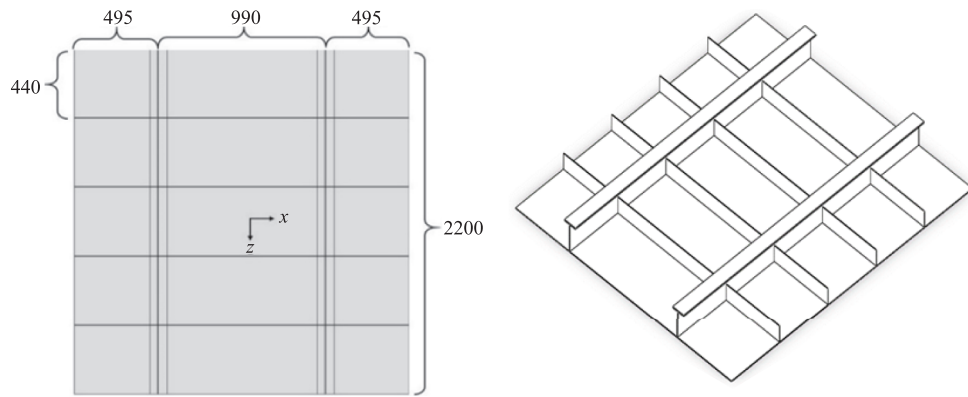


图 3 加筋板有限元模型

Fig.3 Finite element model of stiffened plate

2.2 网格收敛性分析

本节对网格尺寸大小为 10~110 mm 的模型进行分析,不同网格尺寸模型的 Mises 应力云图如图 5 所示。随着网格数量的增多,模型应力分布与最大应力计算结果逐渐趋于稳定,网格尺寸过小会降低计算效率,而过大又会导致计算结果失真,故在计算时间和网格尺寸之间需找到平衡点。由表 1 可知,当网格尺寸为 15 mm 时最大 Mises 应力计算结果趋于稳定。综合考虑计算得到的载荷与板架模型的变形模式以及计算时间,本文后续有限元模型研究的网格尺寸选为 15 mm。

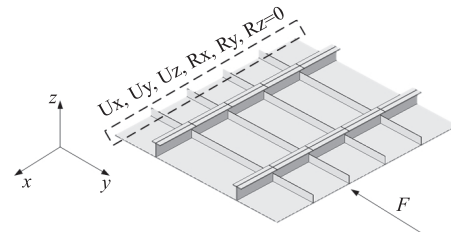


图 4 轴压加筋板载荷和边界条件

Fig.4 Load and boundary conditions of stiffened plates under axial compression

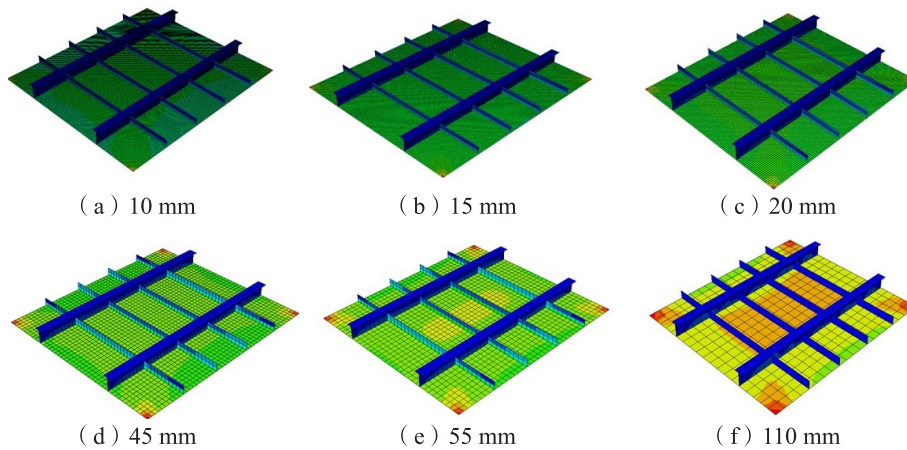


图 5 不同网格尺寸的加筋板计算结果

Fig.5 Calculation results of stiffened plates with different grid sizes

表 1 网格尺寸与最大应力

Tab.1 Mesh size and maximum stress

网格尺寸 /mm	最大Mises应力 /MPa	网格尺寸 /mm	最大Mises应力 /MPa
10	19.11	45	13.44
15	17.30	55	12.79
20	16.19	110	11.28

2.3 测点布置方案影响分析

为了探讨测点布置方案对应变场重构精度的影响,以轴压工况为例,采用有限元软件 ABAQUS 对加筋板进行仿真分析,以一个板格作为一个划分单位,在每个板格单元的纵向和横向分别布置 1 至 2 个目标测点,从而设置了四种测点布置方案如图 6 所示。提取目标测点处上下表面的应变值作为输入数据,在逆有限元算法中重构加筋板的全场应变。

