



# 基于数字图像量测的沿海码头 靠泊荷载感知方法研究

王逸飞, 汪承志, 赵桑岚, 陈东红  
(重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

**摘要:** 为解决在船舶靠泊荷载的量测时传统的接触性感知仪器存在影响船舶靠泊、难以维护, 以及激光测距和声波传感器等非接触性方法易受光照和现场环境的局限性等问题, 提出一种基于数字图像量测的沿海码头靠泊荷载感知方法。依托浙江省宁波舟山港某码头工程, 通过利用橡胶护舷的变形前后两幅图像中的散斑图案进行运算, 计算出橡胶护舷的变形位移, 再根据已知的橡胶护舷规格和变形位移数据得到撞击能量和护舷反力, 进而推算船舶靠泊荷载。结合现场试验结果表明: 与常用应变片测量相比, 该方法的误差低于10%; 通过现场实际应用, 验证了该方法感知靠泊荷载的有效性。

**关键词:** 数字图像; 码头结构; 荷载感知; 靠泊

中图分类号: U653.2; U653.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)06-0194-09

## Coastal wharf berthing load sensing method based on digital image measurement

WANG Yifei, WANG Chengzhi, ZHAO Sanglan, CHEN Donghong

(School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** In order to solve problems that traditional contact-based sensing instruments are interference with berthing operations and maintenance difficulties while measuring berthing loads on ships, and non-contact methods of laser rangefinders and sonar sensors are affected by lighting and environmental conditions, we propose a method for load sensing during coastal berthing on the basis of digital image measurement. Relying on a wharf project at Ningbo-Zhoushan Port in Zhejiang Province, we use the method to compute the deformation displacement of rubber fenders by analyzing speckle patterns in two images taken before and after deformation. By leveraging the known specifications of the rubber fender and the deformation displacement data, we calculate the impact energy and fender reaction force, allowing for the estimation of berthing loads. The results of field tests demonstrate that compared to conventional strain gauge measurements, the error margin of this method is less than 10%, validating its effectiveness in sensing berthing loads through on-site application.

**Keywords:** digital imaging; wharf structure; load sensing; berthing

不同于一般结构, 码头结构荷载主要体现在浪涌荷载和船舶荷载, 船舶靠泊撞击作为码头结构的主要荷载来源, 对码头结构的工作性能影响较大。为推动码头结构维护技术提升和沿海港口结构安全可控的需要, 针对港口一流设施的建设

目标开展港工结构监测研究, 助力一流强港建设, 因此有必要开展对码头结构的船舶靠泊荷载有效感知方法的研究。

针对撞击荷载, 国内外学者已开展了一些相关的研究, 如 Minorsky<sup>[1]</sup>提出了基于24次实际碰

收稿日期: 2024-08-23

作者简介: 王逸飞 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为港口、海岸及近海工程。

撞事故的半解析求解方法,分析碰撞过程中船舶的撞击能量,标志着船舶碰撞研究的开始;Abubakar等<sup>[2]</sup>研究撞击角和撞击速度对碰撞的影响,以数值模拟结果为基础,提出船首结构碰撞损伤响应的简化计算方法;Petersen<sup>[3]</sup>利用船舶水平运动的瞬态方程推导仿真程序,用近似方法计算截面附加质量和阻尼,从而计算截面单元响应函数;邓雷飞等<sup>[4]</sup>应用有限元方法对船舶撞击码头的过程进行数值模拟,根据码头结构产生的最大拉、压应力和混凝土强度破坏准则判断船舶靠泊时产生的撞击力;金梦菊<sup>[5]</sup>在进行逾500次的船模碰撞简易试验后,得到关于船舶撞击力与速度的函数关系;Zhai等<sup>[6]</sup>对船舶冲击载荷作用下高桩码头的横向变形进行研究,建立计算公式,提出计算公式相关系数的方法;Gazetas等<sup>[7]</sup>对码头柔性桩柱施加低频荷载时,得出运动效应与惯性效应仅在相当短的时间内同时发生的结论;廖德华等<sup>[8]</sup>结合船舶与码头发生碰撞的实例,以码头结构现场检测结果为基础,采用水运等行业规范公式推算失控船舶的撞击力;周世良等<sup>[9]</sup>提出一种基于支持向量机的预测模型,结合架空直立式码头的结构特点,对船舶撞击荷载进行监测。然而目前对于高桩码头靠泊荷载感知方法的研究还很少。

