

小金川流域三站生态流量监测设备改造技术研究与实践

李 阳

(四川小金川水电开发有限公司,四川 阿坝 624000)

摘 要:为满足四川省水电站下泄生态流量监管要求,解决小金川流域木坡、春厂坝、赞拉三座水电站生态流量监测数据上传不达标的难题,该项目实施了系统性的监测设备改造工程。文章重点剖析了以雷达液位计、闸位计、视频监控和数据融合技术为核心的全新监测技术方案,包括系统的逻辑架构、硬件组成、流量计算模型、软件平台功能以及数据传输机制。通过对比改造前后数据,论证了该技术方案在提升数据上传率、保障系统稳定性、增强监管效能方面的显著成效,为同类水电站的生态流量监测系统升级提供了可靠的技术范本与实践经验。

关键词:生态流量监测;技术改造;雷达液位计;闸位计;数据融合;监管平台

中图分类号:TV123;TV736

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2026)02-0054-05

DOI:10. 20196/j. cnki. scslfd. 20260212

Research and practice on the technical renovation of ecological flow monitoring equipment for three project in the Xiaojinchuan River Basin

LI Yang

(Sichuan Xiaojinchuan Hydropower Development Co. ,Ltd. ,Aba,Sichuan 624000,China)

Abstract:To meet the regulatory requirements for the ecological flow discharge of hydropower projects in Sichuan Province and to solve the problem of substandard upload of ecological flow monitoring data from three hydropower projects (Mupo,Chunchangba,and Zanla) in the Xiaojinchuan River Basin,a systematic renovation project of monitoring equipment was implemented. This paper elaborates on the background and necessity of the renovation project,and focuses on analyzing the new monitoring technical scheme centered on radar level gauges,gate position gauges,video surveillance,and data fusion technology,including the logical architecture,hardware composition,flow calculation model,software platform functions,and data transmission mechanism of the system. By comparing the data before and after the renovation,the significant effects of the technical scheme in improving data upload rate,ensuring system stability,and enhancing regulatory efficiency are demonstrated,providing a reliable technical model and practical experience for the upgrading of ecological flow monitoring systems of similar hydropower projects.

Key words:ecological flow monitoring;technical renovation;radar level gauge;gate position gauge;data fusion;regulatory platform

0 引 言

电站下泄生态流量是维系河流水生生态、保障下游用水权益的关键环节,已成为中国水电行业绿色发展的核心监管指标之一。四川省水利厅、生态环境厅等八部门于2021年联合印发《四

川省水电站下泄生态流量监管和考核工作制度(试行)》,明确要求各水电站下泄生态流量数据的“上传达标率”与“到报率”均不得低于 80%,并纳入取水许可延续的强制性考核^[1]。

位于四川省阿坝藏族自治州小金川流域的木坡、春厂坝、赞拉三座水电站,在长期的运行过程中,其原有的生态流量监测设备逐渐暴露出

收稿日期:2026-03-09

严重问题。监测数据显示,三站在部分时间段的上传值为不达标,最低达标率一度跌至 35.2%。这一状况不仅直接危及三站《取水许可证》的延续办理,还使电站面临行政处罚的风险。根源在于原有设备老化、监测手段单一、数据传输不稳定以及缺乏有效的验证机制,无法满足现行精准化、实时化、可视化的监管需求^[2]。因此,对三站生态流量监测设备进行系统性技术改造已迫在眉睫。

1 改造前系统诊断与总体改造目标

1.1 原有监测系统问题诊断

原有三站的生态流量监测系统主要存在以下四方面短板:

- 1)设备性能落后。采用的早期雷达探头与数据采集器精度下降,环境适应性差,在复杂气象条件下易出现测量偏差或失效。
- 2)监测维度单一。主要依赖单一的水位或闸位推算流量,未实现闸门下泄流量与生态管道下泄流量的叠加计算,导致上报的总下泄生态流量数据不完整、不准确。
- 3)通信链路脆弱。依赖单一的无线公网进行数据传输,受山区地形与天气影响显著,信号中断、数据包丢失现象频发,是导致“到报率”低下的直接原因。
- 4)缺乏过程验证。系统仅有数据上报,无现场实时视频监控,监管部门无法直观验证下泄水流状态,数据可信度与说服力不足。

1.2 总体改造目标

- 针对上述问题,该项目确立了清晰的改造目标:
- 1)核心目标。确保生态流量监测数据上传达标率与到报率稳定在 80%以上,满足省级监管考核要求。
 - 2)技术目标。构建一个“测得到、算得准、传得稳、看得见”的智能化监测体系。
 - ①测得到。采用高精度传感器,全覆盖监测所有下泄通道(闸门与管道)。
 - ②算得准。建立科学的流量计算模型,实现多源数据自动叠加计算。
 - ③传得稳。采用冗余通信设计,保障数据链路的可靠性。
 - ④看得见。集成视频监控,实现数据与画面的双重验证与远程可视化管理。

