

海洋工程装备

基于浮式平台的结构监测系统研究

沈烨¹, 孙函宇^{1,2}, 李晓峰¹, 王成¹, 蔡亚红¹, 李旭光¹, 杨华伟^{1,2}

(1.中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082;

2.南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458)

摘要: 为了保证浮式平台作业过程中的结构安全, 设计了一种基于浮式平台的结构安全监测系统, 通过 CAN 总线通讯和 RS485 总线通讯, 实现各类传感器数据的实时采集, 获取平台结构应力监测数据以及姿态监测数据, 并通过 PyQt 搭建软件界面, 实现采集数据的实时显示, 同时进行后台监测数据存储。系统支持设置预警阈值进行平台结构的故障预警, 也可对采集到的历史数据进行查询分析处理, 根据数据处理结果, 可有效评估当前平台的结构安全性。基于浮式平台的结构监测系统可进行实时监测数据的采集, 并通过对采集数据的分析处理, 进行平台结构安全性评估。根据评估结果, 采取相应的改进措施, 保证平台作业过程中的结构安全。

关键词: 结构监测; 故障预警; 数据分析; 安全评估; 实时显示

中图分类号: TJ01

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)02-0091-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.02.015

The Study of Structural Monitoring System Based on Floating Platform

SHEN Ye¹, SUN Han-yu^{1,2}, LI Xiao-feng¹, WANG Cheng¹, CAI Ya-hong¹, LI Xu-guang¹, YANG Hua-wei^{1,2}

(1.China Ship Science Research Center, Wuxi 214082, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Guangzhou), Guangzhou 511458, China)

ABSTRACT: Due to the complex and changeable marine environment, the structural safety of floating platform during operation is seriously challenged. In order to ensure the structural safety of the floating platform during operation, a structure monitoring system based on the floating platform is designed. All kinds of sensor data can be collected in real-time based on CAN bus communication and RS485 bus communication. The platform structure stress monitoring data and attitude monitoring data are obtained. The software interface is built by PyQt modular to realize the real-time display of the collected data, and the background monitoring data are stored at the same time. The system supports setting alarm threshold for fault warning of the platform structure. The collected historical data can be queried and analyzed. According to the data processing results, the structural security of the current platform can be effectively evaluated. The structure monitoring system based on a floating platform can

收稿日期: 2021-09-29; 修订日期: 2021-11-08

Received: 2021-09-29; Revised: 2021-11-08

基金项目: 工业和信息化部高技术船舶科研项目(工信部装函[2019]357号); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0502)

Fund: High Tech Ship Research Project of Ministry of Industry and Information Technology (JJH [2019] No.357 of MIIT); Major Projects of Talent Team Introduction from Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou) (GML2019ZD0502)

作者简介: 沈烨(1993—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为结构监测软件开发。

Biography: SHEN Ye (1993—), Female, Master, Engineer, Research focus: development of structural monitoring software.

引文格式: 沈烨, 孙函宇, 李晓峰, 等. 基于浮式平台的结构监测系统研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(2): 091-097.

SHEN Ye, SUN Han-yu, LI Xiao-feng, et al. The Study of Structural Monitoring System Based on Floating Platform [J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(2): 091-097.

collect real-time monitoring data. Through the analysis and processing of the collected data, the platform structure safety is evaluated. According to the evaluation results, the corresponding improvement measures are taken to ensure the structure safety of platform operation.

KEY WORDS: structural monitoring; fault warning; data analysis; safety assessment; real-time display

可靠性与安全性是保证浮式平台顺利作业的基础。由于海洋风浪环境的影响,浮式平台在作业过程中受到长时间交变载荷的作用,其结构不可避免地会存在腐蚀、裂纹、变形等缺陷,从而导致其承载能力下降,因此,对浮式平台结构开展实时应力监测,在其出现变形或破裂前发出预警,及时采取规避措施,保证浮式平台的结构安全至关重要^[1-12]。国外对于结构应力监测技术的研究起步较早,在21世纪以后,船舶结构安全性已越来越受到重视。Swartz等^[13]设计了无线船体监测系统,并将其应用于美国高速近岸战斗舰中。Koboević等^[14]利用船体结构监测系统,确定船体维修期,保证船舶运行安全。国内对于结构应力监测技术的研究已具有较好的基础,目前在民船上的应用已取得较好结果,同时在军船上也得到了很好的试验性应用结果^[15-22]。

