

· 信息技术 ·



基于视频图像量测方法的码头水工结构 安全状态评估*

谢殿武¹, 汪承志²

(1. 广西壮族自治区港航发展中心, 广西南宁 530029; 2. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 针对码头超等级靠泊引发的结构安全实时评估难题(现行静态检测技术存在响应滞后、位移分辨率不足等问题), 提出一种基于视频图像评估船舶靠泊过程中水工结构实时变形量测方法, 旨在解决船舶动力特性与结构动态响应的实时匹配难题。利用YOLOv5目标检测和DeepSORT目标跟踪计算船舶靠泊速度, 采用Canny边缘检测与轮廓检测算法结合最小外接矩形法计算靠泊角度, 利用视频图像监测方法获取变形量并计算反力。结果表明, 靠泊速度计算值的平均误差为 ± 0.165 kn, 靠泊角度的计算值误差为 $\pm 0.3^\circ$, 反力的计算值与实测值的相对误差为7.67%, 均满足实际应用要求。提出的基于视频图像分析的船舶靠泊安全评估技术, 在检测和评估方面均表现出高效性和准确性, 能够为码头靠泊安全提供全面、实时、准确的监测与评估。

关键词: 视频图像; 靠泊安全; 码头; 结构分析; 安全性状

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0185-10

Video-image measurement method-based safety status assessment of wharf hydraulic structure

XIE Dianwu¹, WANG Chengzhi²

(1. Port and Shipping Development Center of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530029, China;

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In view of the problem of real-time assessment of structural safety caused by over-grade berthing at the wharf (the current static detection technology has problems such as response lag and insufficient displacement resolution), a real-time deformation measurement method of hydraulic structure during the ship berthing process on the basis of video-image is proposed, aiming to solve the problem of real-time matching between the dynamic characteristics of the ship and the dynamic response of the structure. The ship berthing speed is calculated by YOLOv5 object detection and DeepSORT object tracking. The berthing angle is calculated by combining the Canny edge detection and contour detection algorithm with the minimum circumscribed rectangle method. The deformation amount is obtained and the reaction force is calculated by the video image monitoring method. The results show that the average error of berthing speed calculated values is ± 0.165 kn. The error of berthing angel calculated values is $\pm 0.3^\circ$. The relative error between the counter-force calculated values and the counter-force measured values is 7.67%. All the calculated values meet the requirements of practical applications. The ship berthing safety assessment technology based on video image analysis proposed in this paper shows high efficiency and accuracy in both detection and assessment, and can provide comprehensive, real-time and accurate monitoring and assessment for wharf berthing safety.

Keywords: video-image; berthing safety; wharf; structural analysis; safety performance

收稿日期: 2025-03-17

*基金项目: 交通运输行业重点科技项目 (2021-ZD1-007)

作者简介: 谢殿武 (1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运行业规划建设管理。

沿海港口为适应经济快速发展需要适度停靠超限船舶,因此对船舶靠泊下水工结构的安全性开展评估十分必要。传统码头水工结构评估方法依赖传感器和人工经验,存在成本高、易受腐蚀、数据不准确等问题,且无法全面获取靠泊信息^[1-3]。随着计算机技术、图像处理和人工智能的发展,基于视频图像的检测方法成为新趋势,它具有非接触、实时性强、信息全面等优点,能有效克服传统方法的不足。

近年来,视频图像量测技术在码头水工结构安全评估领域取得了显著进展,主要应用于码头结构健康监测、船舶撞击影响分析等多个方面。Negi等^[4]通过研究发现,计算机视觉技术结合视频图像量测方法可用于港口结构的健康监测,能够实时检测结构变形及船舶靠泊对码头设施的影响;Lattanzi等^[5]提出一种多机器人协作检查系统,利用视频图像测量港口液压结构的位移数据,提高了长期监测的精度;Teng等^[6]提出一种基于智能视频分析的水下结构健康评估技术,能够利用高分辨率视频监测码头基础设施的损伤状况;de Oliveira Bezerr等^[7]开发出一种基于视频图像的位移测量系统,可用于监测船舶靠泊对码头结构的影响,发现 2° 以内的位移不会显著影响港口安全;Tsaimou等^[8]利用无人机(UAV)与计算机视觉技术对码头结构进行监测,优化港口基础设施的安全管理,并提高对船舶撞击后码头变形的检测能力;Wu等^[9]研究基于数字图像相关(DIC)技术的高桩码头结构安全监测方法,该方法能有效捕捉船舶撞击引起的码头位移数据;Habib等^[10]利用物联网(IoT)和计算机视觉技术建立港口风险管理平台,该系统可实时检测船舶撞击导致的码头位移情况;杨娜等^[11]通过研究发现,基于视频图像识别技术的结构位移测量方法通过创新性设计监测系统与算法优化,可实现对结构位移的实时

联动高精度自动化监测,在实际工程中验证了其替代传统接触式传感器的可行性,显著提升了复杂环境下结构安全评估的效率和可靠性。

现有研究在船舶靠泊检测评估方面取得显著成果,本文聚焦船舶靠泊过程中的关键参数,通过视频图像检测技术获取数据,构建评估模型以分析其对码头的伤害程度。研究内容包括:1)船舶靠泊速度和角度的视频图像检测方法;2)橡胶护舷反力的视频图像检测与分析;3)基于有限元实时计算的最不利构件位置分析及长期受荷劣化过程判断,以实现码头结构安全状态的精准评估。

