

宽浅河道断面复杂工况下的 ADCP 实时流量监测策略及相向组合式应用

戴加远, 杨光, 毛威

(南京南瑞水利水电科技有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要 本研究探讨适用于宽浅河道断面复杂工况下的流量监测策略及应用方法, 结合场景 A 分析复杂工况下的流量监测工作难点, 提出基于 ADCP 声学多普勒流速剖面仪进行流量监测的技术策略, 并探讨其在相向组合式应用当中的应用流程。研究表明, 相向组合式应用方法能够测得不同工况下的断面处流量分布情况, 且对于各流层流速检测的标准差始终能控制在 0.3 m/s 以下。因此, ADCP 实时流量监测在宽浅河道断面复杂工况中具有显著的应用价值。

关键词 宽浅河道断面; ADCP 实时流量监测; 复杂工况; 相向组合式应用

中图分类号: TV8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.006

0 引言

ADCP 声学多普勒流速剖面仪作为主流的流量监测设备, 其因具备全剖面、高度自动化与不扰流等优势被广泛用于多类水体的流量监测工作中。然而, 宽浅河道断面复杂工况下的流量检测仍然对单探头 ADCP 流量检测产生限制, 检测过程受到声束覆盖范围影响, 难以得出精准反映声波信号质量的测流数据。基于此, 本研究从 ADCP 实时流量监测介入宽浅河道断面复杂工况的视角出发, 在构建实时流量监测策略的基础上, 对双探头相向组合式应用方法展开深入研究。

1 项目概况

场景 A 位于泵站与节制闸群联合调度的宽浅河道断面, 周边水工建筑物频繁启闭形成了复杂的非恒定流场, 当泵站进入抽排模式时, 高强度水流从泵口喷涌而出, 在河道右侧形成局部高速射流区, 流速峰值可达 2.0 m/s 以上, 同时裹挟大量气泡与悬浮泥沙向下游扩散。除此之外, 受河床地形与边界约束, 射流在行进约 80 ~ 120 m 后逐渐扩散, 与主流区发生剧烈掺混, 形成大尺度紊动涡街。

2 宽浅河道断面复杂工况下的流量监测难点

2.1 宽浅河道复杂水文条件影响监测精度

宽浅河道的流量测量场景具有宽深比大、流速垂向分布不均匀等特征, 在采用 ADCP 进行流量监测的过

程中, 复杂水文条件将严重影响其测量精度。例如: 场景 A 当中的河道水面宽达到 180 m、水深为 4 ~ 10 m、断面宽深比为 18:45, 属于典型的宽浅河道结构。河道中水流流速在垂向上的梯度变化十分显著, 当采用单点探头测量方法进行流量监测时, 其产生的各层流量标准差平均值将超过 1.0 m/s, 严重影响测流结果精度。

2.2 多闸泵联合调度下出现流场扰动

宽浅河道通常位于水利枢纽调控河段位置, 在运行管理过程中, 水利枢纽的多闸泵群联合调度行为造成河道水流出现非恒定流或局部流场变化现象^[1]。如节制闸引水造成主流位置频繁变动、泵站抽影导致水流流向紊动。在此背景下, 传统 ADCP 流量监测在固定位置进行测流时难以精准捕捉参数信号, 河流中的水体紊流现象造成流场扰动, 导致水体散射体浓度分布不均, 而借助 ADCP 进行流量监测时的声波后向散射强度因此大幅衰减, 得出的流量估计值出现明显误差。

2.3 测流环境复杂引发监测盲区

在 ADCP 测量参数设计误差的情况下, 针对宽浅河道断面复杂工况的流量检测常出现检测盲区问题, 即因测量量程不足引发的空间盲区以及波束覆盖范围受限引发的环境干扰盲区^[2]。在处理浅水环境的流量监测方面, 水体环境内的底边界反射容易对回波信号产生混响干扰, 导致在采用 ADCP 进行流量监测时出现远

作者简介: 戴加远 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水文水资源监测。

距离急剧衰减现象,继而影响多普勒频率的稳定性,最终出现大量监测盲区。

3 ADCP 实时流量监测技术策略分析

3.1 利用信号编码提升监测精度

针对宽浅河道断面流态复杂、垂向流速梯度显著的应用场景,为保障固定式 ADCP 单元流速测量的精度与稳定性,监测人员需优化其发射信号的编码结构^[3]。例如:在固定断面在线监测中,监测人员可采用如巴克码的相位编码信号或相干脉冲串作为主要发射波形,并合理设置码元宽度、编码位数与相干脉冲数,确保其能够在既定功耗与数据更新率约束下,有效提升信号处理估计精度。