结构监测系统可对浮式平台的重要结构、敏感部分以及运动状态进行实时监测,通过对结构应力、模型相对运动及锚链张力等相关结构参数进行分析计算,可给出平台结构安全性警示信息。本文设计了一种基于浮式平台的结构监测系统,通过CAN总线以及RS485总线实现结构传感器数据的采集,并支持数据的实时显示、处理、存储、预警和对外通信功能,

对平台运行过程中的结构安全性保障提供支撑。

1 系统整体方案设计

浮式平台结构安全监测系统主要是通过对平台重要结构以及薄弱部位布置传感器,实时采集传感器数据,分析当前海况环境下平台的结构安全,并对故障部位进行预警,提醒船员及时采取补救措施,以保证平台安全稳定作业。浮式平台结构监测系统部署于具有总线通信模块的采集主机上,其硬件部分包含传感器以及通讯模块。其中,传感器分为结构传感器和姿态传感器,结构传感器包括单向应力传感器、三向应力传感器、单向加速度传感器以及锚链张力传感器。通讯模块主要采用CAN总线通讯以及RS485总线通讯,可实现数据的多通道连续采集。软件部分主要实现对数据的分析、处理以及存储。系统整体框架如图1所示。

CAN通讯模块是通过CAN转以太网接口将结构传感器与采集主机相连,平台结构应力数据通过此模块实时传输给采集主机。姿态传感器通过RS485总线与主机com端口相连,平台姿态数据通过RS485总线实时传输给采集主机。

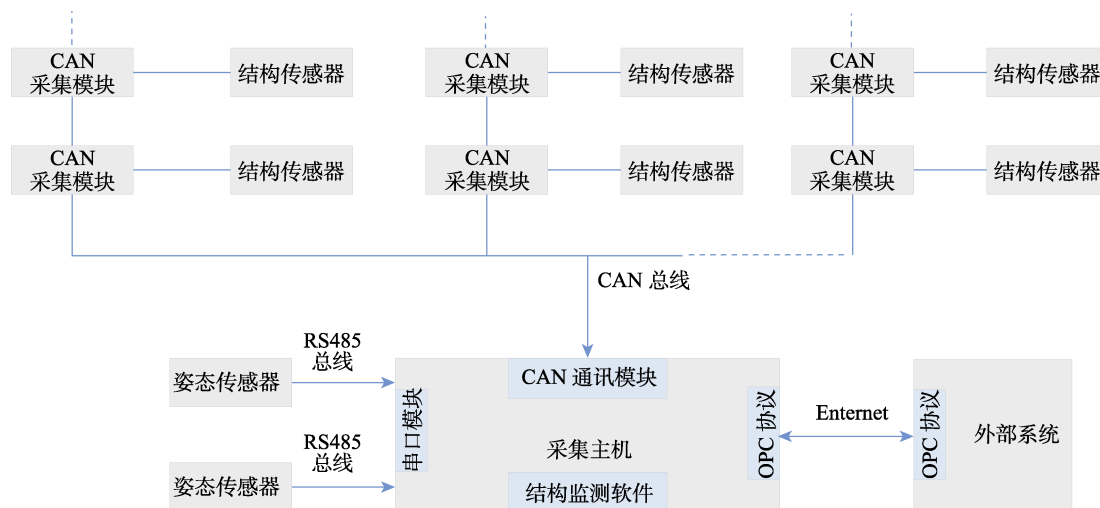


图1 系统整体框架

Fig.1 Overall framework of the system

基于浮式平台的结构监测系统具有以下几个功能:支持多种数据的多通道协调采集;支持多种数据的统一组态化显示;支持多种数据的实时显示、统计处理以及集中存储;支持多数据集中对外通讯;支持平台结构故障预警显示。

2 软件功能设计与实现

基于浮式平台的结构监测系统的功能模块主要包括采集数据的实时显示与存储、数据的处理分析、结构故障预警显示3部分。当数据通过通讯模块传输

到采集主机时,数据存储模块在实时显示传感器数据的同时进行数据保存;数据的处理分析模块可对所保存的数据进行数据滤波、统计分析、疲劳损伤评估、趋势预测等计算;故障预警模块可设置预警阈值,在接收传感器数据的同时,通过不同颜色的预警信号灯显示,表明当前平台结构应力是否超限,如图 2 所示。

