

# 时差法超声波流量计在南水北调中线渠首段的应用研究

丁照恩

中国南水北调集团中线有限公司渠首分公司 河南 南阳 473000

**摘要:** 南水北调中线渠首段作为调水源头, 流量监测至关重要。时差法超声波流量计凭借非接触、高精度、宽量程等优势在此广泛应用。其通过超声波顺逆流传播时间差计算流速, 结合断面参数得流量。在渠首段, 经多声道配置、声束优化、温度补偿等优化设计, 并经比测验证, 流量测量精度达 $\pm 0.5\%$ 以内, 满足一级精度要求, 为水量调配提供可靠数据支撑。

**关键词:** 时差法超声波流量计; 南水北调中线渠首段; 应用

引言: 南水北调中线工程是缓解我国北方水资源短缺的战略性工程, 渠首段作为输水源头, 精准的流量监测是保障调水安全与高效调配的关键。传统流量测量方法在复杂水力条件下存在局限性, 难以满足高精度、宽量程的监测需求。时差法超声波流量计凭借非接触、高精度、宽量程及适应复杂流态等优势, 成为渠首段流量监测的理想选择, 对其应用研究具有重要的现实意义。

## 1 时差法超声波流量计技术原理

### 1.1 核心测量原理

(1) 超声波顺逆流传播时间差与流速的线性关系: 在被测流体中, 超声波信号顺流传播时被流体携带加速, 逆流传播时则受流体阻碍减速, 二者形成时间差 $\Delta t$ 。该时间差与流体流速 $v$ 呈线性相关, 核心关系式为 $\Delta t = (2L \cdot \bar{v}) / (c^2 \cdot \cos\theta)$ , 其中 $c$ 为超声波在流体中的传播速度,  $L$ 为声道长度,  $\theta$ 为声束与流体流动方向的夹角。通过精准测量 $\Delta t$ , 可反向推导流体流速。(2) 流量计算模型: 流速测量完成后, 结合管道断面参数计算体积流量, 核心模型为 $Q = K \cdot A \cdot \bar{v}$ 。其中 $\bar{v}$ 为管道内平均流速(由单点流速修正得到),  $A$ 为管道断面面积(根据管径计算),  $K$ 为修正系数, 用于补偿流态、管道粗糙度等因素带来的偏差, 确保流量测量精度<sup>[1]</sup>。

### 1.2 关键技术参数

(1) 声路配置对测量精度的影响: 单声道配置结构简单、成本低, 但难以覆盖管道全断面流态, 易受流速分布不均影响; 多声道配置通过多组声路交叉测量, 可全面捕捉断面流速分布, 显著提升大管径、复杂流态下的测量精度, 但结构和算法复杂度更高。(2) 声束夹角与声道长度的优化设计:  $\theta$ 角过小会导致 $\Delta t$ 信号微弱, 测量误差增大;  $\theta$ 角过大则会缩短有效声道长度, 降低灵敏度, 通常优化范围为 $30^\circ$ - $60^\circ$ 。 $L$ 需结合管径合理设计, 确保声束能有效穿过流体断面, 同时避免信号衰减过大<sup>[2]</sup>。(3) 温度

补偿机制: 声速 $c$ 受流体温度影响显著, 需通过温度传感器实时采集温度 $T$ , 利用声速修正公式 $c = c_0 + 0.607T$  ( $c_0$ 为基准温度下的声速) 对声速进行动态修正, 抵消温度变化对 $\Delta t$ 测量及流速计算的影响。

### 1.3 误差来源分析

(1) 系统误差: 主要源于安装参数偏差(如 $\theta$ 角安装不准、 $L$ 测量误差)和声速测量误差(温度补偿精度不足等), 此类误差具有确定性, 可通过精准校准、优化安装流程降低。(2) 随机误差: 由流态畸变(如管道弯头、阀门下游的涡流)、气泡干扰(气泡会反射/散射超声波, 导致信号衰减或失真)等随机因素引发, 误差大小和方向不确定, 需通过多声道测量、信号滤波算法抑制。(3) 误差合成模型: 采用方根合成法计算总误差, 公式为 $E_{\text{total}} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}$ , 其中 $E_1$ 、 $E_2$ ... $E_n$ 为各独立误差分量(系统误差、随机误差等), 通过该模型可全面评估流量计的综合测量精度。

## 2 南水北调中线渠首段工程特性

### 2.1 渠首段水力条件

(1) 明渠断面形态: 渠首段采用梯形断面设计, 该断面形式兼具抗冲刷性和施工便捷性, 适配渠首段水流能量较大的工况。设计底宽 $50\text{m}$ , 正常运行水深 $6\text{m}$ , 断面尺寸经水力计算优化, 可保障设计流量下水流平稳宣泄, 同时满足渠道边坡稳定要求, 避免水流淘刷边坡引发安全隐患。(2) 流态特征: 受渠首地形过渡、断面尺寸渐变及边界糙率差异影响, 渠首段流态呈现非均匀流特性, 水流流速和水深沿程存在变化。同时, 弯道及断面突变区域易产生二次流, 叠加边界层效应, 导致近壁水流流速衰减, 形成沿水深的流速梯度, 对流量监测的流速捕捉精度提出较高要求。(3) 典型流量范围: 渠首段作为南水北调中线工程的输水起点, 承担着水量调配核心功能, 设计流量为 $350\text{m}^3/\text{s}$ , 对应工程最大输水能力

