

对超声波燃气表在家用燃气计量领域的适应性分析

冷小广 张玺

青岛积成电子股份有限公司

[摘要] 超声波燃气表是通过测量超声波顺流与逆流之间的时间差来测量气体流动^[1]，目前，超声波测量技术广泛应用于管道大直径、输送管等场所的天然气的测量，但由于我国天然气成分复杂多样，其不可能经济准确地计算理论声速，这将导致天然气测量中时有误差，因此，其在国内家用燃气测量领域应用并不广泛。作为超声波转换器，其所有功能都需要电源，具有高能耗和高功率要求，结合现状，本文主要针对超声波时差测量方法的原理，以及这类重要部件的附加软件功能等方面进行了阐述，最后，对于全面实现家用燃气表的超声波计量技术中需要注意的问题也进行了分析。

[关键词] 超声波燃气表；家用燃气计量；适用性；分析

[DOI] 10.12252/j.issn.2096-627X.2021.11.510

前言：燃气计量仪器仪表的准确性和智能性在不断地提高，但是在实际的工作中，因为安装时的各种问题并不能有效地发挥和体现出新型智能表具相对传统表具的进步，这就需要我们对手表的安装及时进行系统的总结和概括^[2]。

随着超声换能器性能的提高以及微机技术和流体力学理论的迅速发展，超声测量技术得到了广泛的发展并应用于气体流量计等测量仪器领域。超声波流量计，具有无操作部件、精度高的优点。但是，由于住宅内管直径小，安装环境复杂，难以满足超声气体流动的要求，超声波气体流量计还没有得到普及和大规模应用。

一、国内外研究现状

(一) 国外研究现状

在1900年的时候，超声波在流体中顺流和逆流的时间是不同的，这一现象引起了科学家的研究兴趣，利用这个时间差可以测量流体的流速，从而通过计算得到流量。随着不断地对超声波流量计深入地研究，终于在1931年国外科学家发明了时差法的超声波流量计专利并将其应用于实践当中。这是最早的关于超声波流量计的资料。由于时差法的时间间隔非常短，当时的电子技术和工艺制造水平无法达到高精度的要求。

1950年，第一台应用于测量飞机燃料的超声波流量计问世，它的原理是利用了顺流和逆流的频差测量流速，从而通过计算得到流量。虽然基于频差法的流量计在稳定性和可靠性上需要进一步提升，但是这意味着对超声波流量计进入了一个快速发展的时代。随后的几年中，针对悬浮颗粒的场景需求前苏联科学家研发出了基于流体散射的多普勒效应的超声波流量计。同时，前苏联科学家还对流道内的流场分布进行了研究，将线流是直线的轨迹作为层流，将线流是杂乱无规则的轨迹作为湍流，并且通过大量的实验给出了在不同的流场下的速度分布校正公式。随着半导体技术和工艺制造水平的快速发展，研制出了大量计算能力强大的芯片，可以使得时间间隔的分辨率得到进一步地提高，这有利于研制高精度的超声波气体流量计。

1980年，随着DSP、FPGA各种微处理器的出现提高了计算能力和集成了许多功能即简化了超声波气体流量计的开发工作。其中特别是德国的TDC系列芯片的出现，其测量时间的精度可以达到ps级别，理论上这已经完全达到了超声波气流流量计高精度的要求。虽然在实际应用中有许多因素可以影响测量的精度，但在理论上是可行的。现在超声波流量计不仅精度高而且可以远程监控更加地智能化，其应用领域也越来越广泛。

(二) 国内研究现状

由于九十年代我国的工业生产比较落后，因此对超声波流量计的研究要晚于国外。1960年的时候，国内的一些高校和研究所才开始研究超声波流量计。1967年的时候，国内的第一台流量计问世。1977年的时候，由北京大学研发了第一台超声波流量计，通过测得的流速可直接计算出流量，这是标志着我国超声波流量计发展的里程碑。从1994年的“JJG198-94速度式流量计”计量检定规程到2016年“JJG1030-2007速度式流量计”超声计量检定规程，这代表了我国不停地在探索超声波流量计并且取得了一定的实际应用成果。超声波流量计具有无压损、精度高、量程

宽和无机械传动部件等优点被人们广泛地应用且渐渐地成为一种主流的趋势。在90年代，国家对国内的仪表越来越重视。国内的一些高校如浙江大学、大连理工大学和研究机构对超声波流量计积累了一定的经验，并且可以研制出超声波流量计的样机。目前，虽然国内可以研制出超声波流量计并可以应用在实际的场景中，但是一些需要高精度的超声波流量计的场合还是得去国外购买。比如工业中常用的超声波流量计、家用的超声波流量计和商业中的超声波流量计就需要满足高精度、稳定性好、可靠性高等要求。进口的超声波流量计由于维护的成本太高满足不了国内对超声波流量计的需求。因此自主研发各种计量场景下高精度、低成本超声波流量计是迫切需要的。

