

基于响应面法的舰船 CFRP 抗冲击板的孔洞损伤识别

杜忠民¹ 李力² 王希阳² 刘锐²

1. 海军装备部 湖北武汉 430000

2. 武昌船舶重工集团有限公司 湖北武汉 430416

摘要: 针对高度各向异性的舰船二维碳纤维复合材料板, 在其边缘设置 16 个电极, 通过 ANSYS 计算不同位置和尺寸下的孔洞的 CFRP 板的电位, 建立了孔洞损伤识别的响应面模型, 旨在进行 CFRP 板孔洞的无损检测。虚拟仿真实验表明, 基于归一化电位数据的响应面法, 能够有效地识别 CFRP 板上的孔洞, 特别是对孔洞尺寸和中心位置横坐标的预测估计。在孔洞中心的纵坐标位置的辨识中, 相对误差相较偏大, 并讨论了产生误差的原因和提高精度的方法。

关键词: CFRP 板; 无损检测; 响应面模型; 归一化

树脂基碳纤维复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, 简称 CFRP) 具有重量轻、耐冲击、耐腐蚀、抗疲劳、比刚度和比强度高、吸能特性好、设计自由度高、综合利用效率高等优点, 广泛应用于海洋工程和船舶工业等领域^[1-3]。目前, 针对 CFRP 结构的常用无损检测方法有: 超声波检测^[4]、红外热像检测^[5]、射线检测法^[6]、声发射检测^[7]等。这些传统检测技术的实施往往依赖于复杂的检测设备或昂贵的传感器器件, 并且在长期健康监测中的应用还存在一定的困难。近年来, 一种依靠 CFRP 自身的导电性实施无损健康检测的方式逐渐得到人们的关注^[8-10]。该方法不依赖于任何外部传感器, 只需对自身的电阻测量即可完成无损检测, 过程简单, 成本低廉, 适用于长期监测, 具有良好的发展前景。

舰船上的 CFRP 层合板作为抗冲击的加固结构, 在冲击荷载作用下, 形成的冲击孔洞是碳纤维复合材料结构的典型损伤形式。秦溶蔓等^[11]研究了陶瓷/纤维复合材料层间混杂结构对装甲板抗侵彻性能的影响; 范清扬等^[12]对极端海况下复合材料高速船的结构响应与损伤进行了研究; Bin Liu 等^[13]进行了碳/玻璃纤维混杂复合材料层合板横向低速度冲击响应与破坏的实验与有限元数值模拟, 以便模拟船舶结构耐撞性。通过电阻的测量可以有效地判断孔洞的存在, 但对于孔洞的定位和大小的识别是检测的难点之一。

响应面是质量工程领域广泛采用的工具, 并在船舶工程领域和复合材料检测中得到一定的应用^[14-16]。舰船中碳纤维增强复合材料层合板结构出现孔洞损伤时, 为实现低价格高效地进行无损损伤诊断, 本文建立一种响应面模型, 通过

在有限元中进行大量的仿真模拟训练, 对 CFRP 孔洞损伤位置和尺寸进行估计, 并通过设计仿真实验减小误差。

1. 响应面法

响应面法被用作反问题的求解器, 对于大多数复合材料的响应面, 其函数是多项式的近似值, 但响应面函数不限于多项式。本文采用响应面法对 CFRP 板的孔洞损伤位置和尺寸进行估计, 预测参数包括: 圆心横坐标 X 、圆心纵坐标 Y 和圆孔半径 R , 其响应面描述为

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中, y 为预测参数; k 为电极的数量; β_j 为第 j 个电位对应的系数向量; β_{jj} 为第 j 个电位的平方对应的系数向量; β_{ij} 第 i 个电位与第 j 个电位乘积对应的系数向量; x_i 为第 i 个电极采集的电位。

对于 16 个电极所测得的电位向量的模长定义为

$$\eta_{16} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \cdots + V_{15}^2 + V_{16}^2} \quad (2)$$

式中, V_i 为第 i 个电极采集的电位。

将 16 个电极所测得的电位中的所有元素除以 η_{16} 以获得归一化电位变化矢量 (v_{16}), 表示为

$$v_{16} = [v_1 \quad v_2 \quad \cdots \quad v_{16}]^T \quad (3)$$

第 i 个归一化电位 v_i 为

$$v_i = V_i / \eta_{16} \quad (4)$$

对于 16 个电极所测得的电位, 将电位归一化处理后,

圆心横坐标 X 、圆心纵坐标 Y 和圆孔半径 R 的响应面估计为

$$X = \bar{\beta}_0 + \sum_{j=1}^{16} \bar{\beta}_j v_j + \sum_{j=1}^{16} \bar{\beta}_{jj} v_j^2 + \sum_{i=1}^{15} \sum_{j=i+1}^{16} \bar{\beta}_{ij} v_i v_j \quad (5)$$