数字图像相关(digital image correlation, DIC)方法是近年来迅速发展的一种新型测试方法,可以进行跨尺度的三维位移和应变变量测<sup>[10]</sup>。学者们利用这种方法在众多领域取得了广泛的研究成果,如Tang等<sup>[11]</sup>提出一种基于DIC技术确定局部化起始应力水平的方法,定性研究围压对应力阈值、能量演化、场应变模式和裂纹演化的影响;Lingga等<sup>[12]</sup>结合两个针孔相机通过数字图像相关建立立体视觉结合传统的接触法和非接触法,测量大型圆柱形水泥堆石试件的轴向和横向变形;Farahani等<sup>[13]</sup>使用DIC处理两个或多个时刻的坡度阴影投影,使用多个视角生成山体阴影图像,解决滑坡的3D表面位移;李堂勇<sup>[14]</sup>依托成都地铁某运营区间,通过模型试验及DIC等方法对浅埋地铁隧道抗震

性能进行研究。然而应用DIC对高桩码头结构进行精确感知尚无先例。

传统的荷载感知方法有经验公式法、物理模型试验法、应变片法等。经验公式法基于长期工程实践公式往往简化了环境条件,通常过于理想化,精确性不足;物理模型试验法可以直观地反映真实荷载作用,但试验成本高、时间长,且缩尺模型可能存在比例失真问题,难以完全反映实际荷载;现多用应变片法,但安装过程比较复杂,易受到温度、湿度等环境因素的影响,且只能感知其安装位置的局部应变,无法反映整个结构的情况。而DIC避免了缩尺效应和高成本问题,能直接在实际结构上进行量测,提供更加准确和丰富的数据,能够实现非接触、全场的应变监测,受安装和环境的限制小,可适用于复杂结构和动态环境。

本文旨在根据橡胶护舷的规格参数结合数字图像量测技术,获取橡胶护舷的应变和变形位移,从而推算出船舶靠泊荷载。研究成果可为沿海码头开展数字化智能监测及性能提升应用研究提供参考。

## 1 船舶靠泊荷载感知方法建立

为解决沿海码头极端复杂环境条件下靠泊荷载感知困难的问题,本文建立基于数字图像散斑方法的荷载感知系统。该系统包括目标物体、图像采集终端、核心算法和可视化输出终端。所使用的目标物体是具有丰富纹理特征和充足非反光特征点的聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)棋盘标定板和立体标定柱,适用于沿海码头极端复杂环境条件下。图像采集终端(由高清摄像机和镜头组成)在码头远程监测条件下,以可视化输出终端作为监测和嵌入式处理平台,确定船舶靠泊位置,并通过集成程序对采集的数据进行计算,直接输出结果。可上传结果至云服务器进行存储,并向指定用户提供实时施工指导。理想的现场量测系统布置流程见图1。

利用数值散斑获取靠泊荷载的完整过程见图2。

此过程主要分为4个步骤：1) 进行摄像机校准并同时获取至少60张校准图像，以计算摄像机的内参数矩阵、畸变参数和外参数矩阵。通过评估再投影尺寸评估校准的质量，以减小由不充分校准引起的误差。通过摄像机校准获取的内外参数，可以通过将图像中的像素坐标转换为世界坐标来实现对目标的准确定位和测量。2) 将获取的目标图像采用角点检测算法检测其中的点特征。捕获的图像经过自适应二值化处理，识别单个散斑点并计算每个轮廓的凸多边形。3) 使用特征点方法

对通过检测特征点算法提取的各种特征点进行拟合计算。通过选择点云的中心作为原点建立坐标系。利用内外参数矩阵、齐次重心坐标、3D点坐标和图像点坐标，可以建立投影模型方程，确定控制点坐标和相机坐标系中的3D点坐标。可以从具有对应关系的两组点云中获得旋转矩阵和平移矩阵，从而转换成3D，得到3D点坐标。4) 系统在整个过程中实现连续图像采集和处理，以及橡胶护舷反力曲线数据传输，进而得到船舶靠泊荷载。