1 基于视频图像的船舶靠泊过程中码头水工结构安全评估参数检测方法

视频图像采集系统是船舶靠泊监测的关键设备,其性能和布局直接影响检测与分析的准确性和可靠性^[12]。本文采用高分辨率、低照度的工业级网络摄像头,其具备以下优势:高分辨率可捕捉船舶靠泊的细节,为分析船舶位置、姿态及橡胶护舷变形提供丰富信息;低照度性能确保在夜间或低光照条件下获取清晰图像,实现全时段的有效监测。

摄像头布局综合考虑船舶靠泊场景和监测需求。码头测试断面见图1。在码头前沿两侧各安装1个摄像头,呈一定角度布置,覆盖船舶靠泊的主要区域,确保从接近到停靠的全过程被清晰拍摄。橡胶护舷中段布置摄像头用于量测拖轮顶推时橡胶护舷变形,见图2。船头方向的摄像头用于监测船舶前进方向和靠泊速度,见图3;船尾方向的摄像头则关注尾部动态及与码头的相对位置,用于判断靠泊角度。码头量测断面的横梁岸侧端部设置1个实时差分定位(RTK)毫米级位移量测系统。

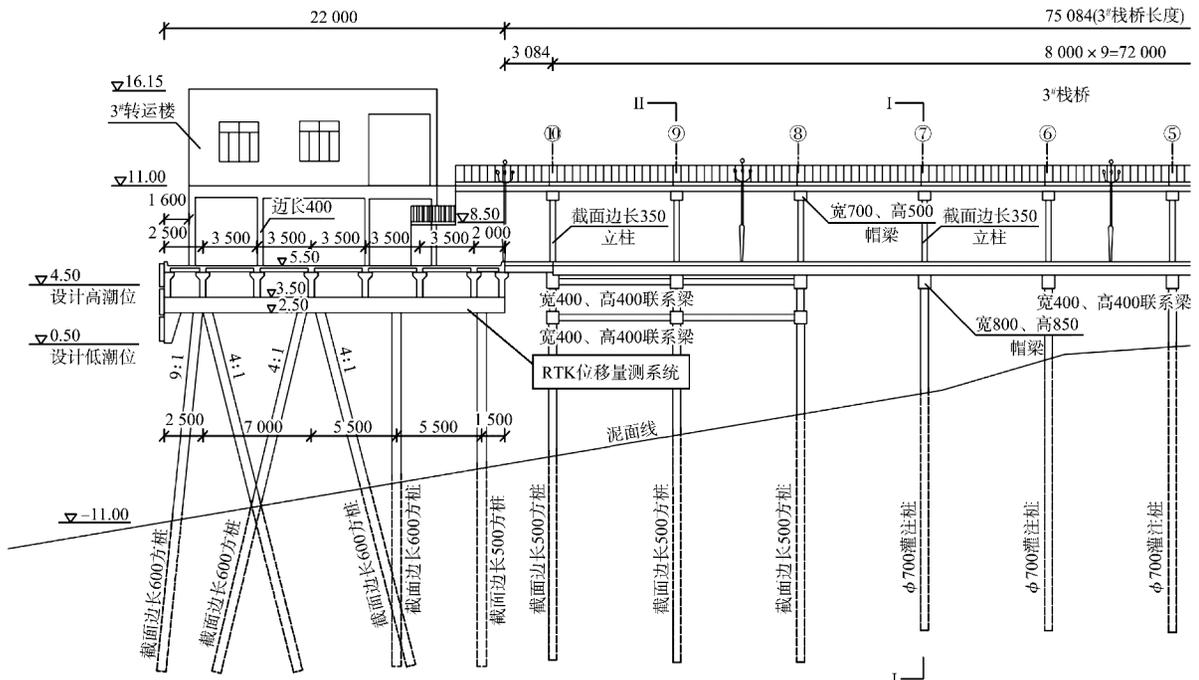
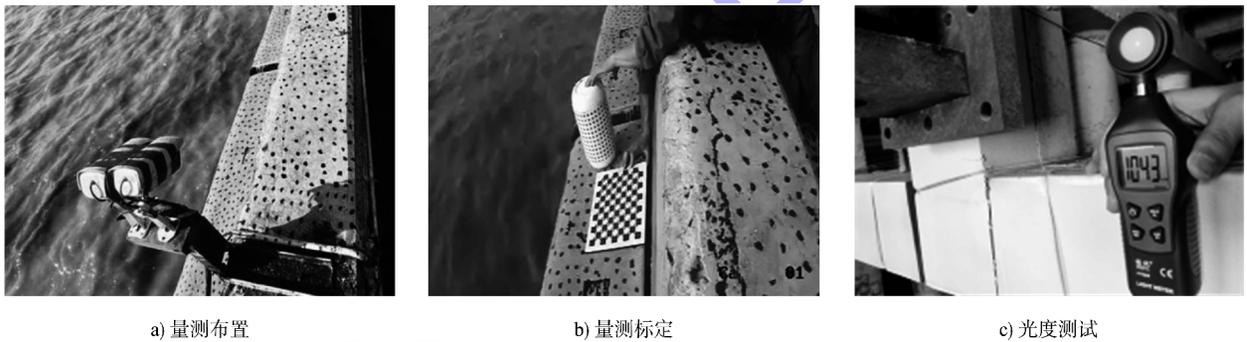


图 1 码头测试断面 (尺寸: mm; 高程: m)

