

缆道式 ADCP 测流在宁夏七星渠干渠上的应用

杨绍军 陈晓梅

宁夏七星渠管理处

DOI:10.32629/etd.v6i11.17489

[摘要] 随着水资源精细化管理需求提升,传统水文测量法难满足现代化灌区建设。本文以宁夏七星渠干渠为研究对象,探讨缆道式ADCP的应用潜力,分析其在复杂河流环境的适用性,提出优化方案与方法。研究显示,缆道式ADCP在七星渠的应用,可显著提高水文测量效率与精度,为水资源精准调度、水费公平计收提供可靠数据,也为黄河流域高含沙流量监测提供可推广的技术方案。

[关键词] ADCP; 七星渠; 缆道测流; 水资源管理; 比测分析; 技术创新

中图分类号: TV133.2 **文献标识码:** A

Application of Cableway-Mounted ADCP Flow Measurement on the Main Canal of Ningxia Qixing Canal

Shaojun Yang Xiaomei Chen

Ningxia Qixing Canal Management Office

[Abstract] With the increasing demand for refined water resource management, traditional hydrological measurement methods struggle to meet the requirements of modern irrigation district construction. This study takes the main canal of Ningxia Qixing Canal as the research object, explores the application potential of cableway-mounted ADCP, analyzes its adaptability in complex river environments, and proposes optimization schemes and methods. Research indicates that the application of cableway-mounted ADCP in Qixing Canal can significantly improve the efficiency and accuracy of hydrological measurements, provide reliable data for precise water resource scheduling and equitable water fee assessment, and offer a replicable technical solution for high-sediment flow monitoring in the Yellow River Basin.

[Key words] ADCP; Qixing Canal; Cableway Flow Measurement; Water Resource Management; Comparative Measurement Analysis; Technological Innovation

引言

七星渠是建于公元前100年、拥有2100多年历史的无坝引黄古渠,干渠设计引水能力 $58\text{m}^3/\text{s}$,年均引水量 $8.45\text{亿}\text{m}^3$,承担着宁夏沙坡头区、中宁县及同心扬水、固海扩灌、红寺堡三大扬水工程共210万亩农田灌溉和人畜饮水的供水保障任务,是宁夏中部干旱带经济社会发展的重点水源工程,有“塞北都江堰”之称,也是世界灌溉工程遗产重要部分。随着水资源管理要求提升,传统人工测流难满足需求,原有流速仪法问题多。2024年在宁夏七星渠4个干渠断面引入缆道式ADCP,本文将分析其应用,为推广提供参考。

1 ADCP测流技术原理

1.1 ADCP技术原理。ADCP借助声学多普勒原理测量水流速剖面,向水中发射固定频率声波脉冲,声波遇泥沙、浮游生物等散射体后散射,ADCP接收回波并分析多普勒频移—散射体朝向仪器时回波频率升高,背离时降低。结合声波发射频率、声速等参数,可算出水流相对ADCP的速度。

ADCP换能器兼具发射与接收功能,与水流方向以特定夹角发射声束,根据波束方向的多普勒频移计算水流流速。

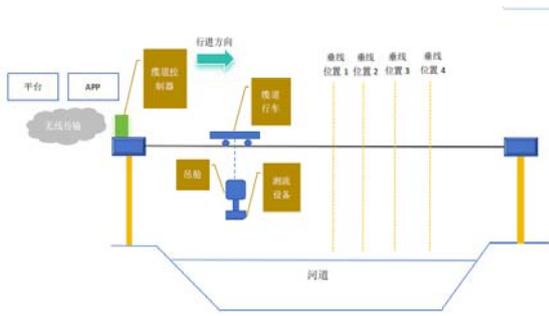
1.2 缆道式ADCP的技术优势。在七星渠此类引黄灌区,缆道式ADCP相比传统测流方法及其他ADCP优势显著:一是测量精度高,通过多垂线、多单元测量,依托数万数据点积分算流量,减少人为与理论假设误差;二是自动化程度高,可定时、定点自动测量,降低人工干预;三是适应复杂环境,能应对河道流速变化大、泥沙含量高的情况;四是安全性好,人员无需涉水,降低安全风险;五是数据维度丰富,可获取全断面流速分布云图,为水资源精细化管理提供支撑^[1]。

2 缆道式ADCP在七星渠的应用

2.1 断面选择。根据七星渠实际运行需求和水流特性,选择龙王庙、宏爱、高渠口、潘营桥4个关键测水断面进行缆道式ADCP系统建设。所有选定断面均位于顺直、均匀的渠段,有效避开了弯道、涡流、浅滩、淤积及分流等流态复杂区域,从而保证了水

