

关于钢结构渡槽安全监测的几种信息化手段应用

张菁

安徽省引江济淮工程有限责任公司 安徽 合肥 230000

摘要: 淠河总干渠钢结构渡槽是引江济淮工程的重要组成部分,其安全性关系着人民生命财产安全和经济社会有序发展,及时掌控渡槽运行的健康状态具有重大意义。通过技术手段实现“早发现-早干预”,确保重大基础设施的全周期安全与经济高效运行。为解决渡槽巡检信息化手段薄弱的实际问题,对渡槽工程的安全监测进行了研究,提出几种信息化监测手段以及智能预警平台的框架,以期为实现渡槽无人化巡检和综合预警提供技术参考。

关键词: 钢结构渡槽工程;安全监测;信息化系统;预警平台

引江济淮淠河总干渠渡槽工程是目前世界上跨度最大的通水通航钢结构渡槽,其安全运行直接关系到淠史杭干渠水资源调配、农业灌溉、合肥市城市供水及防洪安全,渡槽安全监测不可或缺。然而,传统人工巡检方式工作量大、精确度低、时效性差,通过现代新信息化监测手段的应用,实时监测结构位移、应力变化、渗漏情况等关键参数,同时借由智能预警平台,可精准评估渡槽的健康状态,及时发现潜在风险,为科学决策提供数据支撑,确保渡槽在全生命周期内安全、高效运行。

1 钢渡槽工程安全监测重要性

钢渡槽工程安全监测的重要性主要体现在以下几个方面:

1.1 保障结构安全性与稳定性。实时风险预警,通过位移、应力、变形等关键参数的持续监测,可及时发现结构异常(如裂缝、倾斜或材料疲劳),避免因隐患积累导致突发性失效事故。预防灾难性事故,钢结构渡槽长期承受水流荷载、自重及环境侵蚀,监测数据如同“健康晴雨表”,可在失稳前触发预警。典型案例显示,未及时处理的变形可能引发坍塌,威胁下游区域安全。

1.2 优化运营维护。腐蚀与疲劳是钢结构主要退化因素,定期监测结合防护措施,可显著延缓劣化进程,降低全生命周期维护成本。

1.3 支撑科学决策与技术创新。数据驱动维保策略,建立监测数据库,可分析损伤规律并制定针对性维护计划,避免盲目检修造成的资源浪费,推动工程技术进步。

2 钢渡槽工程安全监测信息化手段概述

钢渡槽工程安全监测的信息化手段主要包括以下几种:

2.1 传感器监测技术。采用应变计、位移传感器、加速度计等设备,实时监测钢结构的应力、变形、结构振动等参数,为安全评估提供数据支持。

2.2 智能预警平台。通过物联网技术将传感器数据上传至云端,结合人工智能算法分析数据趋势,实现异常状态的实时预警。

2.3 BIM技术应用。在施工和运维阶段,利用BIM模型进行虚拟建造和进度管理,辅助精度控制与焊缝质量监测。

2.4 可视化监测系统。通过三维可视化平台展示监测数据,直观呈现结构状态变化,提升决策效率。

2.5 无损检测与数据分析。优先采用无损检测方法,结合大数据分析预测结构健康趋势。

3 钢渡槽工程安全监测传感器应用

3.1 应力应变监测。监测关键截面,关键杆件长期应力变化趋势,了解杆件受力情况,并根据理论计算和变化趋势设置预警。钢渡槽结构节间短,尺寸大,节点次内力效应明显。选取监测节点板区域,受力关键部位布设振弦式应变计,实时监测钢结构应力分布。选取钢渡槽每幅边跨 $L/4$ 、墩顶、中跨 $L/2$ 截面等10个截面,共布设48个测点进行在线实时监测,实时分析并预警,预防钢结构疲劳损伤引发的结构风险。

3.2 变形与位移监测。拉线式位移传感器,通过测量钢索伸缩引发的传感器信号变化计算位移量。传感器内部集成增量/绝对值编码器,将机械位移转换为电信号输出。该信号经放大处理后,由控制系统根据公式计算实际位移量,分辨率可达 0.01mm ,可实时反馈槽身位移数据并支持自动化控制。在每道伸缩缝、支座布置测点,可有效反馈槽体毫米级形变,适用于温度、荷载耦合作用下的形变分析。主梁的挠度是评定梁体弯曲度的主要依据,可通过监测主梁的挠度值的变化情况为评定桥面的平顺度提供重要的依据。为观测使用过程中的梁体跨中挠度及整体线型,按照最不利位置布点原则并综合考虑仪器安装和后期维护的便利性,于墩顶、边跨跨中、

