

# Research on countermeasures to improve the safety monitoring system of hydraulic and hydroelectric metal structures

Hudong Chen

China Yangtze Power Company Limited, Beijing, 100000, China

## Abstract

Hydropower Construction Projects are crucial parts of the nation's economy. Exposed at the metal structure of its environment is highly corrosive under conditions including hydraulic action and fatigue, thereby generating various hazards that affect personnel's work or life. At present, there are currently some shortcomings in China's safety monitoring System of hydropower plants' metal structures, which fail to meet the demands of safe operation under complicated conditions. According to this, this article will explore and analyse a safety-monitoring System of hydraulic-and-hydro-electric-metal-structures; Finally, it will put forward some improvements. The purpose of this paper is to steadily improve the Safety level of China's hydraulic and hydroelectric Metal Structures, Provide fundamental scientific basis for ensuring their Safe Operation.

## Keywords

Water conservancy and hydropower; Metal structure; Safety monitoring; Improvement measures

# 水利水电金属结构安全监测体系的完善对策研究

陈虎东

中国长江电力股份有限公司, 中国 · 北京 100000

## 摘要

水利水电工程属于国家基础设施的重要组成, 其金属结构长久处于水力冲击、腐蚀、疲劳等诸多环境当中, 安全风险随着时间推移会越来越大。目前我国水利水电金属结构安全监测体系存在着一定的技术滞后性, 不能满足复杂工程环境下的安全保障需求。因此, 本文将从水利水电金属结构安全监测体系入手进行研究分析, 并针对其提出相应的改进措施, 以期逐步提高我国水利水电金属结构的安全性, 为水利水电工程的安全运行提供必要的科学依据。

## 关键词

水利水电; 金属结构; 安全监测; 完善对策

## 1 引言

近些年来, 由于极端气候频繁出现、工程老化加快等原因, 造成水利水电金属结构失效的危险越来越大。传统水利水电金属结构安全监测大多依靠人工巡检, 存在着数据分散、预警迟缓等不足, 不能适应智慧水利的发展需要。因此, 创建起覆盖全周期、全场景的水利水电金属结构安全监测体系, 就成了保证工程安全、改善运行效率的重要途径。

## 2 水利水电金属结构安全监测现存问题分析

### 2.1 技术层面

对水利水电金属结构安全监测来说, 在技术上传感器技术的不足就是制约监测体系的主要问题<sup>[1]</sup>。传统应变片和振动传感器设备受到水流冲击、电磁噪声等环境干扰, 会使

测量数据出现离散性增大、精度降低的情况, 不能很好地反映结构真实的盈利分布状况。目前大多数监测系统采用周期性采样的方式, 采样频率一般小于 10Hz, 不能很好地捕捉到瞬间出现的动态荷载, 降低了早期预警损伤的效果。由于有线传输架构以及本地存储方式, 导致数据传输延迟一般在秒级, 实时性不足又会使得工况即时诊断、响应变得迟缓, 进而加大突发性结构风险故障发生的概率。

### 2.2 数据层面

水利水电金属结构中数据监测分布在应力监测、位移监测、环境监测等异构子系统上, 但是由于缺少统一的数据接口标准, 造成数据孤岛现象越来越严重。应力监测数据一般存放在 SCADA 系统里, 水温、流速这些环境参数被水文部门单独管理, 二者之间跨系统的数据融合大多依靠人工导出和导入来实现, 造成数据处理效率不高, 并且容易产生数据一致性偏差等问题。而从数据分析方面来说, 目前大多数监测单位都使用阈值比较法或者基础统计模型来进行状态评价, 并没有有效地把机器学习、深度学习等职能算法运用

【作者简介】陈虎东 (1986—), 男, 工程师, 中国湖北松滋人, 硕士, 从事水工金结研究。

到分析当中来提高分析精度,造成预测寿命与实际工况出现偏差,不能满足工程安全精细化决策的要求。

### 2.3 管理层面

由于水利水电金属结构安全的预警机制大多采用静态阈值设定,没有很好地把结构服役年限、环境腐蚀速率等动态演化参数纳入考虑范围。以运行20年老旧闸门和新建闸门均用统一应力阈值为例,容易忽略材料疲劳的累积效应时变特性,从而造成预警系统漏报、误报等问题<sup>[2]</sup>。就维护决策而言,大部分单位仍旧沿用着“定期检修加事后维修”的传统方式,其检修周期大多依照规范推荐值而不是按照结构实际健康状况来决定,这就引发了维护资源被过度消耗或者缺乏的现象。

