

# 海塘工程安全监测技术研究

洪东升<sup>1</sup> 韩攀<sup>2</sup> 高子豪<sup>1</sup>

1 台州市水利水电勘测设计有限公司, 浙江台州, 317700;

2 浙江天禹水电建设有限公司, 浙江台州, 317000;

**摘要:** 海塘工程是我国沿海地区防洪防潮、保障区域社会发展的重要基础设施。随着海塘工程运营年限的增加和自然灾害风险的加剧, 开展海塘工程安全监测研究, 建立健全安全监测技术体系, 对于提高工程安全运行水平、延长工程使用寿命、预防灾害风险具有重要意义。本文在分析海塘工程安全监测意义的基础上, 重点探讨了水闸、泵站、堤防等海塘工程的监测技术方法, 并进一步阐述了监测数据在工程运维管理中的应用, 以期提升海塘工程安全保障能力提供技术支撑。

**关键词:** 海塘工程; 安全监测; 监测技术; 运维管理; 风险防控

**DOI:** 10.69979/3060-8767.25.01.040

## 引言

海塘工程是我国沿海地区抵御风暴潮和海啸等自然灾害, 保障人民生命财产安全的重要基础设施。随着海平面上升、极端天气频发等气候变化影响的加剧, 海塘工程面临的安全风险不断加大。我国早期修建的众多海塘工程已进入高龄期, 工程老化损坏问题日益突出, 一旦发生工程事故, 极易造成巨大的人员伤亡和经济损失。加强海塘工程安全监测, 及时掌握工程的健康状况, 预判安全风险, 采取针对性的防控措施, 对于确保海塘工程安全运行、发挥防灾减灾功能至关重要。

## 1 海塘工程安全监测的意义

### 1.1 提高工程安全运行水平的重要保障

海塘工程建设投资大、涉及范围广, 其安全稳定运行关系到广大人民群众的生命财产安全和国家重大战略实施。开展海塘工程安全监测, 综合运用现代信息技术手段, 实时获取工程运行状态数据, 能够及时发现工程建筑物的变形、开裂等病险情况。客观评估工程整体安全状况, 为工程维修养护、除险加固等管理决策提供依据, 从而有效防范工程安全事故, 提高工程安全运行水平, 通过持续动态监测工程安全状况, 管理部门能够掌握工程的健康趋势, 对比分析历史数据, 准确把握工程安全的薄弱环节, 从而“对症下药”, 最大限度地消除安全隐患。

### 1.2 延长海塘工程使用寿命的有效手段

海塘工程使用年限的长短直接影响着工程效益的发挥和投资的经济回报, 而工程使用寿命很大程度上取

决于日常运行维护的水平。通过开展安全监测, 持续跟踪工程结构的应力应变、变形位移等力学性能参数, 能够及时诊断工程的健康状况, 发现工程建筑物及其附属设施老化、损坏等性能退化问题, 为管理部门制定修复方案、开展养护施工提供科学依据。从而最大限度减缓工程性能退化速率, 延长工程使用寿命, 安全监测过程中积累的海量工程性能数据, 为分析研究影响工程使用寿命的环境荷载、材料性能等因素提供了丰富的基础资料, 在大数据分析技术支持下, 可建立工程结构性能演变模型, 预测工程使用寿命。并进而指导开展针对性的预防性养护措施, 实现工程使用寿命全周期的科学管控, 达到事半功倍的养护效果, 显著提高养护资金使用效益<sup>[1]</sup>。

### 1.3 预防灾害风险的关键技术支撑

海塘工程建于海陆交界处, 受海洋动力、气象等因素的影响复杂而严峻, 灾害风险突出。海塘工程安全监测是预防灾害风险, 提高抵御自然灾害韧性的关键技术手段。通过布设气象水文、工程结构等多要素立体监测网络, 实现海塘工程周边自然环境、工程自身状况等的全过程、精细化监测, 并利用先进的数值模拟、灾害预警等技术, 建立工程灾害风险分析与预警模型。对工程可能面临的极端风暴潮、海啸等灾害风险进行超前预判和滚动预警, 并提出针对性的风险防控措施和应急处置方案, 当灾害真正来临之时, 可依托完善的工程安全监测体系, 实时掌控灾情动态, 优化应急资源调配, 最大限度减轻灾害损失, 从容应对百年一遇乃至千年一遇的极端灾害事件<sup>[2]</sup>。