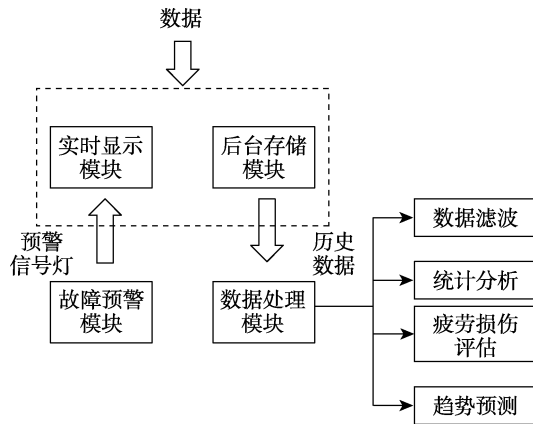


图 2 系统功能模块

Fig.2 Function module diagram of the system

2.1 数据实时显示与存储

采集数据的实时显示主要通过软件显示界面实现,该系统基于 PyQt 模块搭建数据显示界面。PyQt 是 Qt 基于 Python 的移植版本,本质仍为开发窗体程序的模块,同时也可使用 Python 进行窗体的开发。将结构应力、平台六自由度姿态、锚链张力等数据通过 CAN 通讯模块以及 RS485 总线上传,在软件界面上进行实时显示,同时进行后台数据存储。数据存储是将实时显示的所有种类数据以 tdms(Technical Data Managerment Streaming) 文件格式进行存储,存储数据类型为浮点数。为便于查看历史数据,每 4 h 新建一个数据文件,保证合理的数据量。

2.2 数据处理分析

该系统支持历史数据查询功能,可通过选择起始时间与时间间隔,查询任意时间段内的历史数据,并对其进行数据处理分析。数据处理分析模块主要包括:数据滤波、统计分析、疲劳损伤评估以及趋势预测分析。

2.2.1 数据滤波

数据滤波主要是为了过滤某些不正常数据,以保证数据处理分析的合理性。该系统采用傅里叶滤波的方法进行数据滤波,通过设置截止频率,实现时域数据的低通滤波以及高通滤波功能。

2.2.2 统计分析

统计分析包括频谱分析以及最大值、最小值、平均值、标准偏差、偏度、峭度和平均跨零周期等参数

的计算。主要原理方法如下:

1) 采用傅里叶变换实现数据的时频变换,并计算得到主频值。

2) 计算时域数据的最大值、最小值、平均值以及标准偏差。

3) 偏度为数据分布偏斜方向和程度的度量,计算公式为:

$$S_k = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \quad (1)$$

式中: μ_3 为 3 阶中心矩; σ 为标准偏差。

4) 峭度是描述数据分布形态陡缓程度的统计量,计算公式为:

$$K_u = \frac{\sum_{t=1}^n (f(t) - f_{ave})^4}{(n-1)S^4} \quad (2)$$

式中: f_{ave} 为数据的平均值; S 为数据的标准偏差。

5) 有义值。1 个峰谷值之差为 1 个波幅,计算出所有波幅,并进行从大到小排序,选取排序后的前 1/3 波幅数据,求出其平均值,即为数据的有义值。

6) 1 个峰谷值之间的时间差的 2 倍即为 1 个周期,所有周期的平均值即为总数据的周期。如式 (3) 和 (4) 所示。

$$T = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_i \quad (3)$$

$$T_i = 2 \times |t_{\text{峰}} - t_{\text{谷}}| \quad (4)$$

7) 峰谷值。选取滤波后数据中所有的峰值和谷值,其中峰值的选取公式为:

$$f(m-1) < f(m) \& f(m) > f(m+1) \quad (5)$$

即当某个数据值大于其前后相邻的数据,则这一数据为一个峰值。

谷值的选取公式为:

$$f(m-1) > f(m) \& f(m) < f(m+1) \quad (6)$$

即当某个数据值小于其前后相邻的数据,则这一数据为一个谷值。

2.2.3 疲劳损伤评估

疲劳寿命预测方法的原理设计具体步骤如下:

1) 利用雨流计数法获得应力谱图,包括应力水平幅值、平均应力、循环次数。

2) 根据 Goodman 疲劳经验公式,对应力谱进行修正,求得平均应力为 0 时的应力水平幅值及循环次数。

3) 根据 S-N 曲线,获得应力水平幅值对应的疲劳寿命。

4) 根据疲劳线性累积损伤理论求得疲劳损伤。

2.2.4 趋势预测

利用傅里叶变换对数据进行预测,该系统是根据已有的 4 h 应力数据,预测后 1 h 的应力数据。主要步骤如下:

1) 将已具备的时域数据按时间平均分为 4 组,

分别进行傅里叶变换,得到4组频域数,见式(7)。

$$X_T(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x_T(t) e^{-j\omega t} dt \quad (7)$$

