

# 超声波燃气表小流量计量的关键技术

吴哲慧<sup>1</sup> 张江涛<sup>2</sup> 于文强<sup>1</sup>

1. 金卡智能集团股份有限公司杭州分公司 浙江 杭州 310018

2. 金卡智能集团(杭州)有限公司 浙江 杭州 310018

**摘要:** 本文聚焦超声波燃气表小流量计量关键技术。阐述了其工作原理及小流量计量特点,指出面临信号检测处理、流场特性、环境因素影响等问题。进而介绍传感器优化、信号处理算法改进、流场补偿、环境因素补偿等关键技术。通过搭建实验平台,设计基础精度、环境因素影响、关键技术验证等实验方案,结果表明所采用关键技术有效提升了小流量计量精度与稳定性,满足实际应用需求。

**关键词:** 超声波燃气表;小流量计量;关键技术;信号处理

引言:在燃气计量领域,准确计量小流量用气至关重要。传统膜式燃气表在小流量计量时存在漏计、误计等问题,难以满足需求。超声波燃气表凭借非接触式测量原理,在小流量计量上展现出高精度、高灵敏度等优势。然而,其在实际应用面临信号检测处理难、流场特性不稳定、环境因素影响大等诸多挑战。研究超声波燃气表小流量计量关键技术,对提升计量精度、推动行业发展具有重要意义。

## 1 超声波燃气表工作原理及小流量计量特点

### 1.1 超声波燃气表工作原理

超声波燃气表核心基于时差法实现燃气流量计量,属于非接触式电子式计量设备,无机械运动部件,从根本上规避了传统机械燃气表的磨损问题。其工作时会在燃气流管道内对称安装两个超声波传感器,分别承担发射与接收功能,两个传感器交替切换角色,实现超声波顺流与逆流双向传播。当燃气在管道内流动时,会对超声波传播速度产生明显影响,顺流传播时超声波速度与燃气流速叠加,传播时间缩短;逆流传播时超声波速度与燃气流速抵消,传播时间延长。设备通过高精度时间数字转换芯片捕捉两次传播的微小时间差,结合管道横截面积、超声波在静止燃气中的传播速度等参数,通过特定算法计算出燃气瞬时流速,再经过积分运算得到累计用气量<sup>[1]</sup>。目前主流设备多采用STM32L443等低功耗微控制器,搭配优化的软件架构,在保证计量精度的同时降低能耗,适配家庭及工业多种用气场景。

### 1.2 小流量计量特点

超声波燃气表在小流量计量场景下的核心特点的是高精度与高灵敏度,这也是其相较于传统膜式燃气表的核心优势。小流量通常指接近仪表最小量程的低流速燃气工况,如家庭小火慢炖、恒温热水器待机运行等场

景,传统膜式燃气表因机械部件灵敏度不足,易出现漏计、误计现象,而超声波燃气表凭借非接触式测量原理,可捕捉到微小的燃气流速变化,计量重复性好、误差小。其小流量计量量程比可达1:200甚至更高,远超传统膜式燃气表的1:50至1:100,能全面覆盖各类低流量用气场景。同时,小流量计量时仍能保持较低的压力损失,流通截面大的设计使燃气阻力大幅降低,相较于膜式燃气表压力损失可减少约50%,既不影响燃气设备正常运行,也能避免因小流量压力不足导致的计量偏差,且无机械磨损,长期使用后小流量计量精度仍能保持稳定。

## 2 超声波燃气表小流量计量面临的问题

### 2.1 信号检测与处理问题

小流量计量时,超声波燃气表面临的核心问题是信号检测难度大及处理精度不足。由于小流量工况下燃气流速极低,超声波顺流与逆流传播的时间差极小,通常仅为纳秒级,对信号检测的灵敏度要求极高。此时超声波信号易受多种干扰,包括管道振动产生的机械噪声、电子元件运行产生的电磁干扰,以及燃气中杂质颗粒反射导致的信号衰减,使得接收端捕捉到的信号幅值微弱、信噪比极低,易出现信号失真、误判等情况。同时,小流量信号的稳定性较差,流量波动频繁且幅度微小,传统信号处理算法难以实现噪声抑制与突变响应的平衡,要么过度平滑导致信号滞后,无法及时捕捉小流量变化,要么响应过快导致噪声干扰加剧,进而影响计量精度<sup>[2]</sup>。

### 2.2 流场特性影响问题

流场特性不稳定是影响超声波燃气表小流量计量精度的关键因素之一。小流量工况下,燃气在管道内的流动状态复杂多变,不再呈现稳定的层流状态,易出现流速分布不均匀、涡流、回流等现象,尤其在管道弯头、传感器安装位置附近,流场畸变更明显。这种不稳定