## 2 海塘工程安全监测技术体系

### 2.1 水闸安全监测技术分析

水闸是海塘工程体系的核心建筑物，在调控潮位、引排洪水中发挥着关键作用，由于水闸两侧水位差异大，经常承受较大的水流冲刷力，运行工况复杂，是海塘工程安全监测的重点。水闸安全监测的核心是获取闸室结构的应力应变、变形位移等力学性能参数，传统的水闸监测主要采用人工巡检、水准测量等方法，监测效率低、数据精度不高，随着传感器技术、自动化测量技术的进步，水闸结构安全监测日益实现自动化、智能化。典型的监测技术包括：利用振弦式应变计、光纤传感器等实时测量闸墩、闸底板混凝土的应力应变状态；采用激光位移计、GPS 等对闸门启闭过程中的变形位移进行动态跟踪；基于图像识别、视频分析等技术对闸门的锈蚀、损伤情况进行智能诊断。通过布设渗压计监测闸基渗流状况，评估闸基稳定性；利用声呐、电磁等仪器检测闸门前后冲淤变化，评价水流对闸基冲刷风险，上述监测数据汇集于闸控中心，通过数据挖掘分析，及时掌握水闸结构的健康状况，预判灾害风险，优化调度运行方案，切实保障水闸安全。如某海塘水闸通过布设多参数自动化监测系统，对闸门启闭力、渗流量等关键指标实时监测预警，并结合视频监控诊断闸门锈蚀情况，为闸门除锈、更换等检修养护提供决策支持，有效提高了水闸安全运行水平<sup>[3]</sup>。

### 2.2 泵站安全监测技术研究

泵站是保障海塘工程安全运行的重要辅助设施，肩负着排涝、引水、防洪等多重使命，由于泵站机电设备繁多、系统复杂，设备故障时有发生，严重威胁着泵站乃至整个海塘工程的安全稳定运行，泵站安全监测的重点是对关键机电设备的运行工况、健康状态等进行实时监测诊断。泵体和电机是监测的核心对象，泵体监测主要采用振动、噪声、温度等传感器，实时获取泵体振动、轴承温度等状态参数，通过与标准值对比分析，及时发现泵体的磨损、不平衡等机械故障，电机监测可利用电参量传感器，实时测量电机的电压、电流、功率等指标，并采用人工智能算法，精准诊断电机的匝间短路、断条等电气故障，对于大型 or 关键泵组，可在其主轴两端安装径向位移传感器，实时测量转子碰摩量，预警可能引发的泵组事故，泵站监测还需重点关注设备能效水平，可通过测量分析设备的效率、能耗等参数，评估泵站节能改造潜力。随着海塘工程的智慧化改造，泵站运行日益实现远程集中控制。泵站安全监测还应纳入泵站自动

化系统的运行状态监测，包括控制单元的工作状态诊断、就地仪表的数据异常报警、通信信道的畅通性监测等，最大限度降低因系统故障导致的泵站“失控”风险<sup>[4]</sup>。

### 2.3 堤防安全监测技术探索

堤防是海塘工程体系的基础，其安全性直接关系到整个海塘防洪防潮能力的发挥，受海浪持续冲刷、风化侵蚀等影响，堤防极易发生变形、裂缝等病害，严重时甚至导致溃堤，后果不堪设想。必须加强堤防安全监测，及时发现险情隐患，维护堤防安全，堤防安全监测的主要内容包括：堤身的沉降、位移，堤坡的稳定性，护岸护坡的完整性等，针对堤身沉降问题，可布设高精度 GPS 自动化变形监测系统，实时获取堤顶标志点的三维位移。通过在堤顶和堤坡布设多台雷达干涉仪，可监测分析堤身的微小变形，对于堤坡失稳，可采用无人机倾斜摄影测量等获取堤坡三维形貌，并利用三维点云配准等算法分析堤坡的滑动趋势，针对护岸护坡的损毁监测，可采用视频图像识别等新技术，及时发现护岸开裂、脱落、冲刷等病害，考虑到堤防线路长、监测点位多的特点。近年来基于物联网、移动通信等技术的在线监测系统在堤防监测领域得到广泛应用，实现了堤防安全的全域感知、全时监控，数据分析方面，通过引入有限元分析、数值模拟等方法，可实现堤防安全得多情景评估和风险预警。海塘堤防还应重点监测周边环境状况，如通过潮位站网掌控海水动态，利用地质雷达探测堤基冲刷变化等，为堤防抢险、加固提供信息支撑<sup>[5]</sup>。

## 3 海塘工程安全监测数据在运维管理中的应用

### 3.1 水闸运维决策支持系统构建

海塘工程安全监测获取的海量数据蕴含了丰富的工程状态信息，是支撑工程运维管理科学决策的重要依据。水闸作为海塘工程的关键性建筑物，亟需建立基于安全监测数据的运维决策支持系统，服务于水闸检修养护、调度控制等管理工作，水闸运维决策支持系统以水闸监测数据库为基础，融合 GIS、BIM、机器学习等先进技术，实现水闸运行状态的可视化展示、健康诊断、趋势预测、辅助决策等功能。系统通过三维可视化模型直观呈现水闸结构的应力应变、位移变形等状态参数，并基于大数据分析，开展水闸结构的安全评估、剩余寿命预测，及时推送预警信息，为水闸检修养护提供智能化决策建议。针对水位调控、闸门启闭等调度控制工作，系统依托水情、工况等实时监测数据，辅以水动力、泥沙数学模型分析，优化水闸调度方案，并提供闸门启闭力、振动等工况参数的实时监测和异常报警，保障水闸

