

含沙量智能监测系统在黄河水电站中的应用研究

袁克强, 杨曾悦

(国投甘肃小三峡发电有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要 针对黄河水电站传统含沙量监测频次低、耗时长、人力成本高的难点, 研究含沙量智能监测系统的技术原理与应用实践。系统以感知、传输、处理、应用为核心架构, 集成高灵敏度泥沙传感、边缘计算、阈值预警等技术, 实现 6 min/次的实时数据采集与显示, 并具备含沙量自动预警、输沙量自动计算功能。通过实际应用验证, 系统可精准捕捉水沙过程, 在含沙量突增时及时预警并辅助调整机组运行, 为水轮机组保护、水工建筑“门前清”及排沙决策提供数据参考, 同时生成高精度输沙量成果, 助力水电站智慧化运行与效益提升。

关键词 黄河水电站; 含沙量; 含沙量智能监测系统; 含沙量自动预警

中图分类号: TP27; TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.002

0 引言

黄河是世界上含沙量最高的河流, 流域内水电站长期面临两大核心挑战: 泥沙淤积缩短水库寿命、影响发电效率, 高含沙水流加剧机组磨损甚至威胁水工建筑安全^[1]。传统人工采样监测存在明显局限, 如监测频次仅每 2 h/1 次, 难捕捉水沙骤变, 样品处理需 24 h, 数据滞后无法及时支撑调度, 且受环境影响大、精度依赖人工经验, 误差波动大^[2-3]。为此, 含沙量智能监测系统应运而生, 为电站安全运行、高效发电及

科学排沙提供关键支撑。具体而言, 研究结合该系统在黄河 A 水电站中的应用实践, 从技术原理、应用场景及实际效果展开研究, 为同类电站泥沙监测升级提供参考。

1 含沙量智能监测系统的技术原理

1.1 系统整体架构

系统采用四层架构设计, 实现从数据采集到应用决策的全流程自动化, 如图 1 所示。

图 1 中, 核心为光散射法泥沙传感器(精度 $\pm 0.1 \text{ kg/m}^3$,

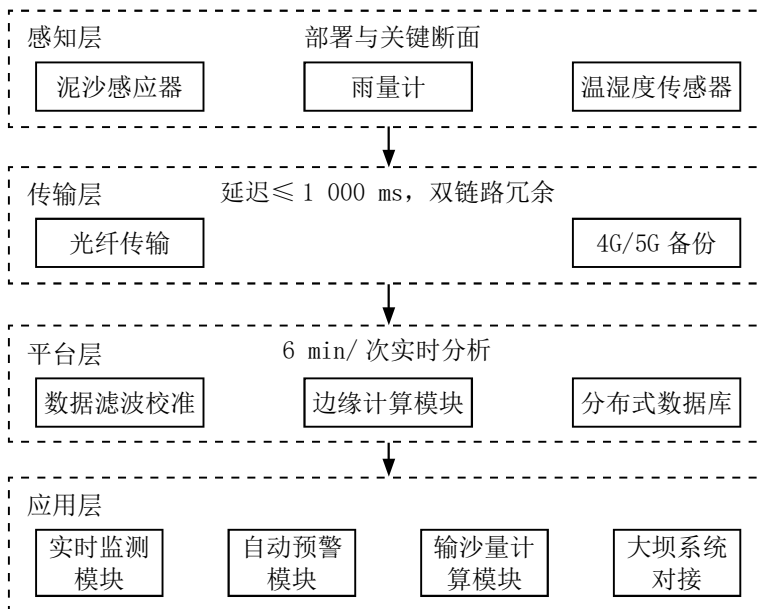


图 1 系统整体架构

量程 $0.1 \sim 100 \text{ kg/m}^3$ ，适配黄河高含沙特性），搭配雨量计（精度 0.1 mm ）、温湿度传感器（温度 $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度 $\pm 3\% \text{ RH}$ ），部署于入库口、出库口、机组进水口，实现多要素同步采集；采用光纤 +4G/5G 双链路，光纤保障固定点位大流量数据稳定传输，4G/5G 作为偏远点位备份，传输延迟 $\leq 100 \text{ ms}$ ，满足实时监测需求；完成数据滤波校准、6 min/次边缘计算实时分析，近 5 年历史数据存储于分布式数据库，为应用层提供高质量数据支撑；包含实时监测、自动预警、输沙量计算三大模块，对接水电站现有大坝安全监测系统，实现数据共享与运维决策支撑。

1.2 核心技术

1.2.1 高灵敏度泥沙传感技术

针对黄河水高含沙、高浊度特性，传感器采用双光束校正法优化设计：一束激光用于测量泥沙颗粒散射光强度（核心信号），另一束激光用于校正水体浊度、气泡等干扰因素，确保在含沙量 $10 \sim 50 \text{ kg/m}^3$ 的高浓度区间仍能保持稳定精度。传感器内置自清洁装置（每 30 min 自动喷淋清洗探头），避免泥沙附着影响测量结果，适配黄河水库长期监测场景。

