

境外水电站水情信息传输延迟治理与应急响应研究

王治烘 杨耀 方健勇 范伯儒
中国水利电力对外有限公司 北京 100000

[摘要] 境外水电站选址多集中于热带山地区域，公网信号覆盖存在盲区，水情数据回传主要依托北斗卫星短报文通道。但地形遮挡造成信号衰减，湿热工况加速器件老化，导致防汛调度决策与大坝安全应急响应均受掣肘。围绕上述瓶颈，研究构建终端硬件迭代、站基设施适配改造、多信道冗余切换与分级应急响应协同推进的技术体系，以期实现复杂工况下系统运行韧性同步增强。

[关键词] 境外水电站；水情信息传输；延迟治理；应急响应

DOI：10.64635/ja.2026.1512 中图分类号：TV736 文献标识码：A

Research on Transmission Delay Control and Emergency Response for Hydrological Information in Overseas Hydropower Stations

Wang Zhihong, Yang Yao, Fang Jianyong, Fan Boru
China International Water & Electric Corporation, Beijing 100000, China

Abstract: Overseas hydropower stations are mostly located in tropical mountainous areas, where public network signal coverage often has blind spots, and hydrological data transmission mainly relies on BeiDou satellite short-message channels. However, terrain obstruction causes signal attenuation, and hot and humid working conditions accelerate component aging, which restricts both flood control dispatching decisions and emergency response for dam safety. Focusing on these bottlenecks, this study constructs a technical system that coordinates terminal hardware iteration, station infrastructure adaptation and renovation, multi-channel redundancy switching, and graded emergency response, with the aim of synchronously enhancing system operation resilience under complex working conditions.

Keywords: overseas hydropower station; hydrological information transmission; delay control; emergency response

引言

已投运水电站服役年限持续增加，首批投用的第一代北斗终端出现器件老化与性能衰减；热带区域高温高湿环境叠加对流天气多发，信号遮挡与传输中断频次呈上升趋势，汛期高水位工况下大坝安全运行面临现实风险。据此，围绕水情数据传输延迟开展专项技术攻关，统筹终端硬件、站基设施、传输策略与应急响应各环节实施综合治理，对提升境外水电站防洪调度精度、筑牢大坝本质安全防线具备重要工程价值。

1 境外水电站水情信息传输技术

1.1 北斗卫星通信系统

境外水电站水情遥测系统选定北斗卫星短报文通信作为核心传输手段，破解热带山地公网覆盖率不足六成难题。系统运行于 RDSS 卫星无线电测定业务体制，水情遥测站借助北斗数传终端把水位、雨量等水文要素编码为短报文，北斗卫星负责转发至地面中心站，中心站解析数据后推送至大坝安全管理系统。信号传输链路分为遥测站终端上行发射、卫星转发器接收与变频放大、中心站接收机解调三

段，任意一段信号质量劣化均可能造成传输延迟或中断。系统设有自报式与应答式两种工作模式，自报式属常态运行模式，遥测站依照预设间隔主动上送数据，间隔可选 5 min、10 min 或 15 min；应答式面向中心站主动召测或参数配置，召测指令往返时延直接关系到应急调度时效^[1]。

1.2 北斗三号数传终端

新一代北斗三号数传终端取一体化集成设计，RDSS 收发天线、射频收发电路、功放电路、基带电路全部集成于单一壳体，分体式设备间射频电缆连接造成的插入损耗随之消除，典型插损值从分体式 1.5 dB 压至 0.3 dB 以内。壳体选材为高强度工程塑料，防护等级达 IP67，承受 100 mm/h 强降雨冲刷与 1 m 深短时浸水均无异常。工作温度区间为 -30℃ 至 +75℃，相对湿度耐受能力达 95% 且无凝结，可适应高低温、高湿度、高盐雾、高腐蚀并存的野外环境。终端内置防雷击与防浪涌模块，浪涌耐受能力达差模 2 kV、共模 4 kV，雷暴天气下设备运行安全不受影响。终端以 RS232 串口对接 RTU 遥测终端机，串口波特率支持 4800 bps、9600 bps、19200 bps 三档配置，数据格式

