

基于双轴扫描声呐的抛填振夯施工实时检测系统构建与应用

王超, 徐文星, 颜如玉, 李祺闻, 赫文, 陈兆海
(中交一航局第三工程有限公司, 辽宁 大连 116083)

摘要: 针对抛填振夯施工质量检测效率低、覆盖范围有限、实时性差的问题, 提出一种基于双轴扫描声呐(DAS)的实时检测系统。该系统融合双轴扫描声呐、北斗 GNSS、倾角传感器等多源数据, 通过坐标转换、姿态补偿与误差控制算法, 实现水下基床位置和高程的三维可视化实时检测。在某沿海港口工程应用中, 系统检测效率较传统方法提升 20 倍以上, 补抛准确率达 92% 以上, 工期缩短 15% 以上, 平面误差与高程误差均控制在 ± 5 cm 以内。结果表明, 该系统可实现抛填振夯全流程精细化、数字化管控, 为水运工程施工质量实时检测现存问题提供有效解决方案。

关键词: 抛填振夯; 双轴扫描声呐; 实时检测; 三维可视化

中图分类号: U6; U655 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-7874(2026)09-0022-06

doi: 10.7640/zggwjs202609004

Construction and application of real-time detection system for dumping and vibro-compaction based on dual-axis scanning sonar

Wang Chao, Xu Wenxing, Yan Ruyi, Li Qiwen, He Wen, Chen Zhaohai
(No.3 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116083, China)

Abstract: To address the problems of low efficiency, limited coverage, and poor real-time performance in quality detection during dumping and vibro-compaction construction, a real-time detection system based on dual-axis scanning sonar (DAS) is proposed. The system integrates multi-source data from DAS, BeiDou GNSS, and tilt sensors, and employs coordinate transformation, attitude compensation, and error control algorithms to realize 3D visual real-time detection of underwater foundation bed position and elevation. In a coastal port engineering application, the detection efficiency of the system is more than 20 times higher than that of traditional methods, the replenishment accuracy reaches over 92%, the construction duration is shortened by more than 15%, and both the plane and elevation errors are controlled within ± 5 cm. The results demonstrate that the system can achieve precise and digitalized control throughout the dumping and vibro-compaction process, providing an effective solution to the existing problems in real-time construction quality detection for waterway engineering.

Key words: dumping and vibro-compaction; dual-axis scanning sonar; real time detection; 3D visualization

0 引言

抛填振夯是水运工程基础施工的关键环节, 其质量直接影响结构稳定性与使用寿命。传统检测方法如水砣、单波束测深仪、高度计等, 存在效率低、覆盖范围有限、无法实时监控等问题^[1], 导致质量隐患识别滞后、返工成本增加, 严重制

约工程效益。宋江伟等^[2]研究了整平船声呐测距对检测精度的影响, 冯海暴等^[3]提出深水抛填船实时测控验收系统, 但未涉及振夯施工数字化实时检测技术应用, 目前国内抛填振夯全流程高精度实时检测技术应用尚不成熟。

声呐技术凭借非接触式测量与高分辨率成像

的优势, 逐渐成为水下工程检测的研究热点^[4]。单波束测深系统与多波束测深系统现已成为水下地形测绘的常规技术装备^[5-6], 而双轴扫描声呐因其高分辨率、大范围扫描能力, 尤其适用于抛填振夯后水下石料检测。莫中生等^[7]提出基于二维扫描声呐 MS1000 的跨海高铁水下测绘方法, 有效解决传统水下测绘技术的诸多弊端。葛文等^[8]研究双轴扫描声呐技术在污水沉井竣工测量中的应用, 验证了其精准性。但上述研究未扩展至水运工程抛填振夯施工, 抛填振夯全阶段的实时、高精度、全覆盖检测仍是行业技术空白, 尤其在位置及高程动态检测的适用性验证方面缺乏系统性研究。