Fig.1 Wharf test section (dimension: mm; elevation: m)



a) 量测布置

b) 量测标定

c) 光度测试

图 2 橡胶护舷变形数字图像量测布置、标定与光度测试

Fig. 2 Digital image measurement arrangement, calibration and photometric test of rubber fender deformation



a) 摄像头安装

b) 船舶靠泊视频截图

图 3 全程监测船舶进出港区的球形摄像头及其获取的船舶靠泊过程视频截图

Fig. 3 Spherical camera used to monitor whole process of ship entering and leaving port area and its obtained video frame

此外，在码头高处(如灯塔或监控塔)安装 1 个俯视摄像头，从高空俯瞰整个靠泊区域，提供船舶与码头的整体位置关系，为全面分析靠泊过程提供宏观视角。为保障系统正常运行，须定期维护和校准摄像头。定期检查安装位置是否偏移并及时调整；清洁镜头和外壳，确保光学性能；校准摄像头参数(如焦距、光圈、曝光时间)，保证图像质量和准确性。

为保障监测数据的可靠性，对 2023 年 5 月 30 日靠泊的船舶开展夜景环境下橡胶护舷变形与整体位移现场标定测试，见图 4，通过对橡胶护舷变形

的激光量测和船舶靠泊速度的雷达测速验证数字图像量测的准确性，并进行关照度现场试验分析。通过分析可知，高分辨率背照式传感器(像素面积 $2.8 \mu\text{m}^2$ ，感光度 25 600)配合低照度增强算法(MBLLEN 多分支网络)，通过增加可控光源将环境提升至 $5 \sim 20 \text{ lux}$ ，并结合全局快门传感器抑制动态模糊，以实现复杂场景下的稳定量测。船舶边缘轮廓清晰，橡胶护舷图像特征点可有效识别。像素位移精度达亚像素级，证明图像分辨率满足变形测量需求。



图 4 夜景环境下橡胶护舷变形与整体位移现场验证界面

Fig. 4 Interface of field verification of rubber fender deformation and overall displacement in night environment

2 船舶靠泊速度与靠泊角度检测算法

2.1 船舶靠泊速度计算方法

在船舶靠泊速度检测中，准确识别船舶目标并对其运动轨迹进行跟踪是计算靠泊速度的关键前提。本文提出一种结合 YOLOv5 目标检测和 DeepSORT 目标跟踪的船舶靠泊速度计算方法，流程见图 5。YOLOv5 算法将目标检测视为回归问题，通过单次前向传播直接预测目标类别和位置。它将输入图像划分为网格，每个网格预测多个边界框及其置信度分数和类别概率。通过非极大值抑制(NMS)去除重叠边界框，最终输出准确的检测结果。在船舶靠泊场景中，经过大量不同条件图像数据训练的 YOLOv5 模型能够准确识别船舶目标并输出其位置坐标。为实现船舶运动轨迹的

连续跟踪，本文采用 DeepSORT 算法。DeepSORT 基于简单在线实时跟踪(SORT)算法，结合深度学习技术，通过提取目标外观特征(如形状、颜色)，解决目标遮挡和 ID 切换问题，提高跟踪的稳定性和准确性。DeepSORT 利用 YOLOv5 检测的船舶目标，通过卷积神经网络(CNN)提取外观特征，建立特征描述子，并结合目标运动状态(如位置、速度、加速度)和外观特征，利用匈牙利算法完成目标匹配。若目标在多帧中未被匹配，则视为离开视野；若检测到新目标，则分配新 ID 并开始跟踪。通过这种方式，DeepSORT 能够稳定跟踪船舶靠泊过程中的运动轨迹，为靠泊速度计算提供连续的位置信息。

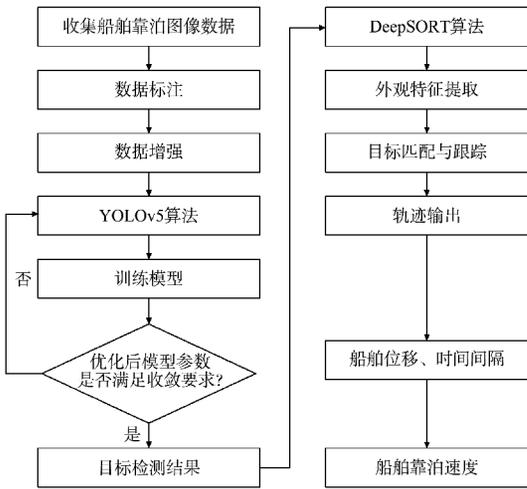


图 5 船舶靠泊速度计算流程

Fig. 5 Calculation process of ship berthing speed

完成船舶目标识别与跟踪后, 通过基于像素位移和时间戳的速度计算模型计算靠泊速度。假设在视频序列中, 第 t_1 帧船舶中心位置为 (x_1, y_1) , 第 t_2 帧为 (x_2, y_2) , 时间间隔 $\Delta t = t_2 - t_1$ 。由于图像坐标以像素为单位, 需要将其转换为实际物理位移, 以计算船舶的实际靠泊速度。

根据勾股定理, 船舶在图像中的像素位移 d_{pixel} 的公式为:

$$d_{\text{pixel}} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

将像素位移转换为实际物理位移 d 的公式为:

$$d = kd_{\text{pixel}} \quad (2)$$

式中: k 为标定系数, 是图像像素与实际物理距离的比例关系。假设物体实际长度为 L , 图像中像素长度为 l , 则标定系数 $k = L/l$ 。

船舶的靠泊速度 v 的计算公式为:

$$v = \frac{d}{\Delta t} = \frac{k \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

