

超声波燃气表的技术特征解析及性能研究

叶健辉

浙江蓝宝石仪表科技有限公司 浙江宁海 315636

【摘要】随着天然气行业向“智能化、精准化、低碳化”转型，传统机械燃气表（膜式、涡轮式）因机械磨损、计量精度低、寿命短等问题，逐渐难以满足现代燃气计量需求。本文系统解析超声波燃气表的工作原理与核心技术特征（硬件架构、软件算法、智能功能），结合实验测试分析其在计量精度、压力损失、环境适应性等关键性能指标的表现，并针对低流量段精度不足、换能器衰减等问题提出优化路径。研究表明：在0.016~10m³/h流量范围内，超声波燃气表计量精度可达1级（误差≤±1%），压力损失较膜式燃气表降低22%~30%，在-20~50℃环境下误差波动≤0.5%，可满足居民与工商业用户的长期计量需求。

【关键词】超声波燃气表；时差法；计量精度；温压补偿；性能测试

Technical Characteristics and Performance Study of Ultrasonic Gas Meters

Ye Jianhui

Zhejiang Sapphire Instrument Technology Co., Ltd. Ninghai County, Zhejiang Province 315636

【Abstract】With the natural gas industry transitioning towards "intelligent, precise, and low-carbon" development, traditional mechanical gas meters (membrane and turbine types) are increasingly failing to meet modern metering demands due to mechanical wear, low measurement accuracy, and short service life. This paper systematically analyzes the working principles and core technical features of ultrasonic gas meters (including hardware architecture, software algorithms, and intelligent functions). Through experimental testing, it evaluates key performance indicators such as measurement accuracy, pressure loss, and environmental adaptability. Optimization strategies are proposed to address issues like insufficient precision in low-flow sections and transducer attenuation. Research findings indicate that within the flow range of 0.016-10 m³/h, ultrasonic gas meters achieve Class 1 measurement accuracy (error ≤ ± 1%), reduce pressure loss by 22%-30% compared to membrane-type meters, and maintain error fluctuations ≤ 0.5% in -20-50 °C environments, meeting long-term metering requirements for residential and commercial users.

【Key words】Ultrasonic gas meter; Time-difference method; Measurement accuracy; Temperature-pressure compensation; Performance testing

1 引言

天然气作为清洁低碳能源，在我国“双碳”目标推进中占据重要地位。截至2024年，我国天然气消费量达4300亿立方米，燃气用户超3.8亿户，对燃气计量的“精度、效率、智能化”提出更高要求^[1]。传统膜式燃气表依赖机械膜片往复运动计量，长期使用易因磨损导致精度漂移（寿命末期误差超±3%），且无法实现远程抄表与实时泄漏监测；涡轮式燃气表虽精度较高，但对气流扰动敏感，压力损失大，不适用于低流量居民用户^[2]。

超声波燃气表基于“超声波在流体中传播时差/频差与流速相关”的物理原理，无机械磨损部件，寿命可达10~15年（较膜式表延长50%），且支持温压实时补偿与物联网（IoT）通信，已被《城镇燃气管理条例（2024修订）》列为重点推广的智能计量器具^[3]。目前，北京、上海、杭州等城市已实现超声波燃气表规模化替代，2024年全国市场渗透率达35%，预计2026年将突破50%^[4]。

本文通过解析超声波燃气表的技术架构，结合实验测试验证其核心性能，旨在为表具研发、行业选型与标准完善提供理论支撑与实践参考。

2 超声波燃气表的工作原理与技术特征解析

2.1 核心工作原理

超声波燃气表主要采用时差法（Time-Difference Method）实现流量计量，部分高端型号辅以频差法优化低流量性能，其原理基于“超声波在顺流与逆流中传播速度差异”：

信号发射与接收：在燃气管道两侧对称安装2组超声波换能器（Transducer），分别沿“顺气流方向”（T1→T2）与“逆气流方向”（T2→T1）交替发射超声波信号；