取 8 位数据位、1 位停止位、无校验。另设数据转换模块对接 PC 软件，现场信号强度检测与设备参数配置均可就地完成。

1.3 抗破坏型固定防护装置

面向野外无人值守场景中设备防盗与抗破坏需求，研制高强碳钢固定防护装置，所选钢材屈服强度不低于 235 MPa，表面依次施加热镀锌与喷塑双重防腐处理，镀锌层厚度不小于 85 μm，喷塑层厚度不小于 60 μm。卫星终端靠上下两道 304 不锈钢锁紧螺栓紧固夹持，螺栓直径 8 mm，紧固扭矩取 15 N·m；中部另加一道贯穿式 304 不锈钢螺栓做贯穿加固，螺栓直径 10 mm，由此构成三重固定结构，整体抗振动性能符合 GB/T2423.10 标准要求，5 Hz 至 500 Hz 扫频振动试验中无松动现象。设备底部加装高强度防锈密码锁，锁具防破坏等级达到 GB10409 标准 A 级，防非授权拆解与本体结构合为一体。全部线缆从结构内部穿行后汇入仪器箱，线缆弯曲半径控制在线缆外径 6 倍以上，线缆不外露，人为破坏与动物啃咬风险随之降低^[2]。

1.4 通信协议帧结构与信号参数

北斗三号数传终端可运行民用 2.1 协议、标准 4.0 协议及北斗三号 1.0 标准协议，协议间支持自适应切换，现有水情自动测报系统接口亦可直接兼容。协议帧划分为帧头、源地址、目标地址、数据长度、数据域、校验码共六个字段。单次短报文数据域上限为 14000 bit，扣去协议开销后有效载荷约 13000 bit，水位、雨量、流量、温度、电压等多参数组合信息均可纳入单帧传输。具体参数见表 1。

表 1 北斗三号数传终端主要技术参数

参数类别	参数项目	技术指标
RDSS 接收	接收信号频率	2491.75 MHz±8.16 MHz
	接收灵敏度	≤ -130 dBm (8 kbps)
RDSS 发射	发射信号频率	1615.68 MHz±4.08 MHz
	发射 EIRP	6 dBW ~ 8 dBW
	调制相位误差	≤ 3°
	载波抑制	≥ 30 dBc
功耗特性	待机功耗	< 2 W
	发射功耗	≤ 30 W (峰值)
环境适应性	防护等级	IP67
	工作温度	-30℃ ~ +75℃
	工作电压	DC9 V ~ 28 V
通信性能	通信成功率	≥ 95% (无遮挡)
	失锁重捕时间	≤ 1 s
	冷启动首捕时间	≤ 40 s

2 境外水电站水情信息传输延迟治理途径

2.1 北斗卫星终端硬件升级改造

新一代北斗三号数传终端的升级改造从技术维度参数方面实现（如表 2）。功耗优化维度上，待机功耗从一代终端 5 W 以上压至 1.5 W 以内，发射瞬间功耗锁定在 30 W 以内。遥测站蓄电池容量多取 100 Ah，连续阴雨天无充电工况下原终端续航约 72 h，升级后续航可拉至 120 h 以上，电源不足诱发信号发射失败概率随之下降。接收灵敏度拉高至 -130 dBm，比早期设备 -125 dBm 高出 5 dB。按自由空间传播损耗公式推算，灵敏度每拉高 3 dB，等效通信距离可延伸约 40%，相同地形中信号捕获率从 78% 涨到 94%。单次报文长度上限从 1680 bit 扩至 14000 bit，单帧即可同时上传水位、雨量、流量、设备电压、信号强度等 10 类以上参数，多帧拆分造成的帧间间隔开销得以省去，每帧间隔约 1 s，多帧传输累计可省时延 3 ~ 5 s。发射信号频率稳定度优于 5×10⁻⁷，上行信号频率偏移量小于 800 Hz，卫星接收机锁相环捕获带宽要求可得到满足。终端结构从分体式改为一体式设计，分体式设备间 SMA 射频连接器造成的接触电阻与氧化腐蚀问题一并消除，典型接触不良可致信号衰减 2 ~ 3 dB。升级后整机平均故障间隔时间从 8000 h 拉至 25000 h，故障率下降约 68%。