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^{16} \beta_j v_j + \sum_{j=1}^{16} \beta_{jj} v_j^2 + \sum_{i=1}^{15} \sum_{j=i+1}^{16} \beta_{ij} v_i v_j \quad (6)$$

$$R = \beta_0 + \sum_{j=1}^{16} \beta_j v_j + \sum_{j=1}^{16} \beta_{jj} v_j^2 + \sum_{i=1}^{15} \sum_{j=i+1}^{16} \beta_{ij} v_i v_j \quad (7)$$

式中, $\bar{\beta}$ 、 $\hat{\beta}$ 和 $\hat{\beta}$ 分别为目标参数为圆心横坐标 X 、圆心纵坐标 Y 和圆孔半径 R 时的电位信息系数向量。

2. CFRP 板孔洞损伤检测的模拟仿真

2.1 有限元模型的建立

对于 CFRP 板孔洞损伤的有限元分析, 应用有限元软件 ANSYS17.2 进行仿真计算。单元类型是选用具有四个节点的热电固体单元 (PLANE 67)。数值仿真分析了高度各向异性的二维碳纤维复合材料板, 尺寸为: X 方向为 400mm, Y 方向为 400mm。X 方向电阻率为 $60\Omega \cdot \text{mm}$, Y 方向电阻率为 $0.02\Omega \cdot \text{mm}$, 电阻率比为 3000。对其激励的电流为 100mA。

在 CFRP 板四边分别布置 4 组电极, 共 16 组电极。电极 1、4、5、8、9、12、13、16 距离边缘角均为 80mm, 即四边最边缘的电极距离边缘角均为 80mm, 其他电极均匀分布, 同侧两相邻的电极间距为 80mm。点 (400, 400) 为激励电流的正极, 点 (0, 0) 为激励电流的负极, 点 (0, 400) 接地, 使用 16 电极布置进行 CFRP 板孔洞损伤监测示意图如图 1 所示。

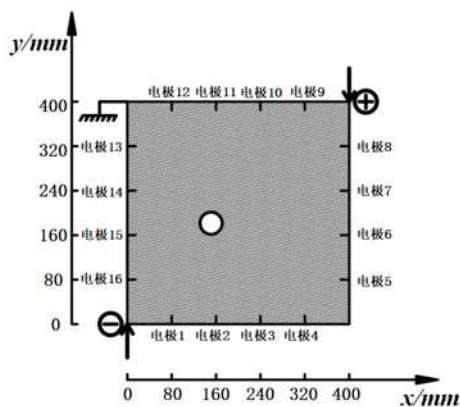


图 1 CFRP 板孔洞损伤监测示意图

采用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 命令流计算获取

CFRP 板不同位置 and 不同尺寸下的孔洞损伤的电位响应, 即采集变化的 CFRP 板孔洞损伤的电位响应数据, CFRP 板孔洞损伤的电位分布云图如图 2 所示。

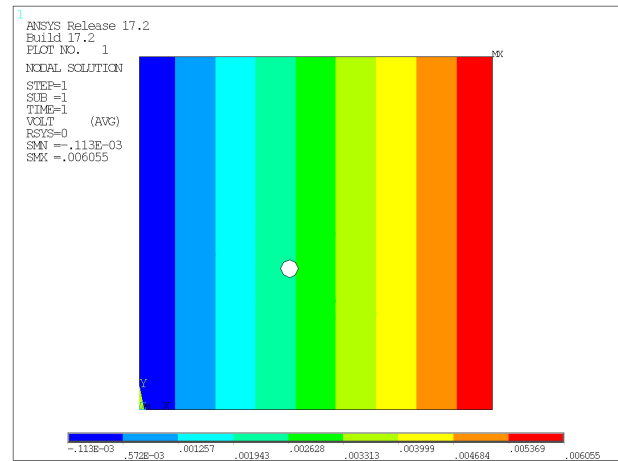


图 2 损伤电位分布云图

2.2 检测结果及讨论

针对 220 组具有不同位置和尺寸孔洞的 CFRP 板进行了数值仿真, 其中 210 组数据用于确定响应面模型参数, 再利用该响应对其余 10 组模型的孔洞进行了预测。

图 3、图 4 和图 5 分别为归一化电位数据预测估计圆心横坐标、纵坐标以及圆孔半径的结果, 其对圆心横坐标、纵坐标以及圆孔半径估计的 R^2 调整系数分别为 0.99542、0.64719 和 0.99984。即归一化处理后圆孔半径和圆心横坐标的 R^2 调整系数更接近于 1, 对圆孔半径的预测估计效果最好, 对圆心横坐标的预测估计效果居中, 对圆心纵坐标的预测估计效果稍差。整体上, 16 组电极情况下使用归一化电位数据预测估计圆心横纵坐标以及圆孔半径的结果是有效的。