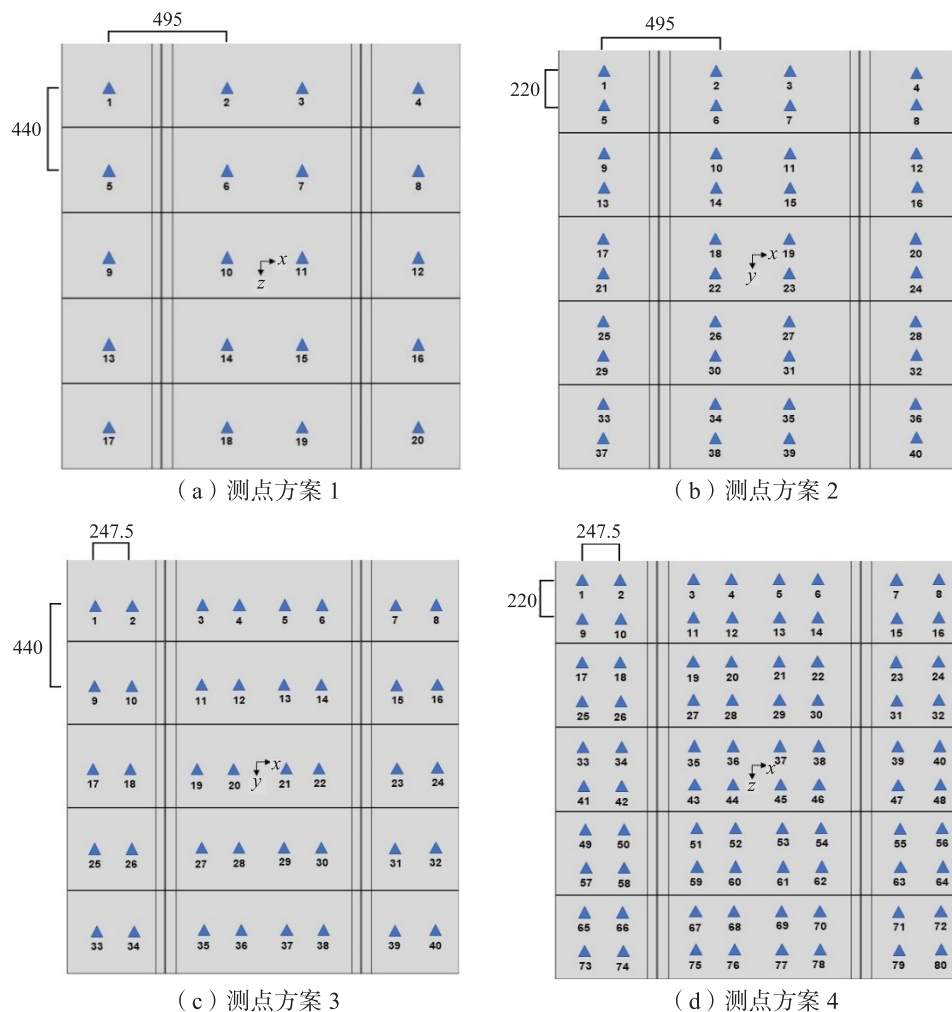


图 6 加筋板应变重构测点布置方案

Fig.6 Layout schemes of measuring points on stiffened plate for strain reconstruction

四种布置方案测点的 Mises 应变重构结果如图 7 所示。

如图 8 所示,选取 20 个随机测点作为应变场重构验证测点验证重构应变场精度。为避免结果具有偶然性,选取的随机测点与输入测点在 X 、 Y 方向上错落分布。

根据图 9 中所示的验证测点 Mises 误差分布结果可知,四种测点布置方案在验证测点处的 Mises 应变值的平均误差均在 5% 以内。表 2 列出了四种测点布置方案的 Mises 应变的平均误差和最大误差。在四种测点布置方案中,均为验证测点 18# 的 Mises 应变误差最大。需要注意的是,在验证测点编号为 16#~20# 这个区域,这些测点位于加载端附近,该区域的模型应力变化梯度较大,造成重构数据与实测数据存在一定差异,导致该区域验证测点误差较大。

从不同测点布置方案的应变重构误差结果可以看出,与测点方案 1 和 2 相比,测点方案 3 和 4 在

轴压作用下具有更高的精度,这是因为加筋板在轴压作用下,其应变梯度主要沿纵向方向变化,增加纵向测点数量有助于减小误差。因此,测点方案 3 和 4 通过在板格的纵向布置两个测点,更好地反映了板格内部的应变特征,因而具有更高的重构精度。测点方案 3 和测点方案 4 相比,虽然测点方案 4 的测点布置较为密集,但其 Mises 应变重构精度并没有大幅度提升。因此在保证应变重构精度的情况下,采用测点布置方案 3 较为合适。