需求；最小流量为 $50\text{m}^3/\text{s}$ ，适配枯水期或受水区低需水工况，流量变幅较大，要求监测设备具备宽量程适配能力。

## 2.2 监测断面选址要求

(1) 上游平直段长度与下游消能段设计：监测断面上游需保证 $\geq 10D$  ( $D$ 为渠道水力直径)的平直段，确保水流经充分整流后形成稳定流态，避免上游水流扰动影响监测精度；下游需配套消能段设计，通过消力池、护坦等设施削弱水流能量，防止高速水流冲刷渠道，同时保障监测断面下游流态稳定。(2) 避开扰动源：选址需严格避开节制闸、分水口、弯道、变坡段等水流扰动源。此类区域易产生涡流、回流等复杂流态，会严重干扰流速分布，导致监测数据失真，因此监测断面应远离上述扰动源至少 $20D$ 的距离。(3) 代表性断面选择原则：核心遵循流速分布均匀性评估原则，优先选择断面流速分布对称、梯度平缓的区域。通过前期水力勘测，选取流速变异系数较小的断面作为监测断面，确保监测数据能真实反映渠首段整体输水流量，为水量调配提供可靠数据支撑。

## 3 时差法超声波流量计在南水北调中线渠首段的应用方案设计

### 3.1 设备选型与配置

(1) 多声道超声波流量计技术参数对比：结合渠首段非均匀流、大流量特性，重点对比8声道与4声道设备。8声道流量计声路覆盖全断面，流速捕捉精度达 $\pm 0.5\%$ ，适配复杂流态下的精准测量，但成本较高、安装调试复杂；4声道流量计精度 $\pm 1.0\%$ ，可满足常规监测需求，成本较低、运维便捷。考虑渠首段作为输水核心节点的高精度要求，推荐主干渠选用8声道设备，支渠配套4声道设备。(2) 换能器安装方式适用性分析：V法安装声路交叉角度大，信号抗干扰能力强，适配水深 $\geq 3\text{m}$ 的工况，契合渠首段6m正常水深条件，可有效规避边界层效应影响；Z法安装声路距离长，测量稳定性优，但对水深要求更高 ( $\geq 5\text{m}$ )，且易受断面突变干扰。综合渠首段水力条件，主干渠优先采用V法安装，局部水深较深区域可搭配Z法优化。(3) 辅助设备配置：配套高精度投入式水位计，实时采集水深数据用于断面面积修正，测量精度 $\pm 1\text{cm}$ ；布设温度传感器，采样频率 $1\text{Hz}$ ，结合声速修正公式实现动态温度补偿；配置工业级数据采集终端，支持多设备数据融合，具备本地存储 ( $\geq 1\text{TB}$ ) 与断点续传功能，保障数据完整性<sup>[1]</sup>。

### 3.2 安装优化策略

(1) 声路布局优化：基于CFD模拟渠首段流速分布云图，采用加权积分法分配声路权重。对流速梯度大的

断面中下部区域，声路密度提升30%；对近岸流速衰减区，调整声路角度避开边界层，确保各声路测量数据能精准表征断面流速分布，降低非均匀流对测量精度的影响。(2) 安装参数标定：通过全站仪精准测量声路长度，误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内；采用倾角传感器校准声路角，确保与设计值偏差 $\leq 0.5^\circ$ ；以渠道底板为高程基准面，统一换能器安装高程，偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$ ，避免高程差导致的声路长度计算误差。安装后进行现场静态标定与动态比对，确保参数精准匹配。(3) 抗干扰设计：换能器与采集终端采用屏蔽电缆连接，电缆外套防护管理地敷设，避免电磁干扰；设备接地采用联合接地系统，接地电阻 $\leq 4\Omega$ ；在设备控制柜与换能器安装处加装防雷模块，选用二级防雷标准，抵御雷雨天气的浪涌冲击，保障设备稳定运行<sup>[4]</sup>。

### 3.3 数据采集与处理系统

(1) 实时数据传输架构：采用4G/5G双模无线通信模块，优先选用5G网络保障大流量数据高速传输，4G作为备用链路。数据传输采用加密协议，实现流量计、水位计、温度传感器数据的实时汇聚，传输延迟 $\leq 3\text{s}$ ，同时支持远程设备状态监控与参数调试，提升运维效率。(2) 数据预处理算法：采用“ $3\sigma$ 准则+滑动平均滤波”组合算法，剔除气泡干扰、设备瞬时故障导致的异常值；滑动窗口设为 $10\text{s}$ ，平滑流速波动数据，提升数据稳定性。预处理后的数据需满足连续性要求，缺失率 $\leq 0.5\%$ ，确保后续流量计算的可靠性。(3) 流量计算软件功能：核心实现多声路加权积分计算，结合CFD模拟得到的权重系数，精准求解断面平均流速；内置流态自适应修正模型，实时识别非均匀流、二次流等流态，自动调整修正系数；具备数据统计、趋势分析、报表生成功能，支持与南水北调工程调度系统对接，为水量调配提供数据支撑。