流场会导致超声波传播路径发生偏移,顺流与逆流的传播距离出现微小差异,同时燃气流速在管道横截面上的分布不均,会使传感器捕捉到的流速无法准确代表管道内的平均流速,进而引入计量误差。小流量时燃气流动的雷诺数较低,流场变化缓慢且无规律,难以通过固定模型进行预判和修正,即便优化管道结构,也难以完全消除流场畸变对小流量计量的影响。

### 2.3 环境因素影响问题

小流量计量场景下,环境因素对超声波燃气表计量精度的影响更为突出,且难以通过常规手段完全规避。温度是核心影响因素之一,环境温度变化会直接改变超声波在燃气中的传播速度,同时会导致燃气密度、粘度发生变化,进而影响燃气流速,小流量时这种影响的占比更高,易导致计量误差增大。湿度与气压的变化也会产生间接影响,高湿度环境会腐蚀传感器部件,降低其检测灵敏度,气压波动则会改变燃气的流动状态,尤其在低流速下,气压微小变化即可导致流速出现明显波动。另外,环境振动、电磁干扰等因素在小流量计量时影响更为显著,环境振动会导致传感器安装位置偏移,改变超声波传播路径,电磁干扰则会干扰信号传输与处理过程,导致时间差检测出现偏差。

## 3 超声波燃气表小流量计量关键技术

### 3.1 传感器优化技术

传感器优化技术是提升超声波燃气表小流量计量精度的基础,核心围绕提高传感器灵敏度、稳定性和抗干扰能力展开。目前主流采用MEMS超声波传感器,通过先进MEMS工艺优化传感器结构,减小体积的同时提升检测精度,可精准捕捉小流量工况下的纳秒级时间差。在传感器选型上,优先选用高灵敏度、低噪声的换能器,优化激发频率与脉冲数,减少信号衰减,确保小流量时仍能捕捉到清晰的超声波信号。优化传感器安装位置与角度,采用对称安装方式,减少流场畸变对传感器检测的影响,部分方案通过设计专用安装支架,降低环境振动对传感器的干扰。通过表面镀膜处理,增强传感器抗腐蚀、抗污染能力,防止灰尘、油污附着,延长使用寿命,确保长期使用过程中小流量计量精度的稳定性,同时搭配低功耗设计,兼顾灵敏度与能耗需求。

### 3.2 信号处理算法改进技术

信号处理算法改进是解决小流量信号检测与处理问题的核心技术,重点实现噪声抑制与信号突变响应的平衡。目前应用较广泛的是自适应滤波算法,结合加权移动平均的平滑滤波优点和步进检测的快速响应特性,可动态检测信号中的突变,在突变发生时快速跟踪新电平,

在平稳阶段采用加权滑动平均实现平滑效果,并根据稳定时长调整平滑强度,约束相邻点的最大变化幅度。与传统滤波算法相比,该算法在小流量计量中既能有效抑制机械噪声、电磁噪声的干扰,又能及时捕捉小流量波动,避免信号滞后。同时优化时间差检测算法,采用高精度时间数字转换芯片(如TDC-GP22),提升纳秒级时间差的检测精度,减少时间差测量误差对计量结果的影响<sup>[3]</sup>。另外,通过Python实现算法优化,结合机器学习方法,对小流量信号进行自适应识别与修正,进一步提升信号处理的准确性和稳定性,确保小流量计量精度符合国家1.5级精度指标要求。

### 3.3 流场补偿技术

流场补偿技术主要用于修正小流量工况下流场畸变导致的计量误差,核心是通过流场建模与动态补偿,使传感器捕捉到的流速能够准确反映管道内燃气的平均流速。首先,通过数值模拟与实验测试,分析小流量工况下流场的分布规律,建立流场畸变模型,明确流场畸变与计量误差之间的对应关系。在此基础上,采用流场均匀化结构设计,在管道内增设导流件、整流网等部件,优化燃气流动路径,减少涡流、回流等现象,降低流场畸变程度。引入动态流场补偿算法,实时检测流场变化情况,根据流场畸变模型对测量到的流速数据进行动态修正,消除流场不均匀对计量精度的影响。通过多传感器协同检测,在管道不同位置安装辅助传感器,采集不同区域的流速数据,结合加权平均算法计算管道平均流速,进一步提升小流量计量的准确性,有效解决小流量流场不稳定导致的计量偏差问题。

### 3.4 环境因素补偿技术

环境因素补偿技术的核心是实时监测环境参数变化,通过算法修正消除其对小流量计量的影响,确保不同环境工况下计量精度的稳定性。针对温度影响,在设备内部集成高精度温度传感器,实时采集环境温度与燃气温度数据,建立温度与超声波传播速度、燃气流速之间的数学模型,通过算法动态修正超声波传播速度,抵消温度变化带来的计量误差。针对气压、湿度影响,结合环境参数检测模块,实时采集气压、湿度数据,通过补偿算法修正燃气密度、粘度等参数,调整流速计算结果,减少气压、湿度波动对小流量计量的影响。采用抗干扰设计,优化设备电路结构,增加电磁屏蔽层,减少环境电磁干扰对信号传输与处理的影响;通过振动隔离设计,降低环境振动对传感器安装位置的影响,确保超声波传播路径稳定。结合长期实验数据,建立环境因素补偿数据库,实现补偿算法的自适应优化,进一步提升小流量

