

小流量监测与整编技术优化研究

——以金沙江阿海站为例

普洪林, 朱朋*

长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局, 重庆 400025

DOI:10.61369/WCEST.2025060013

摘要 : 小流量 (尤其是趋近于零的最小流量) 的精确监测是水资源精细化管理、生态评估及工程调度的关键基础, 也是水文监测的难点。本文以受梯级水电站调控影响显著的金沙江阿海站为例, 针对其频繁出现的极小流量 (如2025年2月20日流量 $2.22\text{ m}^3/\text{s}$, 2022–2024年多次记录 $0\text{ m}^3/\text{s}$) 监测失真与整编失效问题展开研究。通过分析常规转子式流速仪在低流速下的精度局限、电站调度导致的水流状态紊乱等挑战, 提出识别“空间敏感点”(深槽、下游急弯)和“时间敏感点”(电站调峰水位陡变期)的优化策略; 创新应用基于高精度水位同步观测的“水位面积流速增量法”靶向捕捉微小流量变化, 并辅以触发式测验模式。在整编环节, 构建精细化低水位–流量曲线、电站微出库流量亚模型及融入水位差、时间滞后效应的多元推流体系, 显著提升了小流量数据的可靠性与连续性。该方法立足现有设备, 操作性强, 成本低, 为类似受工程影响水文站的小流量监测整编提供了实用解决方案。

关键词 : 小流量监测; 流量整编; 水文站; 水电站影响; 水位面积流速增量法

Research on Optimization of Small Flow Monitoring and Reorganization Technology – A Case Study of Ahai Station on Jinsha River

Pu Honglin, Zhu Peng*

Hydrology Bureau of Yangtze River Water Resources Commission Hydrology Bureau of Upper Yangtze River Hydrology and Water Resources Survey, Chongqing 400025

Abstract : Accurate monitoring of small flow (especially the minimum flow approaching zero) is a key foundation for fine management of water resources, ecological assessment, and engineering scheduling, as well as a difficult point in hydrological monitoring. This article takes the Ahai Station on the Jinsha River, which is significantly affected by the regulation of cascade hydropower stations, as an example to study the monitoring distortion and reorganization failure of its frequent occurrence of extremely small flow (such as $2.22\text{ m}^3/\text{s}$ on February 20, 2025, and $0\text{ m}^3/\text{s}$ recorded multiple times from 2022 to 2024). By analyzing the accuracy limitations of conventional rotor flow meters at low flow rates and the challenges of water flow disorder caused by power plant scheduling, optimization strategies are proposed to identify "spatial sensitive points" (deep troughs, downstream sharp bends) and "time sensitive points" (sudden changes in power plant peak water level); Innovative application based on high-precision synchronous observation of water level, using the "incremental method of water level area flow velocity" to target and capture small flow changes, supplemented by a trigger based testing mode. In the reorganization process, a refined low water level flow curve, a sub model of micro outflow flow from the power station, and a multi-dimensional flow system incorporating water level differences and time lag effects were constructed, significantly improving the reliability and continuity of small flow data. This method is based on existing equipment, has strong operability, low cost, and provides a practical solution for small flow monitoring and reorganization of hydrological stations affected by engineering.

Keywords : small traffic monitoring; traffic reorganization; hydrological station; the impact of hydropower stations; incremental method of water level area flow rate

作者简介: 普洪林(1997—), 男, 僮族, 云南红河人, 助理工程师, 本科, 主要从事水文测报、水文分析工作。

通讯作者: 朱朋(1992—), 男, 汉族, 重庆垫江人, 工程师, 专科, 主要从事水文测报、水文分析工作。

引言

水文监测是水资源可持续管理、防洪抗旱及生态保护的基石。其中，小流量，特别是趋近于零的最小流量的精确捕捉与记录，对评估水资源可利用量、保障河流生态基流、支撑水利工程精细调度具有不可替代的作用。然而，在流量极低的工况下，传统的转子式流速仪因启动灵敏度不足、测量误差增大，加之水流微弱易受环境干扰，常导致监测数据失真甚至缺失^[1]。这一问题在受大型水利工程（如水电站）调控的河段尤为突出，天然水流状态被人工调度严重扭曲，常规监测与整编方法往往失效。