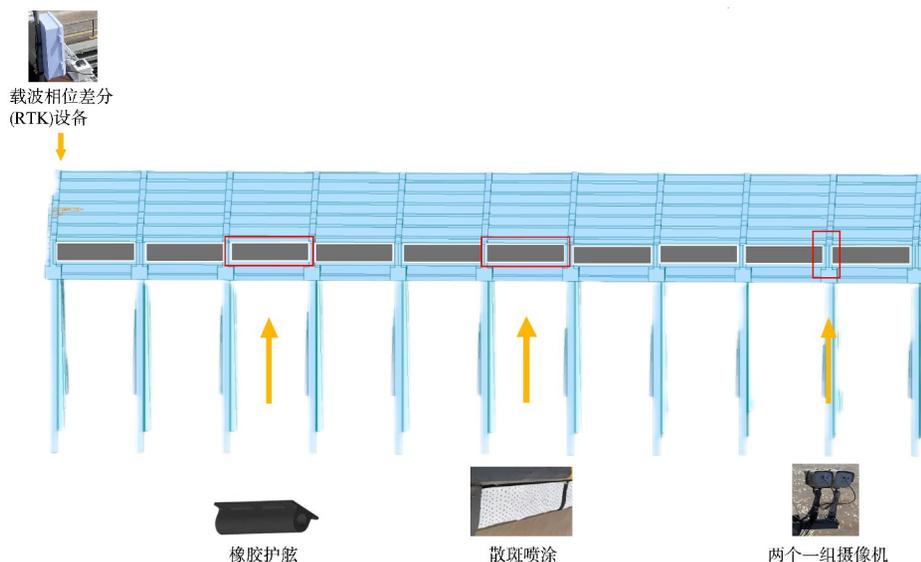


图1 3D-DIC 码头结构量测系统布置流程

Fig. 1 Layout process of 3D-DIC wharf structure measuring system

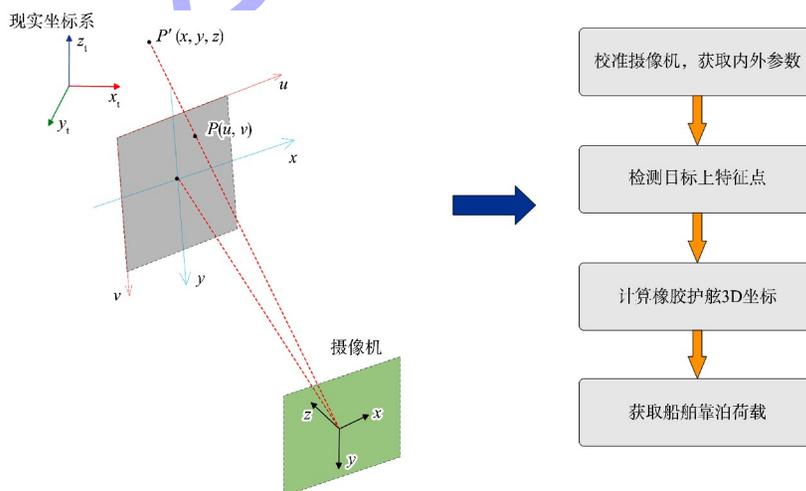


图2 靠泊荷载获取完整过程

Fig. 2 Complete process of obtaining berthing load

## 2 3D-DIC 及其优化技术原理

DIC 方法是将光度力学与数字图像处理技术相融合而发展起来的。它通过计算物体表面变形前后的数字散射图像来获取全场变形信息, 具有全场、非接触测量的特点。这种方法迅速发展并在理论研究和工程中得到应用。

3D-DIC 方法包括 4 项关键技术: 1) 参数标定, 对两个相机内部及相对位置参数进行标定; 2) 图像采集, 即采集研究对象表面的数字图像; 3) 图像匹配, 将两个摄像头在相同时刻和不同时刻拍摄的图像中的相同点进行匹配; 4) 3D 重建, 求解研究对象表面上各点在不同时刻的 3D 坐标。3D 重建与基于图像的位移计算密切相关, 见图 3,  $M$  点与  $M'$  点在空间上重叠, 成为相机 1 拍摄照片中的  $m_1$  点; 因此, 仅通过计算点  $m_1$  的坐标无法定位空间中的唯一点。但由于相机 2 拍摄的照片中  $M$  点和  $M'$  点映射为  $m_2$  和  $m'_2$  点, 因此通过计算  $m_1$  和  $m_2$  点的坐标, 可以唯一确定并跟踪  $M$  点在空间中的实时坐标。

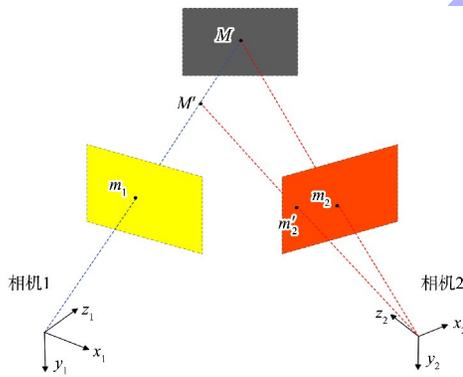


图 3 双目立体视觉原理

Fig. 3 Principle of binocular stereo vision

基于双目立体视觉原理, 要实现变形的计算, 还要基于图像相关算法完成两台相机采集到的图像信息的匹配。基于上述计算原理和相机标定参数, 即可通过 3D-DIC 软件计算得到被测物体表面在 3D 空间内的变形信息。

实现多视图设置的两个关键问题是系统校准和数据合并。每台摄像机都有 1 个典型立体对, 标定的目的是找到内在参数和外在参数。内、外参数共同用于描述将全局坐标系中的每个三维物

质点  $P(X, Y, Z)$  映射到相机传感器  $I(X_p, Y_p)$  上的图像点的变换, 是根据光学模型和近景摄影测量中比较器坐标的直接线性变换。具体如下, 坐标  $P(X, Y, Z)$  首先被刚性地转换为相机坐标系坐标  $(X_c, Y_c, Z_c)$ , 在摄像机坐标系中的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $R_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) 为旋转矩阵的元素;  $T_x$ 、 $T_y$ 、 $T_z$  为平移向量的分量。接着归一化图像点坐标计算式为:

$$\begin{cases} x' = \frac{X_c}{Z_c} \\ y' = \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \quad (2)$$