在实际计算中, 为提高速度计算的准确性和稳定性, 通常对多组连续帧图像中的船舶位置进行计算, 并取平均值作为靠泊速度。同时, 考虑靠泊过程中速度的变化, 可采用滑动窗口方法对不同时间段内的速度进行实时更新和分析。通过该速度计算模型, 能够实时获取船舶靠泊速度, 为靠泊安全评估提供重要的数据支持。

2.2 船舶靠泊角度计算方法

本文采用 Canny 边缘检测算法与轮廓检测

算法相结合的方法实现船舶轮廓的精确提取, 流程见图 6。其主要步骤包括: 高斯滤波降噪、计算梯度幅值与方向、非极大值抑制以及双阈值检测与边缘连接。在处理船舶靠泊图像时, 首先通过高斯滤波去除噪声, 然后计算每个像素点的梯度幅值和方向。梯度幅值反映灰度变化的强度, 而梯度方向指示变化的方向。非极大值抑制用于去除非边缘像素, 保留梯度最大值点, 从而获得细化的边缘。最后, 通过双阈值检测和边缘连接, 将满足条件的边缘像素连接成完整的轮廓。经过 Canny 算法处理后, 船舶边缘得以清晰凸显。

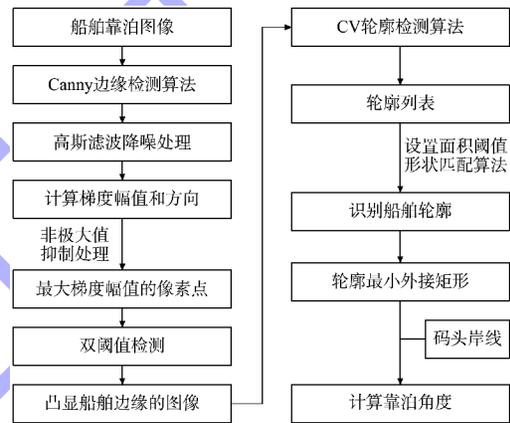


图 6 船舶靠泊角度计算流程

Fig. 6 Process of ship berthing angle calculation

在获得船舶边缘图像后, 利用轮廓检测算法提取船舶轮廓。轮廓检测基于边缘图像中像素的连接关系, 识别出物体的封闭轮廓。OpenCV 库中的 `cv2.findContours` 函数可实现这个功能, 通过扫描边缘图像, 提取所有轮廓并存储为列表。根据船舶轮廓的特征(如面积和形状), 从轮廓列表中筛选出船舶轮廓。船舶轮廓通常面积较大且具有特定形状, 通过设置面积阈值和形状匹配算法, 可准确识别船舶轮廓, 为后续靠泊角度计算提供数据基础。

在提取船舶轮廓后, 通过最小外接矩形法计算船舶靠泊角度。利用 OpenCV 库中的 `cv2.minAreaRect` 函数计算船舶轮廓的最小外接矩形, 该矩形完全包围船舶轮廓, 并具有中心坐标、宽度、高度和旋转角度。旋转角度即矩形长边与水平方向的夹角, 是计算船舶靠泊角度的关键参数。

为准确计算船舶靠泊角度, 需要将最小外接矩形的旋转角度与码头岸线方向关联。在实际应

用中，可通过在图像中标记码头岸线方向实现这一关联。假设码头岸线在图像中为水平直线，则靠泊角度 θ 可通过下式计算：

$$\theta = \alpha - \beta \quad (4)$$

式中： α 为最小外接矩形的旋转角度； β 为码头岸线与水平方向的夹角（在假设条件下， $\beta = 0^\circ$ ）。

计算时须考虑角度的正负：若船舶船头偏向码头岸线右侧， θ 为正值；若偏向左侧， θ 为负值。通过此方法，可实时准确计算船舶靠泊角度。该方法基于船舶轮廓与码头岸线的相对关系，能够准确获取船舶靠泊角度，为靠泊安全评估提供重要的参数支持。

3 船舶靠泊姿态下橡胶护舷相对变位检测方法

通过视频图像识别技术对橡胶护舷的相对变位进行监测。本文采用特征点匹配技术，结合边缘检测与轮廓提取算法，实现对橡胶护舷变形的高精度监测，流程见图 7。在橡胶护舷表面选取具有显著颜色、纹理或形状差异的特征点，并利用 Shi-Tomasi 角点检测算法进行提取。该算法基于灰度图像，通过计算像素点的自相关矩阵特征值识别角点。特征值较大的像素点通常在两个正交方向上灰度变化显著，被认为是角点。在橡胶护舷图像中，这些特征点表现为清晰的亮点，标示出关键位置。

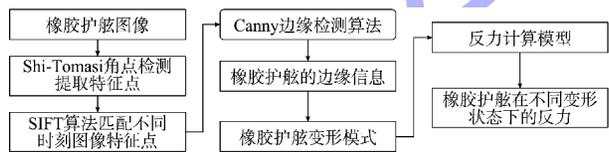


图 7 橡胶护舷反力检测计算流程
Fig. 7 Process of rubber fender reaction detection calculation

在船舶靠泊过程中，橡胶护舷受挤压变形，导致特征点位置变化。通过尺度不变特征变换 (SIFT) 算法对不同时刻图像中的特征点进行匹配。SIFT 算法具有尺度不变性、旋转不变性和光照不变性，能够在不同尺度和角度的图像中准确匹配特征点，计算其位移向量。