2) 遍历4组幅频特性曲线,选取1h内每个 ω 值对应最大幅值 $\xi_{\max}$ 数据当作预测数据,见式(8)。

$$\xi(\omega) = \xi_{\max}(\omega) \quad (8)$$

3) 进行傅里叶逆变换,得到时域预测数据,见式(9)。

$$x_T(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X_T(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (9)$$

2.3 结构故障预警显示

船体总弯矩通过实时监测到的波浪弯矩和静水弯矩叠加得到,见式(10)。

$$M(x) = M_s(x) + M_w(x) \quad (10)$$

船体结构应力为:

$$\sigma = M(x)Y / I(x) \quad (11)$$

式中: Y 为该剖面距离中和轴的最大位置。

由弯矩得到的结构应力应小于许用应力,即:

$$\sigma < [\sigma] \quad (12)$$

式中: $[\sigma]$ 为结构的许用应力。

该系统提供2级预警阈值,可进行人工设置,通过不同颜色信号灯显示实现数据异常情况下的预警。阈值的设置原则为:将平台建造所用材料的许用强度值(283 MPa)设定为结构应力安全上限值,当应力值在上限值的60%~80%时,进行一级预警;当应力值大于上限值的80%时,进行二级预警阈值。

3 软件测试

该软件已在科学试验平台上部署,三向应力传感器实时采集数据显示如图3所示。其中界面右侧即为各个传感器测点,绿色代表应力数据正常。当结构应力超过预警阈值时,测点显示灯会相应地改变颜色,一级预警为黄色,二级预警为蓝色,超过上限为红色。当点击右侧某个传感器,界面左侧即显示该传感器的实时采集数据。

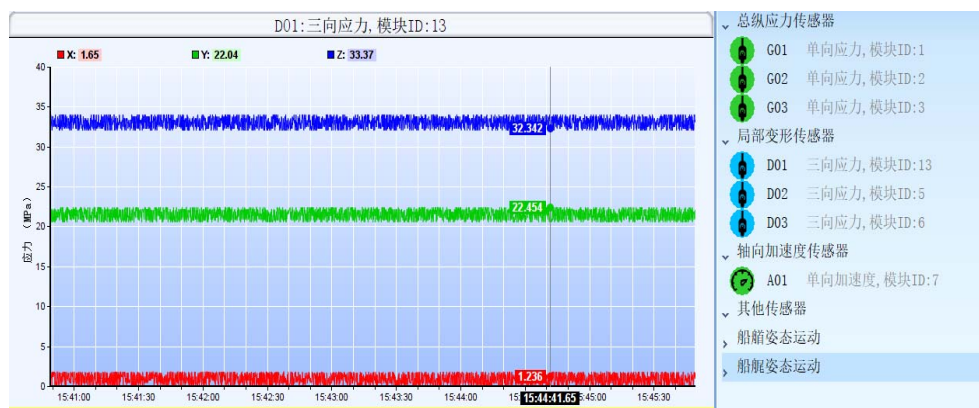


图3 三向应力数据实时显示
Fig.3 Real time display of 3D stress data

该系统提供数据处理分析界面。在界面左上角设置所要查询的历史数据时间段,在界面上方选择测点,设置滤波类型及截止频率,点击显示数据按钮,即可显示该时间段内平台上该测点的数据曲线,如图4所示。