在传感器坐标系中, 使用固有相机参数, 即像素焦距  $(f_x, f_y)$  和主点坐标  $(C_x, C_y)$ , 计算传感器坐标系中的图像点坐标  $(x_p, y_p)$ , 关系式为:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & s & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $s$  为斜率系数, 其值为  $f_y \tan \alpha$ , 其中  $\alpha$  为传感器的水平轴和垂直轴之间的夹角 (垂直时  $\alpha = 0^\circ$ )。结合式 (1) 和 (3), 假设  $s = 0$  得到:

$$\begin{cases} x_p = f_x \cdot \frac{R_{11}X + R_{12}Y + R_{13}Z + T_x}{R_{31}X + R_{32}Y + R_{33}Z + T_z} + C_x \\ y_p = f_y \cdot \frac{R_{21}X + R_{22}Y + R_{23}Z + T_y}{R_{31}X + R_{32}Y + R_{33}Z + T_z} + C_y \end{cases} \quad (4)$$

再重新排列得到:

$$\begin{cases} x_p = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \\ y_p = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \end{cases} \quad (5)$$

通过求解一个线性方程组, 推导出参数集  $L_j$  ( $j = 1, 2, \dots$ ), 该图像包含一个非平面标定集, 其位置  $S(X', Y', Z')$  具有较高的精度。利用式 (5) 建立 2D 图像点与 3D 世界点的映射关系。由于每个控制点提供两个方程, 因此至少需要 6 个点才

能获得 11 个数字最小二乘法技术 (digital least squares technique, DLST) 参数。更多的点数是首选的, 本文试验选用 33 个点。因为通过最小二乘最小化解决超定系统, 减少了试验误差的影响; 在实践中, 此步需要一个 3D 校准对象, 其控制点的 3D 位置是已知的, 并具有足够的精度。使用轴向对称的三维物体即标定柱代表了 360° 多视图系统的最佳解决方案, 因为校准对象的图像可以从所有相机同时获得。然后对校准图像进行分析, 检测图像点  $(x_p, y_p)$  对应校准对象的控制点, 并将其与已知的 3D 位置  $(X, Y, Z)$  进行排序匹配。接下来, 完成计算并绘制参数  $L_j (j=1, 2, \dots, 11)$  和相关重建误差。

### 3 现场试验验证

#### 3.1 试验过程

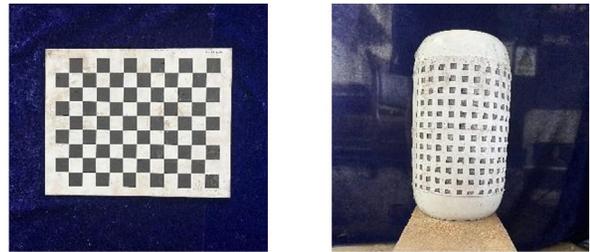
浙江省宁波舟山港有生产泊位约 620 座, 其中 1 万吨级以上的大型泊位近 170 座, 5 万吨级以上的大型、特大型深水泊位超过 100 座, 是中国超大型巨轮进出最多的港口, 也是世界上少有的深水良港, 见图 4。



图 4 宁波舟山港

Fig. 4 Ningbo Zhoushan Port

本文依托该港口某码头工程, 验证提出的方法在船舶靠泊码头结构过程中的应用试验。采用双目立体视觉测量系统, 并进行了持续测量实验。现场测试的测量系统包括棋盘标定板和立体标定柱。棋盘标定板的方格为 9 行 12 列, 每个方格边长为 25 mm, 立体标定柱的直径为 165 mm, 方格为 11 行 30 列, 根据圆周长公式控制列间距为 17.27 mm, 行列间距一致, 故行间距同为 17.27 mm, 见图 5。



a) 棋盘标定板

b) 立体标定柱

图 5 棋盘标定板和立体标定柱

Fig. 5 Checkerboard calibration board and stereo calibration column

进行 4 次参数校正, 得到最后摄像机的固定参数, 更正图像的失真。将包含着两个相机参数, 保存到所有相机的单元阵列中, 保存包含此分析中所有摄影机的摄影机参数的单元格数组, 之后为所有摄像机绘制内部参数统计信息得到现场校正后的标定板数据信息, 完成标定板现场标定。

将含标定柱的现场视频根据来源摄像机分别保存, 新建一个 3D 位置文件, 输入标定柱尺寸得到空间图片, 见图 6, 以此校准目标的真实 3D 坐标, 加载图像, 暂时提高图像分辨率以更好地找到质心, 默认值为立方插值, 开始找质心, 检查中心线是否正确, 选择区域, 第一次绘制区域包含的标号为 1~3 列, 第二次绘制区域标号为 2~4 列, 使之有重叠部分, 重叠部分为 2 和 3 列; 对质心排序, 根据输入的标定柱规格所生成的质心展示 3D 坐标, 将质心的 2D 坐标转为 3D 坐标, 选出感兴趣区域中的点, 利用这些参数完成相应图像点的立体校准, 完成标定柱现场标定。