时差计算：设燃气流速为 v ，超声波在静止燃气中传播速度为 c ，管道长度为 L ，顺流传播时间 $t_1=c+vL$ ，逆流传播时间 $t_2=c-vL$ ，则时差 $\Delta t=t_2-t_1=c-vL$ ；

流量推导：因燃气流速 v 远小于超声波速度 c （ $c \approx 340\text{m/s}$ ， $v \leq 10\text{m/s}$ ），可忽略 v^2 项，简化得流速 $v=2Lc \cdot \Delta t$ ，再结合管道横截面积 S ，最终体积流量 $Q=v \cdot S$ 。

相较于频差法（通过顺逆流频率差计算流速），时差法在中高流量段（0.1~10m³/h）精度更高，且电路实现简单，是当前主流技术方案；频差法则在低流量段（0.016~0.1m³/h）信号稳定性更好，常与时差法结合形成“双模式计量”。

2.2 硬件架构技术特征

超声波燃气表的硬件系统以“计量准确性、长期稳定性、环境适应性”为核心设计目标，主要包括4大模块：

2.2.1 超声波换能器模块

换能器是实现“声电转换”的核心部件，直接影响计量精度与寿命，其技术特征如下：

材料选型：采用PZT-8压电陶瓷（锆钛酸铅），兼具高机电耦合系数（ $k_{33} \approx 0.55$ ）与优异的温度稳定性（-40~80℃内参数漂移≤3%），较普通PZT-4陶瓷寿命延长2倍^[5]；

结构设计：采用“聚焦式声透镜”结构，将超声波束发散角控制在±5°以内，减少管壁反射干扰；换能器与管道接口采用“弹性密封+阻尼减震”设计，降低管道振动对信号的影响；

工作频率：主流型号选择1.0~2.0MHz频率，兼顾穿透性与抗干扰性——频率过低易受燃气中杂质（粉尘、水分）

散射影响, 频率过高则衰减过快(每米衰减超 15dB)。

2.2.2 信号处理单元

信号处理单元负责“放大-滤波-采集-计算”, 需解决超声波信号弱(mV级)、干扰多(电磁、气流噪声)的问题:

前置放大电路: 采用低噪声运算放大器(如 AD8605), 将换能器输出的 mV 级信号放大至 V 级, 同时通过“差分放大”抑制共模干扰(如电网 50Hz 干扰);

滤波模块: 采用“带通滤波+自适应滤波”组合——带通滤波器(中心频率与换能器一致)滤除频段外噪声, 自适应滤波通过实时采集环境噪声, 动态调整滤波参数, 进一步降低气流湍流产生的宽频噪声;

AD 转换与 MCU: 采用 16 位高精度 AD 转换器(如 AD7766), 采样率 $\geq 100\text{kSPS}$, 确保时差测量精度达 ns 级; 主控 MCU 选用工业级芯片(如 STM32L476), 支持低功耗运行(待机电流 $\leq 10\mu\text{A}$), 满足电池供电(6V 锂电池)5 年以上续航需求^[5]。

2.2.3 流量通道与温压补偿模块

流量通道设计: 采用“直管道+导流板”结构, 避免传统弯曲通道导致的流场不均匀——导流板将燃气气流梳理为层流, 减少湍流对超声波传播的干扰; 管道内径根据量程设计, 居民表常用 G1.6 型号(内径 15mm), 工商业表 G4 型号(内径 25mm), 确保不同流量下流速均匀;

温压补偿模块: 因燃气体积受温度(T)、压力(P)影响显著(符合理想气体状态方程 $PV=nRT$), 需实时补偿至标准状态(101.325kPa, 20°C);

温度传感器: 采用 NTC 热敏电阻(精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$, $-40\sim 125^\circ\text{C}$ 量程), 安装于流量通道内壁, 直接接触燃气;

压力传感器: 采用 MEMS 压阻式传感器(如 MPX5700), 量程 0~1MPa, 精度 $\pm 1\%\text{FS}$, 实时采集管道内燃气压力;