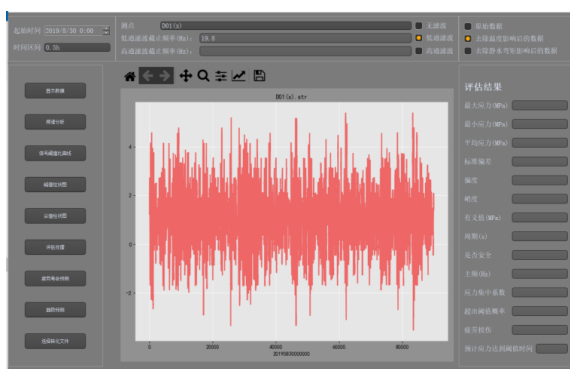


图4 数据查询界面
Fig.4 Data query interface

可对所选择的测点数据进行统计分析,包括频谱分析以及主频、最大(小)值、有义值、平均值、标准偏差、偏度、峭度、周期、应力集中系数等的计算,如图5所示。

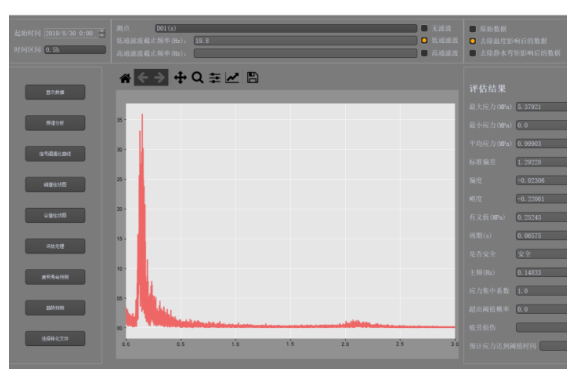


图5 统计分析界面
Fig.5 Statistical analysis interface

可对所选择的测点进行结构疲劳损伤评估,可获得应力谱柱状图以及疲劳损伤结果,如图 6 所示。

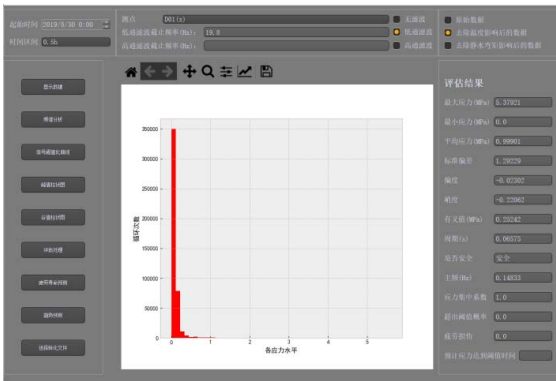


图 6 疲劳评估界面
Fig.6 Fatigue assessment interface

可根据当前 4 h 的应力数据,对所选择的测点进行结构应力趋势预测,如图 7 所示。

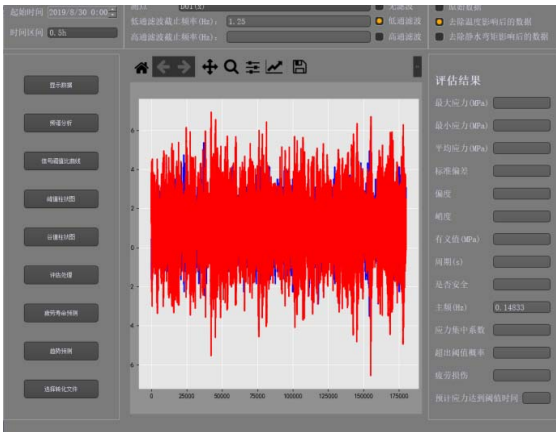


图 7 趋势分析界面
Fig.7 Trend analysis interface

为验证该系统数据处理分析功能的有效性,现利用此功能对式 (13) 和 (14) 所示正弦函数的数据进行处理分析。

$$y = \sin(2\pi t) \tag{13}$$

$$y = 100\sin(2\pi t) \tag{14}$$

选取式 (13) 所示正弦函数数据进行滤波显示,设置低通滤波,截止频率为 19.8 Hz,结果如图 8 所示。

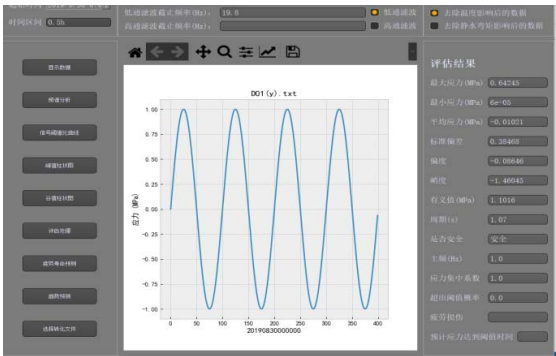


图 8 正弦波数据显示
Fig.8 Data display of sine wave

对式 (13) 所示正弦函数进行统计分析,结果如图 9 所示。