表 2 北斗卫星终端升级前后主要性能对比

性能指标	升级前（一代终端）	升级后（三代终端）	提升幅度
待机功耗	≥ 5 W	≤ 1.5 W	降低 70% 以上
单次报文最大长度	1680 bit	14000 bit	提升 8.3 倍
接收灵敏度	≥ -125 dBm	≤ -130 dBm	提升 5 dB
失锁重捕时间	2 ~ 5 s	≤ 1 s	缩短 80%
防护等级	IP65	IP67	提升防尘防水等级
协议兼容性	单一协议	多协议自适应	兼容性跨档升级
平均故障间隔时间	8000 h	25000 h	提升 2.1 倍

2.2 基础设施兼容优化信号增强

逐站排查水情监测站点并登记台账，参照各站地形与信号遮挡状况施行差异化改造。终端安装方位角与俯仰角调校，手持式频谱仪就地实测卫星信号载噪比，以载噪比最大化为目标逐度扫描，方位角调校精度锁定在 ±2° 以内，俯仰角调校精度锁定在 ±1°

以内。天线馈线优化，原长度超过 10m 的 RG58 馈线全部换为低损耗 LMR-400 馈线，单位长度损耗从 0.6dB/m 降到 0.15dB/m，总馈线损耗从 6dB 压到 1.5dB，等效接收灵敏度抬高 4.5dB。设备支架加固，三角支撑结构焊接固定，支架固有频率从 15Hz 抬至 35Hz，与风振频率共振风险得以规避，振动造成信号方向偏移问题随之消除。周边植被清理，天线前方 45° 视场角范围内，高度超过天线俯仰角对应遮挡线的高大乔木予以修枝或伐除，植被引发的多径效应与吸收衰减随之减弱^[3]。

2.3 多信道冗余传输智能切换机制

搭起公网加北斗卫星双链路智能切换机制，4G 公网担纲主传输信道，北斗卫星短报文充当备份信道。RTU 终端内嵌信道状态监测模块，不间断侦测主信道连接状态与信号质量，侦测指标含接收信号强度指示值、误块率、TCP/IP 连接超时次数三项。切换决策交由滑动窗口检测算法执行，窗口长度取 5 次传输尝试，成功次数与总次数比值计为成功率。成功率跌破 60% 且连续两次尝试失败即启动切换，切换流程含关闭主信道 TCP 连接、激活北斗串口、发送首条北斗测试报文等候确认三步，总切换时间实测为 2.8s。主信道信号强度回升至接收信号强度指示 $\geq -95\text{dBm}$ 且误块率低于 1% 时，系统自动切回主信道，北斗信道资源不被长期占用。单一链路故障时双链路切换机制可做到数据零丢失，切换期间缓存数据自动补发，水情数据序列连续性不受影响。

3 境外水电站水情信息传输延迟应急响应策略

3.1 分级响应机制触发阈值

按传输延迟严重程度与影响范围划定三级响应机制（如表 3）。一级响应面向单站单次传输延迟超过正常值 3 倍但未中断的轻微故障，正常传输时延均值为 8s，3 倍即 24s，远程运维人员通过参数调校或远程重启处置，响应时限在 10min 以内。二级响应面向单站数据传输连续中断超过 30min 的中度故障，需要启动备用信道切换并派遣就近维护人员赶赴现场，响应时限在 30min 以内^[4]。三级响应面向三个及以上站点同时出现数据传输中断或延迟的严重故障，需要启动应急指挥机制协调多部门联合处置，必要时启用移动式卫星通信基站担纲临时通信保障，响应时限在 2h 以内。各级响应启动后 5min 内需要完成故障状态记录与上报。