流的平稳性与代表性,满足规范对“测流断面应垂直于平均流向,且水流条件良好”的核心技术要求。

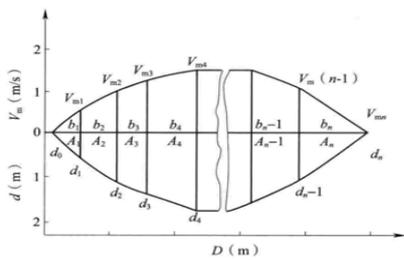
2.2 技术选型。(1) ADCP设备。选用高精度、宽量程ADCP,依据断面水深与流速特性确定工作频率,确保在20-30米水深条件下精准测量各水层流速,测量精度在±5%以内。设备具备强抗干扰能力,适应含沙量高、流态复杂的水文环境。(2) 缆道系统。缆道主体采用高强度合金支架与耐腐蚀钢丝绳,保障结构稳定与耐久性。自动行车系统集成伺服电机与高精度编码器,实现厘米级精确定位,满足ADCP断面扫描的位置控制要求。(3) 软件平台。基于微服务架构构建管理平台,后端采用Java与SpringCloud框架支持分布式部署,前端使用Vue.js与ElementUI实现友好人机交互。数据库采用MySQL集群与InfluxDB时序数据库协同管理结构化与非结构化数据,全面提升系统数据处理与存储效率。



2.3 技术原理。缆道式ADCP自动测流系统融合机械自动化、传感器等技术,实现河(渠)道流量自动监测,核心原理如下:

缆道自动运行:以伺服电机为驱动,高精度编码器监测位置与移动距离,控制系统按预设方案,控制缆道带动ADCP沿断面横向移动、定位,确保设备处于最佳测量位置。

数据采集:ADCP依据多普勒效应,发射超声波测量反射波频移计算不同深度流速;雷达水位计发射电磁波,借回波时间差算水位。



数据传输:采用4G传输模式,辅以信号增强与缓存以防数据丢失。

数据处理及流量计算:先校验预处理数据去异常,再依水力学原理,用 $Q=v \cdot A$ 公式,将断面划单元测流速与面积,累加得总流量^[2]。

ADCP流速计算公式为:

$$V = \frac{F_d \cdot C}{2F_d \cos(A)}$$

式中,V为水流速度;C为ADCP换能器表面处的声速; F_d 为ADCP发射的声波频率;A为波束方向与流速方向的夹角; F_d 为多

普勒频移。

断面流量计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n v_i \times A_i$$

其中,Q为断面流量; v_i 为第i个单元的平均流速; A_i 为第i个单元过水面积。

3 应用效果分析

3.1 测量精度分析。2025年4-6月,对4个断面开展缆道式ADCP(在线ADCP)与走航式ADCP、人工流速仪法比测,获55组有效数据,依据《GB/T21303-2017》评价精度。

龙王庙断面:在线与走航ADCP比测,测流误差-4.22%~4.91%(±3%内占85%),断面面积误差-1.80%~1.48%,平均流速误差-4.79%~4.92%;与人工比测,测流误差-1.17%~4.52%,数据稳定。

高渠口断面:在线与走航ADCP比测,测流误差0.26%~4.0%(优化算法后≤3%);与人工比测,测流误差-1.15%~3.37%,断面面积误差-2.08%~4.69%,误差均在±5%内。

潘营桥断面:在线与走航ADCP比测,测流误差-2.74%~3.77%,因平均流速偏大2次误差超5%,修正后其余≤4%,数据合理。

红崖断面:在线与走航ADCP比测,测流误差-1.17%~4.65%,断面面积误差-2.38%~3.92%,数据稳定。

综合来看,缆道式ADCP在七星渠干渠测流精度超95%,优于传统人工法,满足规范要求。

3.2 测量效率提升。缆道式ADCP的自动化测量和数据处理功能显著提高了测量效率。传统人工流速仪法完成一次全断面测量需要1-2小时,而缆道式ADCP系统实现“一键施测”,3分钟即可完成一次全断面测流,测量效率提升20-40倍。

系统具备定时、远程及事件触发能力,可实现无人值守连续监测。2025年夏秋灌期间,4个断面设备畅通率达到97.40%-98.65%,高于《水文自动测报系统技术规范》(GB/T41368-2022)95%的要求,为水量调度提供了及时、连续的断面流量信息^[3]。

3.3 数据应用价值。缆道式ADCP测量数据为七星渠干渠的水资源管理提供了重要依据。通过分析测量数据,能够更好地掌握渠道流量变化规律,优化水量调度,提高水资源利用效率。