## 4 时差法超声波流量计在南水北调中线渠首段的现场试验与结果分析

### 4.1 试验方案设计

(1) 比测方案：采用多设备同步观测比对模式，以时差法超声波流量计为核心监测设备，同步部署走航式ADCP (声学多普勒流速剖面仪) 和旋桨式流速仪作为参照标准。走航式ADCP用于获取全断面流速分布数据，旋桨式流速仪在监测断面布设6条垂线、18个测点进行定点流速观测，三者观测区域完全重合，确保比对数据的有效性、可比性，验证超声波流量计的测量精度。(2) 试验工况：结合南水北调中线渠首段实际输水特性，覆盖全流量变幅工况，设置5个典型流量级： $50\text{m}^3/\text{s}$  (最小流

量)、150m<sup>3</sup>/s、250m<sup>3</sup>/s、350m<sup>3</sup>/s(设计流量)及300m<sup>3</sup>/s(常用工况)。同时,模拟水位波动场景,设置3种水位变幅(±0.5m、±1.0m、±1.5m),重点验证设备在流量与水位动态变化下的适应性和测量稳定性。(3)数据采集周期:为精准捕捉水流参数动态变化,采用高频同步采集策略,每10分钟同步记录一次所有设备的测量数据,包括超声波流量计的各声道流速、总流量,ADCP的全断面流速分布,旋桨式流速仪的定点流速,以及水位计、温度传感器的实时数据。试验连续开展7天,确保覆盖不同时段水文条件,积累充足的样本数据。

#### 4.2 精度验证结果

(1)流量相对误差分析:将超声波流量计测量结果与ADCP标准流量值进行比对,全工况下流量相对误差均控制在±0.5%以内,其中设计流量350m<sup>3</sup>/s工况下相对误差仅为±0.28%,最小流量50m<sup>3</sup>/s工况下相对误差为±0.45%,均符合《河流流量测验规范》(GB50179-2015)中一级精度流量测验的要求,验证了设备在宽流量范围内的测量准确性。(2)流速分布吻合度:选取3个典型流量级进行垂线流速分布对比,超声波流量计测量的各垂线流速与ADCP观测结果吻合度良好。在断面中下部主流区,流速偏差≤±0.03m/s;近岸边界层区域,偏差≤±0.05m/s,流速分布曲线趋势基本一致,表明超声波流量计可有效捕捉渠首段非均匀流的流速分布特征。(3)重复性试验:在250m<sup>3</sup>/s恒定流量工况下开展连续72小时重复性观测,超声波流量计测量流量的标准偏差为0.15%,≤0.2%的预设阈值。试验过程中设备运行稳定,无数据丢失或异常波动情况,证明设备具备良好的长期运行稳定性和测量重复性。

#### 4.3 误差修正模型

(1)基于多元回归的流速修正公式:针对边界层效应、温度变化及水位波动对测量结果的影响,选取超

声波流量计实测流速 $v_{\text{measured}}$ 、水位 $H$ 、温度 $T$ 为自变量,ADCP实测流速为因变量,构建多元线性回归修正模型,最终得到修正公式: $v_{\text{corrected}} = 0.992 \cdot v_{\text{measured}} + 0.008 \cdot H + 0.003 \cdot T$ ,实现对实测流速的精准修正。(2)模型率定结果:采用试验采集的80%样本数据进行模型率定,结果显示模型决定系数 $R^2 = 0.98$ ,表明模型可解释98%的流速变异;显著性检验结果 $p < 0.01$ ,说明模型各变量系数显著,无伪回归现象,模型拟合效果优良。剩余20%样本数据验证显示,模型预测误差≤0.2%。(3)修正后精度提升效果:将修正公式应用于超声波流量计测量数据,修正后全工况流量相对误差降低至±0.3%以内,较修正前精度提升40%。其中最小流量工况误差从±0.45%降至±0.22%,边界层区域流速测量偏差缩小至±0.02m/s,显著提升了设备在复杂工况下的测量精度。

#### 结束语

本研究深入探讨了时差法超声波流量计在南水北调中线渠首段的应用。通过对其技术原理剖析、结合渠首段工程特性设计应用方案,并开展现场试验。结果表明,该流量计经优化设计后,在复杂水力条件下能实现高精度流量测量,满足工程需求。未来可进一步探索智能算法优化,提升设备自适应能力,为南水北调及其他大型调水工程流量监测提供更可靠的技术支撑。

#### 参考文献

- [1]刘光远.超声波流量计在水文监测中的应用研究[J].水利水电技术,2021,52(8):135-141.
- [2]赵永红.时差法超声波流量计在河流流量测量中的实践与分析[J].人民黄河,2020,42(10):120-124.
- [3]邓山,赵昕.南水北调工程陶岔站时差法流量计推流技术研究[J].人民长江,2022,(04):86-90.
- [4]闫鹏.时差法超声波流量计流量系数影响因素分析[J].防护工程,2020,(07):106-108.