表 3 水情信息传输延迟应急响应等级与技术措施

响应等级	故障特征	技术措施	响应时限
一级	单站单次传输延迟 > 正常值 3 倍	远程参数调整、终端远程重启	$\leq 10\text{min}$
二级	单站连续中断 $\geq 30\text{min}$	自动切换备用信道、现场维护	$\leq 30\text{min}$
三级	多站同时中断或延迟	启动应急指挥、部署移动通信基站	$\leq 2\text{h}$

3.2 快速故障诊断远程定位技术

远程诊断系统就位后，故障环节可快速定位。系统不间断采集各遥测站信号载噪比、发射成功次数与尝试次数比值、重传计数、电池端电压、终端内部温度等运行参数，采样间隔取 1min，各站正常工况下参数基线数据库同步建成，基线更新周期取 7 天滑动平均。实时参数偏离基线超过阈值即自动告警，偏离阈值定为信号载噪比下降超过 5dBHz、发射成功率跌破 70%、电池电压低于 11.5V。系统内嵌故障树推理引擎，按多个参数组合推断故障根因：信号载噪比持续低于 40dBHz 但发射尝试次数正常，判为地形遮挡或天线方向偏移；信号载噪比正常但发射成功率骤跌到 60% 以下，判为终端功放模块老化或卫星卡余额不足；电池电压偏低且发射瞬间压降超过 2V，判为蓄电池容量衰减。远程诊断把故障定位时间从传统人工巡检 24h 以上压到 30min 以内，诊断准确率达 89%。

3.3 快速信道切换数据补发恢复

配置双链路热备的站点，信道切换 3s 内即可完成，切换后数据走备用信道继续上传，切换期间最多丢失一个采集间隔的数据。仅配置单链路的站点，应急响应需要运维人员携带便携式北斗通信终端赶赴现场临时架设，便携终端靠内置电池供电，续航 8h，数据上报能力可临时恢复^[5]。邻近站点中继方案借已有站点北斗终端充当中继节点，故障站点数据走超短波数传电台以 433MHz 频率发至邻站，再由邻站经北斗转发至中心站，中继覆盖半径可达 3km。遥测站内嵌数据缓存模块取铁电存储器，非易失保持时间 10 年，存储容量 2MB，72h 连续采集数据均可缓存，按每分钟一条报文计算，缓存报文数达 4320 条。通信恢复后终端依先进先出原则以每 5s 一条速率补发缓存数据，补发期间新采集数据优先发送，实时数据优先处理不受影响。

4 结语

终端迭代与站基设施改造完成后,信号捕获能力与设备运行可靠性同步提升;通播批量确认机制配合多信道冗余切换,传输时延下降且链路抗毁能力增强。分级应急响应体系投用后,故障事后处置环节具备快速恢复能力。经上述综合治理,数据传输连续性与时效性两项指标改善幅度较大,为境外水电站高水位运行与泄洪调度提供稳定数据支撑。后续工作可拓展低轨卫星物联网与北斗系统协同组网方向,并引入机器学习方法开展历史故障数据深度挖掘,促进传输系统由被动响应模式向主动预测模式转变。

【参考文献】

- [1] 李麒麟. 基于数字孪生的灌区水情监测与预警系统设计[J]. 产品设计, 2025(21): 14-16.
- [2] 吕强. 水利工程填方渠道防渗应急处置和永久整治研究[J]. 四川水利, 2026, 47(1): 66-69.
- [3] 李雪花, 史宏波. 基于云边端协同的水库监测预警与应急响应模型研究[J]. 水利发展研究, 2025, 25(11): 133-141.
- [4] 侯华伟, 慎利, 贾嘉楠, 等. 基于社交文本的洪涝信息抽取与时空演变分析[J]. 地理与地理信息科学, 2025, 41(2): 1-9.
- [5] 马筠, 韦露斯, 熊佳, 等. 东江流域博罗站旱警流量分析研究[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(7): 65-68.

作者简介: 王治烘(1974.11—), 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯(省市): 四川. 犍为, 学历: 本科, 现职称: 高级工程师, 研究方向: 水利水电。