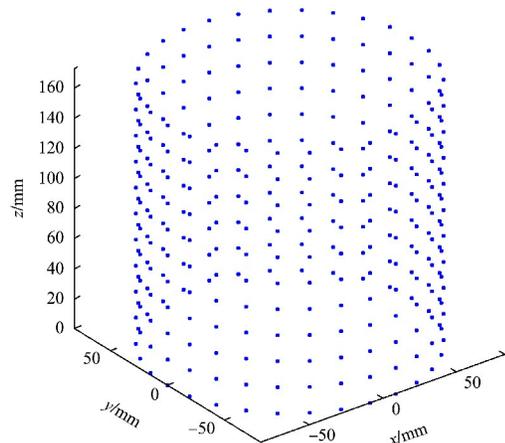


图 6 标定柱 3D 空间图

Fig. 6 3D diagram of calibration column

在现场采用喷漆和喷绘的方法对码头前沿和橡胶护舷进行散斑的制作, 在喷涂之前, 确保被喷涂的表面干净, 这里先用高压水枪对指定区域进行冲洗, 再用小铲和砂纸对难以冲刷的污渍进行去除和打磨平整, 以提供最佳的附着力和散斑效果。根据摄像机的位置, 控制斑点应该在 3~5 个像素大小, 且具有良好的对比度, 大小相等的黑白区域, 斑点方向随机。

使用归一化互相关(normalized cross-correlation, NCC)算法对来自两个摄像头的图像集运行分析, 来自第 1 台摄像机的第 1 张图像始终被定义为参考图像。输入来自 2 个摄像机的图像, 一个为参考摄像机, 另一个为“变形”摄像机, 仅设置参考摄像机的第 1 张为参考图像, 后面的全部图像都为“当前图像”, 见图 7。接着分析并执行 DIC 参数, 进行迭代求解, 迭代 50 次后停止。接着进行 DIC 分析, 在之前的感兴趣区域(region of interest, ROI)内设置种子, 完成设置后对参考的种子集和当前子集的种子进行对比, 验证种子准确性, 确认区域位置一致即完成了种子的设置。查看格式位移, 根据该码头橡胶护舷的规格可知其宽度为 500 mm, 设置现实中的长度进行校准, 将像素和实际宽度再次进行校正, 得到单位与像素之比为 1.67, 见图 8。再提取结果并计算每张图片的相关图像点、相关系数、表面和表面颜色, 完成应变分析和位移分析。

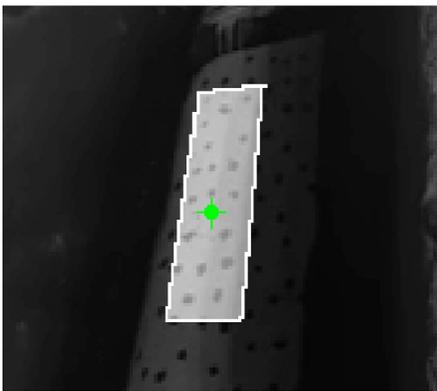


图 7 ROI 种子预览  
Fig. 7 ROI seed preview

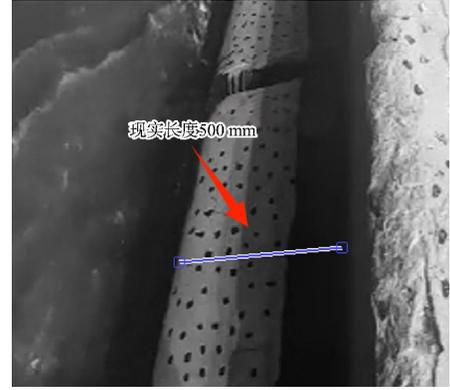


图 8 现实长度校正  
Fig. 8 Real-length correction

接着进行 3D 重建, 将上一步分析现场散斑图像中对应的点对, 利用标定柱得到的参数转化为 3D 点和曲面。对于每一对摄像机, 将重构一个动态 3D 曲面, 将多个曲面缝合在一起, 保存并绘制组合曲面。在这一步中, 参数  $L_{j,c_k}$  和  $L_{j,c_l}$  ( $j=1, 2, \dots, 11$ ) 与摄像机相关联的  $C_k$  和  $C_l$  ( $k$  和  $l$  表示特定立体对中摄像机的索引), 用于将每对对应的图像点从其图像坐标转换为 3D 坐标  $(X, Y, Z)$ , 从每个立体对中得到一个 3D 点云, 由于标定上的控制点坐标都是在全局坐标系中表示的, 所有点云都是在全局坐标系中自动重建, 而不需要执行任何额外的坐标变换过程。而且, 校准对象上的每组  $N$  个重构点的坐标  $(X_n, Y_n, Z_n)$  ( $N=1, 2, \dots, n$ ), 在校准对象上, 以及相关的真实坐标  $(X_{n,1}, Y_{n,1}, Z_{n,1})$  可用于计算重建误差  $(\Delta X_n, \Delta Y_n, \Delta Z_n)$ , 关系式为:

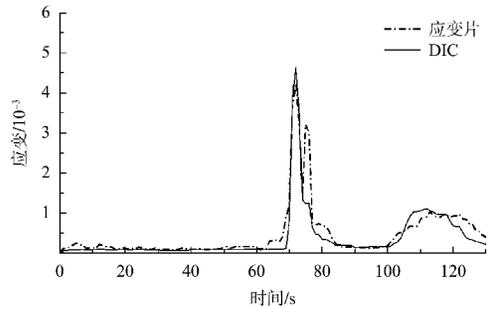
$$\begin{cases} \Delta X_n = X_n - X_{n,1} \\ \Delta Y_n = Y_n - Y_{n,1} \\ \Delta Z_n = Z_n - Z_{n,1} \end{cases} \quad (6)$$

完成重构曲面后进行表面合并, 这里使用现场的 2D 分析结果中定义的细分形成 3D 三角形网格集。从每个相机对获得的网格是独立的, 彼此不连接, 并且与合并的曲面, 网格之间的重叠需要局部重叠。为了构造一个连续的网格, 需要对其进行分解, 并将相邻的网格缝合在一起。根据 3D 重构点的动态位置, 计算出各构型每个时间下的计算位移、刚体运动、变形和应变。另外, 对每个三角

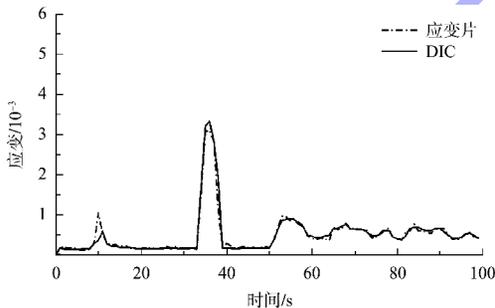
面，计算和绘制变形和应变测量值，并将所有结果保存为 MATLAB 结构；绘制所有参数。将动态形状和与从顶点位置减去的刚体运动相关联的参数可视化。

### 3.2 试验结果

现场试验记录船只靠泊 7 次，对 DIC 影响较大的因素主要在于光照和散斑清晰度，考虑当地日照角度和时间将靠泊情况分为 3 组：7—13 时、13—19 时以及 19 时—次日 7 时。将 DIC 测量和应变片测量结果进行对比，结果见图 9~11。