计量的稳定性和准确性。

#### 4 实验验证与分析

##### 4.1 实验平台搭建

为验证超声波燃气表小流量计量相关技术的有效性,搭建专用实验平台,确保实验条件贴合实际使用场景,实验数据精准可靠。实验平台核心由气源系统、流量标准装置、被测超声波燃气表、环境模拟模块、数据采集与分析系统五部分组成。气源系统采用高压气瓶与稳压装置,提供稳定、洁净的燃气,可调节燃气压力与流速,满足小流量(0.025~4m<sup>3</sup>/h)工况的测试需求。流量标准装置选用钟罩式气体流量检定装置,其计量精度高于被测仪表,作为流量标准参考,确保流量参数的准确性。被测超声波燃气表选用搭载了传感器优化、自适应滤波及各类补偿技术的样机,按照实际安装规范固定在实验管道上。环境模拟模块可调节实验环境的温度、湿度、气压,模拟不同环境工况对小流量计量的影响。数据采集与分析系统采用专用软件,实时采集超声波传播时间差、燃气流速、累计用气量、环境参数等数据,实现数据的自动记录、存储与初步分析,为后续实验结果分析提供可靠的数据支撑。

##### 4.2 实验方案设计

实验方案围绕小流量计量精度、稳定性及各类关键技术的有效性展开,分为基础精度测试、环境因素影响测试、关键技术验证测试三个阶段,确保实验覆盖各类实际工况。基础精度测试阶段,设定不同小流量点(涵盖仪表最小量程至常用小流量范围),调节气源系统使燃气流速稳定在设定值,通过流量标准装置与被测样机同步采集数据,每个流量点稳定运行30分钟,重复测试5次,计算被测样机的计量误差,验证小流量计量精度是否符合国家1.5级精度指标要求。环境因素影响测试阶段,固定小流量值,分别调节环境温度、湿度、气压至不同梯度,每个梯度稳定运行20分钟,采集计量数据,分析不同环境参数对小流量计量精度的影响程度。关键技术验证测试阶段,分别关闭传感器优化、信号处理算法改进、流场补偿、环境因素补偿等技术,在相同小流量工况下进行测试,与开启所有关键技术的测试结果进行对比,验证各类关键技术对提升小流量计量精度的有效性。

##### 4.3 实验结果分析

实验结果分析围绕计量精度、关键技术有效性、环境适应性三个核心维度展开,结合采集的实验数据进行量化分析与总结。基础精度测试结果显示,被测超声波燃气表在0.025~4m<sup>3</sup>/h的小流量范围内,计量误差均控制在±1.5%以内,符合国家1.5级精度指标要求,且重复测试的偏差较小,表明其小流量计量重复性好、精度稳定,相较于未优化的样机,计量误差降低了30%以上。环境因素影响测试结果表明,开启环境因素补偿技术后,温度、湿度、气压在较大范围内变化时,小流量计量误差的波动幅度控制在±0.5%以内,未开启补偿技术时误差波动幅度可达±2.0%,验证环境因素补偿技术的有效性<sup>[4]</sup>。关键技术验证测试结果显示,传感器优化技术使小流量信号信噪比提升了40%,自适应滤波算法有效平衡噪声抑制与信号响应速度,流场补偿技术使流场畸变导致的计量误差降低了50%,各类关键技术协同作用,显著提升小流量计量精度与稳定性,实验结果表明所采用的小流量计量关键技术可行、有效,可满足实际应用需求。

##### 结束语

本文深入探讨了超声波燃气表小流量计量关键技术,通过理论分析与实验验证,证实传感器优化、信号处理算法改进、流场补偿及环境因素补偿等技术的有效性。这些技术显著提升了小流量计量精度与稳定性,降低计量误差,使其能更好地适应不同环境工况。未来,随着技术不断进步,超声波燃气表小流量计量技术将进一步完善,为燃气计量领域带来更精准、可靠的解决方案。

##### 参考文献

- [1]刘贺奇.超声波燃气表的计量检定[J].大众标准化,2025(17):185-187.
- [2]陈瑶,李跃忠,张玉华,等.基于自适应滤波算法的超声波燃气表[J].机电工程技术,2025,54(7):137-141.
- [3]涂馨予,金杭超,易向阳.用于超声波燃气表中的换能器研制[J].声学与电子工程,2023(2):24-27.
- [4]陈丽,禹静,樊丹丹,等.融合CNN-Attention-GRU的超声波燃气表时差预测方法研究[J].中国测试,2025,51(12):104-111.