## 3 完善水利水电金属结构安全监测体系的核心对策

### 3.1 构建智能化监测网络

#### 3.1.1 传感器技术升级

由于受温度漂移、电磁干扰等因素的影响,水利水电金属结构电阻应变片的应力测量误差不可避免,振动传感器的采样频率一般小于10Hz,不能很好地捕捉到闸门启闭过程中的瞬态冲击信号。因此,在完善水利水电金属结构安全监测系统的时候,需要推进新型传感器系统的部署,对于光纤传感器应该采用光信号传输方式,可以对压力钢管应变分布进行长时间稳定的监测。MEMS传感器是利用微机电系统集成技术将闸门振动、位移的实时采集功能集成在传感器上,动态响应频率可以达到1KHz,可以对微米级性的变化特征进行准确识别。对于偏远地区布线困难问题的解决,可以先采用无线传输技术和自供电方案,使用太阳能和超级电容相结合的供电方式,保证传感器在没有外部电源的情况下也可以正常工作。另外,使用自组织网络可以实现多节点数据中继,有效地抑制了远距离传输过程中信号衰减的问题,经过技术升级之后,可以将监测数据的采集频率提高到100Hz以上,满足精度指标的要求,为建立水利水电金属结构健康评价和风险预警提供高可信度的数据基础。

#### 3.1.2 物联网与边缘计算融合

目前水利水电金属结构监测系统大多采用人工巡检加本地存储的方式,数据上传时间一般要达到几分钟以上,不能满足突发风险的即时预警要求。采用系统的部署方式对物联网技术进行应用,可以实现传感器、执行器以及控制终端之间的相互连接,从而形成一个包含闸门、启闭机和压力钢管等各个部分在内的全要素监测网络<sup>[3]</sup>。在闸门处设置物联网网关,使用5G或者4G通信模块和边缘计算单元,可以对应力、位移、振动等数据进行实时采集和加密传输,上传周期缩短到1秒以内。边缘计算机制的主要价值就是实现本地化的智能处理,在网关端部署轻量级的AI模型,对原始数据进行清洗、特征提取和异常检测等操作。云端平台侧重

全局分析和决策支持,把建筑信息模型同数字孪生技术结合起来,动态模拟结构健康状况并给出准确的维护建议。该端、边、云协同架构之下,云端计算负荷下降,系统反应加快,极大加强了实时监测和智能防控的能力。

### 3.2 打造全要素分析平台

#### 3.2.1 多源数据整合

水利水电金属结构安全监测包含结构本体、环境、运行三个方面的数据体系,主要监测的有应力、应变、振动、位移等结构参数,水温、流速、水位和腐蚀性离子浓度等环境参数,闸门启闭次数、荷载工况、操作时长等运行参数。目前监测系统中,以上述数据分散存储在SCADA、水文监测和设备管理系统等异构子系统中,由于数据格式异构性和更新频率不同,造成多源数据不能进行有效的融合分析。为打破这个瓶颈,急需创建起统一的数据中台架构,可以采取“数据湖+微服务”的技术路线。采用ETL工具对多源异构数据进行标准化抽取、转换并存入分布式数据湖中,对结构化以及非结构化的数据都可存储起来,用微服务架构创建统一的标准数据接口来实现各个系统之间的数据及时获取与动态更新。