2 改造技术方案详述

2.1 系统总体架构设计

改造后的“水电站生态流量监测系统”采用分层分布式架构,分为现场采集层、网络传输层和平台应用层,其逻辑结构见图 1。

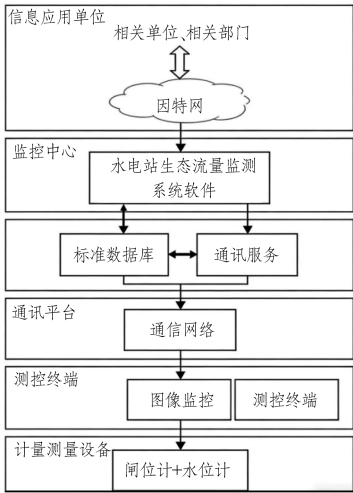


图 1 系统逻辑结构

2.2 现场层:核心监测设备配置与安装

现场层是数据之源,其核心是根据各电站下泄设施的具体情况,配置相应的传感器与采集终端。现场层设备系统由现场数据采集设备、图像采集设备、通信网络及信号处理设备四部分组成,形成“现场采集 — 无线传输 — 中心处理 — 智能应用”一体化监测体系(见图 2)。现场层设备配置情况见表 1。

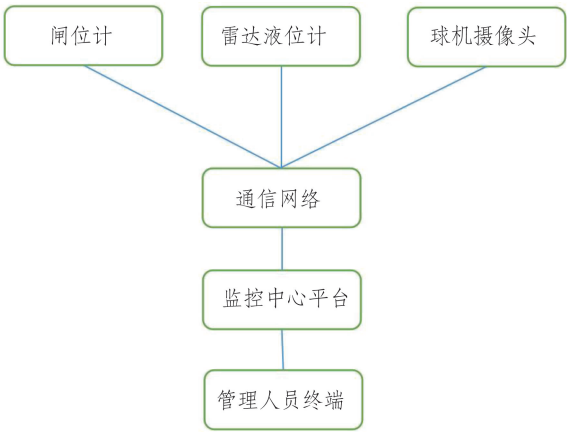


图 2 现场层设备结构

2.2.1 核心传感器选型与原理

- 1)雷达液位计。采用非接触式高频雷达波测量原理,测量范围 0~30 m,精度:±2 mm,抗干

表 1 三站监测设备配置清单

电站名称	下泄设施构成	闸位计 / 台	雷达液位计 / 台	球机摄像头 / 台	生态流量监测柜 / 台
木坡电站	1 道闸门 + 1 根 DN500 生态管	1	1	1	1
春厂坝电站	3 道闸门 + 1 根 DN700 生态管	3	1	1	1
赞拉电站	1 根 DN700 生态管	1	1	1	1

抗能力强,输出 4~20 mA 或 RS485 信号。天线发射微波脉冲,到达水面后反射并被接收,通过计算波束往返时间精确计算出水位高度 h。其优势在于不受水温、水质、蒸汽和泡沫的影响,安装维护简便,非常适合水电站泄水口的复杂环境^[3]。

2) 闸位计(开度仪)。选用绝对值编码器型闸位计,将其机械传动部分与闸门启闭机的传动轴耦合。测量精度:±0.1%,输出 4~20 mA 或 RS485 信号,实时传输闸门开度数据,闸门动作时,编码器输出与闸门提升高度 e 相对应的唯一数字编码信号,实时、精确地反映闸门开度。

3) 球机摄像头配备具备高倍光学变焦、360°水平旋转、红外夜视功能的智能球机。可远程控制视角与焦距,实现对下泄口水流状态的 24 小时不间断视频监控与录像回溯。

2.2.2 生态流量监测柜

监测柜作为现场层的“大脑”,集成了以下功能模块:

1) 数据采集模块(RTU/PLC)。接收并处理来自所有闸位计和雷达液位计的模拟/数字信号。

2) 流量计算模块:内置流量计算模型,实时进行流量计算与叠加(详见 3.3 节)。

3) 视频编码与接入模块:接入球机摄像头视频流,进行编码与压缩。

4) 双路通信模块:同时支持有线光纤和 4G/5G 无线网络,实现通信链路冗余备份。

5) 供电与防雷模块:提供稳定电源,并配备多级防雷保护,确保野外长期稳定运行。

2.3 核心算法:下泄流量计算模型

该系统的核心技术突破在于实现了对闸门与管道下泄流量的一体化叠加计算。

2.3.1 闸门下泄流量计算模型

对于平板闸门,采用以下经典公式进行下泄流量计算:

$$Q_g = \mu_0 \times \beta \times e \times \sqrt{2gh}$$
 (1)