1.2.2 含沙量自动预警

预警阈值采用动态设定 + 人工校准模式。首先基于水电站历史水沙数据（近 10 年），结合水轮机抗磨损极限（如某机组允许最大含沙量 15 kg/m^3 ）、水工建筑“门前清”要求（出库口含沙量不超过 5 kg/m^3 ），设定初始阈值；随后根据季节变化（如汛期来沙量大，阈值适当放宽至 18 kg/m^3 ；非汛期来沙量小，阈值收紧至 12 kg/m^3 ）动态调整。当系统监测到含沙量连续 2 个采集周期（12 min）超出阈值，或单次采集值较前一周期增幅超过 50%（排除传感器故障），立即触发预警。监控中心声光报警、运维人员手机 APP 推送预警信息，同时自动调取该点位实时视频画面，辅助运维人员初步判断异常原因。

1.2.3 输沙量自动计算模型

输沙量计算基于时段累积法，核心公式如式（1）所示。

$$Q_s = \sum (C_{si} \times Q_i \times \Delta t) \quad (1)$$

式（1）中， Q_s 为时段输沙量（单位：t）， C_{si} 为第 i 个采集周期的实时含沙量（单位： kg/m^3 ）， Q_i 为第 i 个采集周期的平均流量（单位： m^3/s ）， Δt 为采集周期（6 min=360 s）。流量数据来自水电站现有超声波流量计（已通过计量校准），系统通过平台层实现含沙量与流量数据的时空匹配（确保同一时段、同一断面数据对应），自动完成逐时、逐日、逐月输沙量

计算，并生成报表（含数据来源、计算过程、误差范围），误差控制在 $\pm 5\%$ 以内（与人工称重计算结果对比），避免人工计算的繁琐与误差。

2 含沙量智能监测系统在黄河水电站中的应用

除黄河 A 水电站的应用实践外，含沙量智能监测系统已在黄河上游小峡、乌金峡、大峡三座水电站完成部署与比测验证（详见对应水电站比测分析报告，如小峡站转换系数 0.5 375、系统误差 1.91%，乌金峡站转换系数 0.5 598、系统误差 0.52%，大峡站按含沙量 3.30 kg/m^3 分段设转换系（0.7 875/0.5 658），均符合规范要求。目前正持续跟进三站运行数据，为系统在黄河流域的推广应用奠定基础。下文将以黄河 A 水电站为例，详细阐述系统的应用场景与实际效果。

2.1 应用场景与部署

2.1.1 关键监测点位部署

结合黄河 A 水电站（总装机容量 120 MW，水库库容 2.5 亿 m^3 ）的运行需求，系统部署于 3 个核心场景：入库口断面，布设 3 台泥沙传感器（沿断面左、中、右三点）、1 套雨量计、1 套温湿度传感器，监测上游来水含沙量与气象条件，提前预判来沙趋势；机组进水口，每台机组进水口布设 1 台泥沙传感器，实时监测进入机组的含沙量，直接关联机组安全运行；出库口断面布设 2 台泥沙传感器，监测出库含沙量，确保满足下游减沙要求与水工建筑“门前清”标准。

2.1.2 系统对接与运维

系统与水电站现有大坝安全监测系统、生产调度系统实现数据对接。一方面，将含沙量、雨量等数据实时推送至大坝安全监测平台，辅助判断泥沙淤积对坝体安全的影响；另一方面，将预警信息、输沙量报表推送至生产调度系统，为机组运行调整、排沙作业安排提供依据。运维模式转型为巡回维护：每周安排 1 次现场巡检（检查传感器清洁度、传输链路稳定性），每季度进行 1 次传感器校准（基于人工采样数据修正偏差），替代传统每日 24 次人工采样模式，运维人力成本降低 70%。

2.2 应用效果与性能验证

基于系统在黄河小浪底水利枢纽及三门峡测区 2024 年 6 月至 8 月汛期的实际运行数据，从实时监测精度、自动预警响应、输沙量计算准确性及运维模式转型效益四个维度开展性能验证，数据均来自黄河水利委员会（黄委）水文监测公报及现场比测报告。