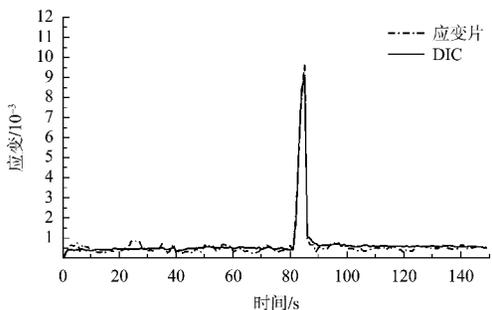
a) 11月26日10时



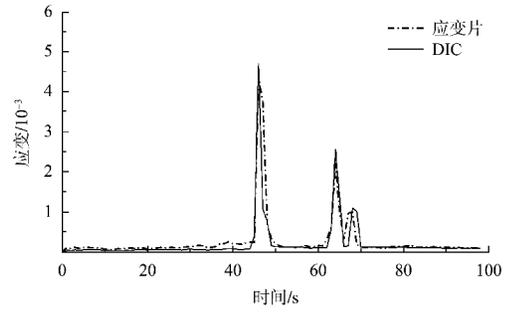
b) 11月14日11时

图 9 7—13 时组的应变片及 DIC 应变

Fig. 9 Strain gauge and DIC strain of 7 to 13 o'clock group

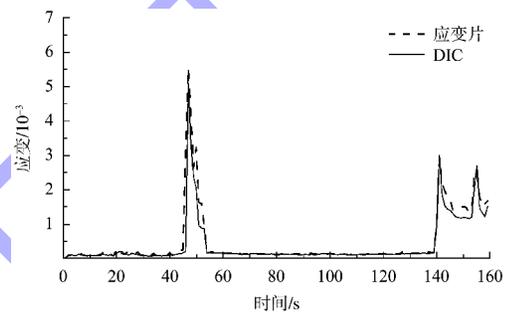


a) 11月18日15时

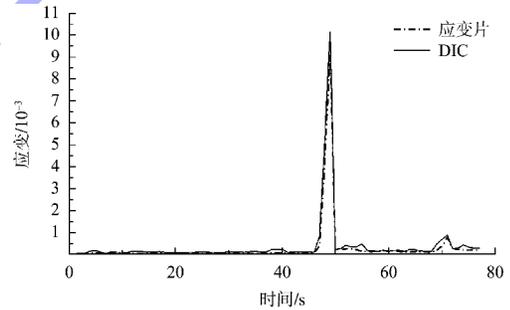


b) 12月3日16时

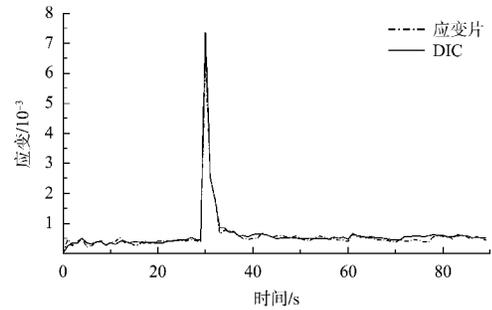
图 10 13—19 时组应变片及 DIC 应变  
Fig. 10 Strain gauge and DIC strain of 13 to 19 o'clock group



a) 11月12日23时



b) 11月28日23时



c) 11月16日0时

图 11 19 时—次日 7 时组应变片及 DIC 应变  
Fig. 11 Strain gauge and DIC strain of 19 to next day 7 o'clock group

由图9可以看出,两次靠泊过程的折线图出现多个波动处,可知在7—13时,受风力和波浪力影响,船体存在多次接触橡胶护舷的情况,但均可被有效记录,且连续稳定。11月26日10时DIC最大应变为 $4.640 \times 10^{-3}$ ,应变片最大应变为 $4.238 \times 10^{-3}$ ,精确度达91.34%;11月14日11时DIC最大应变为 $3.352 \times 10^{-3}$ ,应变片最大应变为 $3.117 \times 10^{-3}$ ,精确度达92.46%。

由图10可看出,两次靠泊过程的折线图除起伏处外都较为平稳,可知在该时间段内,船体接触橡胶护舷次数较少,靠泊过程受风力和波浪力影响较小,不存在贴着橡胶护舷横向摆动,记录稳定准确。11月18日15时,DIC最大应变为 $9.015 \times 10^{-3}$ ,应变片最大应变为 $9.622 \times 10^{-3}$ ,精确度达93.69%;12月3日16时,DIC最大应变为 $4.692 \times 10^{-3}$ ,应变片最大应变为 $4.331 \times 10^{-3}$ ,精确度达91.66%。

由图11可看出,3次靠泊过程的折线图除起伏处外都较为平稳,可知即使在夜间,具备夜视功能的摄像机仍具有良好的视频和散斑获取效果,记录稳定准确。11月12日22时DIC最大应变为 $5.080 \times 10^{-3}$ ,应变片最大应变为 $5.552 \times 10^{-3}$ ,精确度达91.50%;11月28日23时DIC最大应变为 $9.137 \times 10^{-3}$ ,应变片最大应变为 $10.138 \times 10^{-3}$ ,精确度达90.13%;11月16日0时,DIC最大应变为 $7.351 \times 10^{-3}$ ,应变片最大应变为 $6.722 \times 10^{-3}$ ,精确度达91.44%。

从以上结果可以看出,数字图像测试结果和验证结果相差均不大。根据仿真结果可以看出,本文提出的方法在理论上具有较高的准确度和鲁棒性,并且具有一定的抗噪声能力,稳定性较好;同时满足实际过程中的允许误差,说明了该方法的可行性和精确性。由于数字散斑结果是均有连续结果的平均值,导致上升和下降段的变化率较平缓。变化曲线更接近工作状态。接着根据现实校正的长度获取实际位移,代入该橡胶护舷的参数,其为直径500 mm、长1500 mm的圆柱体,采用Web Plot Digitizer软件进行手工数据标注,再进