主跨跨中、主跨L/4截面和主跨3L/4截面，每个界面布设2个侧点的原则，共布置26个静力水准仪对钢渡槽沉降及主梁挠度进行监测。为监测渡槽伸缩缝和止水带处渗漏水情况，共布置4个测点进行监测。

3.3 环境参数监测。温度传感器，PT100铂电阻监测环境温湿度，通过恒流恒压法或UTL芯片计算阻值变化，修正温度对应变数据的干扰。安装需避开热源直射，保护管与构件间填充绝热材料，减少测量误差。雷达液位计，布设在伸缩缝、止水带处，监测渗漏水情况。超声风速风向仪，布设在桥头、跨中位置，实时采集风荷载数据，为振动分析提供输入参数。通过对渡槽水位、水流速度以及结构响应的监测，建立水位、流速与结构响应的准确模型，以分析结构受力情况并进行结构安全预警，水位及流速监测共布置4个测点进行监测。每幅边跨和中跨跨中各布置1台多普勒流速流量剖面仪，实时测量钢渡槽内水位及流速。为监测通航船只及周围环境信息，视频监控共布置10个测点进行监测，在特定时间段内对航道及渡槽周边的视频画面进行截图统计。

3.4 专项监测。腐蚀监测传感器，电阻探针测量悬索钢丝腐蚀速率，结合涂层监测仪评估防护层失效状态。适用于水下钢构件，预警氯离子侵蚀导致的钢筋锈胀风险，边跨、墩顶及中跨跨中每处布置2个测点，有效监测钢结构腐蚀情况。焊接式电阻应变计，边跨、墩顶及中跨跨中每处布置2个测点，通过电阻变化量检测钢结构构件的应变。通过监测钢结构应力，反映出渡槽疲劳特性，预测疲劳寿命。振动加速度传感器，捕捉槽身振动频谱（< 100Hz），识别水流脉动或机械振动引发的异常响应。传感器需集成物联网平台实现数据联动，如渗压异常自动触发应力复核；安装时需规避强磁场、焊接热影响区，并定期校准维持精度。

4 钢渡槽工程安全监测数据分析与预警

钢渡槽工程安全监测的数据分析与预警技术体系主要包括以下核心环节：

4.1 多源异构数据处理。数据清洗与融合，采用奇异谱分析（SSA）算法分解监测序列，分离出水压、温度、时效等趋势分量与周期分量，结合动态时间弯曲（DTW）距离算法识别结构异常变形趋势。通过方差贡献率数据融合算法整合静态与动态监测数据，提升损伤识别的全面性与准确性。环境干扰修正，利用温度传感器实时采集环境温湿度数据，结合恒流恒压法计算阻值变化，消除温度对应变监测数据的干扰。

4.2 智能分析与预测模型。组合预测模型，采用改进布谷鸟算法优化的核极限学习机（KELM）预测趋势分量

与周期分量，结合长短期记忆（LSTM）网络处理序列余量，实现多因素耦合作用下的高精度预测。基于BIM技术、数字孪生技术构建施工过程动态模型，模拟吊装、焊接等复杂工况下的结构响应，预判潜在风险。损伤诊断与定位，应用环境激励下的质量归一化模态参数识别技术，通过振动频谱分析（< 100Hz）捕捉结构动力特性变化，定位螺栓松动、焊缝开裂等损伤位置，实现24小时应力损失监测与疲劳损伤预警。

4.3 分级预警与闭环管控。三级预警机制，参照尾矿库标准建立“黄-橙-红”三级预警：单点异常触发黄色预警，同类3点异常升级为橙色预警，跨类别2项橙色预警触发红色预警。预警信息通过移动端APP分级推送至管理人员，联动视频监控系统自动调取现场画面辅助决策。智能处置闭环，建立“监测→分析→处置→反馈”流程：AI识别裂缝扩展或位移超限（如位移传感器检测精度0.05mm）后，自动生成维修工单并跟踪闭环。对高风险作业（如动火维修）强制关联气体检测数据及审批流程，实现全过程数字化留痕。

5 钢渡槽工程安全监测其他信息化手段

5.1 智能化分析与预警技术。多源数据融合分析，采用奇异谱分析（SSA）分离水压、温度、时效等趋势分量，结合动态时间弯曲（DTW）算法识别异常变形模式，提升损伤诊断精度。通过方差贡献率融合算法整合静态监测与动态振动数据（如加速度传感器频谱 < 100Hz），实现结构损伤综合定位。AI预测与数字孪生，基于改进布谷鸟算法优化核极限学习机（KELM），结合LSTM网络预测结构响应趋势，误差率 < 5%。构建施工过程数字孪生模型，模拟吊装、焊接等复杂工况下的结构行为，预判潜在风险。智能分级预警机制，建立“黄-橙-红”三级预警：单点异常触发黄色预警，同类3点异常升橙色，跨类别2项橙色升红色。预警信息通过移动端APP分级推送，联动视频监控自动调取现场画面辅助决策。