在此基础上，结合橡胶护舷的边缘检测和轮廓提取结果，进一步分析其变形情况。利用 Canny

边缘检测算法获取边缘信息，并通过轮廓检测算法提取轮廓。根据特征点位移和轮廓变化，可直观观察橡胶护舷的变形模式（如压缩、弯曲），见图 8。通过分析这些变形模式，能够准确评估橡胶护舷的变形程度，为反力计算提供可靠数据支持。这种基于特征点匹配的监测方法能够实时、准确地获取橡胶护舷在靠泊过程中的变形信息，为反力检测和分析奠定了基础。

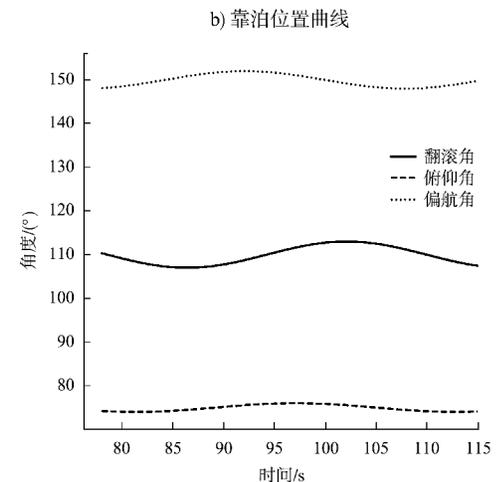
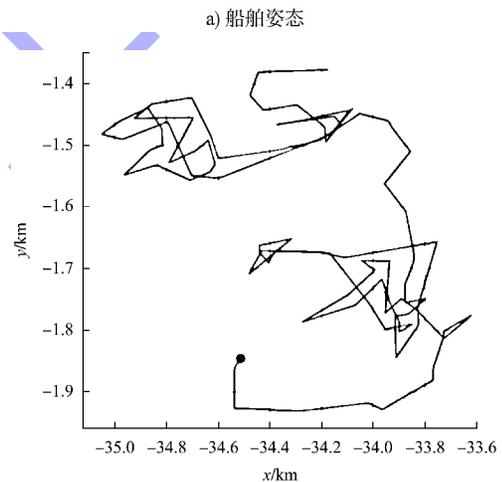


图 8 船体姿态与靠泊位置、角度曲线
Fig. 8 Hull attitude and berthing position and angle curves

基于橡胶护舷的相对变形量, 利用橡胶护舷反力曲线图查询反力, 见图 9。为验证模型的准确性, 本文在实验室模拟不同靠泊工况, 对橡胶护舷施加不同程度的挤压变形, 并通过力传感器测量反力。同时, 利用视频图像监测方法获取变形量并计算反力。

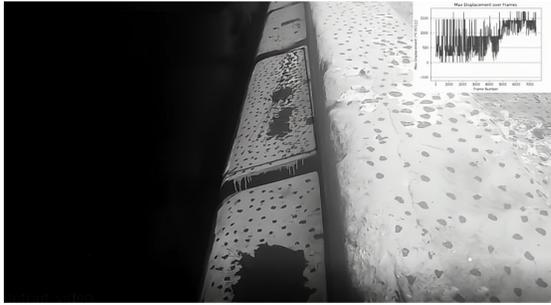


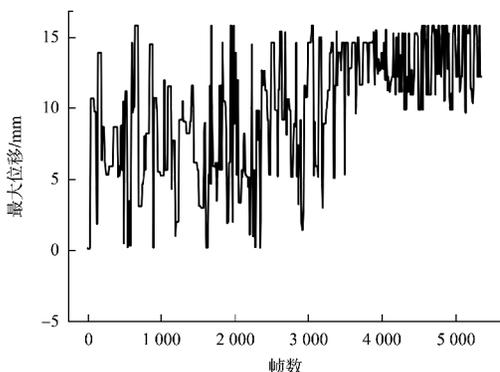
图 9 船舶靠泊过程实施位移量测的界面
Fig. 9 Interface of displacement measurement during ship berthing process

4 船舶靠泊过程下水工结构安全状态评估

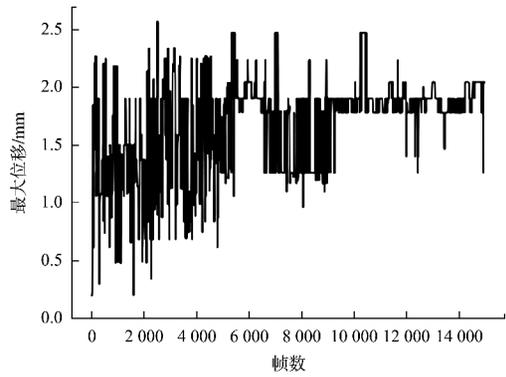
采用本文提出的方法, 对日间、夜晚不同时段靠泊的 5 艘船舶开展靠泊速度、角度和橡胶护舷变形分析, 见图 10。通过与现场检测的对比获得数字图像方法的可靠性。其数字图像量测靠泊安全性状见表 1。

