

# 确保超声波流量计计量精度的几点措施

陈志华 吴燕娟 任贇鹏

金卡智能集团(杭州)有限公司 浙江 杭州 310018

**摘要:** 为确保超声波流量计计量精度,需综合施策:优化流场,合理选安装位置、设计整流器、采用多声道布局;强化信号处理,运用噪声抑制、温压补偿及非线性误差校正技术;规范设备选型与安装,确保换能器匹配、安装角度间距精准;完善校准维护,定期在线校准、制定维护周期、建立故障诊断体系。多管齐下,可有效提升计量可靠性,满足工业及民用领域高精度测量需求。

**关键词:** 超声波流量计; 计量精度; 几点措施

引言: 在工业生产与民用领域中,超声波流量计凭借非接触测量、适用性广等优势,成为流量监测的关键设备。然而,其计量精度易受流体特性、安装环境、设备参数及人为操作等因素影响,导致测量误差,影响生产效率与决策准确性。为确保计量结果可靠,需从流场优化、信号处理、设备选型、安装规范及定期维护等环节制定针对性措施,以提升抗干扰能力,保障长期稳定运行。

## 1 超声波流量计的工作原理与精度影响因素

### 1.1 基本工作原理

(1) 时差法、多普勒法、波束偏移法等主流技术对比: 时差法应用最广泛,通过测量超声波顺流与逆流传播的时间差换算流量,适用于清洁均匀流体,精度较高;多普勒法利用多普勒效应,追踪流体中杂质散射信号,适合含杂质、气泡的流体,但精度受杂质浓度影响;波束偏移法通过超声波传播方向偏移量计算流速,抗干扰能力强,适合大口径管道,但结构相对复杂,成本较高。(2) 超声波信号传播路径与流量换算模型: 信号传播路径主要有V型、Z型两种,V型适用于小口径管道,Z型适用于大口径管道,可减少管道内壁干扰。流量换算核心模型基于流体流速与超声波传播参数的关联,通过测量传播时间、频率或偏移量,结合管道内径、截面积等参数,代入公式计算瞬时流量与累积流量,模型准确性直接决定基础计量精度。

### 1.2 影响计量精度的主要因素

(1) 流体特性: 流速分布不均会导致测量值偏离实际均值,管道中心与管壁流速差异越大,误差越明显;湍流会破坏流体稳定状态,干扰超声波信号传播;流体中含杂质或气泡时,会散射、衰减信号,尤其气泡过多会导致信号中断,显著降低计量精度。(2) 安装环境: 管道振动会使换能器位置偏移,改变信号传播路径;温度变

化会影响流体声速和管道尺寸,导致换算模型参数偏差;电磁干扰会干扰超声波信号的发射与接收,造成信号失真,影响测量稳定性。(3) 设备参数: 换能器的灵敏度、频率稳定性直接影响信号采集质量,性能不佳会导致信号微弱;信号处理算法的优化程度决定了对于干扰信号的过滤能力和数据计算准确性;声道布局不合理会无法全面捕捉流体流速分布,增加测量误差<sup>[1]</sup>。(4) 人为因素: 安装不规范,如换能器安装角度、间距偏差,会改变信号传播路径;参数设置错误,如管道内径、流体声速设置不当,会导致换算误差;长期不维护会使换能器结垢、老化,设备性能下降,逐步增大计量偏差。

## 2 确保超声波流量计计量精度的关键技术措施

### 2.1 流场优化措施

(1) 安装位置选择: 安装位置的合理性是保证流场均匀的基础,核心是避开流场扰动区域。应选择管道直管段安装,上游直管段长度不小于10倍管径,下游不小于5倍管径,坚决避开弯头、阀门、泵体等设备,此类部件会导致流体产生旋流、涡流,破坏流速分布均匀性,造成计量偏差。同时,安装点应远离管道变径处,避免因截面突变引发流速紊乱,确保流体以稳定的层流或均匀湍流状态流经测量区域,为精准计量提供基础条件。(2) 整流器设计: 针对无法避开扰动源、流场紊乱的场景,需通过整流器设计优化流场。常用整流器包括多孔板整流器和导流叶片整流器,多孔板通过均匀分布的通孔分割流体,削弱涡流强度,使紊乱流体逐步趋于均匀;导流叶片则通过引导流体流动方向,消除旋流,规范流速分布轨迹。整流器需与管道内径、流体流速匹配设计,安装在流量计上游合适位置,确保流体经过整流后,流速分布均匀稳定,减少流场不均对计量精度的影响<sup>[2]</sup>。(3) 多声道布局优化: 单声道流量计仅能测量管道某一点的流速,难以反映整个管道截面的流速分布,易产生测量