5.2 可视化与集成管理平台。BIM+GIS三维可视化，集成BIM模型与GIS地理信息，构建“安全管理一张图”，实时展示应力、变形、渗流等监测数据空间分布。支持历史预警回溯与维修工单跟踪、智能巡检与远程监控，结合AI图像识别检测焊缝开裂、涂层脱落等表观缺陷。5G边缘计算网关实现GNSS位移数据（精度±1mm）本地化处理，降低云端负载。

5.3 自动化运维与决策支持。闭环处置流程，建立“监测→分析→处置→反馈”智能闭环：AI识别位移超限后自动生成维修工单，并强制关联气体检测等高危作业审批。智能施工安全管控，人员定位系统与高处作业

门禁联动,实时监控渡槽高空作业人员行为,识别未系安全绳等违规操作。基于物联网平台整合环境监测站数据(温湿度、风速),动态调整施工方案。

6 钢渡槽工程安全监测预警平台构想

为满足渡槽养护管理的需求,利用当今科技手段(结构分析、传感测试、通信、计算机及网络技术),建立集环境监测、结构监测、数据分析处理、报警与评估、电子化巡检为一体的钢渡槽安全监测预警平台。全面、实时地掌握渡槽在运营过程中的健康状况,有效指导渡槽的养护工作;建立有效安全报警机制,在结构出现异常情况或突发事件时及时报警;定期或突发事件后对渡槽的结构状态作出评估,掌握渡槽工作状态的变化规律,为渡槽养护管理单位提供技术依据。并达到技术先进、操作简便、运行可靠的总体目标。

安全监测预警平台主要功能包括数据采集、设备信息、数据展示、统计报表、文档管理、系统管理6大模块。数据采集模块通过制定长期监测等数据接口规范和传输协议,实现前端监测数据至监测系统的数据汇聚。设备信息模块提供传感设备分布、设备运行状态、设备参数等功能,结合地理信息系统,展示监测工点传感设备的布设情况和实时运行状态信息。统计报表是基于多种监测数据的积累,在时间维度、空间维度等统计分析方法,为用户提供趋势分析、病害预测、周期性报告等功能,更好的指导渡槽养护维修。文档管理指系统整合的资料包括勘察设计资料、科研资料等,用于对监测工点结构状态的研究分析和决策支持。系统管理是对用户角色、访问操作权限、组织结构等系统基础信息进行配置和管理,依据用户归属于哪个部门、部门下辖哪些监测项目进行访问权限控制,防止越界操作。此外,系统

管理模块提供系统运行日志,供系统管理员追溯、排查系统运行历史信息。数据展示模块,即安全监测一张图,是指渡槽结构监测内容基于BIM模型的综合展示、预警(报)警的统计及处理、各项指标的趋势分析、基于BIM模型关联信息的查询统计等。点击不同的传感器,能够显示默认近期一个月的数据。同时能够显示今日报警、过船记录、风速、风向、温度、湿度,并显示近期每天预警记录趋势图。

综上所述,这些技术手段共同构成钢渡槽全生命周期信息化监测体系,显著提升工程安全性和管理效率。融合BIM+GIS构建“安全管理一张图”,支持多源数据三维可视化展示及历史预警回溯,为全生命周期运维提供决策支撑。融合AI大模型实现自然语言生成安全报告,结合区块链技术确保监测数据不可篡改,推动钢渡槽监测向“无人值守、智能决策”升级。通过数据驱动与智能联动,显著提升了钢渡槽全生命周期风险管控能力,为重大调水工程安全运行提供技术保障。

参考文献

- [1]李鸽.罗家河坝渡槽结构工程安全监测方案应用[J].水利科技与经济,2020,26(8):63-66.
- [2]刘云.大型预应力梁式渡槽应力变形监测与仿真分析[J].人民黄河,2020,42(1):126-130.
- [3]叶春.大坝安全监测信息化管理及应用[J].电子测量技术,2022,41(9):75-79.
- [4]邢介东,张玉生.大跨钢桁梁桥健康监测及运营期可靠性评估系统设计[J].铁道勘察.2025
- [5]赵汗青,简方梁,淡丹辉,赵一鸣.大跨连续钢桁梁桥健康监测系统设计及应用[J].世界桥梁,2024年第52卷第6期