金沙江干流上的阿海水文站是国家基本水文站，承担着为防汛抗旱、水资源管理收集基础数据的重任。其特殊的地理位置——上游仅距阿海水电站1200米，下游73公里为金安桥水电站，且区间无较大支流汇入——使其成为研究小流量监测难题的典型样本。近年来，该站频繁记录到趋近于零的极小流量甚至“0 m³/s”的异常值（如2022年3月16日、2023年4月10日、2024年1月18日及2025年2月20日）。这些异常数据揭示了现有依赖电站出库流量简单推流模式的局限性，亟需探索经济、有效且操作性强的小流量监测与整编改进方法。本文结合阿海站实际条件，聚焦小流量监测瓶颈，提出并验证从敏感点识别、监测方法优化到多元整编路径的实用解决方案。

一、小流量监测的挑战与阿海站特殊性

（一）小流量监测的普遍性挑战

低流量测验面临多重技术障碍：

测验精度受限：传统转子式流速仪在极低流速下（通常低于0.1m/s），启动困难或误差显著增大。水流微弱时，信号易被风浪、设备摆动等随机噪声淹没。

断面代表性弱化：枯水期河道形态（如主槽位置、水深）可能因冲刷淤积变化，导致依据高水期建立的水位-流量关系失效。死水区或流速极小区域的存在，使得单次代表线法测流结果代表性不足。

时机捕捉困难：小流量状态，特别是瞬时最小值，常由水电站调峰蓄放水引发，呈现短时、瞬变的特征。按固定周期或流量分级布置的常规测验策略，难以精确捕捉这些关键瞬间。

环境干扰放大：浅水条件下，测深杆或铅鱼触底、风浪对水面波动的影响被显著放大，进一步降低数据可靠性。

（二）阿海站的典型特殊性

阿海站面临的挑战在普遍性之上叠加了独特因素：

剧烈水力扰动：夹在两大水电站之间，阿海站的水位流量关系受上游电站调峰运行和库容调度的直接、频繁干扰。尤其是在非汛期小流量时段，天然流态被“削峰平谷”严重扭曲。

“稳定”断面的动态变化：测验河段虽为顺直U形河床（长约1.4km，最大水面宽约130m），乱石夹沙河床断面相对稳定，无滩地植被，下游250米急弯起高水控制作用。但在极小流量下，受电站调控影响，水流动力条件剧变，常规断面稳定性优势被削弱，急弯处成为关键敏感点。

依赖关系推流的失效：当前采用上游阿海电站出库流量(Q_{out})与本站实测流量(Q)建立单一相关关系进行整编推流^[2]。当电站泄放微小生态流量、检修放水或接近“零出库”（实际存在渗漏）时， Q_{out} 与 Q 的相关性极不稳定甚至断裂，导致推流结果严重失真，无法反映真实的极小流量动态。

测次响应滞后：依据 Q_{out} 分级布控流量测次，在 Q_{out} 落入极小流量区间时，响应可能不够及时，错过捕捉瞬时最小流量

的时机。

二、小流量敏感点识别与优化监测方法

针对阿海站缆道转子式流速仪在极小流量下“测不准、测不到”的核心问题，关键在于精准锁定微小水流存在的时空位置并改进观测手段。

（一）敏感点识别是前提

1. 空间敏感点定位：

深槽核心区：分析历史测流资料和断面地形图，识别在极低水位下仍能维持流动水体的区域，通常是主槽最深槽线或河床深坑。阿海站左岸深槽是首要靶区。

水力控制点：下游250米处的急弯，在特定低水位级对小流量水流形态仍可能产生控制或汇集作用，是重要的辅助监测区。

2. 时间敏感点捕捉：

调度规律关联：紧密跟踪上游电站运行计划，特别是发电低谷期（负荷低，下泄流量小）、库水位大幅波动期（蓄水或集中泄水前后）以及生态调度试验期。

水位过程预警：密切关注本站高精度水位计数据，当水位过程线出现急速下降或上升趋势（斜率陡变）时，预判极小流量可能出现的窗口期，并复盘历史“0 m³/s”记录日的具体水位变化过程。

（二）优化监测方法是核心

立足阿海站现有缆道设施，提出经济实用的补充监测策略：

水位面积流速增量法（核心创新）：在预判的小流量时段（特别是疑似趋零过程），同步强化基本水尺断面和其上游28m流量测验断面的水位观测（需高精度毫米级、分钟级采样的自记水位计支持）。

精确测量空间敏感点（如左岸深槽）的过水断面面积(A)，可使用手持激光测距仪辅助。利用两断面间距($\Delta x=28m$)和实测的连续水位变化率(dh/dt)，通过公式 $\Delta V \approx (dh/dt) * (A / \Delta x)$ 估算该局部区域的流速增量。此方法对微小水流变化极其敏感，可作为转子式流速仪数据的有效补充和关键校验，尤其在传统仪器失