3.2 优化多频多信号发射频率用于应对流场扰动

宽浅河道断面的水文条件与散射体特性容易受到上游调度、降雨等因素影响,导致监测工作出现环境快速变化现象,继而引发监测中声波传播衰减以及后向散射强度不稳定情况^[4]。为增强 ADCP 系统对此类环境扰动的适应能力,监测人员可采用多频发射自适应选择模式进行监测实践。在应用实践中,不同频率的声波在水体中的传播损耗存在显著差异,如 300 kHz 的较低频率对应的声波衰减慢、穿透力强,更适用于需要较长探测距离的监测工况,而 600 kHz 及以上的较高频率则对应更短的波长以及高距离分辨率,在近场测量中能够保持最优信噪比。

3.3 针对监测盲区进行监测参数自适应调整

流量监测工作中应当针对存在的监测盲区现象,制定监测参数自适应调整策略予以应对,借此解决流量数据缺失、检测数据质量下降等关键问题^[5]。如图 1 所示,图中为在浅水环境下应遵循的发射信号设计流程,根据图中流程方法,监测人员应当基于过渡带效应进行分层厚度决策,并通过匹配滤波方法实时感知测量底深。

4 ADCP 监测在宽浅河道断面复杂工况下的相向组合式应用实践

4.1 相向组合式系统架构设计

监测人员在场景 A 中选择相向组合式系统架构设计方法,在河道两岸对称布设两个 ADCP 探头,使其声束保持相向交叉发射关系。为了确保双探头各距离单元采集的流量、回波强度数据能够做到零误差,相关人员通过设置数据采集单元,通过 4G 网络将 ADCP 系统与监测平台相连接,保证探头测得的数据通过 4G 网络

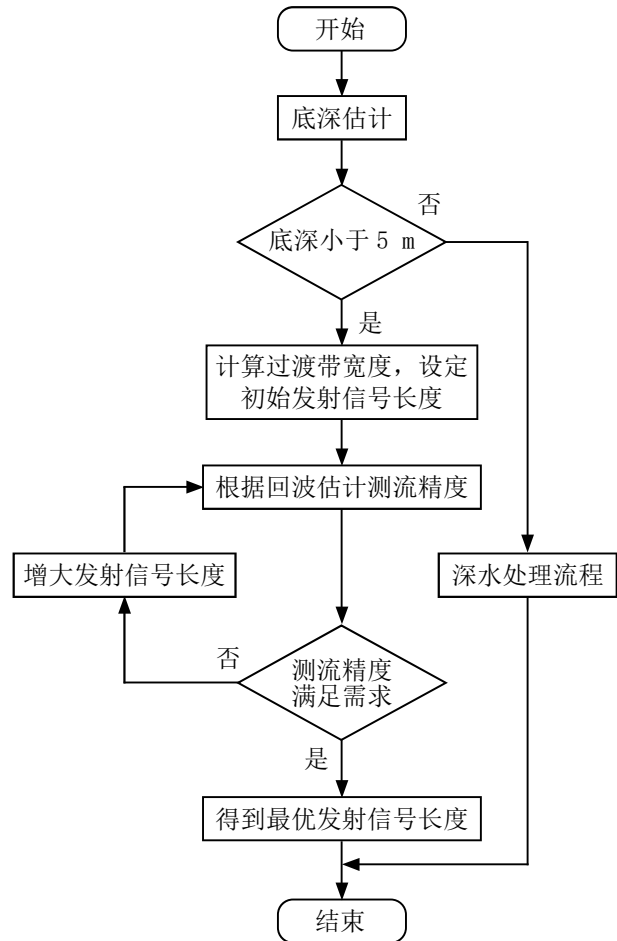


图 1 浅水环境下的发射信号设计流程

传递至监控中心。在硬件集成架构设计方面,系统采用模块化设计方法,其双探头通过电缆实现与岸上控制箱紧密连接,控制箱内嵌入工业级处理器,负责支持流量监测数据交互,为复杂工况下的高精度流量监测提供硬件基础。

4.2 流场适应处理下的安装优化

一方面,安装高度将影响 ADCP 声束的有效覆盖范围,在场景 A 的 ADCP 安装实践中,相关人员按照标准高程数据进行安装工作,为了避开表层波动与近底紊流影响,相关人员将探头置于相对水深 60% 位置,安装高程随水位变化控制在 $-3.342 \sim -2.492$ m 之间。另一方面,为了有效降低安装工程的复杂程度,相关人员采用优化固定安装高程的安装方案,确保安装高度在最低水位至最高水位区间之内,并且仍处于主流层范围内。ADCP 探头通过倾斜支架固定于栈桥前端,保持中心位置位于河底,用于增强不同水位下的测量一致性。