#### 3.2.2 智能分析算法

在水利水电金属结构安全监测中,传统的预警机制主要使用静态阈值比较法,预警阈值没有考虑结构服役状态变化的因素,从而造成漏报或者误报的风险增大。水电站压力钢管的设计应力阈值定为200MPa,但是没有考虑到材料疲劳累积效应,运行10年后,相同应力水平下的断裂风险提高3倍,而固定的阈值不能实现自适应调整,造成预警失效<sup>[4]</sup>。智能分析算法可以很好地解决上述瓶颈问题,智能分析算法中的时序监测数据的长期依赖特征使用LSTM神经网络结构寿命预测模型来挖掘,然后结合应力寿命曲线得到剩余使用寿命的准确预测。其次,用DBSCAN或者K-means聚类算法对历史工况数据进行模式识别,动态地把正常操作区间和异常工况区分开来。例如对闸门启闭过程中产生的振动时序数据进行聚类分析,得到高频振动工况属于“异常冲击”模式,根据该结果把应力预警阈值从原来的150MPa提高到180MPa,提高了预警的灵敏度。除此之外,算法同数字孪生技术深入融合,在虚拟空间当中模拟出各种阈值设定之后的风险传播途径和结构反应,从而给预警策略改良赋予量化的参照,促使监测体系由“被动应对”转向“主动防范”,大大加强了对风险预估的精确程度和速度。

### 3.3 完善全生命周期管理

#### 3.3.1 分级预警与动态响应

传统的水利水电金属结构安全监测预警系统大多只使用单一的阈值来设定,没有形成风险分级和动态响应的能力,小规模故障不能得到及时的干预,从而演变成重大的事故,或者因为误报而造成维护资源的浪费。因此可以创建分级预警系统,用风险矩阵法对故障严重程度及发生概率进

行综合评价,将预警等级划分为蓝色、黄色、橙色、红色四种。蓝色预警引起日常巡检频率的动态增加,黄色预警执行专项检测,橙色预警实行立即停止运行并上报上级主管的要求,红色预警会启动应急预案,开展人员疏散和设备电源切断的工作。同时还要开发出动态响应引擎,依靠规则引擎和AI模型的配合来按照实时监测的数据自动调节响应策略。

### 3.3.2 全生命周期健康管理

水利水电金属结构的全生命周期管理是贯穿于设计、施工、运行到报废的几十年时间,传统的管理模式主要依靠纸质档案和各种分散的系统,造成历史监测数据丢失、状态变化记录断开的现象十分严重,从而大大限制了精准维护决策的实现<sup>[5]</sup>。全生命周期健康管理迫切需要创建起覆盖设计、施工、运行、退役全过程的集成化数据库体系,把建筑信息模型当作主要载体,把结构几何参数,材料性能,施工工艺记录,实时监测数据等各类信息全面地纳入进来。设计阶段把闸门应力计算模型和疲劳寿命曲线嵌入到BIM模型中。施工阶段用物联网传感器实时采集焊接温度、结构变形等重要参数并进行自动更新,运行阶段把应力、振动和腐蚀检测数据纳入进来,及时修正结构健康状况评价参数。退役阶段用BIM模型对结构的剩余价值进行量化评价,指导拆解工

艺的改进和材料再利用方案的制定,给精准维修决策赋予了诸多方面的数据支撑,进而大幅加强工程的安全可靠程度和经济性。

目前,数字孪生、边缘计算等技术得到广泛应用,水利水电金属结构安全由原来的被动应对转变为现在的主动预防,依靠技术驱动的创新、数据融合的基本、机制优化的保障,逐步加大智能化监测设备的研发和部署力度,构建起技术、管理、人才三位一体的安全监测新生态,为水利水电工程的高质量发展筑牢根基。

### 参考文献

- [1] 吴育松.水利水电工程金属结构安装施工质量控制对策探析[J].现代工程科技,2025,4(24):189-192.
- [2] 刘明杰,苗圃,刘伯宇,等.龚庄子进水闸金属结构安全检测及评估[J].科技资讯,2023,21(08):134-137.
- [3] 马洪雁.谭尧水库金属结构安全评价分析[J].低碳世界,2022,12(10):88-90.
- [4] 赵伟明,谭军,申志高,等.水府庙水库弧形闸门金属结构安全性态分析[J].水利水电快报,2022,43(08):70-74+84.
- [5] 柴江飞,张洪涛,王俊鹏,等.前柳林泄洪闸安全评价[J].水利科学与寒区工程,2021,4(04):160-163.