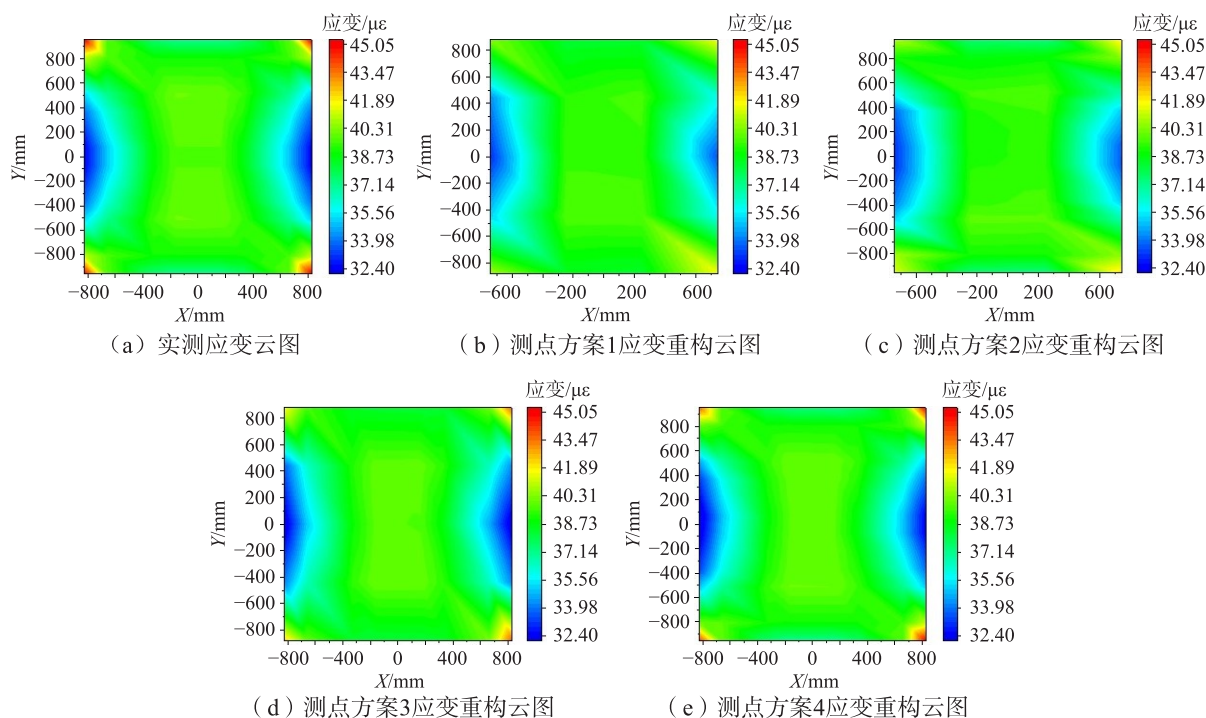


图 7 四种测点布置方案的 Mises 应变重构云图

Fig.7 Cloud maps of Mises strain reconstruction for different layout of measurement points

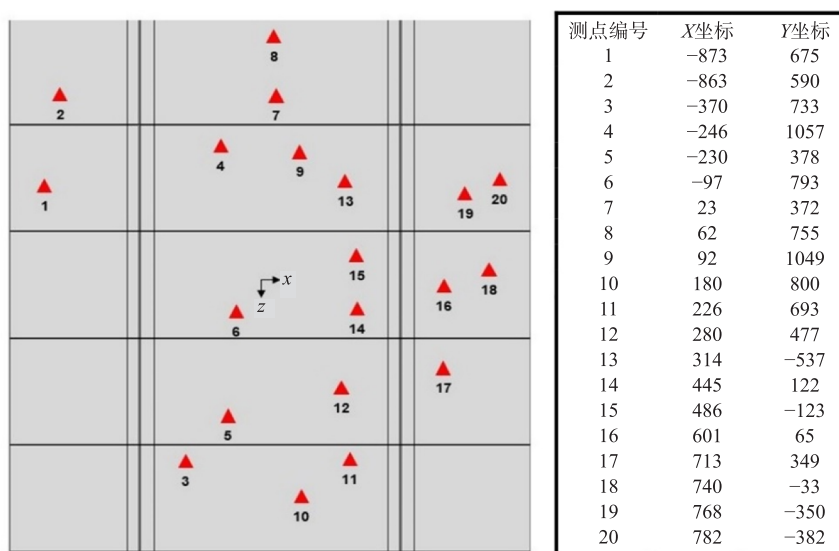


图 8 随机验证测点分布图

Fig.8 Locations of randomly selected measuring points for verification

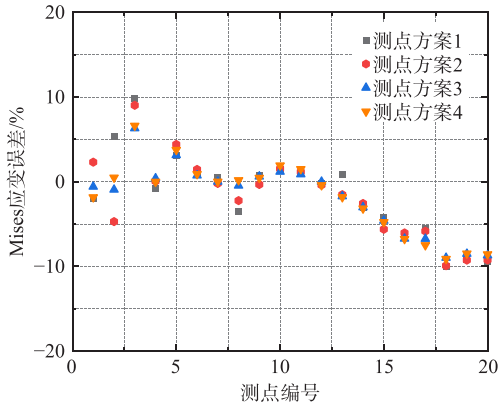


图 9 轴压工况下 4 种测点方案的 Mises 应变重构误差
Fig.9 Error of Mises strain reconstruction for different layout schemes of measuring points under axial compression

