

# 防波堤智能巡检技术与应用

朱鹏瑞, 刘红彪, 尹纪龙, 薛润泽

(交通运输部天津水运工程科学研究所 水工构造物检测、诊断与加固技术交通行业重点实验室, 天津 300456)

**摘要:** 以中国东部沿海某防波堤为依托工程, 其建成后多次受到风暴潮破坏, 修复后仍出现继续破坏的情况, 为全面评估现状, 开展了智能巡检工作。防波堤水上可见工程利用无人机航拍技术, 水下隐蔽工程利用无人艇搭载多波束声呐测量水深, 测量获得的点云数据融合处理后建立防波堤三维可视模型, 并提取现状断面与设计对比研判防波堤破坏程度与破坏原因。该防波堤水下坡面多处受损, 坡面形态与设计断面存在一定差异, 水下扭工字块断肢、扭王字块滑落现象较多, 结合分析得出超出设计标准的自然灾害是造成该防波堤频繁破坏的主要原因。

**关键词:** 防波堤; 智能巡检; 断面对比; 破损原因

**中图分类号:** U656.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2023) 03—0089—03

结构检测及评估, 即结构故障诊断, 其目的是确定结构是否存在故障, 进而判别故障的程度和方位、结构目前的状况、使用功能以及结构故障的变化趋势等<sup>[1]</sup>。港工建筑物结构检测目前仍然以常规检测为主, 巡检方式效率较低且结果粗放, 巡检过程中存在一定的安全隐患和盲区。随着科技发展, 近年来各种先进的设备与技术如无人机、水下机器人、多波束测深系统、声呐系统等逐步应用于水运结构检测, 大大提高检测的效率与精度<sup>[2-7]</sup>。国内外学者对无人机低空摄影测量技术进行了研究, 特别是在无人机低空影像的获取方法、影像处理、三维建模等方面都展开了大量的研究。一些工程应

用了无人机低空摄影测量用于码头和防波堤的水上外观检测, 取得了良好的效果。部分港口实现了“水上无人机+水下多波束”初级智能巡检, 由于不同空间数据在数学基础、空间基准、尺度和格式方面的不一致, 检测成果割裂, 无法形成完整的水工建筑物立体信息模型, 缺乏直观性, 距离真正的智能巡检尚有不小的差距。

## 1 工程背景

某防波堤位于中国东部沿海, 是一座典型的斜坡式防波堤, 胸墙原为浆砌块石结构, 长度 2350m, 前沿水深在 5m ~ 10m 之间, 竣工于 1990 年, 其间多次遭受

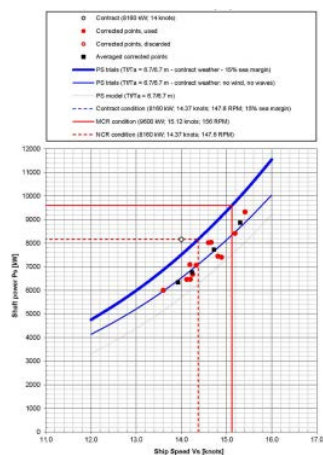


图3 功率—航速曲线

## 4 结语

基于规范要求的船速修正, 计算公式多而且非常复杂, 稍有不慎就容易出错, 借助于 STAIMO 软件, 可以得到很好的修正结果。测速功率点的设置, 要满足性能

测试和航速修正要求, 功率点设置越多, 功率—航速曲线越精确, 得到的最终结果更准确, 但功率点过多, 加大试航工作量。STAIMO 通过模拟功率曲线准确找到同功率点的速度, 大大提高了航速报告完成效率。

## 参考文献:

- [1] ISO15016:2015, 国际标准组织标准.
- [2] ITTC 7.5-01-01.2-2014, 国际拖曳水池协会公约.
- [3] 黄智强, 船舶试航航速修正方法对比分析, 广东造船 2019 年第 2 期.
- [4] GB-T3471-2011 海船系泊及航行试验规则, 国标.
- [5] 胡敏捷, 利用 M 修正法实现船舶航速修正的探讨, 广船科技 2015 年第 3 期.
- [6] 丁举, 考虑波浪影响的船速测量不确定度分析, 船舶 2007 年第 3 期.