误差。多声道布局通过在管道不同截面、不同位置设置多个换能器,采集管道内多个测点的流速数据,再通过加权平均算法计算管道平均流速,显著提高流速分布的代表性。常见布局包括双声道、四声道、八声道,大口径管道优先采用多声道设计,可有效弥补流速分布不均的缺陷,尤其适用于工业大流量、非均匀流场的测量场景,大幅提升计量准确性。

## 2.2 信号处理与误差补偿技术

(1) 噪声抑制算法:超声波流量计在工业环境中易受电磁干扰、管道振动等因素影响,产生信号噪声,导致测量数据失真。采用针对性的噪声抑制算法是提升信号质量的关键,小波变换算法可精准区分有效超声波信号与噪声信号,通过多尺度分解提取有效信号,抑制无关噪声;自适应滤波算法能实时适应环境干扰变化,自动调整滤波参数,过滤动态噪声,减少干扰信号对测量结果的影响,确保信号采集的稳定性和准确性,为精准流量换算提供可靠依据。(2) 温度/压力补偿模型:流体的密度会随温度、压力的变化而改变,进而影响流量计量结果,尤其对于气体和易挥发液体,这种影响更为显著。通过建立温度/压力补偿模型,实时采集测量区域的流体温度、压力数据,结合流体的热物理特性参数,自动修正流体密度偏差,调整流量换算公式中的相关参数,使计量结果贴合流体实际状态。补偿模型需基于实验数据校准,确保在不同温度、压力工况下,均能实现精准修正,减少环境参数变化带来的计量误差<sup>[3]</sup>。(3) 非线性误差校正:超声波流量计在测量范围的两端,易因流速过低或过高产生非线性误差,同时信号传播过程中的衰减、散射也可能导致非线性偏差。通过大量实验采集不同工况下的测量数据与实际流量数据,建立非线性误差拟合公式,利用最小二乘法等数学方法优化拟合精度,对测量结果进行实时校正。校正公式需覆盖流量计的全测量范围,针对不同流速区间的误差特性,进行分段校正,有效弥补非线性误差,提升流量计在全工况下的计量精度,确保测量结果的一致性。

## 2.3 设备选型与安装规范

(1) 换能器频率与管径匹配原则:换能器作为超声波发射与接收的核心部件,其频率选择需与管道管径、流体特性严格匹配。大口径管道(管径大于1000mm)适合选用低频换能器(0.5-1MHz),低频信号穿透力强,可减少管道内壁和流体的衰减,确保信号有效传播;小口径管道(管径小于500mm)适合选用高频换能器(1-5MHz),高频信号分辨率高,能精准捕捉流速变化,提升测量精度。若频率与管径不匹配,会导致信号衰减严

重、测量分辨率不足,直接影响计量效果。(2) 安装角度与间距的标准化要求:安装角度与间距的规范性直接决定超声波信号的传播路径,需严格遵循ISO17089标准要求。换能器安装角度根据管道材质、流体声速确定,通常采用V型或Z型安装,角度偏差不得超过 $\pm 1^\circ$ ,避免信号传播路径偏移导致测量误差;安装间距需结合管道内径、换能器频率计算确定,精准控制两换能器之间的距离,确保信号能准确穿透流体、被有效接收,同时避免间距过大导致信号衰减、间距过小导致信号干扰。(3) 接地与屏蔽设计:工业现场的电机、变频器等设备会产生强烈的电磁干扰,干扰超声波信号的发射与接收,导致计量失真。通过完善的接地与屏蔽设计,可有效抵御电磁干扰:换能器线缆采用屏蔽线缆,减少外部电磁信号的侵入;流量计主机与管道、接地体可靠连接,接地电阻不大于 $4\Omega$ ,将干扰信号导入大地;设备外壳采用金属屏蔽结构,屏蔽外部电磁辐射,形成完整的抗干扰防护体系,确保流量计稳定运行<sup>[4]</sup>。

## 2.4 定期校准与维护策略

(1) 在线校准方法:定期校准是保证计量精度长期稳定的关键,优先采用在线校准方式,避免拆卸设备影响生产运行。常用在线校准工具为便携式超声波校准仪,校准过程中,将便携式校准仪与现场流量计安装在同一管道,同步采集流量数据,对比两者测量结果,计算误差值,若误差超出允许范围,及时调整现场流量计的参数,完成校准。在线校准需遵循校准规程,定期开展,确保流量计测量精度符合标准要求。(2) 维护周期制定:结合使用环境和工况,制定科学合理的维护周期,一般工业场景每3-6个月开展一次常规维护,恶劣环境(含杂质多、振动强烈)每1-2个月维护一次。维护重点包括:清洗换能器探头,去除表面结垢、杂质,避免影响信号发射与接收;检查电气连接部位,紧固松动的接线,排查线缆破损情况,防止信号传输中断;检查设备密封性能,避免流体渗漏损坏内部元器件,确保设备正常运行<sup>[5]</sup>。(3) 故障诊断与数据记录分析:建立完善的故障诊断与数据记录分析体系,实时监测流量计运行状态,记录流量数据、故障信息、校准结果等内容。通过分析运行数据,可及时发现计量偏差异常、设备性能下降等问题,预判潜在故障;针对出现的故障,采用分段排查法,重点检查换能器、信号处理模块、电气连接等部位,快速定位故障原因并及时处理。同时,通过长期数据积累与分析,优化校准与维护周期,持续提升计量精度的稳定性。