(1) 精准调度。实际运行中ADCP设定每30分钟传输一次数据,调度中心可随时获取最新断面流量,据此调整上下游直开口、闸门,实现了从“经验调度”到“数据驱动调度”的转变。2025年夏秋灌运行期间,各断面交水保证率达到了95%以上,同心扬水、固海扩灌、红寺堡扬水供水保障率达到100%。(2) 公平计量。系统测量全程自动执行,数据从传感器产生后直接传输至中心数据库,无人干预环节,确保了数据的原始性和真实性。系统完整保存每一次测量的原始数据,形成不可篡改的“铁账本”计量体系,为水费公平计收提供了权威依据。(3) 运维方便。ADCP在测量流速的同时,基于回声强度分析技术,可同步在线监测渠道淤积状况与断面形态变化,为“精准计量”提供直接科学依据,实现断面从“被动清淤”到“主动计算”的转变。

高渠口断面比测记录表(部分)

序号	测次	日期	时间	比测类型	流量(m ³ /s)	断面面积(m ²)	平均流速(m/s)	最大水深(m)	备注
1	/	2025年5月 19日	11:00-11:40	人工	10.49	15.98	0.66	1.7	符合规范要求
				在线	10.68	15.4	0.69	1.63	
				差值	0.19	-0.58	0.03	-0.07	
				误差	1.81%	-3.63%	4.55%	-4.12%	
2	/	2025年5月 20日	7:00-7:30	人工	10.27	15.77	0.65	1.68	符合规范要求
				在线	10.25	15.03	0.68	1.61	
				差值	-0.02	-0.74	0.03	-0.07	
				误差	-0.19%	-4.69%	4.62%	-4.17%	
3	/	2025年5月 21日	9:57-10:45	人工	29.95	27.39	1.09	2.54	符合规范要求
				在线	30.25	26.54	1.14	2.45	
				差值	0.3	-0.85	0.05	-0.09	
				误差	1.00%	-3.10%	4.59%	-3.54%	
4	/	2025年5月 22日	10:08-10:44	人工	30.68	28.59	1.09	2.58	符合规范要求
				在线	31.07	27.74	1.12	2.53	
				差值	0.39	-0.85	0.03	-0.05	
				误差	1.27%	-2.97%	2.75%	-1.94%	
5	/	2025年5月 23日	8:52-9:44	人工	37.49	31.95	1.17	2.79	符合规范要求
				在线	37.53	30.94	1.21	2.69	
				差值	0.04	-1.01	0.04	-0.1	
				误差	0.11%	-3.16%	3.42%	-3.58%	

4 创新性与技术优势

4.1 技术范式变革。融合缆道水平移动与ADCP垂直剖面测量能力,创新“剖面扫描式”测流,ADCP水平移动时持续测垂直流速剖面,生成“流速云图”,实现从间接推算到直接三维扫描的转变,基于大量数据点积分算流量,减少误差,提升可靠性。

4.2 一体化精准测量体系。结合高精度绝对编码器定位(直联电机,上电获绝对位置,无打滑、断电误差,定位精度±1厘米内)与“位置-水深同步触发机制”(到位稳定后同步触发水位读取与ADCP测量),实现时空同步匹配,避免断面面积计算误差。

4.3 自适应智能数据处理算法。针对非理想流态,弃固定经验公式,创新“多层级数据过滤(按相关性剔除无效数据)、剖面流速优化拟合(自适应加权积分算垂线平均流速)、边界影响补偿(插值补盲区流速)”算法,自适应复杂流况。

4.4 功能拓展与系统集成。拓展ADCP功能,实现淤积态势在线感知、断面形态监测;通过环境适应性设计、抗风稳摆与智能诊断,保障恶劣环境下365天×24小时运行,运维转主动干预;针对高含沙水情,优化信号与数据处理,克服干扰,形成黄河流

域高含沙水流测流标准。

5 结束语

缆道式ADCP测流在宁夏七星渠干渠的应用,以高精度、高效率的声学传感技术破解了传统测流中水流扰动大、数据采集难等痛点。通过缆道载体与ADCP的深度耦合,实现了复杂水流环境下的稳定测量,尤其在低水位、含沙量波动等场景中展现出显著优势。这一技术革新不仅提升了七星渠灌区水资源调配的精准度,更为古老水利工程注入智慧基因,成为宁夏水利现代化转型的生动实践。

[参考文献]

- [1]李明,王强.缆道式ADCP在水文测量中的应用研究[J].水利科技,2020,45(3):45-50.
- [2]王伟,张丽.黄河流域水文测量技术发展现状与展望[J].黄河水利,2021,36(2):23-28.
- [3]刘洋,陈刚.声学多普勒流速剖面仪在复杂河流环境中的应用[J].水利学报,2022,47(4):78-85.