针对上述问题, 创新性构建基于双轴扫描声呐的抛填振夯施工实时检测系统, 以解决抛填振夯施工中质量动态检测与验收效率难题。该系统可实时显示施工区域抛填振夯石料的位置、标高, 快速生成验收结果与分析报告, 辅助施工决策。通过对比设计标准与实测数据, 验证该技术对施工质量关键指标的管控能力, 构建水运工程实时质量检测技术体系, 初次实现了抛填振夯全阶段实时检测, 推动施工管理向精细化、数字化、智能化方向升级。

1 系统设计

结合抛填振夯施工环境复杂、实时检测难度大的特点, 研发基于双轴扫描声呐的抛填振夯实时检测系统。双轴扫描声呐是专为长期水下监测设计的剖面扫描装置, 兼具海床地形测绘与结构体状态追踪功能, 支持与 MS1000 专业软件协同

工作或独立运行^[9]; 检测数据存储于传感器探头内部, 通过有线或无线遥测技术实时传输至接收终端; 单次扫描可生成高密度 3D 剖面点云, 覆盖区域远超传统设备, 可直接获取水下目标物的 X 、 Y 、 Z 坐标数据, 支持导入点云处理软件^[10], 实现数据编辑、三维重建及质量分析。

其技术优势主要体现为强环境适应性, 可在高流速水域稳定运行, 适用于港口、航道等复杂工况; 目前在抛填振夯施工领域尚属于首次应用, 其非接触式、高精度三维探测能力可有效解决抛填振夯施工过程实时检测的技术瓶颈。

1.1 测量原理

双轴扫描声呐是一种可观测水下结构体及其周边海床的三维扫描声呐, 适用于水流流速较快水域, 频率为 330 kHz, 适用于浑浊水域, 能够生成 3D 的剖面点, 准确生成三维地面模型, 且覆盖区域大。其核心原理基于单波束测距技术, 系统发射声波脉冲, 通过计算声波从目标反射回的时间差, 精准获取目标物距离, 如式(1)所示:

$$\rho = \frac{c \Delta t}{2} \quad (1)$$

式中: ρ 为目标物距离, m; c 为标准海水条件中的声速, m/s, 取 1 500 m/s; Δt 为声波往返传播时间, s。

双轴扫描声呐自身的测量坐标系, 其顶部为 XOY 平面, 中轴为 Z 轴(向上为正方向), Y 轴正方向为声呐前进方向(初始航向角 $heading=0^\circ$, 顶部有标识), 见图 1。其中 α 为绕 Z 轴的水平转角; β 为绕 X 轴的垂直转角。