参数释义见表 2。

表 2 闸门流量公式参数释义

符号	物理意义	单位	数据来源
Q_g	闸门下泄流量	m^3/s	计算输出
μ_0	管道流量系数	无量纲	常数,通常取经验值 0.6
β	闸门宽度	m	固定常数(闸门设计宽度)
e	闸门开度	m	闸位计实时测量
g	重力加速度	m/s^2	常数,9.81
h	闸前(渠道)水位	m	雷达液位计实时测量

注:流量系数 μ_0 亦可按公式 $\mu_0 = 0.6 - 0.176 \frac{e}{h}$ 进行精细计算,该项目为保障系统稳定性,取固定值 0.6^[4]。

2.3.2 管道(生态管)下泄流量计算模型

对于生态放流管道,视为有压管流,下泄流量计算公式为:

$$Q_p = \mu_c \times A \times \sqrt{2gH}$$
 (2)

参数释义见表 3。

表 3 管道流量公式参数释义

符号	物理意义	单位	数据来源
Q_p	管道下泄流量	m^3/s	计算输出
μ_c	管道流量系数	无量纲	常数,通常取经验值 0.6
A	管道过水断面面积	m	固定常数(闸门设计宽度)
g	重力加速度	m/s^2	常数,9.81
H	管道出口中心处液位	m	雷达液位计实时测量

2.3.3 总生态流量叠加计算

测控终端根据各站的设施配置,自动执行叠加计算:

1) 春厂坝电站总流量:

$$Q_{总} = Q_{g1} + Q_{g2} + Q_{g3} + Q_p$$
 (3)

式中: Q_{g1} 、 Q_{g2} 、 Q_{g3} 为三道闸门流量, Q_p 为管道

流量。

2)木坡电站及赞拉电站总流量：

$$Q_{总} = Q_g + Q_p$$
 (4)

式中： Q_g 为冲沙闸流量， Q_p 为管道流量。

3)计算结果实时显示在监测柜的本地人机界面(HMI)上,并通过通信网络上传。

2.4 网络传输层:冗余通信设计

为彻底解决数据传输不稳定问题,系统采用了“有线为主,无线为辅,双路热备”的冗余通信策略。

1)主用通道。优先采用光纤以太网,将现场监测柜接入电站内部局域网,再通过电站统一出口连接至互联网,提供高带宽、低延迟的稳定传输。

2)备用通道。同时安装 4G/5G 无线通信模块(支持移动、联通、电信三网切换)。当光纤链路中断时,系统自动无缝切换至无线网络,确保数据不间断上传^[5]。

3)通信规约。严格遵循《水文监测数据通信规约》,确保与省级监管平台的数据对接畅通无阻。

2.5 平台应用层:远程监控中心软件平台

系统核心,采用 B/S 和 C/S 混合架构设计：

1)C/S 体系结构。用于数据汇集处理和前端控制程序,互动性强,便于系统维护和复杂功能实现；

2)B/S 体系结构。供监控人员通过浏览器访问,无需安装客户端,操作简单、维护方便,对终端设备无特殊要求。

2.5.1 主要功能模块

1)电子地图可视化总览

基于 GIS 地图,集中展示三座水电站的位置、实时流量数据、设备状态及报警信息。不同颜色标记正常、预警、超标等状态,一目了然。

2)实时监测与预警

①数据实时刷新。列表显示各测点最新的水位、闸位、瞬时流量、累计流量等。

②智能视频联动。点击任一测点,可同时弹出该点位实时视频画面,实现“数据+视频”双重验证。

③多级预警机制。支持远程设置流量报警阈值。当流量低于生态要求或设备发生故障时,系

统自动触发声光报警、弹窗提示,并可通过短信、邮件推送告警信息。

3)数据管理分析与报表

①历史数据查询。支持按电站、时间、数据类型等多条件组合查询。

②曲线与报表分析。生成流量一时间过程曲线、日报、月报、年报等。支持数据导出为 Excel 格式,便于存档与第三方分析。

③设备运维日志。完整记录设备操作、参数修改、报警事件等所有日志。

4)系统管理

完善的用户权限管理体系,支持不同角色(如管理员、操作员、观察员)分配不同的数据查看与操作权限。

2.5.2 数据上报机制

系统支持多种数据上报模式,确保监管数据的及时性与完整性：

1)定时主动上报。测控终端每 15 min 自动打包并上传一组完整的监测数据(含流量、水位、闸位快照)。

2)事件触发上报。当发生流量越限、设备故障等事件时,立即触发上报。

3)平台召测与远程设置。监控中心可随时主动“召唤”任一测点的当前数据,并可远程修改现场终端的参数(如报警阈值、采样间隔)。

3 改造实施成效与综合提升分析

3.1 综合技术性能提升对比

改造前后关键指标对比见表 4。

3.2 监测精度显著提高

改造后采用高精度雷达液位计和闸位计,结合校准后的专用流量计算公式可以有效减少生态流量测量误差,利用便携式超声波明渠流量计进行测验,结果显示新安装设备流量测量误差控制在 ±5% 以内,远优于原有设备 ±10% 的误差水平,能够精准反映水电站实际下泄生态流量。