安全平稳运行。

### 3.2 泵站设备状态评估与预警方法

泵站设备的安全稳定运行是保障海塘工程防洪排涝功能正常发挥的关键,然而,受制于设备老化、环境因素等影响,泵站设备故障时有发生。亟须加强泵站设备状态评估,及时预警设备健康风险,实现预知性维修,降低设备非计划停机风险,基于泵站安全监测获取的温度、振动、电气等多源异构数据,可构建泵站设备全生命周期状态评估模型,采用小波分析、经验模态分解等信号处理方法,从监测数据中提取设备退化的特征信息。运用支持向量机、卷积神经网络等机器学习算法,实现泵体、电机等关键部件的健康状态智能诊断与剩余寿命预测;进一步引入贝叶斯网络、马尔可夫链等推理预测技术,建立泵站系统级健康评估与风险预警模型,揭示泵组运行工况演变规律,提前感知设备退化趋势,实现泵站系统故障的预警和溯源分析,评估预警结果可直接服务于泵站的状态检修策略优化,在保障设备安全可靠的同时,显著降低检修成本。泵站状态评估与预警还应关注外部环境因素的影响,通过分析泵站进出水水质、含沙量等参数与设备故障的关联性,优化水泵选型、泵站布置等设计决策,从源头上提高泵站可靠性。如某市沿江泵站群采用大数据分析技术,融合泵体振动、电机绕组温度等设备工况监测数据和长江水情数据,构建了泵站设备全寿命周期健康管理系统,实现了关键部件剩余寿命预测和泵站总体性能评估,有效指导了泵站的预防性检修,设备故障率降低15%以上。

### 3.3 堤防安全风险分析与防控策略

海塘堤防线路长、防护对象多,其安全风险具有突发性、连锁性、难控性等特点。必须依托堤防安全监测数据,开展堤防安全风险的识别、评估、预警,制定针对性的风险防控方案,筑牢海塘安全防线,首先,要加强堤防病险点识别,综合分析 InSAR、GPS 等变形监测数据,并结合无人机倾斜摄影、视频图像识别等数据,screening 堤防沉降、裂缝、冲刷等病害隐患;进而开展堤防安全评估,构建融合结构可靠度、洪水风险、防汛能力等多因素的堤防安全综合评价指标体系,形成堤防安全等级划分方案,在风险分析的基础上。要建立堤防安全风险动态预警机制,通过布设潮位站网、气象站网等,实时监测海平面、风暴潮等状况,并引入数值模拟、人工智能等技术手段,开发堤防风暴潮预警、溃堤预警等模型,及时发布灾害风险预警,为抢险救灾提供

决策支撑。还要制定突发事件应急预案,依托堤防安全监测体系,实时获取堤防灾情信息,并利用大数据分析、可视化等手段,动态呈现灾害发展态势,辅助应急指挥决策,并对灾后堤防重建、加固等工程提供设计参考。

## 4 结束语

海塘工程是保障沿海地区生命财产安全,服务海洋强国战略的重大民生工程,新时期,必须立足新发展阶段,贯彻新发展理念,加快建设海塘工程安全监测防控体系。不断提升海塘工程智慧化管理水平,要坚持问题导向,聚焦海塘工程面临的新风险、新挑战,加强水闸、泵站、堤防等重点工程的监测预警,补齐监测手段单一、数据利用不足等短板;要坚持创新驱动,加快 BIM、物联网、人工智能等新一代信息技术在海塘工程监测领域的融合应用,推动实现感知、监测、预警、处置的智能化;要坚持应用牵引,充分利用安全监测大数据赋能工程建设、运维、管理等全生命周期管理,最大限度挖掘数据价值,服务于工程决策、风险防控。还要加强部门协同和区域联动,整合行业监管、气象海洋、应急管理等多部门力量,建立“天空地一体化”的海塘工程安全监测网络。实现信息共享、联动预警、协同处置。要强化基础研究和关键技术攻关,加快建设海塘工程安全监测数据中心,为开展监测数据分析、预警模型研发等提供支撑。

## 参考文献

- [1]安哲立,王彦平,马伟斌,等.基于激光雷达的施工隧道安全监测技术研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(12):2393-2402.
- [2]童广勤,耿峻,徐化伟,等.三峡工程安全监测多业务系统集成研究与设计[J].长江科学院院报,2024,41(07):182-189.
- [3]陈梦雪,刘洪庆,许世城.LiDAR技术在钱塘江海塘工程安全监测上的应用研究[J].测绘工程,2015,24(09):44-47.
- [4]陈波.多监测技术在地下轨道交通工程中的应用研究[J].测绘通报,2024,(S02):115-121.
- [5]袁宏永,章翔,黄丽达,等.城市生命线安全工程关键技术研究进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(08):1251-1263.
- [6]王建华,王海礼,赵凡,朱娴娴,陈洲.海塘工程涉河涉堤项目安全监测方案研究[J].浙江水利水电学院学报,2022,34(04):28-31+36.