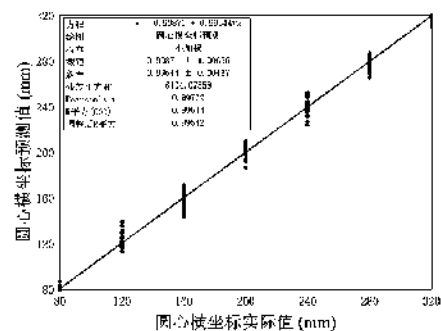


图 3 圆心横坐标的预测估计

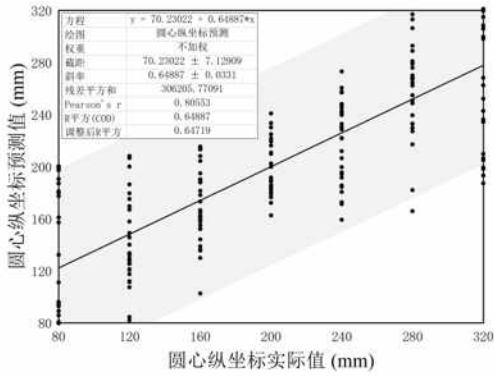


图4 圆心纵坐标的预测估计

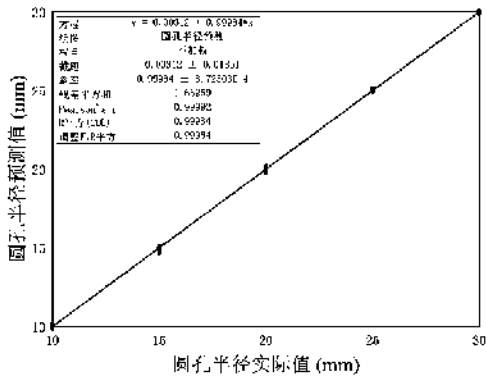


图5 圆孔半径的预测估计

16组电极情况下,使用归一化电位数据进行预测估计,10组圆心横纵坐标以及圆孔半径的预测值与实际值对比以及相对误差如图6、图7和图8所示。图6是圆心横坐标的预测值与实际值对比以及相对误差,圆心横坐标预测值的相对误差最大值为2.118%,平均相对误差为0.8723%。图7是圆心纵坐标的预测值与实际值对比以及相对误差,圆心纵坐标预测值的相对误差最大值为4.03%,平均相对误差为2.415%,部分圆心纵坐标预测值误差相对偏大。图8是圆孔半径的预测值与实际值对比以及相对误差,圆孔半径预测值的相对误差最大值为0.8842%,平均相对误差为0.4996%,对孔洞半径预测精度较为精准。整体上,使用归一化电位数据进行预测估计,对圆心横纵坐标以及圆孔半径的预测估计是较为精准的。