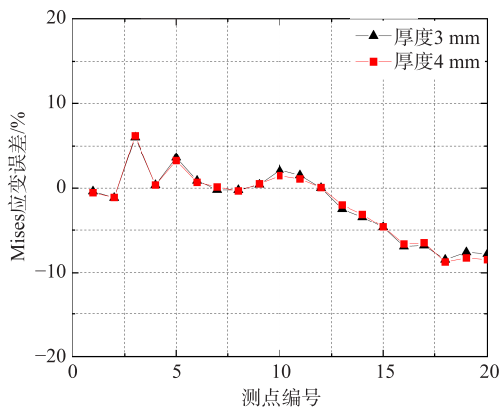
表 2 测点布置方案 Mises 应变误差

Tab.2 Mises strain error for different layout schemes of measuring points

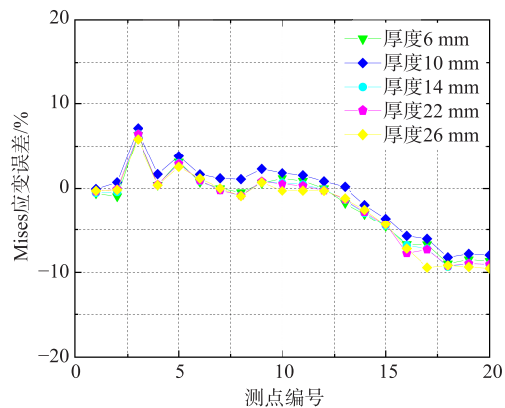
测点方案编号	Mises应变平均误差	最大误差
1	3.90%	10.03%
2	3.89%	9.92%
3	3.21%	8.98%
4	3.41%	9.10%

2.4 板厚影响因素分析

在工程应用上一般将 $0.01 \sim 0.0125 < t/l$ 或 $t/l < 0.125 \sim 0.2$ (t 为板壳的厚度, l 为板长或板宽的最小尺寸) 称为薄板壳, 将 $t/l > 0.2$ 的板壳称为中厚板壳或厚板壳^[16]。IFEM 方法基于中厚板变形理论, 在进行变形重构时适用范围有限, 但在应变重构工作中的影响尚不明确。有鉴于此, 本节将探讨板厚对应变场重构精度的影响, 依次选取厚度为 3 mm 和 4 mm 的薄板, 以及厚度为 6 mm、10 mm、14 mm、22 mm 和 26 mm 的中厚板的加筋板模型。值得注意的是, 根据“厚板”定义, 本文计算模型板厚需达到 88 mm 才可满足“厚板”要求, 这与实际工程出入较大, 故不在考虑范围内, 采用 15 mm 网格尺寸进行数值分析, 测点布置方案与 2.3 节中的方案 3 一致, 并通过随机测点来验证算法有效性。



(a) 厚度为 3~4 mm 误差对比结果



(b) 厚度为 6~26 mm 误差对比结果

图 10 不同厚度下验证测点 Mises 应变重构误差

Fig.10 Error of Mises strain reconstruction of measurement points on stiffened plates with different thickness

不同板厚下加筋板的验证测点误差分布如图 10 所示。在不同的板厚下, 20 个验证测点的 Mises 应变平均误差在 5% 以内。当厚度为 4 mm 时, 其 Mises 应变重构平均误差最小, 其中验证测点 18# 的重构误差最大。可以看出: 在薄板范围内, 适当改变板厚, 对 IFEM 的重构精度变化的影响不大。

在中厚板范围内, 当厚度为 6 mm 时, 其 Mises 应变平均误差最小, 其中验证测点 19# 的重构误差最大; 当厚度为 26 mm 时, 其 Mises 应变平均误差最大, 其中验证测点 18# 的重构误差最大。厚度 4 mm 和 26 mm 两种板厚的 Mises 应变重构结果对比如图 11 所示。不同板厚下重构出的 Mises 应变平均误差和最大误差如表 3 所示。