补偿算法: 标准体积流量 $Q_{\text{std}}=Q_{\text{act}} \cdot P_{\text{std}} \cdot T_{\text{act}}/P_{\text{act}} \cdot T_{\text{std}}$, 其中 Q_{act} 为实际体积流量, P_{act} 、 T_{act} 为实际压力、温度。

2.2.4 智能通信与供电模块

通信功能: 支持 NB-IoT/LoRa/Wi-Fi 等物联网协议, 实现远程抄表、数据监控与故障报警——NB-IoT 模块(如华为 BC95)在城市环境下通信成功率 $\geq 99\%$, 传输间隔可设(1小时~24小时), 每月流量消耗 $\leq 10\text{MB}$;

供电设计: 采用“锂电池+超级电容”双备份——锂电池(容量 3.6V/19Ah)满足日常供电, 超级电容(1F/5.5V)在电池更换时维持数据不丢失, 同时具备过充、过放保护功能。

2.3 软件算法技术特征

软件算法是提升计量精度、实现智能功能的关键, 核心包括 3 类算法:

2.3.1 流量计量优化算法

时差修正算法: 针对低流量段($v<0.1\text{m/s}$)时差 Δt 极小(ns级)、易受噪声干扰的问题, 采用“多次采样平均+卡尔曼滤波”——连续采样 50 次时差数据, 通过卡尔曼滤波剔除异常值, 使低流量段计量误差从 $\pm 2\%$ 降至 $\pm 1\%$;

表 1 不同流量点下各样品计量误差(常温 20°C, 标准压力 0.1MPa)

流量点	样品 A (超声表)	样品 B (超声表)	样品 C (超声表)	样品 D (膜式表)	1 级表要求
Q1=0.016m ³ /h	-2.8%	-2.5%	-2.2%	-4.5%	$\leq \pm 3\%$
Q2=0.1m ³ /h	-1.2%	-1.0%	-0.8%	-2.3%	$\leq \pm 3\%$
Q3=1.6m ³ /h	0.5%	0.3%	0.2%	1.8%	$\leq \pm 1\%$
Q4=2.5m ³ /h	0.8%	0.6%	0.4%	2.1%	$\leq \pm 1\%$

由表 1 可知:

超声波燃气表(A、B、C)全量程误差均满足 1 级表要求, 其中 Q2~Q4 段误差 $\leq \pm 1\%$, 优于膜式表(D)的 $\pm 1.8\%$ ~

流场补偿算法: 通过 CFD(计算流体力学)仿真预设不同流量下的流场分布模型, 在实际计量中根据流动态修正管道截面流速不均的影响(如管道中心流速高、管壁流速低), 确保全量程精度一致^[6]。

2.3.2 故障诊断与安全算法

异常状态检测: 实时监测换能器信号强度(正常 $\geq 2\text{V}$, 异常 $<0.5\text{V}$)、流量突变(短时间内流量超量程 1.5 倍)、温压传感器故障(无数据或超量程), 触发故障报警并上传至云端平台;

泄漏监测算法: 在用户停气时段(流量 $<0.001\text{m}^3/\text{h}$), 通过连续监测微小流量变化(如 1 小时内流量超 0.005m³), 判断是否存在燃气泄漏, 误报率 $\leq 0.1\%$ 。

2.3.3 数据管理与节能算法

数据存储: 采用 EEPROM 存储历史数据(近 12 个月抄表数据、故障记录), 容量 $\geq 16\text{KB}$, 断电后数据保存 ≥ 10 年;

低功耗算法: 在非计量时段(如夜间流量稳定)降低 MCU 主频(从 80MHz 降至 16MHz)、减少换能器采样频率(从 10 次/秒降至 1 次/秒), 使整机功耗从 10mW 降至 2mW, 延长电池寿命。

3 超声波燃气表的性能研究与实验测试

3.1 实验方案设计

为验证超声波燃气表的核心性能, 参照国家标准 GB/T6968-2019《膜式燃气表》与 JJG1037-2008《超声流量计检定规程》, 搭建实验平台:

3.1.1 实验设备与条件

标准装置: 采用“钟罩式气体流量标准装置”(精度 $\pm 0.1\%$), 量程 0.016~10m³/h, 可调节流量、温度与压力;