表 1 数字图像量测靠泊安全性状
Tab. 1 Berthing safety performance measured by digital image

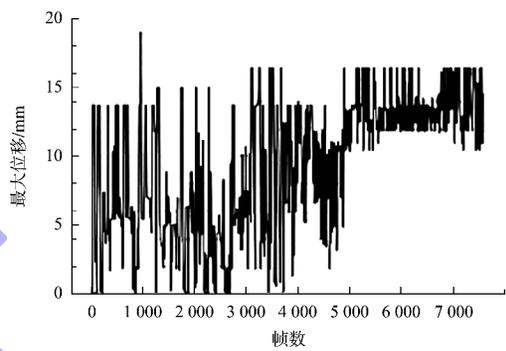
测试时间	停靠船舶编号	船舶类型
2023-05-30T19:20:00	MZ-111	5 万 t 海船
2023-11-12T23:57:00	HW-112	5 万 t 海船
2023-11-14T15:26:00	TRZ-113	5 万 t 海船
2023-11-26T10:25:00	TRZ-114	5 万 t 海船
2023-11-28T11:03:00	ZH-115	5 万 t 海船



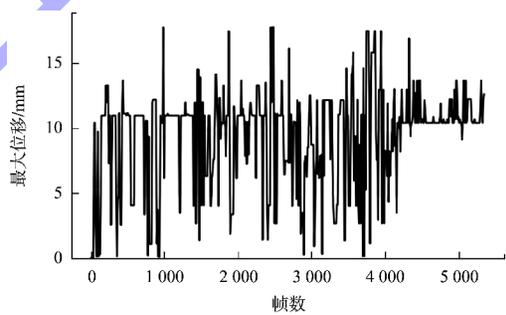
a) MZ-111



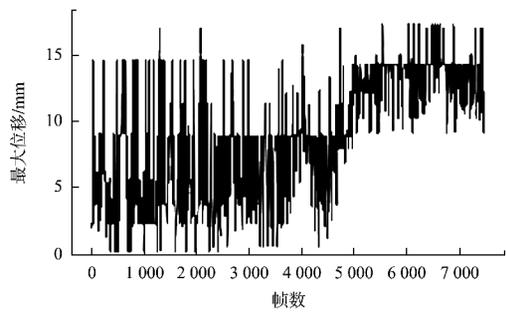
b) HW-112



c) TRZ-113



d) TRZ-114



e) ZH-115

图 10 船舶靠泊过程不同时段橡胶护舷位移曲线
Fig. 10 Displacement curves of rubber fenders at different time periods during ship berthing process

通过对该码头多艘船舶靠泊数据的检测与分析, 得到一系列关键参数的检测结果以及码头伤

害程度的评估结果，这些结果为深入了解船舶靠泊过程中的安全状况提供了重要依据。

4.1 靠泊速度误差验证

根据船舶速度传感器 (DAS) 的显示，实测速度范围为 9.169 8~9.615 9 m/s(极端值为靠泊过程中的瞬时速度)，其中核心有效数据即靠泊接触阶段的实测速度集中在 0.702 3 ~0.803 9 m/s。选取 10 组有效速度数据，计算平均绝对误差 ε ，公式为：

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |v_i - \hat{v}_i| \quad (5)$$

式中： n 为样本个数； v_i 、 \hat{v}_i 分别为第 i 个样本的真实值和预测值。

经统计，10 组数据的平均绝对误差为 ± 0.165 kn，满足不大于 ± 0.2 kn 的要求。

4.2 靠泊角度误差验证

本文根据不同靠泊角度的船舶图像，并与实际测量值对比。码头岸线在图像中为水平直线，在提取船舶轮廓后，通过最小外接矩形法计算船舶靠泊角度。图像中检测到最小外接矩形的旋转角度 α 在 $6.26^\circ \sim 8.05^\circ$ 。结果表明，靠泊角度计算值与实际值高度一致，合成角度最大误差为 $\pm 0.3^\circ$ ，满足港口工程对靠泊角度误差不大于 $\pm 5^\circ$ 的要求。

4.3 橡胶护舷反力误差验证

根据 5 艘船舶开展橡胶护舷变形分析情况，通过力传感器测量反力。同时，利用视频图像监测方法获取变形量并计算反力。选取 5 组反力计算值(8.28、8.35、8.19、8.42、8.21 kN)，与现场实测均值 9.0 kN 进行对比，平均相对误差为 7.67%，在工程允许值 $\pm 10\%$ 以内，满足实际工程要求。

4.4 结构安全状态分析

针对以上获取的船舶撞击力和挤靠力，对结构开展数值分析。结构完整状态下桩基位移见图 11，第 1 排桩基损伤位移演化见图 12，横梁损伤位移演化见图 13，第 2 排桩基损伤位移演化见图 14。分析各类构件损伤情况下结构的变形趋势与极限

位移值，在码头后方设置 RTK 码头横梁位移量测值，通过将船舶荷载代入模型计算，分析云图最大位移的比值，判断是否安全。码头靠泊状态下的结构安全状态分析见表 2、3。根据结果分析可知，5 艘船前后 6 个月靠泊，位移无累加、结构回弹至初始状态，实现安全靠泊。