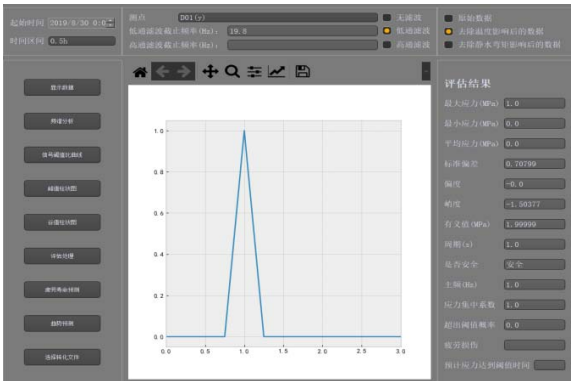


图 9 正弦波数据分析结果
Fig.9 Data analysis results of sine wave

选取如式 (14) 所示正弦函数中,时间间隔为 0~100 s、步长为 0.01 的数据,该数据下疲劳损伤评估结果如图 10 所示。

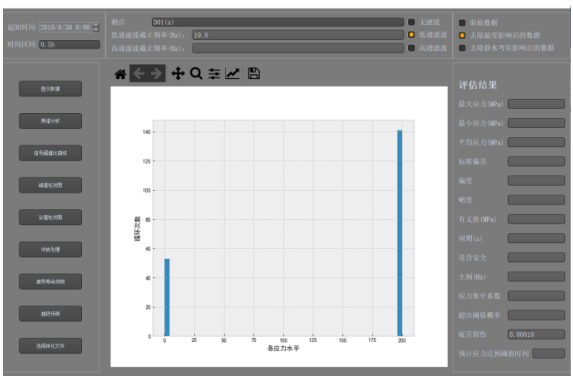


图 10 正弦波下疲劳寿命预测结果
Fig.10 Fatigue life prediction results of sine wave

选取式 (13) 所示正弦函数进行趋势预测分析,结果如图 11 所示。

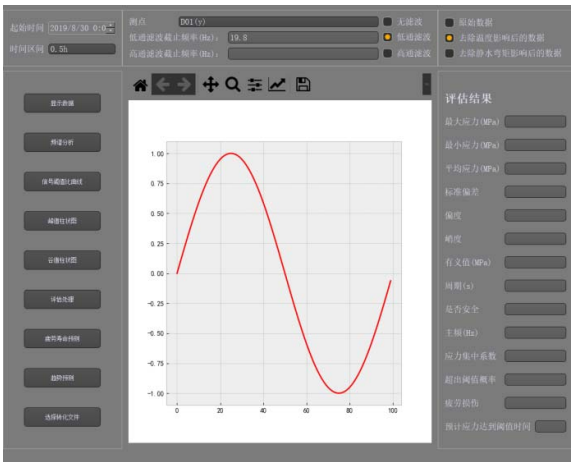


图 11 正弦波下趋势预测结果
Fig.11 Trend forecast results of sine wave

式 (13) 所示正弦函数通过截止频率为 19.8 Hz 的低通滤波后,理论上曲线仍为式 (13),与图 8 所

示波形图一致。根据理论分析式(13)所示正弦函数,主频为1 Hz,绝对值的最大值为1,最小值为0,周期为1 s,与图9所示一致。由此可得,该系统统计分析功能有效。式(14)所示正弦信号作用100 s后的结构疲劳损伤为0.000 19。理论上如式(13)所示正弦信号作用下,趋势预测结果应仍为正弦函数,与图11所示结果一致,因此可认为该系统趋势预测功能有效。

为保证本软件的实用性,现采用某实船结构应力数据进行软件测试。选取2020年11月13号0:00—4:00实船上测点A01(x)的数据,设置低通滤波截止频率为20 Hz,应力曲线如图12所示。对该测点数据进行统计分析、疲劳损伤评估、趋势预测分析,结果如图13—15所示

