



犍为航电枢纽泄水工作闸门实时在线监测

招 滨, 叶 梅

(中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司, 广西南宁 530007)

摘要: 针对水工钢闸门在水利工程中的特殊重要性, 分析传统检测和原型观测的局限性, 提出实时在线监测的必要性。以岷江犍为航电枢纽泄水工作闸实时在线监测系统为例, 设计在线监测系统整体结构和线缆收放, 给出平面定轮闸门结构应力、结构动力响应、运行姿态、定轮运行状态的监测方案与传感器选型方案。

关键词: 平面定轮闸门; 实时在线监测; 应力监测; 振动响应; 犍为航电枢纽

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)12-0104-04

Real-timeonline monitoring for water release gate of the Qianwei navigation-power junction

ZHAO Bin, YE Mei

(China Energy Engineering Group Guangxi Electric Power Design Institute Co., Ltd., Nanning 530007, China)

Abstract: In view of the special importance of hydraulic steel gates in hydraulic engineerings, the limitations of traditional detection and prototype observation are analyzed, and the necessity of real-time online monitoring is proposed. Taking Minjiang Qianwei navigation-power junction real-time online monitoring as an example, the overall structure of on-line monitoring system and the cable collection and release are designed, and the monitoring and sensor selection plan of the plane fixed-wheel gate are given. The system monitors structure stress, structural dynamic response, running attitude, and fixed-wheel running state.

Keywords: plane fixed wheel gate; real-time online monitoring; stress monitoring; vibration response; Qianwei navigation-power junction

水工金属结构设备是水利枢纽工程的重要组成部分, 承担着引水发电、泄洪灌溉、通航等重要功能, 包括闸门、启闭机、机组蜗壳、引水压力钢管、钢岔管等。闸门作为水工建筑物过水孔口的重要组成部分之一, 按照水利水电工程的需要, 能够局部或全部开启这些孔口, 调节上下游水位与流量, 因此其结构与设备的安全可靠运行是整个水利枢纽安全运行管理中的重要环节。近年来, 因闸门运行故障而引发的水利枢纽工程严重事故依然占比很高。事实上, 在安全事故发生之前都存在事故征兆, 例如闸门的结构应力发生变化、结构变形较大、结构振动强烈等, 因此对

闸门实施实时在线监测可以在事故发生前发现征兆, 提前预警和报警, 避免事故发生或者给工作人员留出足够的处理时间, 将事故危害最小化。

本文以岷江犍为航电枢纽泄水工作闸的实时在线监测系统为例, 阐述在线监测的必要性、系统构成、监测内容与方法。

1 工程概述

岷江犍为航电枢纽位于四川省岷江干流下游河段乐山市犍为县境内, 是岷江下游河段(乐山—宜宾)航电规划的第 3 个梯级。坝址位于乐山市犍为县城上游约 3 km 处, 其下游约 1.4 km 处为犍

收稿日期: 2021-05-28

作者简介: 招滨(1972—), 男, 正高级工程师, 从事水电、水利工程金属结构设计及咨询。

为岷江大桥。

岷江犍为航电枢纽工程等级为二等，工程规模为Ⅱ型，通航建筑物按 1 000 吨级的Ⅲ级船闸设计。工程开发任务以航运为主，结合发电，兼顾供水、灌溉、旅游等综合利用，促进地方经济社会发展。

枢纽工程永久水工建筑物包含泄水闸、泄洪冲砂闸、泄水闸消力池、下游消能防冲建筑物、船闸上下闸首和闸室、发电厂房(包括安装间)、鱼道挡洪闸、混凝土接头重力坝等。正常蓄水位 335.0 m，相应库容 1.482 7 亿 m³，死水位为 334.0 m，调节库容为 1 575 万 m³，水库总库容为 2.27 亿 m³。电站装 9 台贯流式机组，单机容量 55.6 MW，总装机容量为 500 MW，保证出力(95%)137.26 MW，多年平均发电量 21.816 5 亿 kW·h，装机年利用时间 4 360 h。枢纽设有 28 扇泄水工作闸门和 28 孔工作闸闸门槽，门型为露顶式平面定轮钢闸门，启闭设备选用 2×2 500 kN 固定卷扬式启闭机，共 28 台。

2 传统检测与实时在线监测

2.1 原型观测与传统检测的局限性

水工金属结构的研究主要分为原型观测试验、数值分析、物理模型试验等。由于水工金属结构的复杂性以及数值分析和物理模型试验的诸多困难，原型观测试验成为了闸门研究最直接的手段。

关于闸门的检测一般为原型观测试验和传统检测^[1]。原型观测试验是指在工程现场对闸门及相关影响因素进行观察、监测和分析，从而来验证闸门设计条件，及时发现和消除闸门运行的安全隐患。传统检测是指通过人工目测、定期巡逻、定期检测等检测闸门的安全运行状况。这种检测模式只能在设计运行状态下对设备进行检测，且检测出的结果也只是闸门在被检测时的运行状态与安全状态，无法全天候了解闸门的安全运行状态，也无法做到出现突发状况时提前预警、报警。