二、超声波计量技术

(一) 时差法超声波计量技术原理

超声波燃气表常采用时间差测量方法。以直径为D的圆形流道为例。图1

超声波的传感器应按图1安装。工作面平行布置、超声传播方向及工作面垂直。两种不同的工作状态，必要时可对其进行修改。当超声换能器处于发射处理状态时，工作表面称为发射表面。当接收超声波并工作时，工作表面称为接收面。

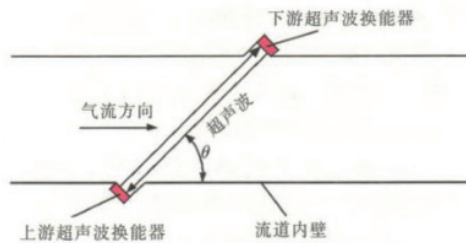


图1 时差法超声波计量技术原理

上游和下游超声波转换器发送或接收交替超声波。超声波顺流是超声波从上游超声波转换器的传输表面到下游超声波转换器的接收表面。超声波逆流是超声波从下游超声波转换器的传输表面传输，并从上游超声波转换器的表面接收。上下游超声波转换器表面之间的线性距离为通道长度，超声波方向与通道内壁之间的角度为声道角。图2显示了超声波顺流原理和超声波转换器的接收^[3]。

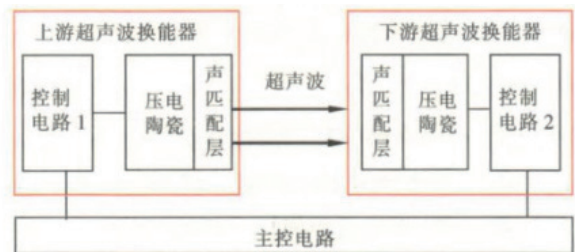


图2 超声波换能器超声波顺流传播发射和接收原理

图2超声波换能器按流量启动和接收的主控制电路起到调

节上下游超声换能器模式转换的作用,以促进气体的测量。

控制电路1和控制电路2可以调节超声波转换器的工作模式,根据主控制电路的指示处于超声波发射或接收状态。

压电陶瓷是电能和超声机械能转化的主要部分。当施加恒定张力时,厚度变化,在表面形成机械振荡,形成超声波信号。当你在压力下获得超声波时,厚度变化,产生与你获得的压力成正比的电荷。

声耦合层与压电陶瓷紧密结合,提高超声传输和能量转换效率,有利于超声转换器在气体中发射和接收超声波。

超声波换能器恒定超声波流量的辐照和接收过程如下。

上游超声换能器的超声发射:主控制电路将超声发射控制引导到超声控制回路中上游换能器,控制电路1控制超声波换能器,压电陶瓷,使极化产生与电场相对应的变形和机械应力,形成高频振荡,产生超声波。从声学对应层释放。完成超声波传输后,关闭传输开关。

下游超声换能器的超声接收:主控制回路将接收器的超声波指令发送至控制阶段,并向下游发送超声波。控制电路2应与上游超声波发射器开关同步,打开下游超声波接收器开关,通过压电陶瓷产生电压并形成电信号,接收开关闭合。

超声换能器的传播和接收过程与超声换能器的恒定传播、发射和接收过程相似。不同之处在于,当超声波逆电流传播时,控制电路2控制超声波发射器下游的发射开关,打开超声波,控制电路1,用于接收上游超声波^[4]。

三、超声波燃气表计量技术问题分析

(一) 时间测量问题

由式 $\Delta t = \frac{2vL \cos \theta}{c^2}$ 可知,若 θ 一定,流道直径D越小,则

Δt 越小,对测量出 Δt 的分辨率要求越高。超声波燃气表能够实现膜式燃气表能够准确计量的最小流量 $0.016 \text{ m}^3/\text{h}$ 。假设在标准状态 (20°C , 101.325 kPa) 下流道内天然气流量为 $0.016 \text{ m}^3/\text{h}$,则对应工况条件 (20°C , 103.325 kPa , 以下同) 下流道内天然气流量 q 为 $0.01569 \text{ m}^3/\text{h}$,假设流道直径D为 25 mm , θ 为 45° ,则对应工况条件下天然气平均流速 v 为 $8.87 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 。声道长度 L 为 0.0354 m ,假定工况条件下 c 为 431 m/s ,由式 $\Delta t = \frac{2vL \cos \theta}{c^2}$ 可以计算得到 Δt 为 2.39 ns 。按照燃气流量 q 最大