效的低流速区。

靶向式流速测量强化：集中有限测验资源，在识别出的空间敏感点（深槽线）使用现有转子式流速仪进行加密垂线、测点测量。若有条件，可引入灵敏度更高的微型流速传感器或接触式探头专攻深槽小流量。

触发式瞬态流量捕捉：建立“24小时待机+触发测验”机制。基于高精度水位实时数据流，预设极小流量触发条件（如水位连续下降速率超过阈值）。一旦触发，立即启动流量测验，确保捕捉瞬时最小流量状态。

三、小流量数据的实用化整编路径

打破单纯依赖 Q_{out} 推流的单一模式，构建融合多种信息源的多元整编体系：

（一）精细化低水位 – 流量关系定线

数据筛选与扩充：单独汇集所有小流量（如 $Q < 5 \text{ m}^3/\text{s}$ ）的实测数据。重点纳入通过水位面积流速增量法、靶向测量、触发式测验获取的新数据点，特别是那些揭示“趋零”非断流状态的值。

独立低水定线：仅针对低水段点据进行定线分析（可采用对数坐标轴、折线等）。严格核“0 m^3/s ”记录：

若原始水位记录显示当日水位有变化（非水平线），则“0”极可能是测不到所致。此时利用新方法估算值或水位变化反推微小流量进行修正。

若确系电站断流检修或河道干涸，需明确标注原因并记录水位特征。

评估下游控制作用：分析下游急弯在不同低水位级对水流的控制效果，评估其对稳定低水 $H-Q$ 关系的贡献，为定线提供物理依据^[3]。

（二）构建多元相关推流模型

主流关系改良 (Q_{out} vs Q)：维持 Q_{out} 与 Q 的主相关关系，但针对 $Q_{out} <$ 极小阈值（如 $1-2 \text{ m}^3/\text{s}$ ）的“微出库区间”，单独建立亚模型（如线性回归、幂函数拟合），专门描述电站泄放微小流量或接近零出库时的推流规律^[4-5]。

引入水位差 (H) 辅助：将本站水位 (H) 或其动态特征（如小时平均水位、日变幅）作为辅助变量，构建 $Q = f(Q_{out}, H)$ 形式的复相关关系。 H 能反映电站调度引起的瞬时水力状态，在小流量下显著提升模型的适应性与精度。

考虑时间滞后效应 (τ)：分析电站出库流量变化传播至本站的滞后时间 τ （小流量时传播可能更慢）。尝试建立 $Q(t) = f(Q_{out}(t - \tau))$ 模型，或直接在模型中引入时间滞后变量。

（三）零值数据的合理性校验与处理

当我们发现整编后的流量数据中出现“0 m^3/s ”（即完全断流）的记录时，绝不能直接采信，必须严格进行以下四步核查：

第一步：回溯原始水位变化

翻查当天原始水位记录：水位线是否上下波动过？

重点看：波动幅度是否超过 ± 1 厘米？哪怕微小变化也可能

说明有水在流动。

第二步：查证天气干扰

强风影响：是否出现6级以上的大风？强风可能把水面压低，导致测流不准。

降水/蒸发：当天是否下过雨（哪怕是小雨）？高温晴空下水面蒸发量是否异常增大？这两点都会干扰真实流量。

第三步：核实工程调度

查水电站公告：是否发布过“零出库”调度令？（部分电站会短期关闸蓄水）

检查设备日志：流量计是否处于检修状态？管道阀门是否被临时关闭？

第四步：查验实测记录

翻现场测流报告：当天有没有人工测量？

看垂线布点：测量点位是否覆盖了河道关键断面？

特别注意：测量员是否备注过“传感器异常”或“杂物堵塞探头”？

处理与修正方法：

若核查发现水位有波动、下过雨、无检修通告或测量覆盖不全，则“0”值很可能是误记！这时需采用以下技术手段修正：

水位增量推算法：根据水位变化幅度 + 河道横截面数据，倒推实际流量（比如水位涨2cm时，流量应至少为 $X \text{ m}^3/\text{s}$ ）。

多因子关联模型：结合天气、工程调度等多重因素，重新计算可能性最高的流量值。

关键操作：

所有修正值必须替换原始“0”记录。

在数据表备注栏逐条写明原因，例如：

“2023-07-15 记录 0 m^3/s 已修正为 0.8 m^3/s 。依据：当日实测水位波动3.5cm + 降雨记录5mm + 无电站关闸通告。”