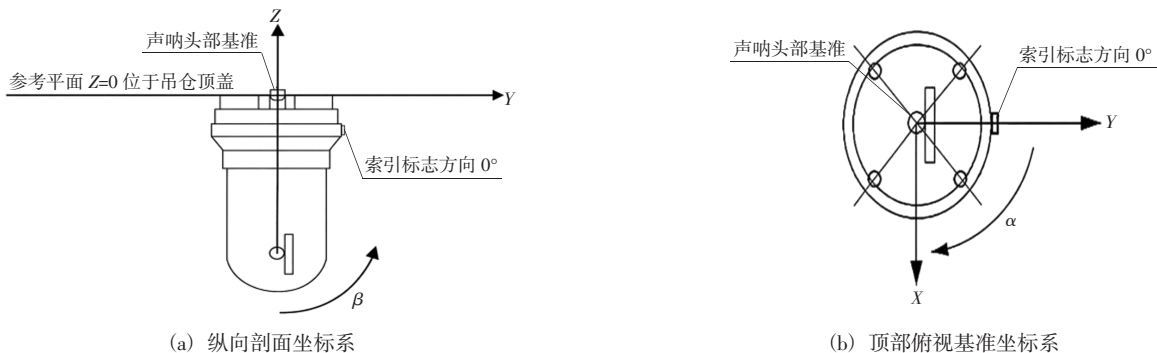


图 1 双轴扫描声呐测量坐标系

Fig. 1 DAS measurement coordinate system

1.2 硬件组成

实时检测系统硬件部署于抛填振夯船甲板, 主要由 1 台双轴扫描声呐、3 台北斗 GNSS 接收机、2 台倾角传感器、1 台激光测距仪、1 套自动

化行走装置及 1 台控制终端组成, 遵循“空间全覆盖、数据无冗余、干扰最小化”原则部署, 系统硬件平面布置见图 2。

各设备功能如下: 1) 双轴扫描声呐负责采集

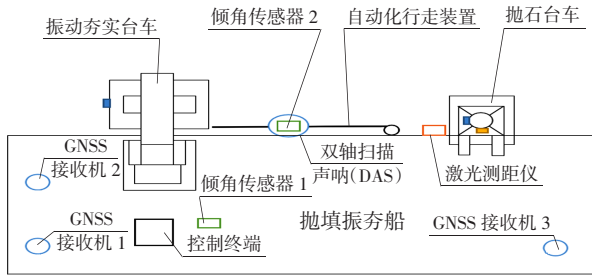


图2 系统硬件平面布置

Fig. 2 System hardware layout

水下地形三维点云数据；2) GNSS 提供船体实时位置与高程；3) 倾角传感器监测船体与双轴扫描声呐姿态；4) 激光测距仪实时测定双轴扫描声呐平面位置；5) 自动化行走装置驱动双轴扫描声呐沿轨道移动；6) 控制终端实现数据融合、处理与可视化。

1.3 关键技术

本系统依托双轴扫描声呐、GNSS 接收机、倾角传感器、激光测距仪多源传感数据融合，通过船体姿态补偿和多坐标系逐级转换，实现水下测点从双轴扫描声呐坐标系到工程施工坐标系的高精度转换。

1.3.1 双轴扫描声呐坐标系与船体坐标系转换

1) 姿态补偿

抛填振夯船作业时受风浪影响产生横摇、纵摇，倾角传感器测量船体的纵摇角 ψ 和横摇角 φ ，通过构建三维旋转矩阵对测量数据进行反向旋转修正，按先横摇后纵摇的顺序实施，假设测点 j 在双轴扫描声呐坐标系下修正前坐标为 (x, y, z) ，则修正后坐标如式(2)所示：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Y(\psi) \cdot \mathbf{R}_X(\varphi) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： (x', y', z') 为 j 点在双轴扫描声呐坐标系下修正后坐标； (x, y, z) 为 j 点在双轴扫描声呐坐标系下修正前坐标； $\mathbf{R}_X(\varphi)$ 为绕 X 轴旋转矩阵； $\mathbf{R}_Y(\psi)$ 为绕 Y 轴旋转矩阵。

其中，绕 X 轴旋转矩阵 $\mathbf{R}_X(\varphi)$ 如式(3)所示：

$$\mathbf{R}_X(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

绕 Y 轴旋转矩阵 $\mathbf{R}_Y(\psi)$ 如式(4)所示：

$$\mathbf{R}_Y(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： φ 为横摇角，($^\circ$)； ψ 为纵摇角，($^\circ$)。

2) 平移换算

船首、船尾布设 3 台 GNSS 接收机构建船体坐标系基准框架，辅以激光测距仪实测双轴扫描声呐相对船体的空间偏移量，经现场联合标定解算，得到声呐换能器旋转中心在船体坐标系下的三维坐标 (x_N, y_N, z_N) 。

双轴扫描声呐坐标系以声呐换能器旋转中心为原点，与船体坐标系转换关系如式(5)所示：

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_N \\ y_N \\ z_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： (x_j, y_j, z_j) 为 j 点在船体坐标系下的坐标； (x_N, y_N, z_N) 为双轴扫描声呐换能器旋转中心在船体坐标系下的坐标； (x', y', z') 为 j 点在双轴扫描声呐坐标系下修正后坐标。