## 3 超声波流量计未来展望与技术挑战

### 3.1 技术发展趋势

(1) 微型化与集成化设计: 随着工业自动化向小型化、智能化升级, 超声波流量计正朝着微型化与集成化方向快速发展, 核心突破点在于MEMS(微机电系统)超声波换能器的研发与应用。传统换能器体积较大、安装受限, 而MEMS换能器通过微加工技术实现微型化, 体积仅为传统产品的几十分之一, 可灵活安装于小口径管道、精密设备等狭小空间, 同时降低设备整体重量与成本。集成化设计则将换能器、信号处理模块、数据传输模块等集成于单一芯片, 简化设备结构, 减少外部连接, 提升设备稳定性与抗干扰能力, 适配便携式测量、嵌入式监测等多元场景, 推动超声波流量计在民用、医疗等非工业领域的广泛应用。(2) 人工智能在信号处理中的应用: 人工智能技术的融入的是提升超声波流量计计量精度与智能化水平的核心趋势, 其中深度学习在信号处理与误差预测中的应用最为关键。传统信号处理算法对复杂干扰的适应性较弱, 而基于深度学习的算法可通过大量历史测量数据、干扰信号数据进行训练, 精准识别不同类型的噪声干扰, 实现自适应滤波与信号提纯, 大幅提升信号质量。同时, 深度学习模型可结合流体特性、环境参数、设备状态等多维度数据, 提前预测计量误差, 实现主动误差校正, 无需人工干预即可维持高精度计量。此外, 人工智能还可实现设备故障的智能诊断与预判, 通过分析运行数据及时发现潜在故障, 降低维护成本, 推动超声波流量计向“自校准、自诊断、自优化”的智能化方向发展。

### 3.2 待解决问题

(1) 复杂流场的精确建模: 复杂流场的精确计量的是当前超声波流量计面临的核心技术难题, 尤其是旋涡流、非满管流等特殊流场, 其流速分布极度不均、流态不稳定, 难以建立精准的流量换算模型。目前, 传统建模方法多基于理想均匀流场假设, 应用于复杂流场时, 会因流态偏差产生较大计量误差, 无法满足石油、化工等行业中复杂工况的测量需求。如何结合计算流体力学

(CFD)技术, 精准捕捉复杂流场的流速分布特征, 优化建模方法, 实现流态与计量误差的精准匹配, 仍是亟待突破的技术瓶颈。(2) 低流速下的信噪比提升: 低流速工况下(如微小流量监测、流体静态趋近状态), 超声波信号的传播速度与信号强度显著降低, 而环境噪声、设备自身噪声的影响相对凸显, 导致信噪比大幅下降, 出现信号失真、测量数据波动等问题, 严重影响计量精度。当前, 虽通过优化换能器性能、改进滤波算法可小幅提升信噪比, 但效果有限, 无法满足低流速场景下的高精度测量需求。如何研发高灵敏度换能器, 优化信号放大与噪声抑制技术, 在不增加设备成本与复杂度的前提下, 有效提升低流速工况下的信噪比, 实现微小流量的精准计量, 是超声波流量计技术发展中需重点解决的问题。

### 结束语

综上所述, 确保超声波流量计计量精度是一项系统性工程, 需贯穿设计、安装、使用与维护全周期。通过科学优化流场分布、强化信号处理算法、严格匹配设备参数、规范安装流程, 并定期开展校准维护, 可有效抵御内外干扰因素, 提升计量可靠性。随着技术发展, 微型化、智能化趋势将进一步推动其精度升级, 但复杂工况下的流场建模与低流速信噪比提升仍是未来需突破的关键方向。

### 参考文献

- [1]张金环.超声波流量计误差分析及实时计量方法研究[J].石油石化节能与计量,2025,15(4):63-68.
- [2]余军.影响超声波流量计测量准确度的相关分析[J].产品可靠性报告,2025,(2):81-82.
- [3]吴欢.天然气的超声流量计量系统误差影响因素分析[J].计量与测试技术,2023,50(10):73-74.
- [4]郑有胜,孙治鹏,方浩,等.超声波流量计测量精度补偿方法研究[J].自动化仪表,2023,44(3):10-14.
- [5]张淞.超声波流量计在气体计量中的应用策略[J].石化技术,2023,30(11):20-22.