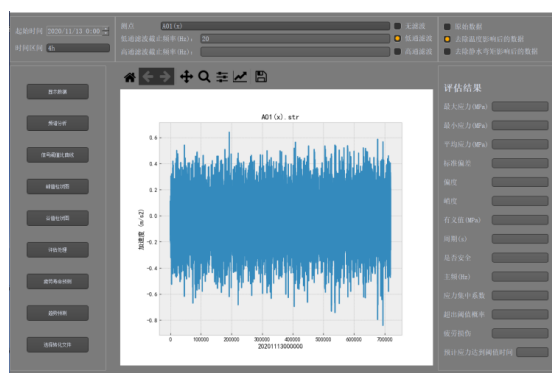


图12 实船测点数据显示

Fig.12 Data display of real ship measurement points

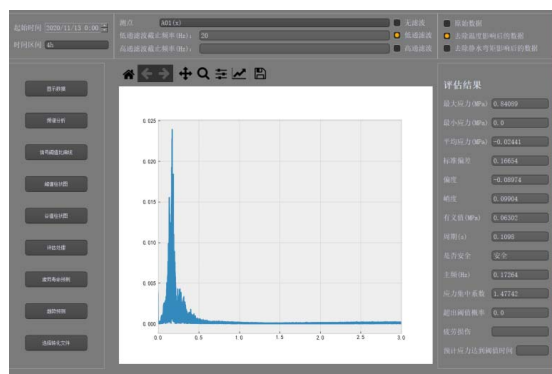


图13 实船测点数据分析结果

Fig.13 Data analysis results of real ship measurement points

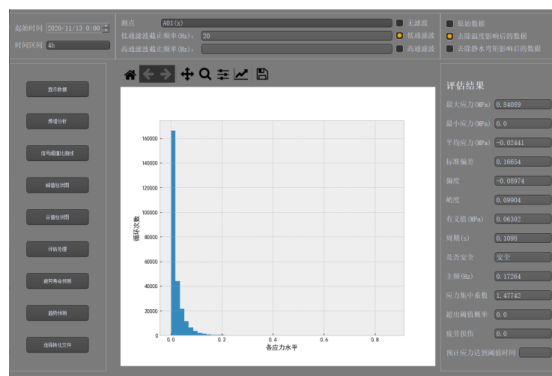


图14 实船测点疲劳寿命预测结果

Fig.14 Fatigue life prediction results of real ship measurement points

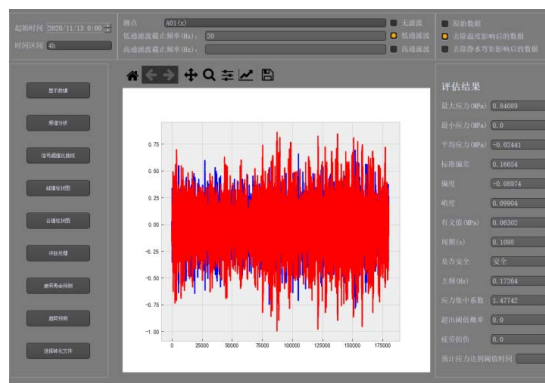


图15 实船测点趋势预测结果

Fig.11 Trend forecast results of real ship measurement points

由上述测试结果可知,该系统可针对实船结构应力数据进行有效的分析处理,为实船运行过程中的结构安全提供支撑。

4 结语

船舶结构损伤分析及安全评估对于保证其航行安全及人员生命财产安全至关重要。本文开发了一种基于浮式平台的结构监测系统,利用CAN总线以及RS485总线实时采集传感器数据,并通过软件实现采集数据的实时显示和存储。同时,当采集数据超过所设置的预警阈值,软件界面显示测点预警灯预警。该系统支持历史数据的查询、数据处理分析等功能,已通过正弦函数验证了功能的有效性,并针对实船结构的应力数据进行了有效测试。该系统可远程监测平台结构的故障状况,并能对结构的超限行为进行预警,节省了人力成本,提高了结构监测的效率与可靠性。

参考文献:

- [1] 郭文敢. 深水半潜式生产平台船体结构监测预警技术研究[J]. 广东化工, 2020, 47(7): 179-180.
GUO Wen-gan. Research on Monitoring and Early Warning Technology of Hull Structure of Deepwater Semi Submersible Production Platform[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(7): 179-180.
- [2] 陈乐. 船体结构应力监测及健康评估系统[J]. 机电设备, 2020, 37(2): 9-13.
CHEN Le. Hull Structure Stress Monitoring and Health Assessment System[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2020, 37(2): 9-13.
- [3] 任慧龙, 唐浩云, 贾连徽, 等. 基于风险的船体结构监测点优化布置[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(1): 1-7.
REN Hui-long, TANG Hao-yun, JIA Lian-hui, et al. Optimal Layout of Hull Structure Monitoring Points Based on Risk Assessment[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(1): 1-7.
- [4] 周天宸. 船舶结构应力监测数据处理与故障诊断方法