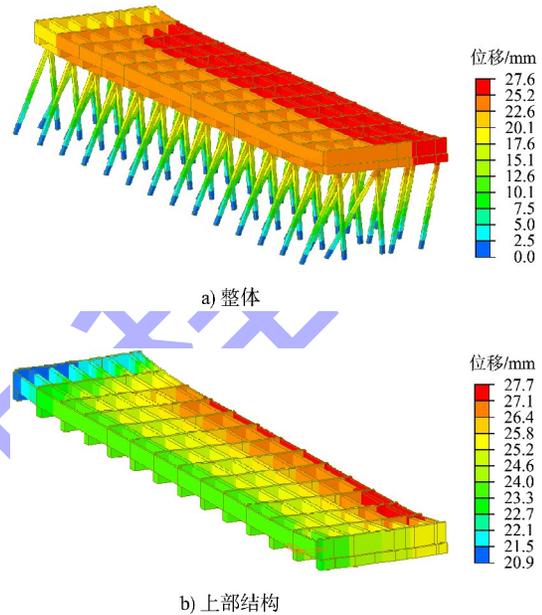


图 11 结构完整状态下桩基位移
Fig. 11 Displacement of pile foundation in structural integrity

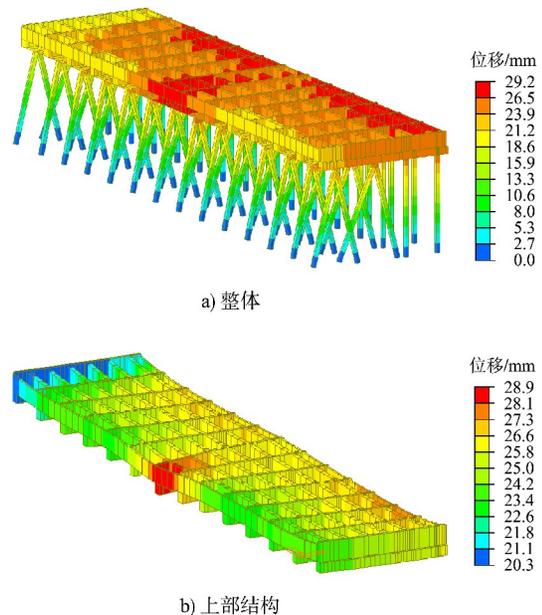


图 12 第 1 排桩基损伤位移演化云图
Fig. 12 Damage displacement evolution cloud map of first row pile foundation

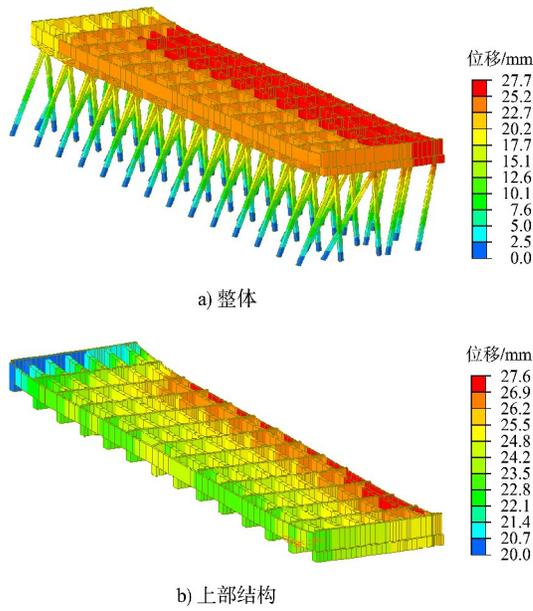


图 13 横梁损伤位移演化云图

Fig. 13 Cross beam damage displacement evolution cloud map

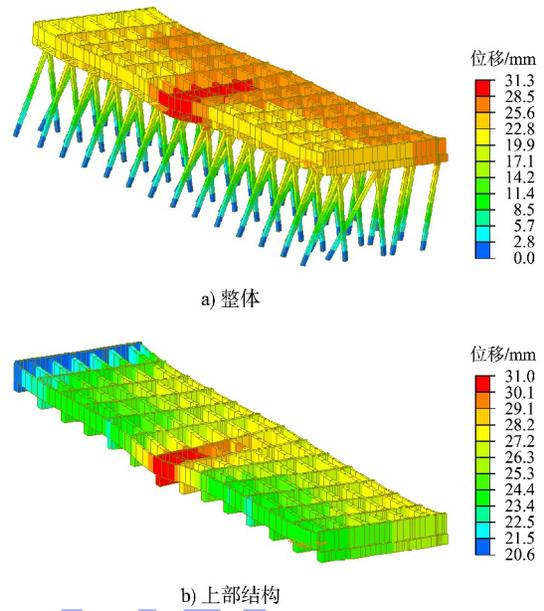


图 14 第 2 排桩基损伤位移演化云图

Fig. 14 Damage displacement evolution cloud map of second row pile foundation

表 2 码头靠泊状态下结构受力分析

Tab. 2 Analysis of structural force in wharf berthing state

船舶	横梁受力		前排桩基受力			后排桩基受力			靠船构件受力		
	弯矩/(N·m)	剪力/kN	弯矩/(N·m)	剪力/kN	轴力/kN	弯矩/(N·m)	剪力/kN	轴力/kN	弯矩/(N·m)	剪力/kN	轴力/kN
MZ-111	2.5	0.25	2.2	0.23	0.24	2.5	0.26	0.27	2.8	0.28	0.22
HW-112	2.4	0.25	2.2	0.24	0.24	2.3	0.23	0.24	2.8	0.28	0.23
TRZ-113	2.4	0.25	2.2	0.23	0.23	2.4	0.23	0.25	2.7	0.27	0.22
TRZ-114	2.3	0.24	2.3	0.24	0.24	2.5	0.24	0.25	2.8	0.28	0.23
ZH-115	2.3	0.24	2.4	0.25	0.24	2.3	0.24	0.26	2.7	0.27	0.22