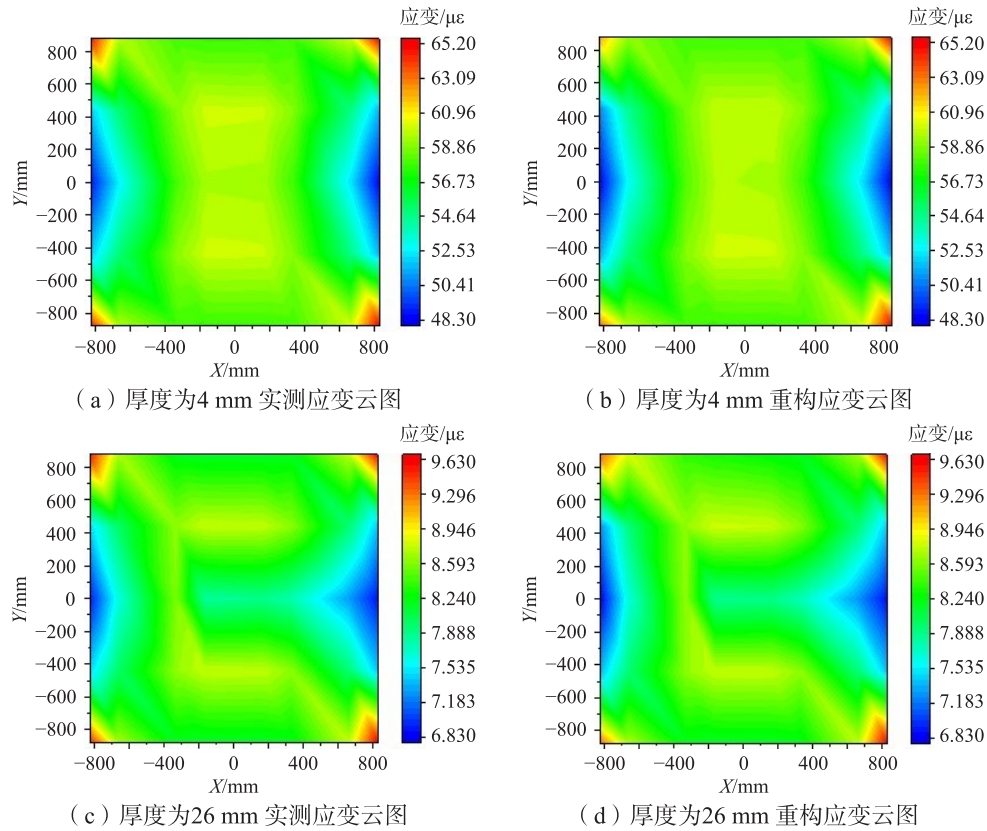


图 11 两种厚度的加筋板 Mises 应变重构结果对比图

Fig.11 Results of Mises strain reconstruction for stiffened plates with different thicknesses

表 3 不同厚度的验证测点 Mises 应变误差

Tab.3 Mises strain error for stiffened plates with different thicknesses

厚度 /mm	Mises应变平均误差	最大误差	厚度 /mm	Mises应变平均误差	最大误差
3	3.25%	8.47%	14	3.25%	9.35%
4	3.19%	8.74%	22	3.24%	9.24%
6	3.21%	8.98%	26	3.28%	9.54%
10	3.27%	8.25%			

通过表 3 误差分析可以看出,在薄板和中厚板范围内改变加筋板的板厚,逆向有限元算法的重构精度无明显变化,均能较好地重构出应变场,靠近加载端的验证测点 16#~20#的 Mises 应变重构误差大于 5%,但未超出 10%。在靠近加载端的边界处,由于应力分布的变化梯度大,重构精度会受到影响,但并不妨碍 IFEM 在整体上表现出对薄板和中厚板结构应变场进行重构的能力。说明在该板厚范围内,IFEM 对重构轴压工况下加筋板的应变场有较好的适用性。

3 加筋板应变场重构测点布置优化方法研究

3.1 基于 IFEM 的应变场重构测点布置优化

在实际研究中,通常需要布置多个测点以了解结构变形的真实情况。虽然测点越多,得到的数据越准确,但是这也增加了测量难度与成本。因此,需要在试验中尽可能少地布置测点,同时获得完整、合理的数据。此外,插值函数等方法常用于拟合试验数据来得到未布置测点的状况。所以如何合理地

布置测点就成了一个需要解决的问题。下面将重点介绍如何解决测点优化后应变测点值的输入问题,并在后续研究中着手测点优化布置问题。

3.2 测点应变的 Xgboost 拟合

在测点监测过程中由于各种因素的影响,导致部分测点可能会出现故障。这时需要一种能有效估算失效点应变值的方法,以保证识别的精度。通过最小二乘法拟合,可以在一定程度上估计失效点的值。Xgboost 回归方法的出现提供了一个新的解决方案,它不仅灵活高效且适用于复杂模式下的应变拟合。通过测点监测获取原始数据,采用故障点拟合方法处理故障点,利用 Xgboost 进行精确拟合,最后用应变重构验证结果。