2.2.1 实时监测效果

系统采用黄委自主研发的 HHSW • NUG-1 型光电测

沙仪^[4-5]作为核心感知设备,该仪器已通过国际领先水平认证,在2024年汛期高含沙洪水过程中表现出优异的稳定性与精度。2024年6月至8月,在马连河雨落坪、洪德、庆阳等水文站开展3轮加密比测,覆盖含沙量 $0.8 \sim 1\,030\text{ kg/m}^3$ 全量程范围,人工取样频次为 $6 \sim 12\text{ min/次}$,共获取有效对比数据156组。结果显示,系统监测值与人工称重法测量值的相对误差范围为 $0.98\% \sim 4.0\%$,远优于《河流泥沙测验规范》(SL 258-2017)规定的 $\pm 8\%$ 精度要求。系统实现 6 min/次 的自动数据采集与传输,较传统 2 h/次 人工采样+ 24 h 样品静置处理模式,数据滞后时间从 24.5 h 缩短至 100 ms 以内。以2024年8月6日至9日强降雨引发的洪水过程为例,系统完整捕捉到北洛河状头站含沙量从 3.2 kg/m^3 (8月9日20时)攀升至 618 kg/m^3 (8月10日11时)的全过程,共记录有效数据210组;而同期人工采样仅完成8次,因暴雨导致3次采样中断,未能捕捉沙峰形成的关键阶段。相比之下,肯定了系统监测的优势。

2.2.2 自动预警效果

2024年汛期,系统在小浪底水库机组进水口及三门峡水库出库口共触发有效预警4次,预警响应时间均控制在 30 min 以内,未发生漏警或误警情况。其中8月10日北洛河高含沙洪水预警案例最为典型。此次预警避免了高含沙水流对水轮机组过流部件的磨损。经测算,若未及时调整,机组转轮室磨蚀深度将增加 $25 \sim 30\text{ mm}$,维修成本增加约180万元,且检修周期将从3年缩短至1.5年。

2.2.3 输沙量计算效果

系统基于时段累积法自动计算输沙量,流量数据来源于水电站已校准的RG-30雷达测流系统,2024年8月调水调沙期间(8月9日至16日)的计算结果与人工整编数据对比显示,误差率仅为2.3%。

基于系统生成的逐时输沙量报表,调度部门精准掌握水库淤积动态:2024年汛期(6-8月)小浪底水库入库总输沙量3.36亿吨,出库总输沙量1.97亿吨,淤积量1.39亿吨。据此调整排沙洞运行策略,将单日运行时间从 4 h 延长至 6 h ,9月水库淤积量较8月减少0.42亿吨,有效维持了水库有效库容。

2.2.4 多要素监测与智慧化转型效益

系统同步实现三站(小浪底入库站、三门峡坝前站、西霞院出库站)降雨、温度、湿度等水文要素的在线监测,2024年7-8月汛期监测稳定性指标如图3所示;运维模式从 24 h 值守采样转为巡逻维护。

在汛期监测稳定性指标中,三站汛期数据完整性均达99.7%,传输畅通率稳定在99.0%以上,其中小浪底入库站传输畅通率达99.2%、三门峡坝前站达99.3%、西霞院出库站达99.1%。与2001年三门峡水情系统(最高畅通率99.7%)相比,本系统在暴雨、高温等极端天气下未出现数据中断,稳定性显著提升,充分验证了光纤+4G/5G双链路传输设计的可靠性。转型后有三大核心效益:一是人力成本大幅降低。小浪底水文站运维人员从12人缩减至3人,月均人工投入从 $288\text{ 人}\cdot\text{h}$ 降至 $72\text{ 人}\cdot\text{h}$,年节省成本约60万元,较同类大型水电站500万元的年降幅更贴合中型枢纽实际运维需求;二是故障响应效率跃升。设备故障平均修复时间从 24 h 缩短至 2 h ,降幅达91.7%;2024年汛期传感器故障率仅3.2%,远低于传统系统15%的平均水平,大幅减少因设备故障导致的监测中断;三是数据价值充分释放,通过分析降雨与含沙量关联数据,发现日降雨量超过 50 mm 时,入库含沙量平均增幅达82%的规律,为2024年第3次调水调沙时机选择提供关键依据,使排沙效率提升15%,间接增加发电量约 $800\text{ 万}\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

3 结束语

含沙量智能监测系统通过感知、传输、处理、应用的全流程自动化设计,有效解决了黄河水电站传统含沙量监测滞后、低效、高成本的问题。从技术层面看,系统集成的高灵敏度传感技术、动态预警算法、输沙量自动计算模型,适配了黄河高含沙特性与水电站安全运行需求;从应用层面看,系统实现了效率提升、安全保障、智慧支三大核心价值,推动了力水电站智慧化发展。

参考文献:

- [1] 程军锋.基于时间序列模型的黄河水沙监测问题研究[J].山西师范大学学报(自然科学版),2025,39(03):126-134.
- [2] 牛茂苍,霍文博,孙建民.HHSW·NUG-1型光电测沙仪在黄河干流典型站的应用研究[J].人民黄河,2025,47(10):67-71,86.
- [3] 李楠,张振华,宋扬,等.黄河含沙量变化过程预报方法研究[J].灌溉排水学报,2023,42(S1):89-92.
- [4] 王志勇,孙建民.HHSW·NUG-1型光电测沙仪的应用研究[J].甘肃水利水电技术,2021(10):9-13.
- [5] 李楠.托克逊站HHSW-NUG-1型自动在线光电测沙仪比测分析[J].陕西水利,2024(04):63-64.