表 3 各构件受力最大时的位移值

Tab. 3 Displacement values of each component under maximum force

构件	状态	位移/mm
横梁	弯矩最大时	0.70
	剪力最大时	1.50
前排桩基	弯矩最大时	0.65
	剪力最大时	0.67
	轴力最大时	0.82
后排桩基	弯矩最大时	1.80
	剪力最大时	0.50
	轴力最大时	0.30
靠船构件	弯矩最大时	0.72
	剪力最大时	0.72
	轴力最大时	0.45

5 结论

1) 本文构建了一套基于视频图像的船舶靠泊参数检测体系, 采用高分辨率、低照度的工业级网络摄像头, 并结合图像预处理技术, 有效提升了图像质量, 为参数检测提供了可靠基础。

2) 在靠泊速度检测方面, 利用 YOLOv5 算法实现船舶目标的快速准确识别, 并通过 DeepSORT 算法完成运动轨迹的稳定跟踪。基于像素位移和时间戳的速度计算模型能够精确计算靠泊速度, 试验结果表明, 实测速度误差为 ± 0.165 kn, 满足实际工程不大于 ± 0.2 kn 的要求; 在靠泊角度检测中, 结合 Canny 边缘检测与轮廓检测算法提取船舶轮廓, 并采用最小外接矩形法计算靠泊角度。

与实际测量值相比, 角度误差为 $\pm 0.3^\circ$, 满足港口工程对靠泊角度误差不大于 $\pm 5^\circ$ 的要求; 在橡胶护舷反力检测方面, 通过特征点匹配技术监测护舷变形, 并结合 Mooney-Rivlin 模型计算反力, 结果表明计算值与实测值的相对误差为 7.67%, 在工程允许值 $\pm 10\%$ 以内, 为分析靠泊对码头的影响提供了关键数据。

3) 在码头伤害程度评估方面, 本文通过不同时段、不同吨位船舶撞击下的位移量测, 结合有限元分析结果, 评估了码头结构在靠泊作用下的损伤程度, 与实际情况相符, 为码头的安全管理和维护决策提供了科学依据。

参考文献:

- [1] 秦网根, 张银, 张润, 等. 板桩码头结构异常情况稳定性分析研究[J]. 中国水运, 2022(5): 36-38.
QIN W G, ZHANG Y, ZHANG R, et al. Stability analysis of sheet pile wharf structural anomalies [J]. China water transport, 2022(5): 36-38.
- [2] 王承强, 王臣, 梁桂兰, 等. 南京某高桩码头靠泊能力仿真分析与在线监测预警[J]. 水运工程, 2024(7): 185-192.
WANG C Q, WANG C, LIANG G L, et al. Simulation analysis and online monitoring and early warning of berthing capacity of high pile wharf in Nanjing[J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 185-192.
- [3] 王承强, 王臣, 贾宇, 等. 高桩码头结构安全监测预警模型及工程应用[J]. 水运工程, 2024(4): 15-21.
WANG C Q, WANG C, JIA Y, et al. High-pile wharf structure safety monitoring and forewarning model and its engineering application[J]. Port & waterway engineering, 2024(4): 15-21.
- [4] NEGI P, KROMANIS R, DORÉE A G, et al. Structural health monitoring of inland navigation structures and ports: a review on developments and challenges [J]. Structural health monitoring, 2024, 23(1): 605-645.
- [5] LATTANZI D, AMINFAR K, HEAD M, et al. Multi-robot teaming for inspection of hydraulic structures [R]. Hartford: Center for Integrated Asset Management for Multimodal Transportation Infrastructure Systems, United Technologies Corporation, 2024.
- [6] TENG S, LIU A, YE X, et al. Review of intelligent detection and health assessment of underwater structures [J]. Engineering structures, 2024, 308: 117958.
- [7] DE OLIVEIRA BEZERR R, DE MELO BERNARDINO J C. Displacement measurement system for small-scale vessels berthed in physical models of port terminals [J]. TransNav: international journal on marine navigation and safety of sea transportation, 2024, 18(1): 169-175.
- [8] TSAIMOU C N, SARTAMPAKOS P, TSOUKALA V K. UAV-driven approach for assisting structural health monitoring of port infrastructure [J]. Structure and infrastructure engineering, 2023(12): 1-20.
- [9] WU W, YE P, CHANG X, et al. Application test of structural safety monitoring of high pile wharf based on DIC [C]//ISPP. Proceedings of International Conference on Image, Signal Processing, and Pattern Recognition (ISPP 2023). Washington: SPIE, 2023: 804-809.
- [10] HABIB M A, O'SULLIVAN J J, ABOLFATHI S, et al. Enhanced wave overtopping simulation at vertical breakwaters using machine learning algorithms [J]. PLoS ONE, 2023, 18(8): e0289318.
- [11] 杨娜, 陈夏阳, 张华彬. 视频图像识别技术在结构位移测量中的应用[J]. 交通世界, 2023(23): 5-8.
YANG N, CHEN X Y, ZHANG H B. Application of video image recognition technology in structural displacement measurement [J]. Transportation world, 2023(23): 5-8.
- [12] 倪慧洋. 基于视频信息的港口滞留船舶检测研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(7): 186-189.
NI H Y. Research on detection of stranded ships in port based on video information [J]. Ship science and technology, 2023, 45(7): 186-189.

(本文编辑 王璁)