四、应用展望与推广价值

本研究聚焦金沙江阿海站小流量监测与整编难题，提出的解决方案核心在于：

理念创新：通过时空“敏感点”识别，引导有限的监测资源精准投向微小水流最可能存续的区域和时段。

方法实用：“水位面积流速增量法”巧妙利用高精度水位数据和基本断面信息推算微小流速变化，设备依赖低（仅需提升水位监测精度），操作性强，有效弥补了传统流速仪的不足。

整编多元：摒弃僵化的单因子推流，建立包含精细化低水定线、微出库亚模型、水位差辅助及滞后效应的多元推流体系，显著提升小流量数据还原的真实性与连续性。

立足现实：充分利用阿海站现有缆道、流速仪、水位计等基础设施，通过优化方法逻辑和数据分析实现性能提升，无需大规模设备更新，成本效益高。

该方案具有广泛的推广价值，特别适用于以下类型的水文站：

受水利工程强烈调控的站点：如水库库区、大坝下游、梯级

电站间的水文站，其天然流态被工程调度扰乱，小流量失真问题普遍。

河床相对稳定但流量变幅巨大的站点：枯汛流量差异大，低水测验难度高，需针对性解决方案。

推进自动化、智能化监测的站点：高精度水位传感器、实时数据传输系统可与“敏感点识别+触发测验”逻辑无缝集成，实现小流量的高效、自动捕捉。

五、结论

小流量的精确监测与可靠整编，是实现水资源精细化管理、保障河流生态健康、支撑水利工程科学调度不可或缺的环节^[6-8]。以金沙江阿海站为代表的两坝间水文站，受梯级电站密集调控影响，常规流量监测方法在小流量（尤其是趋近于零）工况下面临严峻挑战，导致监测数据失真、整编推流失效，多次记录到异常的“0 m³/s”。

本研究紧扣阿海站实际问题，揭示了转子式流速仪在低流速下的技术局限、电站调度引发的天然流态紊乱以及单一相关推流模型在小流量区间的脆弱性等核心症结。创新性地提出基于时空“敏感点”识别的优化监测策略，尤其是利用高精度水位同步观测数据进行“水位面积流速增量法”计算，为捕捉微小流量变化提供了经济、实用、可靠的技术补充。在整编环节，通过建立精细化低水位-流量关系^[9-11]、针对电站微出库流量构建亚模型、融入本站水位辅助信息及时间滞后效应，形成了多元、灵活、适应性强的实用化推流体系，有效修正了“趋零流量”的异常记录，显著提升了小流量数据的连续性和可信度。

整套方案立足阿海站现有测验条件，方法逻辑清晰，操作性强，实施成本低，为解决水电站高度影响下河道枯水期水文资料质量问题提供了有效途径，对提升同类受工程影响水文站的小流量监测与整编能力具有重要的实践价值和推广前景。未来可结合物联网、大数据分析技术，进一步提升敏感点预警、触发响应和模型自优化的智能化水平。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 河流流量测验规范: GB 50179-2015[S]. 中国计划出版社, 2015.
- [2] 中华人民共和国水利部. 水文资料整编规范: SL/T 247-2020[S]. 奔流电子音像出版(北京)有限公司, 2020.
- [3] 李江艳, 刘洁, 王莉莉. 提高水文资料整编质量的分析与研究 [J]. 农村经济与科技, 2018, 29(06): 44-45.
- [4] 李荣荪. 飞来峡水文站低(枯)水期流量与飞来峡水利枢纽出库流量比测分析 [J]. 广东水利水电, 2015, (11): 16-18.
- [5] 商云笛, 韩先宇, 吴文勇. 二滩水电站枯水期尾水水位流量关系研究 [J]. 大坝与安全, 2021, (06): 14-16+27.
- [6] 丁俊凯. 云南中小河流水文监测系统水文测验方式研究 [J]. 云南水力发电, 2016, 32(05): 11-13.
- [7] 谢学成, 杨庆, 杜慧敏. 低流速条件下转子式流速仪测量误差分析与改进 [J]. 水文, 2021, 41(3): 78-82.
- [8] 郭文献, 王龙, 徐梦瑶. 水电工程影响下河道生态流量监测与调控研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4): 1-7.
- [9] 胡宝怡, 张金萍, 陈求稳. 基于高精度水位传感器的微流量监测方法研究 [J]. 水利学报, 2020, 51(8): 980-988.
- [10] 冯娟, 刘年, 周念来. 受水利工程扰动的水文站流量整编方法优化 [J]. 人民长江, 2019, 50(12): 95-99.
- [11] 刘晋, 黄强, 赵静. 智能传感与大数据在水文监测整编中的应用展望 [J]. 水利信息化, 2023, (2): 15-20.