Xgboost 集成了多个弱回归模型的二分树模型,形成一个强回归模型。可以建立二分树模型,如下所示:

$$\min_{j,s} \left[\min_{c_1} \sum_{x_i \in R_1(j,s)} (y_i - c_1)^2 + \min_{c_2} \sum_{x_i \in R_2(j,s)} (y_i - c_2)^2 \right] \quad (20)$$

$$R_1(j, s) = \{x | x^{(j)} \leq s\}, R_2(j, s) = \{x | x^{(j)} > s\} \quad (21)$$

$$\hat{c}_m = \frac{1}{N_m} \sum_{x_i \in R_m(j,s)} y_i \quad (22)$$

式中, R_1 、 R_2 是分割的输入空间, c_1 、 c_2 是对应的输出值。对 R_1 、 R_2 重复式(20)直到满足收敛条件,将输入空间分成 m 个区域 $R_1, R_2 \dots R_m$ 生成决策树。在本研究中,通过设置二分树的最大深度来限制收敛准则。

如图 12 所示, Xgboost 方法的原理是建立一个新的决策树模型,该模型正在学习一个新的函数来拟合上次迭代预测的残差。将所有二分树模型的回归值相加,得到最终的回归结果。

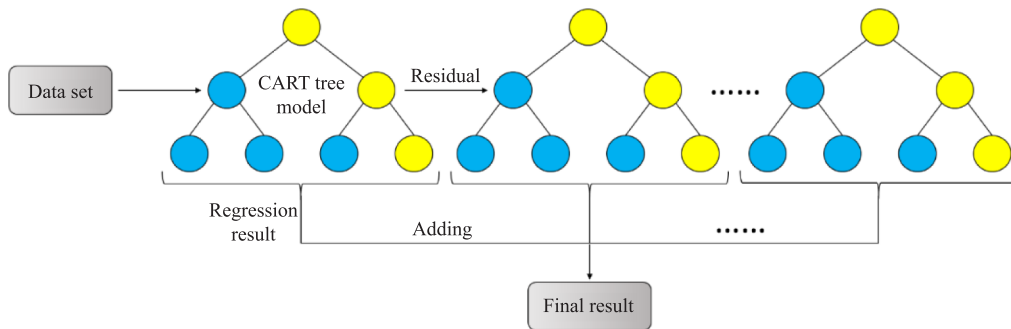


图 12 Xgboost 回归法

Fig.12 Xgboost regression method

基于 Xgboost 回归方法,本文提出了一种改进缺陷点拟合 IFEM 重构测点输入的方法,具体如下:

(a) 以已有测点的坐标作为训练集的输入,以应变作为训练集的回归值。然后,采用 Xgboost 方法对训练集进行训练。

(b) 将目标缺失测点的坐标输入训练模型,输出拟合应变值。最后,将拟合应变引入到应变重构方法中,进行结构应变重构。

3.3 方法验证

以轴压工况为例,以 2.3 节中的测点方案 3 为基础,来探讨重构测点优化布置方案对应变场重构精度的影响。依据参考文献[17]中的布置方案,本文以图 6 中的方案 3 为基础,设置了三种测点缺失重构布置方案,如图 13 所示,提取每种方案中测点的上下表面应变值作为输入数据,进行 Xgboost 拟合,再将拟合后的所有测点数据输入到 IFEM 应变重构算法中,进行应变重构。最终通过 20 个随机测点来验证算法重构应变场的准确性。

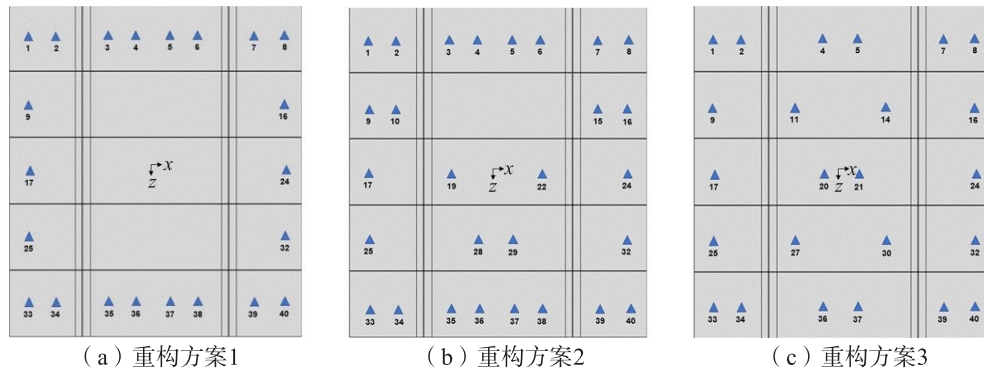


图 13 三种重构测点布置方案

Fig.13 Layout schemes of measuring point for reconstruction

通过 Xgboost 拟合缺失测点应变, 代入到逆向有限元重构算法中, 得到三种重构布置方案测点的 Mises 应变重构结果, 如图 14 所示, 而验证测点的 Mises 应变误差如图 15 所示。