2.2 实时在线监测的必要性

据统计，在水电站和病险水库大坝的不安全问题中，水工金属结构问题占比为 40%，在病险

水闸中这个占比更是达到了 76.7%^[2]。纵观水工钢闸门的整个生命周期，众多因素都影响着它的安全运行，归纳来说主要有结构应力、门槽水利参数、运行环境、动力响应等。针对以上这些影响闸门安全运行的关键因素，如果没有合适的设备来实时监测和数据分析、提前发现事故发生的征兆，会严重影响水利水电工程的运行安全。

文献[3]统计了 1958—1989 年间发生在国内的 43 起平面闸门事故，在对事故的描述与原因分析中可以看出：安全事故发生前都存在应力变化、结构强烈振动、结构变形较大等前兆，由于缺少适合的设备实时监测这些关键参数的变化，导致事故的发生并造成严重后果。随着传感器、大数据技术的不断发展，现在已经具备对水工钢闸门实施实时在线监测的条件。它不仅解决了传统检测工作量大、效率低、风险大的问题，同时也能实现对灾害趋势的预知，做到提前预警、报警。因此对闸门实施实时在线监测是非常必要的，通过在闸门上布置传感器实时监测闸门运行状态，确保闸门的运行安全。

3 在线监测系统总体设计

3.1 监测系统的构成

监测系统由传感器、工作站、数据采集箱、电缆收放装置组成，见图 1。传感器根据功能的不同分为应力传感器、倾角传感器、加速度传感器、接近开关。传感器将采集到的信息按照一定规律转换为电信号，经过信号传输电缆传输至工作站进行数据处理分析，从而得出各种关键参数的变化情况。

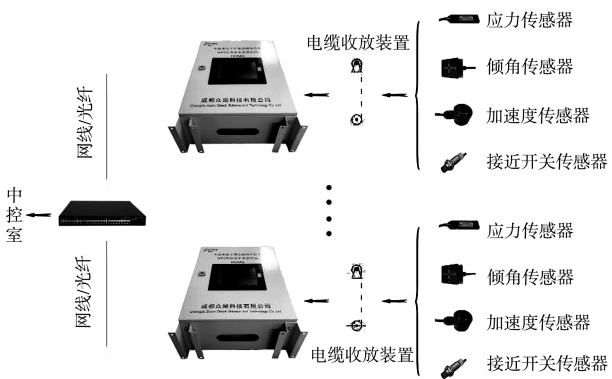


图 1 在线监测系统构成

3.2 监测系统线缆收放设计

泄水闸门体内线缆采用传感器的引出线，由门体引出至数据采集箱的线缆采用多芯的信号电缆，多芯线缆与传感器引出线通过设置在门体内的连线箱连接。传感器引线接头采用防水型航空插头，线缆连接后，连线箱用密封材料密闭，满足水压 1 MPa 的密封性能。

泄水闸监测数据的线缆收放采用变频自控电机式电缆卷筒，门体引出线缆经收放装置后引至数据采集箱。

4 监测内容与方法

4.1 在线监测

1) 流激振动监测。流激振动是指浸没于流体的结构部件的表面被流体流动产生的交替变化激振力所诱发的结构振动，当过闸水流平均流速增大，速度、加速度、位移也随之增大，闸门受到水流载荷更大，闸门容易破坏^[4]。对闸门特征部位安装加速度传感器，采集特征部位的振动加速度、位移、频率，当振动位移超标或振动频率接近闸门固有频率时能够预警、报警。

2) 应力监测。闸门运行过程中，闸门主梁、边梁、吊耳等是闸门破坏的主要部位，对这些关键部位布置应力传感器，并根据实际测出的工作应力解析出动、静应力，在静应力或动应力超标时能够预警、报警。

3) 运行姿态监测。监测闸门中心线在启闭过程中的运行轨迹，计算出门体与侧轨间距，对闸门启闭高度、门体偏移量的实时工况进行监测预警，便于工作人员随时做出调整。

4) 定轮运行状态监测。监测定轮的运行状态，及时发现定轮不旋转问题，同时预警、报警，避免事故发生。

4.2 评价标准

4.2.1 振动位移法

依据 Q/MA61UHLTX.002—2017《水工金属结构实时在线监测评价准则》采纳的美国阿肯色河通

航枢纽管理局“振动构件平均位移划分振动危害的判别标准”，采取中等危害平均位移为 0.25 ~ 0.50 mm、严重危害平均位移 >0.5 mm 的指标作为 ROMS 系统的预警、报警阈值。

4.2.2 激励频法

通过智能激振装置的激励扫频测试，得到闸门的谐振频率(固有频率)，并确定了闸门实际启闭工况下的振动频率预警、报警阈值，闸门启闭过程中，在实际水位条件下产生的流激振动实测频率，计算分析从而得到闸门时域数据，采取对比方法判断闸门运行的稳定性和闸门运行的安全裕度。