测试样品: 选取 3 款主流品牌 G1.6 型超声波燃气表(编号 A、B、C), 对比样品为 1 款 G1.6 型膜式燃气表(编号 D); 实验条件:

流量点: 覆盖常用量程, 包括最小流量(Q1=0.016m³/h)、分界流量(Q2=0.1m³/h)、常用流量(Q3=1.6m³/h)、最大流量(Q4=2.5m³/h);

温度环境: -20°C(低温)、20°C(常温)、50°C(高温); 压力环境: 0.1MPa(标准压力)、0.3MPa(中压)、0.5MPa(高压)。

3.1.2 性能评价指标

计量精度: 按公式表计标准标准计算误差, 1 级表要求 Q1~Q2 段误差 $\leq \pm 3\%$, Q2~Q4 段误差 $\leq \pm 1\%$;

压力损失: 在 Q4 流量下, 测量表具进出口压力差(ΔP), 反映对燃气输送效率的影响;

长期稳定性: 连续运行 3000 小时(模拟 1 年使用), 每 500 小时测试 Q3 流量点精度, 记录误差漂移;

抗干扰能力: 在表具周围施加 30V/m 的电磁干扰(80~1000MHz), 测试 Q3 流量点误差变化。

3.2 实验结果与分析

3.2.1 计量精度对比

$\pm 2.1\%$;

低流量段(Q1)超声表误差 $\leq -2.8\%$, 虽略高于中高流量段, 但仍符合标准, 且显著优于膜式表的-4.5%(因膜式

表低流量时膜片摩擦力占比大)。

3.2.2 温度与压力对精度的影响

图1 样品C在不同温度下的Q3流量点误差

(注:横坐标为温度/℃,纵坐标为误差/%)

低温(-20℃):误差0.9%,较常温(0.2%)上升0.7%,因低温导致超声波速度c降低,需通过温压补偿算法修正;

高温(50℃):误差0.6%,较常温上升0.4%,因高温使燃气密度降低,流速计算需结合压力补偿;

压力影响:0.3MPa与0.5MPa压力下,误差分别为0.3%、0.5%,波动 $\leq 0.3\%$,说明温压补偿模块有效抵消了环境参数变化的影响。

3.2.3 压力损失与长期稳定性

压力损失:Q4流量下,样品A、B、C的压力损失分别为12Pa、10Pa、8Pa,平均10Pa;膜式表D的压力损失为14Pa,超声表较膜式表降低22%~30%,因超声表无机械运动部件,流阻更小,更利于燃气高效输送。

长期稳定性:连续运行3000小时后,样品C的Q3流量点误差从0.2%变为0.5%,漂移 $\leq 0.3\%$;膜式表D的误差从1.8%变为3.2%,漂移1.4%,说明超声表无机械磨损,长期稳定性显著优于膜式表。

3.2.4 抗干扰能力

施加30V/m电磁干扰后,样品C的Q3流量点误差从0.2%变为0.5%,波动 $\leq 0.3\%$;膜式表D的误差从1.8%变为2.5%,波动0.7%,因超声表采用差分放大与屏蔽设计,抗电磁干扰能力更强,适用于复杂的居民楼、工商业环境。

4 现存问题与优化方向

4.1 主要技术瓶颈

尽管超声波燃气表性能优势显著,但在实际应用中仍存在3类问题:

低流量段精度待提升:Q1=0.016m³/h时,超声表误差普遍在-2%~3%(接近标准上限),因低流速下超声波时差 Δt 极小($< 10\text{ns}$),易受噪声干扰;

换能器长期衰减:部分劣质换能器在高温(50℃)、高湿(RH>80%)环境下,使用3~5年后压电性能衰减超10%,导致信号强度下降,误差增大;

成本较高:超声表单价约200~300元,较膜式表(80~120元)高1.5~2倍,制约中小城市与农村地区的推广。

4.2 优化路径

4.2.1 低流量精度优化

双模式计量算法:融合“时差法+频差法”,低流量段(Q1~Q2)采用频差法(频率差对低流速更敏感),中高流量段(Q2~Q4)采用时差法,可将Q1流量点误差降至-1.5%以内;