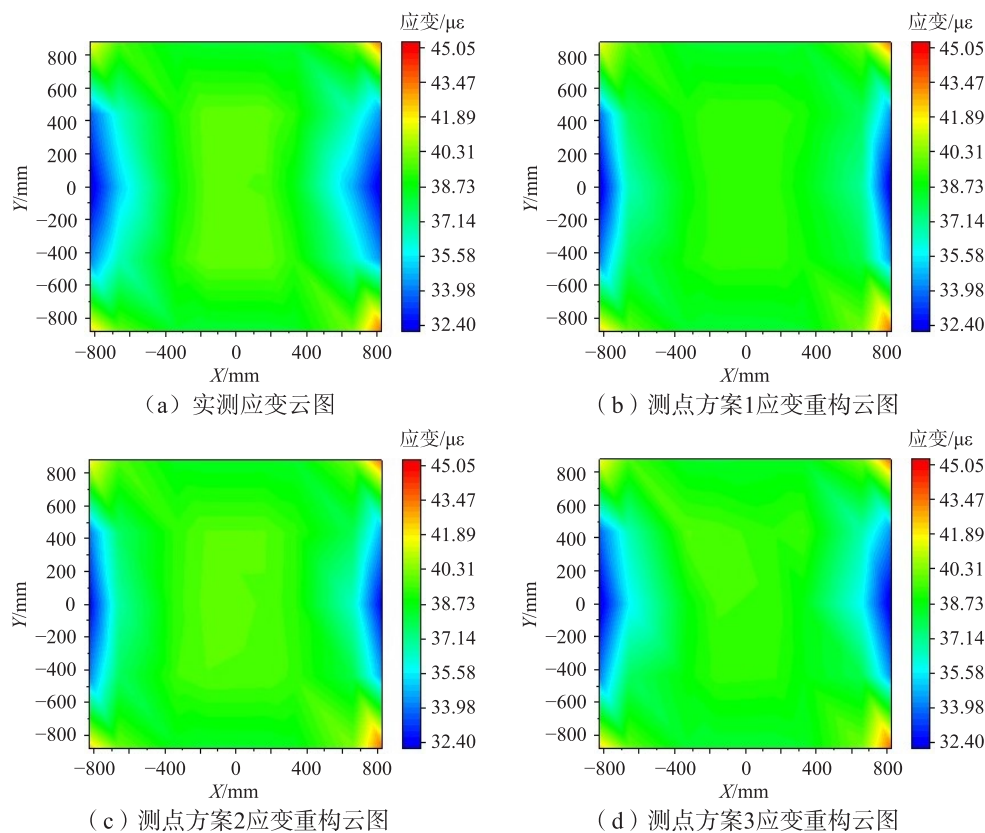


图 14 重构测点布置方案 Mises 应变云图

Fig.14 Cloud map of Mises strain reconstructed

由图 15 可知, 针对三种重构方案, 其验证测点的 Mises 应变的平均误差值均在 5% 以内。对于三种重构方案, 导致其误差较大的验证测点还是集中在靠近加载端的 16#~20#测点。

如表 4 所示, 通过误差分析可以看出, 重构测点方案 2 和 3 相较于测点方案 1 精度更高, 这是因为在重构测点数量上, 方案 2、3 的缺失测点数量较少, 通过 Xgboost 算法得到重构测点其应变更贴合于验证测点值。对比重构方案 2 和重构方案 3 可发现方案 3 缺失点较多, 但仍能重构出较好的 Mises 应

变值,且其精度更高。因此选取重构方案 3 就可完成逆有限元应变重构,这样既能减少测点的数量,也可以得到船舶关键位置的高精度应变重构结果。需要指出的是,经过 Xgboost 算法优化得到的测点布置方案并不是唯一的,即使是在测点数相同的情况下也可能有不同的布置方案,本文给出的测点方案只是误差满足精度要求的其中一种优化方案。

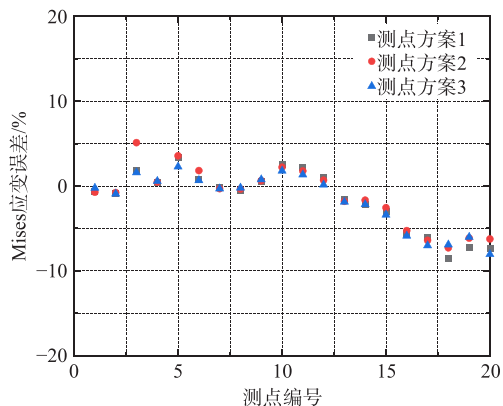


图 15 验证测点处重构方案 Mises 应变误差

Fig.15 Mises strain error on points of verification for different reconstruction

表 4 重构布置方案 Mises 应变误差

Tab.4 Mises strain error of reconstruction for schemes with different defect measuring points

重构方案编号	缺失测点数量	Mises应变平均误差	最大误差
1	18	3.93%	8.52%
2	12	3.89%	7.29%
3	16	3.61%	7.03%