**基金项目:** 公司科研项目 :3000TEU 集装箱船研发设计及建造关键技术研究 (编号: 2283C002)

风暴潮的袭击，每次风暴潮过后，都针对受损的防波堤进行了抢险维修加固，加固的措施主要是在海堤外坡补充抛石、增加扭工字块体与扭王字块体防护。如 2019 年台风利奇马过后，防波堤与堤头相连的 500m 胸墙、外坡及部分面层破坏，如图 1 所示。为了深入查找防波堤破坏原因，还原破坏过程，需要对该防波堤进行一次全面深入的检测与评估。



图 1 防波堤面层碎裂

## 2 防波堤三维可视化模型构建

针对防波堤各组成部分所处位置及环境特点，需选取相应的巡检手段，智能巡检必然涉及多设备多技术的协同配合。水上可见工程利用无人机航拍技术，水下隐蔽工程利用智能无人艇搭载 3DSS-iDX 三维侧扫多波束测深声呐扫描与水下机器人光学成像检测。

### 2.1 无人机航拍扫描

无人机航拍扫描是实现防波堤水上部分可视化的主要技术手段，包括激光雷达扫描模型与倾斜摄影模型两部分。将雷达点云数据复合到倾斜摄影模型上，能够增加航拍模型的属性信息，水平精度 2cm，垂直精度 5cm，在代表部位的拐角部位或护面块体布置监测特征点，实现无人机航拍测量的精确性与连续性。在低潮位时采用飞马 D2000RTK 旋翼无人机进行航拍，航线规划依据激光头扫描距离和扫描速率确定飞行速度、航带宽度和飞行高度。防波堤航拍点云见图 2。

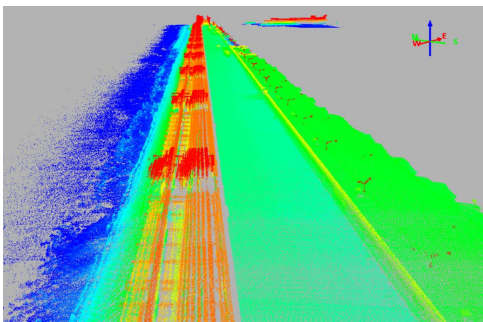


图 2 防波堤航拍点云三维模型

### 2.2 智能无人艇测水深

在高潮位时采用智能无人艇搭载 3DSS-iDX 三维侧扫多波束测深声呐进行水下地形扫描，将扫海测量数据输入 CARIS HIPS and SIPS 7.0 专业后处理软件，整理后点云模型见图 3。

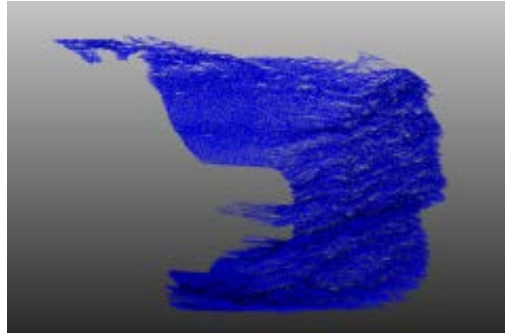


图 3 防波堤水深点云模型

### 2.3 水上与水下点云三维模型构建

作为空间三维数据的展示，点云成果的展示是一种常见的数据成果展现形式，点云数据具有曲面模型所不具有的特征展示等优势，将智能巡检获得的水上与水下构件点云数据融合处理，去除上方的管廊架等噪声点，渲染后建立防波堤的三维可视模型，从而形成一整套完整的智能巡检技术。

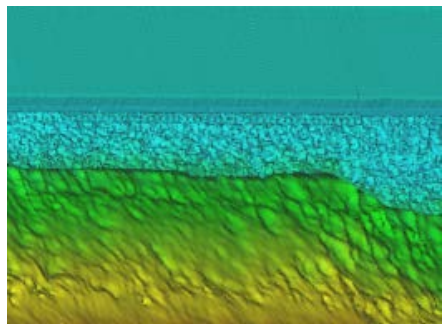


图 4 防波堤水上与水下结构点云融合渲染细节

## 3 防波堤断面变化精细化分析与验证

### 3.1 模型断面提取与对比

将无人机与无人艇协同扫描的多源数据融合起来，不仅能够实现防波堤整体面貌的三维精细模型，还能将实测状态与设计或之前状态断面对比，研判当下防波堤现状，分析防波堤破坏程度与破坏原因。