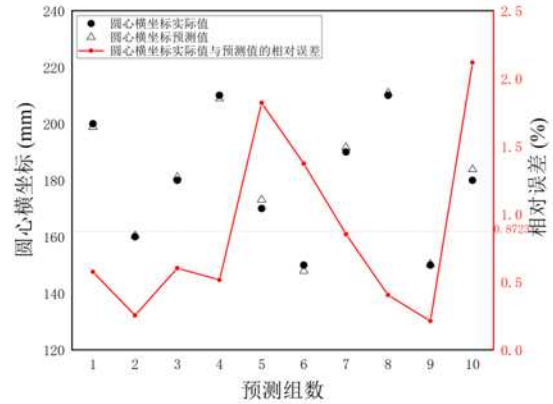


图6 圆心横坐标预测及相对误差

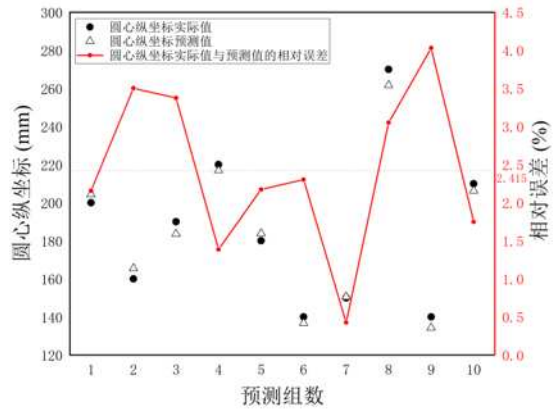


图7 圆心纵坐标预测及相对误差

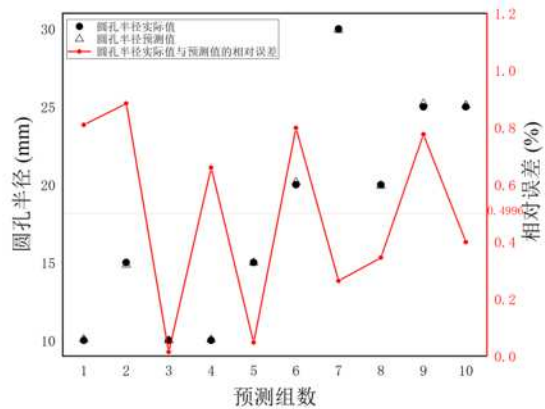


图8 圆孔半径预测及相对误差

3. 结论

本文对高度各向异性的 CFRP 板在不同位置和尺寸下的孔洞损伤进行了有限元分析,建立了响应面模型,进行了估计和分析,得出以下结论:

(1) 碳纤维板结构发生孔洞损伤时,建立响应面模型,分析电位响应数据,只需在有限元中进行大量的模拟训练,即可估计出 CFRP 板孔洞损伤的位置和大小,从而实现低价高效地进行 CFRP 板孔洞损伤的无损诊断。

(2) 基于归一化电位数据的响应面法,对 CFRP 板孔洞损伤的识别,尤其是对孔洞尺寸的估计是精准有效的。对孔洞中心位置横坐标的识别误差次之,对孔洞中心位置纵坐标的识别误差稍大。其孔洞中心位置的预测精度可能与电阻率的比值、电极的数目、电流的激励和电位的获取方式有关。

参考文献

[1] Daekyun O, 韩志强, Jackyou N. 基于复合材料层板轻量化方法的 11m CFRP 高速艇最优设计 [J]. 造船技术, 2018(05): 77-84.

[2] Yanyan S. CFRP strengthening of reinforced concrete pontoon walls against ship bow collisions [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2022, 18(08).

[3] A M H, A S. Structural Reliability Analysis for the Construction Design of the High-Speed Ship with CFRP Material [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1081(01).

[4] 但家梭, 沈通, 罗钢华. 超声波检测技术在船舶货舱盖密性试验上的应用 [J]. 中国船检, 2019(12): 92-95.

[5] 范春利, 沈立华, 李孟良等. 船用输热管道及保温层的红外热像无损检测研究 [J]. 电子器件, 2006(04): 1367-1371.

[6] 陈栋康康. 碳纤维增强复合材料层合板孔隙缺陷的无损检测方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.

[7] 吴猛猛, 高艳, 明岳等. 船舶压力管路阵列阀门微泄漏声发射检测试验 [J]. 船舶工程, 2022, 44(05): 107-111.

[8] Povol M, Tabucol J, Brugo M T, et al. Electrical Resistance Curing Method for Hybrid Metal-CFRP Tubes [J]. Applied Composite Materials, 2020, 27(04).

[9] 韩中州, 郑华升, 陈精英. 基于电阻响应的 CFRP 加固结构的无损检测 [J]. 塑料工业, 2021, 49(03): 154-158.

[10] 吴玉箫, 何建, 于海州. 基于电阻层析成像技术的 CFRP 缺陷检测研究进展 [J]. 电子测试, 2022(01): 98-101.

[11] 秦溶蔓, 朱波, 乔琨等. 陶瓷/纤维复合材料层间混杂结构对装甲板抗侵彻性能的影响 [J]. 材料导报, 2020, 34(18): 18183-18187.

[12] 范清扬, 刘斌, 雷加静等. 极端海况下复合材料高速船的结构响应与损伤研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2022, 46(05): 837-842.

[13] Bin L, Wei W, Leigh S. Experimental and numerical response and failure of laterally impacted carbon/glass fibre-reinforced hybrid composite laminates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 179.

[14] Todoroki A, Tanaka Y, Shimamura Y. Multi-probe electric potential change method for delamination monitoring of graphite/epoxy composite plates using normalized response surfaces [J]. Composites Science & Technology, 2004, 64(05): 749-758.

[15] 曾漾, 周俊, 沈志远等. 基于响应面法的复合材料舱壁结构优化设计 [J]. 重庆大学学报, 2020, 43(06): 82-89.

[16] 朱兆一, 李晓文, 李钊等. 基于响应面法复合材料船舶开孔板架优化设计 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(09): 48-52.

作者简介:

杜忠民 (1978—), 男, 汉族, 湖北武汉, 本科, 海军装备部, 工程师, 主要从事船舶建造工艺技术方面的研究。

通讯作者: 李力, 男, 1997 年生, 硕士, 主要从事碳纤维智能复合材料方面的研究。