4 结 论

本文将有限元分析结果作为实际测量值输入逆有限元算法中,得到了逆有限元应变重构结果并分析了重构误差,最后将 Xgboost 算法引入逆有限元算法中,对测点布置方案进行优化。通过研究得到了以下结论:

(1)通过对轴压载荷作用的船体加筋板板进行 IFEM 重构,并与数值仿真结果对比,除加载端由于较大应力突变导致其误差结果偏大之外,在其余区域应变重构均符合要求,验证了 IFEM 的精确性和有效性。

(2)通过对不同板厚的加筋板模型进行 IFEM 重构,结果表明在薄板和中厚板范围内选用不同板厚,逆向有限元算法的重构精度无明显变化,这对加筋板的应变场重构具有较好的适用性。

(3)采用 Xgboost 算法对逆向有限元测点的数量和位置进行优化,结果表明优化后的测点方案在重构过程中验证测点的重构误差能够控制在 5% 以内。同时在逆有限元法的实际应用中,该算法在保持高精度结果的同时可大幅减少测点数量。

(4)本文研究表明,对于加筋板结构可以采用 Xgboost 算法作为优化后测点方案数据补充,从而达到加筋板结构应变场重构的效果。

参 考 文 献:

- [1] Tessler A, Spangler J L. A variational principle for reconstruction of elastic deformation of shear deformable plates and shells[R]. Hampton: Langley Research Center, NASA/TM-2003-212445, 2003.
- [2] Vazquez S L, Tessler A, Quach C C, et al. Structural health monitoring using high-density fiber optic strain sensor and inverse finite element methods[R]. Hampton : Langley Research Center, NASA/TM-2005-213761, 2005.
- [3] Papa U, Russo S, Lamboglia A, et al. Health structure monitoring for the design of an innovative UAS fixed wing through inverse finite element method(iFEM)[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 69: 439-448.

- [4] Kefal A, Hizir O, Oterkus E. A smart system to determine sensor locations for structural health monitoring of ship structures[C]//Proceedings of the 9th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, Glasgow, UK, 2015.
- [5] Kefal A, Oterkus E. Structural health monitoring of marine structures by using inverse finite element method[J]. *Analysis and Design of Marine Structures*, 2015: 341–349.
- [6] Kefal A, Oterkus E. Shape-and stress-sensing of a container ship by using inverse finite element method[C]//The Royal Institution of Naval Architects, Proceedings of the International Conference on Smart Ship Technology, 2016. <https://strathprints.strath.ac.uk/56241>.
- [7] Kefal A, Mayang J B, Oterkus E, et al. Three dimensional shape and stress monitoring of bulk carriers based on iFEM methodology[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 147: 256–267.
- [8] Colombo L, Sbarufatti C, Giglio M. Definition of a load adaptive baseline by inverse finite element method for structural damage identification[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 120: 584–607.
- [9] Li M Y, Kefal A, Cerik B, et al. Structural health monitoring of submarine pressure hull using inverse finite element method[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Marine Structures (MARSTRUCT 2019, Dubrovnik, Croatia, 6-8 May 2019): Trends in the Analysis and Design of Marine Structures, Florida CRC Press, 2019: 293.
- [10] Li M, Kefal A, Cerik B C, et al. Dent damage identification in stiffened cylindrical structures using inverse finite element method[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 198: 106944.
- [11] Li M, Kefal A, Oterkus E, et al. Structural health monitoring of an offshore wind turbine tower using iFEM methodology[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 204: 107291.
- [12] Abdollahzadeh M A, Yildiz M, Kefal A. Three-dimensional shape sensing of a representative ship-hull cross-section based on inverse finite element method[C]//Proceedings of the 34th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meetings on Marine Structures, Istanbul, Turkey, 2020.
- [13] 黄 辉. 基于逆有限元方法的板梁结构变形重构的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
Huang H. Research on deformation reconstruction of plate and beam structure based on iFEM[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2021. (in Chinese)
- [14] 李 婧. 基于逆有限元法的某舱室结构变形监测系统开发[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
Li J. The development of a deformation monitoring system for a certain cabin structure based on inverse finite element method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [15] 闫宏生, 白超迪, 贾同宇, 等. 逆有限元法在船体加筋板结构变形重构中的应用[J]. *中国造船*, 2023, 64(1): 168–179.
Yan H S, Bai C D, Jia T Y, et al. Application of inverse finite element in structural deformation reconstruction of ship reinforced plate[J]. *Shipbuilding of China*, 2023, 64(1): 168–179. (in Chinese)
- [16] 徐芝纶. 弹性力学 (第 5 版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
Xu Z L. Linear elasticity (5th Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016. (in Chinese)
- [17] Roy Rinto, Tessler Alexander, Surace Cecilia, et al. Efficient shape sensing of plate structures using the inverse finite element method aided by strain pre-extrapolation[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 180: 109798.