从点云复合模型中提取出现有断面轮廓线，将断面现状与修复设计断面进行对比分析。总体上现状断面轮廓与设计断面轮廓吻合度一般，内侧层面发生了明显的

沉降,外坡坡肩坡面线低于修复设计,坡脚坡面线低于修复设计,典型断面对比见图5。

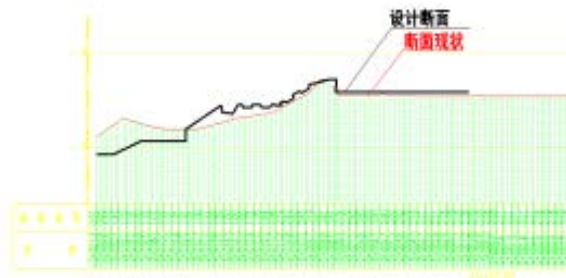


图5 断面现状与原设计断面对比

### 3.2 水下机器人光学成像

采用加拿大 Shark Marine seawolf5 水下机器人系统进行水下构件质量检查。重点分析防波堤胸墙与面层严重破损段 K0+140m~K0+320m 区段,其水下 10% 的扭王字块与扭工字块体断肢,断肢形式主要为中间连杆断肢或者端部断肢,如图6所示。



图6 K0+140m~K0+320m 扭工字块大量断肢

综合断面分析成果与水下机器人检测成果,防波堤胸墙整体破坏段对应的水下坡面形态与设计断面存在一定差异,水下扭工字块断肢、扭王字块滑落现象较多,滑落的断肢块体、块石堆积在缺口前方水下区域并覆盖在正常的护面块体上,形成突出于外坡面的鼓包,此处明显处于动态变化的不稳定状态,是安全隐患最大的区段。

### 4 防波堤破损原因简析

该防波堤面层荷载较小,波浪是其主要荷载,因此推断发生损坏的原因主要为对堤前波浪水动力特性认识不足<sup>[8]</sup>。该防波堤胸墙高度仅 1m,风暴潮发生时,大量的海浪越过堤顶,会对堤顶和面层形成较大的冲击力,胸墙坍塌,面层冲击碎裂,加速了面层下方回填料的流失,造成了面层下方的脱空现象。同时风暴潮造成护面块体振动、碰撞,甚至沿着坡面上下滚动,出现块体磨圆、断肢等情况,形成薄弱区域。该防波堤在每一次修

复时,为加强护面块体稳定性,在薄弱区域补抛了较大质量的护面块体,然后大护面块体需要更大的接触面积与更好地勾连咬合才能保持稳定,工程上“以大覆小”反而没达到预期加固的效果。

### 5 结论

(1) 防波堤智能巡检获取的点云数据是面测量方式,可对防波堤的断面变化进行精细分析。如何将航拍点云、多波束点云、声呐侧扫数据与光学成像等数据融合并集成下一个统一的智能巡检系统中,提供三维实景、多角度、全方位的展示,能够观测结构体的连续变化,将是今后的发展趋势。

(2) 该斜坡堤破损成因:超出设计标准的自然灾害是造成防波堤胸墙坍塌、面层碎裂脱空、护面块体滑落与水下扭工字块护面块体断肢的主要原因。

### 参考文献:

- [1] 田双珠,王笑难,等.港口工程已建码头的检测与评估[J].水道港口,2004,12:219-221.
- [2] 杨盼.水陆三维一体化测量系统的集成与实现[D].成都:成都理工大学,2018.
- [3] 沈清华,杨青,朱长富.测量型水下机器人在水下构筑物缺陷检测中的应用[J].水利技术监督,2021(09):9-11+56.
- [4] 孙永朝,丁咚,李广雪,等.基于多源观测技术的海堤变形监测方法研究[J].海洋科学,2021,45(3):108-121.
- [5] 林晓彬,杨志敏.多传感器信息融合的防波堤结构检测技术研究[J].人民珠江:1-10.
- [6] 胡健波,张飞.基于无人机的防波堤巡检[J].水道港口,2015,36(04):355-358.
- [7] 张秋明.利用多波束测深技术对防波堤检测的应用[J].经纬天地,2019(6):59-61.
- [8] 林朝霞,姜宁林,王君辉.中长周期波作用下防浪墙前波浪力分析[J].中国港湾建设,2020,40(5):7-10,34.

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB3207400);浙江省科技项目(2022C01004)