3.3 数据上传达标率大幅提升

借助稳定的 4G 无线通信网络和多模式数据传输机制,改造后三座水电站生态流量数据上传达标率、到报率均提升至 80% 以上,完全满足《四川省水电站下泄生态流量监管和考核工作制

表 4 改造前后关键指标对比

性能指标	改造前状态	改造后状态	提升效果
数据到报率	小于 80%， 最低 35.2%	稳定 大于 95%	提升显著， 完全达标
数据达标率	波动大， 频繁不达标	稳定 大于 90%	满足并超过 监管要求
监测完整性	未实现闸/ 管流量叠加	实现全通道 叠加计算	数据更全面、 准确
通信可靠性	单一无线， 易中断	光纤+4G 双路热备	近乎 100% 连通率
过程可视性	无视频监控	实时视频联动	实现远程 可视化验证
系统维护性	故障定位难， 响应慢	远程诊断 与设置	运维效率 大幅提升

度（试行）》要求，有效解决了原设备数据上传不达标、影响取水许可证延续办理的问题。改造前后数据上传达标率对比情况见表 5。

表 5 改造前后数据上传达标率对比表 /%

电站名称	改造前 平均 达标率	改造前 最低 达标率	改造后 平均 达标率	改造后 最低 达标率
木坡水电站	72.3	48.5	92.7	83.1
春厂坝水电站	69.8	35.2	91.5	82.4
杨家湾水电站	73.5	42.1	93.2	84.6

3.4 智能化监控水平显著提升

改造后的系统具备完善的智能预警和远程管控功能，管理人员可通过电脑或手机终端远程查看实时数据、现场视频和历史记录，无需到现场巡查。例如，春厂坝水电站曾出现闸门开度异常导致流量过低的情况，系统立即发出报警信号，管理人员通过视频确认现场情况后，及时通知运维人员处置，避免了下游生态环境受影响。

系统的可视化展示和数据分析功能，大幅提升了管理效率。通过生成的流量变化曲线，管理人员可直观掌握水电站下泄流量变化规律，为流域生态流量管控提供科学依据。

3.5 系统兼容性与扩展性良好

系统通讯协议完全符合《水文监测数据通信规约》，已成功实现与省级监管平台的数据共享，

实现信息互联互通。同时，系统预留标准化接口，具备良好的扩展性和兼容性，可根据后期需求扩展监测参数（如水温、溶解氧等），或其他相关平台对接，为流域生态流量监测网络完善奠定基础。

4 结 语

针对小金川流域三座水电站生态流量监测改造工作圆满成功。通过采用高精度雷达液位计与闸位计作为感知基础，运用科学的流量叠加计算模型作为核心算法，构建光纤与无线双冗余通信网络链路，并打造一体化的智能软件平台，建成了稳定可靠的生态流量监测系统，彻底解决了数据上传不达标的问题，技术性能全面超越监管要求，实现了生态流量监测从“无”到“好准稳”的质的飞跃。

展望未来，生态流量监测技术将继续向智能化、预测化方向发展。后续可依托现有系统基础上，进一步探索人工智能图像识别、水量预测调度、区块链数据存证等新技术的应用，推动生态流量监测从被动监管向主动保障、精准管控转型、全面筑牢流域生态保护的技术防线。

参考文献：

[1] 四川省水利厅. 四川省水电站下泄生态流量监管和考核工作制度（试行）[EB/OL]. （2021-05-26）[2026-01-12]. <http://slt.sc.gov.cn/scsslt/gsgg/2021/5/26/5dd63eb69bc341c5a4d0b92b8f4e5e9a.shtml>.

[2] 四川优科自动化控制设备有限公司. 木坡、春厂坝、赞拉水电站下泄生态流量监测设备改造六措一案：阿坝片区〔2025〕4 号[R]. 阿坝州：四川小金川水电开发有限公司，2025.

[3] 水利部水利信息中心. 水文监测数据通信规约：SL 651-2014[S]. 北京：中国水利水电出版社，2014.

[4] 王浩，杨志峰. 河流生态需水理论、方法与实践[M]. 北京：科学出版社，2012.

[5] 姚丽娟. 濮阳移动综合网络资源管理系统设计与实现[M]. 成都：电子科技大学，2014.

作者简介：

李 阳（1998-），男，四川巴中人，助理工程师，学士，从事水力发电站运维工作。

（编辑：廖益斌）