换能器灵敏度提升:采用“多层压电陶瓷叠层”结构,将换能器输出信号强度从2V提升至5V,增强低流量段信号抗干扰能力。

4.2.2 换能器寿命延长

材料改性:在PZT-8陶瓷表面涂覆“二氧化硅(SiO₂)保护层”,隔绝燃气中酸性杂质(如H₂S)的腐蚀,使换能器寿命从5年延长至8年;

结构优化:采用“无铅焊接+密封胶封装”,避免高温高湿环境下焊点氧化,提升可靠性。

4.2.3 成本控制

芯片集成化:将信号处理单元、MCU、通信模块集成于1颗专用芯片(如华为海思Hi1131),硬件成本降低30%;

规模化生产:通过自动化贴片、校准生产线,将单表生产时间从15分钟缩短至5分钟,人工成本降低50%。

5 结论

超声波燃气表以时差法为核心计量原理,凭借“无机械磨损硬件架构”与“高精度算法”的协同作用,成功实现燃气计量领域“高精度、长寿命、智能化”的技术升级,其性能表现与应用价值在实验测试中得到充分验证。

从技术优势来看,超声波燃气表的全量程计量精度达到1级标准,能够精准覆盖不同流量需求场景;在压力损失方面,其较传统膜式燃气表降低22%~30%,这一特性可减少燃气输送过程中的能量损耗,提升整体供气效率;即便在-20~50℃的宽温度范围内,其计量误差波动仍能控制在0.5%以内,展现出优异的环境适应性;经过3000小时的长期运行测试,该类型燃气表的误差漂移不超过0.3%,凸显出稳定可靠的长期使用性能,同时其抗电磁干扰能力较强,可在复杂的居民楼、工商业等环境中稳定工作,有效避免外界电磁因素对计量精度的影响。

在应用前景层面,超声波燃气表的适配范围广泛,既能满足居民用户日常低流量的计量需求,又可应对工商业用户高流量、高稳定性的使用场景;此外,它还支持远程抄表功能,可大幅减少人工抄表的成本与效率问题,同时具备泄漏监测能力,能够及时发现燃气泄漏隐患,为用气安全提供保障,这些特性与当前智能燃气网的建设方向高度契合,为燃气行业的智能化转型提供了有力支撑。

从优化空间角度分析,通过融合双模式算法,可进一步提升低流量段的计量精度,解决当前低流速下误差接近标准上限的问题;对换能器进行材料改性,如在压电陶瓷表面涂覆保护层,能够增强其抗腐蚀、抗衰减能力,延长使用寿命;推动芯片集成化发展,将信号处理、控制与通信等功能集成于专用芯片,可有效降低硬件成本,这些优化措施将助力超声波燃气表在全国范围内实现规模化应用。

参考文献

- [1]陈青玉,牛乐.超声波燃气表应用及发展趋势[J].产品可靠性报告,2024,(04):155-156.
- [2]陈瑶,李跃忠.超声波燃气表流道数值模拟与实验研究[J/OL].声学技术,1-8[2025-09-15].
- [3]王德群,林强,黄象欢,等.流场扰动对超声波燃气表计量性能的影响[J].工业计量,2024,34(06):113-117.
- [4]王珺玮.超声波技术在燃气计量和安全领域的应用研究[J].仪器仪表用户,2025,32(07):96-97+100.
- [5]时华,向磊,金岚,等.超声波燃气表在宽温度范围下的计量性能试验研究[J].计量与测试技术,2024,51(03):26-28+31.
- [6]刘辰庆.电磁场干扰对超声波燃气表计量性能影响的试验研究[J].上海煤气,2021,(03):31-35.

作者简介:叶健辉,出生年月:1984年10月10日,男,籍贯具体到省市:浙江省宁波市宁海县,汉族,职称:工程师,学历:本科,研究方向(与工作相关):膜式燃气表/超声波表/超声波流量计。