4.3 数据处理及流量推算

在优化多频多信号发射频率的背景下，场景 A 中对相向组合式 ADCP 系统进行双指标流量提取，为后续推算高精度流量数据奠定基础。首先，在数据预处理与单元筛选阶段，监测区域安装的每个 ADCP 探头能够获取 80 ~ 90 个距离单元的瞬时流量数据，根据流产分析结果确定断面主流集中在 30 ~ 145 m 区间，借助上述有效流量单元覆盖监测的主流区域。在此基础上，监测过程中对每个单元流量序列进行空间平均处理，得到的指标流速数据通过式 (1) 所示的计算方法，转化为断面平均流速，在组合关系系数接近 1 的情况下，选取对应的流速数据组合作为最终数据。在此基础上，监测实践中将左、右岸 ADCP 探头获取的单元流速数据与其地理坐标映射至统一的断面网格中，用于构建完整的二维流速分布场，针对左、右岸探头波束在断面中泓区域形成的交叉覆盖段，监测过程中采用基于信噪比与波束入射角加权的数据融合算法对重叠单元流速进行分析，对应的网格单元水体面积总和为测得流量。

$$\bar{V} = a \left[\frac{V_{ep1} + V_{ep2}}{2} \right]^b \quad (1)$$

式 (1) 中， \bar{V} 表示断面平均流速，m/s； V_{ep1} 表示左岸 ADCP 指标流速，m/s； V_{ep2} 表示右岸 ADCP 指标流速，m/s； a 表示相关系数； b 表示指标系数。

4.4 多工况下的 ADCP 监测效果分析

在完成流量数据提取后，研究针对场景 A 当中的两种典型调度工况进行特征分析，即 1 170 m³/s 与 2 237 m³/s 工况下的断面处流速，前者工况为节制闸引水区域（水流偏左侧，流速分布均匀）、后者工况则为泵站抽排水区域（主流偏右侧，泵口附近紊动显著）。综合流速分布数据得出，1 170 m³/s 工况下的左岸探头在主流区信号较为稳定，单元流速标准差在 0.15 ~ 0.25 m/s 之间；右岸探头在非主流区流速较低，但数据具有良好一致性。2 237 m³/s 工况下的右岸探头在主流区信号强度高，部分单元回波信噪比波动大；左岸探头在非主流区能够稳定采集低流速数据，与其他探头实现空间互补。如表 1 所示，监测工作针对测区内第一至第六层水层进行流速监测（水面依次向河底方向延伸的水层），数据显示，传统固定频率与信号形式下的 ADCP 采集（使用单一固定发射频率和固定信号 7 位巴克码的编码形式，系统参数不随环境变化而调整）流速标准差显著高于多频多信号 ADCP（研究中基于双探

头相向组合式布置，动态选择最优发射频率、编码形式和信号时长的形式）对应的标准差结果，表明双探头相向组合式测量方法在流量监测中的精度更高，即使在底层流速测量中仍能保持 0.187 m/s 的较低测量标准差，综合显示相向组合式 ADCP 在宽浅河道多变的调度工况下仍然具有较好的流量监测适应性。

表 1 各流层流速标准差对比

层数	传统 ADCP 标准差 (m/s)	多频多信号 ADCP 标准差 (m/s)
第一层	0.294	0.185
第二层	0.308	0.196
第三层	0.443	0.205
第四层	0.456	0.212
第五层	0.449	0.214
第六层	0.512	0.187

5 结束语

在宽浅河道复杂工况的影响下，传统 ADCP 流量监测实施效果受到显著影响。本研究在采用 ADCP 进行流量监测的同时，运用双探头相向组合式测量方法进行监测实践，并在实际案例中证实该方法的有效性。未来，研究将聚焦不同水体监测工况，对 ADCP 实时流量监测介入下的关键技术策略进行深入探究，构建完善的 ADCP 实时流量监测技术体系，为推动水体流量监测工作实现高质量发展奠定基础。

参考文献：

- [1] 李雨, 卢满生, 白亮. 河流流量在线监测研究现状与展望 [J]. 水利水电快报, 2025, 46(10): 54-60.
- [2] 刘丰. 基于 ADCP 的在线流量监测关键技术应用 [J]. 上海师范大学学报 (自然科学版中英文), 2025, 54(05): 607-616.
- [3] 毕博, 毕栋. 河道断面测量在水资源调度与管理中的应用研究 [J]. 水上安全, 2025(15): 144-146.
- [4] 钱睿智, 傅国圣, 王江, 等. 双探头 H-ADCP 在宽浅河道断面复杂工况下实时流量监测的相向组合式应用 [J]. 水电能源科学, 2025, 43(09): 6-10.
- [5] 王刚, 苗宝文, 赵倩. 河道流量自动监测系统流速流量率定模型简析 [J]. 现代盐化工, 2024, 51(06): 42-44.