1.3.2 船体坐标系与施工坐标系转换

测点 j 船体坐标系坐标与施工坐标系坐标转换如式(6)所示：

$$\begin{pmatrix} x_{lj} \\ y_{lj} \\ z_{lj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Delta F_{12} & -\sin \Delta F_{12} & 0 \\ \sin \Delta F_{12} & \cos \Delta F_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left(\begin{pmatrix} x_{2j} \\ y_{2j} \\ z_{2j} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{2i} \\ y_{2i} \\ z_{2i} \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} x_{1i} \\ y_{1i} \\ z_{1i} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中： (x_{lj}, y_{lj}, z_{lj}) 为 j 点在施工坐标系下的坐标； (x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}) 为公共点在施工坐标系下的坐标； (x_{2i}, y_{2i}, z_{2i}) 为公共点在船体坐标系下的坐标； ΔF_{12} 为两坐标系旋转角。

1.3.3 自动化行走装置优化

自动化行走装置的刚度不足或台车振动会导致双轴扫描声呐位置偏移及测量基准不准确，从结构增强、减震措施、实时校准 3 个方面对自动化行走装置进行优化。

1) 结构增强

采用抗拉强度 ≥ 300 MPa 的高强度铝合金轨道，行走台车框架壁厚 ≥ 8 mm，增设加强筋，行走台车额定载荷 ≤ 4.9 kN 时，最大变形量 ≤ 0.5 mm；采用导程精度 $\leq \pm 0.02$ mm/m 的滚珠丝杠传动，配备额定扭矩 ≥ 20 N·m 的伺服电机与 1:50 行星减速器，提升传动稳定性。

2) 减震措施

双轴扫描声呐与台车间安装三维减震器，减震器采用橡胶与金属复合结构，可吸收 10~100 Hz 高频振动，衰减率 $\geq 80\%$ ；安装微型加速度传感器(量程 $\pm 5g$)，振动加速度超 $0.5g$ 时自动降速，

风浪 ≥ 5 级时暂停作业。

3) 实时校准

行走装置每移动 5 m, 通过激光测距仪实时测量声呐的实际位置, 与预设位置对比, 若偏差过大, 调整行走电机转速, 修正位置偏差; 结合倾角传感器数据, 实时监测声呐因振动产生的姿态变化, 确保测量基准稳定。

1.4 系统误差评估

平面中误差来源主要包括设备测量误差、环境误差、安装标定误差, 采用误差传播定律计算系统中误差, 平面中误差如式(7)所示:

$$m_{XY} = \sqrt{m_{GNSS-XY}^2 + m_{sonar-R}^2 + m_{cal}^2 + m_{env}^2} \quad (7)$$

式中: m_{XY} 为平面中误差; $m_{GNSS-XY}$ 为 GNSS 平面定位误差; $m_{sonar-R}$ 为双轴扫描声呐平面测量误差; m_{cal} 为系统标定误差; m_{env} 为环境误差。

$m_{GNSS-XY} = \pm 20$ mm, $m_{sonar-R} = \pm 10$ mm, $m_{cal} = \pm 2$ mm, $m_{env} = \pm 3$ mm 代入式(7)得 $m_{XY} \approx \pm 23$ mm。

高程中误差来源主要包括设备测量误差、声呐倾斜改正误差、倾角传感器补偿误差, 采用误差传播定律计算系统中误差, 高程中误差见式(8)。

$$m_Z = \sqrt{m_{GNSS-Z}^2 + m_{sonar-Z}^2 + m_{tilt}^2 + m_{vib}^2} \quad (8)$$

式中: m_Z 为高程中误差; m_{GNSS-Z} 为 GNSS 高程定位误差; $m_{sonar-Z}$ 为双轴扫描声呐高程测量误差; m_{tilt} 为双轴扫描声呐倾斜改正误差; m_{vib} 为倾角传感器补偿误差。

$m_{GNSS-Z} = \pm 30$ mm, $m_{sonar-Z} = \pm 10$ mm, $m_{tilt} = \pm 11$ mm, $m_{vib} = \pm 14$ mm 代入式(8)得 $m_Z \approx \pm 37$ mm。

经计算, 平面中误差约 ± 23 mm、高程中误差约 ± 37 mm, 高程中误差更大, 主要由 GNSS 高程精度偏低、姿态倾斜改正引入附加误差导致, 与现场工况特征一致。