4.2.3 公式分析法

参照 Q/MA61UHLTX.002—2017《水工金属结构实时在线监测评价准则》采纳的经验公式判断闸门安全性和结构的动态特性：

$$\lg A < 3.14 - 1.16 \lg f \tag{1}$$

式中：A 为振动幅值(m)；f 为振动频率(Hz)。根据泄洪过程中的监测数据，得到 A-f 曲线，判断闸门振动响应的振幅、频率是否满足公式要求，当不满足公式关系时，表明闸门的振动特性状态不良，应当及时预警、报警。

4.3 平面定轮闸门测点设计

泄水工作闸门采用平面定轮钢闸门，孔口尺寸为 15.0 m×18.8 m，启闭设备选用 2×2 500 kN 固定卷扬式启闭机。根据设计的监测内容，选用不同的传感器、布置不同的监测位置采集信息。

4.3.1 应力监测

考虑到闸门长期过水作业，闸门应力传感器采用防水应变计，额定电阻 120 Ω，自补偿温度范围为 10~90 ℃，线性膨胀系数不高于 11，敏感栅长度 5 mm，地基尺寸 21 mm×5 mm，安装和操作温度-20~100 ℃，最大承受水压 1 MPa，敏感系数 2.2，屏蔽线 30 m 以上；应力应变采集模块使用的 ADC 采样分辨率 18 位以上，各通道采样分辨率 1 kHz 以上。测点位置见表 1。

表 1 应力传感器布置方案

测点位置	作用
上主梁后翼板中心线位置,横向布置两个测点	测试上主梁弯曲应力
中主梁后翼板中心线位置,横向布置两个测点	测试下主梁弯曲应力
下主梁后翼板中心线位置,横向布置两个测点	测试下主梁弯曲应力
左吊耳部位的面板,相互垂直布置应变片	测试面板应力
右吊耳部位的面板,相互垂直布置应变片	测试面板应力
左吊耳板,垂直方向	测试吊耳板拉应力
右吊耳板,垂直方向	测试吊耳板拉应力
闸门中部面板共布置 2 个测点,相互垂直布置应变片	测试面板应力

4.3.2 流激振动监测

流激振动监测采用防水加速度传感器,全过
载不低于 1 000%, 频响范围(23 ℃) DC-150 Hz,
耐水压不低于 490 kPa, 不锈钢外壳的耐腐蚀型材
料箱体, 传感器额定容量±5g(g 为重力加速度),
非线性不低于±1%RO(量程范围), 允许使用温度
范围-15~65 ℃; 流激振动采集模块采样分辨率
24 位以上, 各通道同步采样分辨率 125 kHz 以上。
测点位置见表 2。

表 2 加速度传感器布置方案

测点位置	作用
门叶上主梁左端	测量水流方向的振动位移和加速度
门叶上主梁右端	测量水流方向的振动位移和加速度
门叶下主梁左端	测量水流方向的振动位移和加速度
门叶下主梁右端	测量水流方向的振动位移和加速度

4.3.3 定轮运行状态监测

定轮运行状态监测采用深海防水接近开关传
感器, 感应距离 2~50 mm, 输出开关量。安装于
每扇门叶下游的定轮侧边, 共计 16 通道。当定轮
发生卡死时可以及时报警。

4.3.4 运行姿态监测

传感器采用电流型双轴倾角传感器, 电流输

出 4~20 mA、频率响应范围 1~20 Hz, 耐水压
1 MPa, 安装在门叶高度约 2/3 的中心线上, 监测
门叶左右和上下游的偏角及倾斜值。每扇闸门通
道数 2, 示值误差不大于 0.5% F. S, 输出电源
24 V/50 mA, 模数转换器为 16 位 A/D。

5 结论

1) 犍为泄水工作闸门担负着整个电站的洪水
宣泄工作, 地位极其重要, 平稳安全地运行关系
到整个电站枢纽的安全。

2) 泄水工作闸门布置实时在线监测系统, 可
以详细、全面监测闸门的结构应力、流激振动状
态、运行姿态、定轮运行状态。

3) 采用变频自控电机式电缆卷筒可以很好地
将传感器线缆从闸门上动态引入启闭机房内的数
据采集箱。

4) 根据实时在线监测的闸门运行数据制定闸
门合理的调度规程, 可以避免闸门小开度运行时
出现危及闸门安全的震动, 延长设备使用寿命,
减少安全隐患, 保障闸门的安全稳定运行。

参考文献:

[1] 张兵, 汤秀丽; 熊荣刚. 实时在线监测技术在水工金属
结构中的应用[J]. 起重运输机械, 2017(12): 136-139.
[2] 胡木生, 再丽娜. 我国水工金属结构管理现状与检测技
术进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 1-6.
[3] 夏念凌. 水工闸门事故实例分析[M]. 北京: 水利电力出
版社, 1994.
[4] 任晓华, 刘月楼, 沈春颖, 等. 平面闸门流激振动试验研
究[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(12): 112-114.

(本文编辑 武亚庆)