- 研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- ZHOU Tian-chen. Research on Data Processing and Fault Diagnosis of Ship Structural Stress Monitoring[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [5] 杨华伟, 万正权. CAN 总线在船舶结构安全监测系统中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(5): 553-559.
- YANG Hua-wei, WAN Zheng-quan. Application of CAN Bus in Ship Structure Safety Monitoring System[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(5): 553-559.
- [6] 郑智敏. 船体结构安装完整性智能监测系统[J]. 船电技术, 2013, 33(10): 40-41.
- ZHENG Zhi-min. Intelligent System of Monitoring of the Integrality for Hull Structure[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2013, 33(10): 40-41.
- [7] 刘东. 基于强度监测系统的船体结构疲劳评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- LIU Dong. Fatigue Assessment Method for Hull Structure Based on Strength Monitoring System[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [8] 任慧龙, 贾连徽, 李陈峰, 等. 船体结构应力监测系统的滤波器设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(8): 945-951, 971.
- REN Hui-long, JIA Lian-hui, LI Chen-feng, et al. Filter Design of Ship Structure Stress Monitoring System[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(8): 945-951, 971.
- [9] 徐利刚. 适用于船体结构健康监测的 FBG 传感器应用研究[J]. 船舶物资与市场, 2020(10): 69-70.
- XU Li-gang. Application of FBG Sensor for Hull Structure Health Monitoring[J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2020(10): 69-70.
- [10] 张仲良, 朱晓军, 彭飞, 等. 基于 HHT 的船体结构应力监测数据特征分析和去噪方法[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(S1): 158-164.
- ZHANG Zhong-liang, ZHU Xiao-jun, PENG Fei, et al. Characteristic Analysis and De-Noising Method of Stress Monitoring Data of Hull Structures Based on HHT[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(S1): 158-164.
- [11] 左欣. 船舶结构健康监测随机应力响应处理方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- ZUO Xin. Study on Method of Random Stress Response Process for Ship Structure Health Monitoring[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [12] 马瑞琪. 智能化船体监测系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- MA Rui-qi. Research on the Key Technology of Smart Hull Monitoring System[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [13] SWARTZ R A, ZIMMERMAN A T, LYNCH J P, et al. Hybrid Wireless Hull Monitoring System for Naval Combat Vessels[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2012, 8(7): 621-638.
- [14] KOBOEVIĆ Ž, BEBIĆ D, KURTELA Ž. New Approach to Monitoring Hull Condition of Ships as Objective for Selecting Optimal Docking Period[J]. Ships and Offshore Structures, 2019, 14(1): 95-103.
- [15] 胡嘉骏, 王辉, 汪雪良, 等. 基于实船试验的船体结构安全性评估方法[C]//第七届船舶力学学术委员会全日会议论文集. 成都: [出版者不详], 2010.
- HU Jia-jun, WANG Hui, WANG Xue-liang, et al. Safety Evaluation Method of Hull Structure Based on Real Ship Test[C]//Proceedings of the 7th Full Day Meeting of the Academic Committee of Ship Mechanics. Chengdu: [s. n.], 2010.
- [16] 朱紫贵. 结构监测技术在海上重大件运输中的应用研究[D]. 辽宁: 大连海事大学, 2013.
- ZHU Zi-gui. Research on the Application of Structural Monitoring Technology in the Transportation of Major Parts at Sea[D]. Liaoning: Dalian Maritime University, 2013.
- [17] 贾连徽. 船舶运动与应力实时监测系统的研究与开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- JIA Lian-hui. Research and Development of the Real-Time Monitoring System of Ship's Motions and Stresses[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [18] 吴今培, 肖健华. 智能故障诊断与专家系统[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- WU Jin-pei, XIAO Jian-hua. Intelligent FD and ES[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [19] 金永兴, 胡雄, 施朝健. 集装箱船舶结构状态监测与评估系统[J]. 上海海事大学学报, 2008, 29(3): 1-4.
- JIN Yong-xing, HU Xiong, SHI Chao-jian. Supervision and Evaluation System of Container Vessel Hull Structure[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2008, 29(3): 1-4.
- [20] 李春梅, 申素梅, 林越, 等. 基于光纤光栅传感技术的海洋平台结构健康监测方法[J]. 船海工程, 2011, 40(6): 165-167.
- LI Chun-mei, SHEN Su-mei, LIN Yue, et al. Structural Health Monitoring Method of Offshore Platform Based on Fiber Bragg Grating Sensing Technology[J]. Ship & Ocean Engineering, 2011, 40(6): 165-167.
- [21] 滑林, 吴梵, 吕岩松, 等. 现役船体结构可靠性评估理论研究现状及展望[J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(4): 173-180.
- HUA Lin, WU Fan, LYU Yan-song, et al. Current Status and Prospect for the Method on Reliability Analysis of Hull Structures In-Service[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2018, 40(4): 173-180.
- [22] 汪雪良, 顾学康, 魏纳新, 等. 航行船舶在波浪中响应长期监测技术[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(2): 59-62.
- WANG Xue-liang, GU Xue-kang, WEI Na-xin, et al. Application Research of Long Term Monitoring Technique for Responses of Ship Traveling at Sea[J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(2): 59-62.