1.5 功能设计

系统根据工程设计要求, 核心实现抛填过程与振夯过程的水下基床位置、高程实时检测功能。

1) 抛填过程实时检测

在抛填施工过程中, 实时采集并显示抛填区域水下基床位置与高程数据, 当检测值与设计值偏差超过阈值时, 标记颜色并提示。

2) 振夯过程实时检测

在振夯施工过程中, 通过双轴扫描声呐对基床进行持续检测, 系统对采集的数据进行偏差修正后输出, 实时反映水下基床的地形地貌变化, 为振夯参数调整提供依据。

2 应用案例

抛填振夯船是用于水下抛填和振夯作业的无动力专用工程船舶, 其核心功能是将石料按设计要求抛投至水下指定区域, 并对抛投后的石料进行振夯处理, 形成稳定基础, 在港口码头、防波堤、跨海大桥等水工建筑物的基础施工中发挥关键作用。

2.1 工程概述

某沿海大型码头抛填振夯工程是区域水运基础设施建设的重点项目, 主要涉及港口码头基床的抛填与振夯施工。工程建设规模庞大, 包含多个沉箱基础及防波堤结构, 其中抛填振夯施工区域总面积达 10 000 余 m^2 , 基床设计厚度 2.0 m, 对抛填石料的位置偏差和高程精度要求极高。

为克服传统检测方法(如人工下道尺、单波束测深仪)在该复杂工况下存在检测效率低、覆盖率不足、实时性差等问题, 引入基于双轴扫描声呐的实时检测系统, 通过高精度、非接触式动态检测技术, 实现施工全过程的质量管控。

2.2 系统标定

硬件安装完成后执行严格的标定流程, 分 3 步实现数据基准统一。

1) 传感器初始值校准

将振夯台车与抛石台车置于施工初始位置, 记录倾角传感器、激光测距仪的初始参数, 确保各设备基准一致。

2) 构建船体坐标系

以船尾 2 个角点的中点为原点, 船尾至船首方向为 X 轴, 左舷至右舷方向为 Y 轴, 垂直向上为 Z 轴; 通过全站仪测量 GNSS 天线相位中心、双轴扫描声呐安装位置、参考控制点等关键点在工程坐标系中的坐标, 完成船体坐标系构建。

3) 测量数据验证

通过校核点对比系统坐标数据, 确保标定误差小于 ± 2 cm; 双轴扫描声呐扫测数据与人工下道尺测量数据的对比偏差小于 ± 5 cm, 满足试验验证的精度要求。

2.3 过程检测

该工程抛填振夯施工检测流程分为抛填、振夯与夯平 3 个阶段。

2.3.1 抛填阶段

1) 抛前扫测与方案制定

施工前采用双轴扫描声呐对基床进行全断面

扫测, 扫测间距为 2 m×2 m, 生成三维点云模型; 将扫测数据与设计标高对比, 划分欠抛区(低于设计标高 5 cm 以上)、合格区(与设计标高偏差 5 cm 以内)、超抛区(高于设计标高 5 cm 以上)。如某沉箱区域基床标高整体低于设计标高约 40 cm, 补抛方量按“区格面积×高差”计算(如 2 m×2 m 区格欠抛 40 cm, 补抛方量=1.6 m³)。

2) 抛填过程实时检测

双轴扫描声呐实时扫测抛石后的基床高程, 当某区域抛填量接近设计值时, 系统自动提示减速抛填; 若出现超抛立即触发区域标黄提示; 若出现欠抛立即触发区域标红提示。试验数据显示, 本阶段补抛准确率达 92% 以上(补抛后复测合格点数/总补抛点数), 较传统抛填方法工效提升 75% 以上。

2.3.2 振夯阶段

1) 施工参数

基于试验验证的厚层振夯技术, 设定振夯施工参数: 振动锤型号 YZ230(夯板尺寸 4.0 m×2.4 m, 重量 23 t), 激振力 150 kN/m², 转速 1 500 r/min, 单次夯击时间 90 s, 夯点间距 3.5 m×1.9 m, 搭接宽度 0.5 m, 确保夯沉率≥10%。