行拟合得到荷载曲线及关系式,见图12。

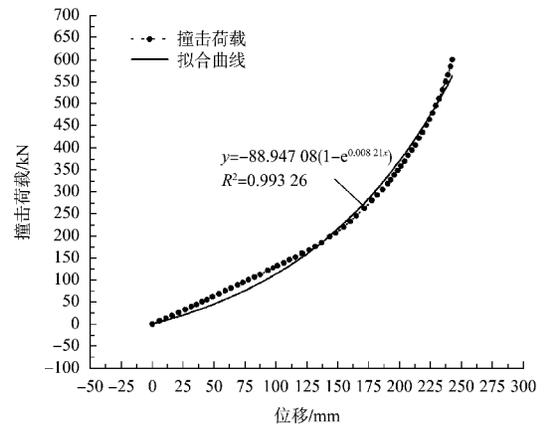


图12 撞击荷载拟合曲线

Fig. 12 Impact load fitting line

#### 4 结论

- 1) 本文设计了基于数字图像相关技术的高桩码头结构船舶靠泊荷载感知方法,且为非接触式,通过试验验证了其能够捕捉橡胶护舷受力时的应变与位移,数据的准确性较高,具有较好的可重复性。
- 2) 本文开发的图像处理算法能够有效识别橡胶护舷表面散斑。在复杂的码头环境中能够稳定运行,并且在多种光照条件下具有较高量测精度。
- 3) 本文通过试验获得的应变和位移数据,结合力学模型,推导出该码头的船舶靠泊荷载-位移公式。
- 4) 本文验证了DIC技术在码头结构监测中的有效性。为码头设施的智能化、数字化管理奠定了基础;为该码头后续的工作提供助力;同时也为沿海高桩码头的靠泊荷载量测方式提供参考。

#### 参考文献:

- [1] MINORSKY V U. An analysis of ship collision with reference to protection of nuclear power plants[J]. Journal of ship research, 1959, 3(2) : 1-4.
- [2] ABUBAKAR A, DOW R S. The impact analysis characteristics of a ship's bow during collisions [J]. Engineering failure analysis, 2019, 100: 492-511.
- [3] PETERSEN M J. Dynamics of ship collisions [J]. Ocean engineering, 1992, 9(4) : 295-329.

[4] 邓雷飞, 李越松, 郭畅. 船舶撞击码头动力响应有限元分析[J]. 水运工程, 2013(8) : 92-96.  
DENG L F, LI Y S, GUO C. Finite element analysis for dynamic response of vessel impact on wharf [J]. Port & waterway engineering, 2013(8): 92-96.

[5] 金梦菊. 船舶与自升式平台碰撞的动力特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.  
JIN M J. Research on the dynamic characteristic of the collision between ship and jack-up [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.

[6] ZHAI Q, XIANG W, LI Y. Study on the lateral deformation of the flexible berthing pile of high-pile wharf under ship impact load [J]. Applied mechanics and materials, 2015, 744/746: 1184-1187.

[7] GAZETAS G, DOBRY R. Horizontal response of piles in layered soils [J]. Journal of geotechnical engineering, 1984, 110(1): 20-40.

[8] 廖德华, 潘新恩, 张建球, 等. 船舶撞击力作用下的墩式码头水工建筑物安全评估[J]. 水运工程, 2021(9): 38-43, 54.  
LIAO D H, PAN XE, ZHANG J Q, et al. Safety assessment of hydraulic structure of pier wharf under impact force of ship [J]. Port & waterway engineering, 2021 (9): 38-43, 54.

[9] 周世良, 柯春儒, 吴凡, 等. 基于支持向量机的架空直立式码头船舶撞击力预测模型[J]. 水运工程, 2023(8): 21-27, 126.  
ZHOU S L, KE C R, WU F, et al. Inversion model of ship impact force of overhead vertical wharf based on support vector machine [J]. Port & waterway engineering, 2023(8): 21-27, 126.

[10] FAN B, QIAO Y M, HU S W. An experimental investigation on FPZ evolution of concrete at different low temperatures by means of 3D-DIC [J]. Theoretical and applied fracture mechanics, 2020, 108(4): 102575 .

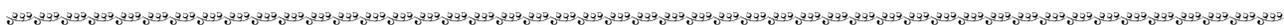
[11] TANG Y, OKUBO S, XU J, et al. Progressive failure behaviors and crack evolution of rocks under triaxial compression by 3D digital image correlation [J]. Engineering geology, 2019, 249: 172-185.

[12] LINGGA B A, APEL D B, SEPEHRI M, et al. Assessment of digital image correlation method in determining large scale cemented rockfill strains [J]. International journal of mining science and technology, 2019, 29 (5): 771-776.

[13] BERG N, HORI T, TAKE W A, et al. Calculation of 3D displacement and time to failure of an earth dam using DIC analysis of hillshade images derived from high temporal resolution point cloud data [J]. Landslides, 2020, 17 (3): 499-515.

[14] 李堂勇. 基于数字图像相关技术的浅埋隧道振动台试验研究[D]. 都江堰: 四川农业大学, 2019.  
LI T Y. Experimental study on shaking table of shallow tunnel via digital image correlation technology [D]. Dujiangyan: Sichuan Agricultural University, 2019.

( 本文编辑 王璁 )



· 消 息 ·

### 安徽蚌埠港黄疃窑综合码头工程交工验收

2025 年 5 月，三航局承建的安徽蚌埠港黄疃窑综合码头工程项目通过交工验收。该项目位于蚌埠高新区黄疃窑村淮河右岸，占地面积 349 亩，主要建设内容包括 4 个 2 000 吨级通用泊位码头、港区道路及附属工程。该项目建成后，将成为蚌埠港最大吨级综合码头，助力当地企业提高运输效率，有效提升淮河流域航道运载力。

[https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202505/t20250519\\_220404.html](https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202505/t20250519_220404.html) (2025-05-08)