允许相对误差为 $\pm 3\%$ 计算,结合式 $q = \frac{Ac^2 \Delta t}{2L \cos \theta}$,则可以计

算得到 Δt 的最大允许误差为 72 ps 。由此可知,要实现准确计量,计时芯片的分辨能力需要达到 ps 级,要求很高^[5]。

(二) 流道设计问题

由于超声波燃气表的直径较小,因此比排气管需要更高的加工精度。这是因为在相同的加工精度下,加工误差将在很大程度上影响管道的出口路径。除了改变通道内的流量截面外,通道处理时的尺寸误差也会因通道内杂质堆积、热膨胀和冷却而改变流量截面。超声测量技术在小管上不能达到高精度,对这些管径的影响也特别显著。

以圆形流道截面A和流道D关系为例:

$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (1)$$

根据流道直径D与声道长度L的关系,可得:

$$L = \frac{D}{\sin \theta} \quad (2)$$

将式(1)和式(2)代入式 $q = \frac{Ac^2 \Delta t}{2L \cos \theta}$,可得:

$$q = \frac{\pi D c^2 \Delta t}{8 \cot \theta} \quad (3)$$

在其他条件为恒定的情况下,如式(3)所示,当通道直径为 25 mm 时, q 的相对流量误差为 4% 。当通道直径为 250 mm 时, q 的相对误差为 0.4% 。超声波燃气表在测量误差中反映了与流道相关的任意元件、在任意工序中都会产生的误差,由此超声燃气表的测量误差增大。

(三) 低功耗设计问题

在能耗要求方面,首先满足天然气的安全要求,然后满足计量要求,最后满足其他功能的要求。测量功能模块和附加功能模块均应考虑低功耗设计,以确保最大工作流程符合相关国家标准。

基于超声波燃气表的纯电子特性,测量和附加功能必须与电源一起工作,因此能量依赖性高。所以超声波燃气表不需要经常测量流量需要设计睡眠模式和动作模式来降低功耗。处于休眠状态时,并不意味着不工作,在该模式下的工作频率降低,以减少能耗。睡眠模式工作频率的选择直接决定了检测的准确性和电源的持续时间^[6]。

四、超声波燃气表家用燃气计量适应性分析

超声波燃气表在安装至管道前,进出气口的防尘盖不能打开。超声波燃气表是速度式计量仪表,当安装前进出气口有气体流过,并持续一定时间,表具会发生计量或者根据设定的保护功能对表具阀门进行关阀操作,以上的结果都会增加后续人员的现场工作。在大规模安装时,必然会增加安装工作以外的后续工作量,如因为新表出现计数,用户使用后因为使用费发生争议产生投诉等问题,增加客服体系一系列的服务流程成本。超声波测量技术的特点要求被测天然气成分稳定、通道直径大、天然气流动状态均匀。因此,要想实现家用燃气表的超声波计量技术,需要注意以下几点^[7]。

(一) 国内天然气成分复杂,变化多,杂质多,使用家用燃气表的超声波计量技术要考虑理论声速的计算的影响。

(二) 超声波燃气表通道的直径较小。在生产和装配期间,要注意通道直径的测量误差,不要在安装时引起的通道变形、注意运行期间温度变化引起的热膨胀和收缩的影响,不能让气体中杂质的积聚和腐蚀改变流动截面,影响天然气的测量精度^[8]。

(三) 超声波燃气表通常,前直线管道的长度大于管道直径的十倍。因此,超声波燃气表要解决安装在环境复杂、空间有限的住宅环境的情况。

总之,虽然超声波燃气表较传统皮膜燃气表而言,在精度、量程、可重复性、体积、使用寿命等方面有无可比拟的优势,是传统膜式燃气表的最佳替代产品,是燃气公司提高管理和效益的优先选择。但是也需要燃气从业人员的传统认知做出调整,跳出表端计量的单一观点,从燃气计量管理上对超声波燃气表的安装、应用做出详细的管理实施方案,对安装、运维人员进行培训和要求。

参考文献:

- [1] 韩朝辉,梁传运,张景. 燃气仪表计量的影响因素分析[J]. 上海煤气, 2020(05): 22-24.
- [2] 张伦. 面向耐高压换能器的低功耗气体超声波流量变送器研制[D]. 合肥工业大学, 2020.
- [3] 蔡树荣. 超声波燃气表技术特性研究与分析[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(06): 30-32.
- [4] 黄常龙. 超声波燃气表环境适应性研究[D]. 重庆大学, 2018.
- [5] 王秀桥,黎红军,赵晓军,方炯,胡良传. 智能超声波燃气表的技术研究[J]. 煤气与热力, 2017, 37(08): 26-28.
- [6] 强璐莹. 户用超声波燃气表的研发[D]. 浙江大学, 2012.
- [7] 丁水龙,李乐,李帆,方炯. 工商用单声道超声波燃气表计量特性测试[J]. 城市燃气, 2019(12): 13-18.
- [8] 周艳,李宁,向德华. 超声波燃气表污染物影响试验分析[J]. 计量技术, 2019(11): 47-52.

作者简介: 冷小广,出生于1988年,男,汉族,山东省青州市,本科,主要从事超声波燃气计量,嵌入式软硬件研发。