2) 振夯施工

每 2 s 记录夯点坐标、标高及夯击时间, 采用标高法计算夯沉率, 如式(9)所示:

$$\eta = (H_1 - H_2) / H \times 100\% \quad (9)$$

式中: η 为夯沉率, %; H_1 为振夯前夯板标高, m; H_2 为振夯后夯板标高, m; H 为振夯前基床平均厚度, m。

以①号、②号、③号沉箱为例, 基床平均厚度为 2 m, 采用标高法计算的夯沉率分别为 14.30%、14.00%、13.15%, 均满足≥10%的验收标准; 若某夯点夯沉率<10%(如某沉箱局部区域夯沉率为 9.8%), 系统自动提示“需延长夯击时间 30 s”, 补夯后夯沉率可提升至 11.5% 以上。

2.3.3 夯平阶段

1) 夯平前处理

振夯完成以后, 通过双轴扫描声呐扫测水下基床三维空间数据, 某沉箱区域扫测结果显示, 2 m×2 m 网格区平均高差的 23 cm, 满足精夯前置条件。

2) 夯平施工

采用标高控制模式, 激振力调节范围为 50~

150 kN/m², 结合夯板下降情况动态调整; 夯板降至设计标高+预留沉降量时, 系统自动控制停锤。

3) 夯后验收

夯平完成后, 双轴扫描声呐以 20 cm×20 cm 网格进行扫测, 结果显示: 2 m×2 m 区域内高程值在“高程值均值 $\mu \pm 5$ cm”范围内的占比达 85% 以上(设计标准为 80%), 满足验收要求, 具备沉箱安装条件。

2.4 应用效果

实时检测系统在某沿海码头工程中全面应用, 显著提升抛填振夯施工的作业效率与成本效益, 以单个 600 m² 沉箱基础区域为统计对象, 具体效果如下所述。

2.4.1 工效分析

1) 检测效率提升

系统单次扫描覆盖面积达 100 m² 以上, 相较于传统水砣仅覆盖线状区域(单次检测面积不足 1 m²), 检测范围大幅扩大; 在该工程中, 单个 600 m² 沉箱基础区域的检测时间由传统人工下道尺方法的 30 h 缩短至 1.5 h 以内, 实测显示检测效率提升 20 倍以上, 大幅减少检测作业对施工进度影响。

2) 施工工期缩短

系统可实时反馈检测结果并指导施工, 通过实时标识缺陷区域, 引导抛石台车与振夯设备精准补抛或补夯, 减少返工次数; 工程中因质量缺陷导致的停工时间大幅缩短, 总工期由原计划的 150 d 缩短至 127 d, 工期缩短 15% 以上。

3) 综合成本降低

通过精准控制石料抛填量, 石料超抛率大幅降低, 节约石料成本; 同时减少潜水员及质检人员配置, 规避潜水作业的安全风险, 综合成本显著降低。

2.4.2 质量分析

从整体精度来看, 系统通过多源数据融合与动态补偿算法, 实现水下抛填振夯区域三维点云数据的高精度获取; 现场对比试验显示, 与人工下道尺、单波束测深仪等传统检测方法相比, 数据偏差控制在±5 cm 以内, 满足工程对位置偏差、高程精度的要求。

1) 抛填阶段

双轴扫描声呐以固定间距扫描生成三维点云, 自动识别与设计值偏差大于 5 cm 的区域, 结合补

抛量计算指导精准补抛,有效避免传统抛填中石料分布不均的问题,补抛准确率达 92%以上。

2) 振夯阶段

系统每 2 s 采集夯点数据,确保夯沉率 $\geq 10\%$ 验收标准;对夯沉率不足区域自动提示补夯,补夯后夯沉率达 11.5%以上。

3) 夯平阶段

双轴扫描声呐扫描生成振夯区域三维地形图,振动夯实台车按标高控制进行夯平,最终夯后验收显示,高程值在“高程值均值 $\mu\pm 5$ cm”范围内占比达 85%以上,超 80%设计标准,超限点经二次补夯后最终合格率达 100%。

3 结语

本文构建的基于双轴扫描声呐的抛填振夯施工实时检测系统,整合双轴扫描声呐、北斗 GNSS 接收机等硬件设备,结合多源数据融合算法,实现施工全过程非接触式动态实时检测,为抛填振夯施工质量管控提供创新方案,主要结论如下:

1) 构建“声呐-多传感设备”协同检测体系,依托设备协同与算法支撑,突破传统检测方法效率低、覆盖有限、实时性差的瓶颈,实现抛填振夯全流程自动化管控;首次将双轴扫描声呐应用于该施工检测领域,结合其高效扫描与精准定位校正能力,构建适配复杂水域的高精度检测框架。

2) 显著提升工程效益,在沿海码头工程应用中,检测效率较传统人工下道尺提升 20 倍以上,单个沉箱检测时间大幅缩短;补抛准确率超 92%,工期较原计划缩短 15%以上,且施工精度与基床平整度均满足设计标准。

3) 推动水运施工管理数字化,通过三维可视化检测、数据追溯与智能施工辅助,推动质量管控模式从“离散抽样检测”向“三维全场连续检测”转变,提供可复制的数字化解决方案,助力水运工程施工管理向精细化、智能化升级。

在未来的工程实践中,可进一步推广该系统的应用,持续优化系统在其它复杂环境下的适应性与数据处理效率,为推动水运工程施工的数字化转型和高质量发展提供更强技术支撑。

参考文献:

[1] 刘太刚.深水抛石整平船声呐检测系统和技术应用[J].中国港

湾建设,2018,38(6):59-63.

Liu T G. Sonar detection system of deep water riprap leveling ship and its application[J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(6): 59-63.

[2] 宋江伟,张浩男.整平船声呐测距对检测精度的影响[J].中国港湾建设,2024,44(4):20-23.

Song J W, Zhang H N. Influence of sonar ranging of leveling ship on detection accuracy[J]. China Harbour Engineering, 2024, 44(4): 20-23.

[3] 冯海暴,吴一鸣,曾凡军,等.深水抛填船实时测控验收系统设计与应用[J].港工技术,2016,53(6):44-47.

Feng H B, Wu Y M, Zeng F J, et al. Design and application of real-time measuring and control system used by deepwater riprap vessels[J]. Port Engineering Technology, 2016, 53(6): 44-47.

[4] 杜召平,陈刚,王达.国外声呐技术发展综述[J].舰船科学技术,2019,41(1):145-151.

Du Z P, Chen G, Wang D. Foreign sonar technology development research summary[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(1): 145-151.

[5] 史磊.单波束测深系统与浅水多波束测深系统在水下地形测量中的对比分析[J].黑龙江水利科技,2018,46(5):32-34.

Shi L. Analysis of comparison between single sounding system and shallow multi-beam sounding system used in bathymetric surveying[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2018, 46(5): 32-34.

[6] 刘士付.水下地形测量技术分析[J].工程技术研究,2020,5(23):229-230.

Liu S F. Technical analysis of the underwater topographic survey[J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(23): 229-230.

[7] 莫中生,张云鹏,吴昊.基于二维扫描声呐 MS1000 的跨海高铁水下测绘研究[J].铁道勘察,2023,49(6):31-36.

Mo Z S, Zhang Y P, Wu H. The research of underwater surveying in high-speed railway construction based on the MS1000 scan sonar [J]. Railway Investigation and Surveying, 2023, 49(6): 31-36.

[8] 葛文,徐长虹.双轴扫描声呐技术在污水沉井测量中的应用研究[J].城市勘测,2021(1):185-189.

Ge W, Xu C H. Application of dual axis scanning sonar technology in sewage caisson survey[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2021(1): 185-189.

[9] 赵培聪.国外声呐技术研究现状与发展趋势[J].现代雷达,2016,38(8):20-24,69.

Zhao P C. Study status and development trend of foreign sonar technology[J]. Modern Radar, 2016, 38(8): 20-24, 69.

[10] 李青蒙.激光扫描点云处理技术研究[D].大连:大连海事大学,2013.

Li Q M. Research on processing technology of point cloud from laser scanning system[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013.