



气体超声波流量计

陈书洗 张耀华

(中国科学院合肥智能机械研究所)

钱以诚 冯大中

(四川石油勘察规划设计院) (四川石油输气管理处)

1983 年 2 月 4 日收到

本文叙述的气体超声波流量计,采用了声阻抗匹配的超声波换能器,用微型计算机进行测量及数据处理,克服了时差法的温度效应问题,使仪器有更大的灵活性和可靠性。本文给出了实验室和天然气管线现场的试验结果;超声波流量计与孔板流量计测量对比,其误差在 0.6% 以内。此外,文章还对设计方法和影响测量精度等某些因素作了讨论。

一、引言

超声波流量计是在测量声速的原理基础上发展起来的。五十年代以后研究的大多是液体的超声波流量计。用于气体的超声波流量计,在七十年代报道才有所增加。这是因为气体介质的声特性阻抗很低,以及气体介质超声波传播衰减较大,致使超声波流量计未能成功地用于气体。1973 年以后,Scapa 公司研制了多谱勒超声流量计;哥伦比亚气体服务公司研制了 Sonimeter-1350TM 声波流量计;日本内海秀雄也研制了气体超声流量计。据称,前两种能适用于各种中、低气体流量测量^[1-3]。我们研制的气体超声流量计,在换能器与负载介质之间采用声阻抗匹配,能有效克服压电晶体和空气介质之间的声失配;采用单板微处理机构成流量计,能进行自动检测、自动修正系数以及数据处理等,并能同时测量流速和声速,克服了直接时差法的温度效应等问题,保证其测量精度。微处理机增加了仪器的灵活性,并能构成质量流量仪器。

该仪器可用于中、低压管道中气体的流速和流量测量。例如:天然气生产及储运、氨气等化工生产过程的测量和监控,以及风洞实验室的流速测量等。

二、测量原理

流体的流速与超声波在流体中顺流和逆流之间的传播时间差存在着线性关系。只要分别在顺流和逆流方向上测量出超声波的传播时间,就可以换算出流体的流速。

超声波测量流速的基本原理如图 1 所示,在管道上斜装一对超声换能器组成声路。超声波的顺、逆传播时间分别为:

$$t_d = \frac{L - l}{c + V \cos \theta} + \frac{l}{c} \quad (1)$$

$$t_n = \frac{L - l}{c - V \cos \theta} + \frac{l}{c} \quad (2)$$

式中 c 为流体中的声速; V 为流体流速; θ 为声程 L 与管道轴线之夹角, l 为安装换能器的管壁上凹坑内沿声程的深度(见图 1)。

由式(1)和式(2),并因 $c \gg V$, 求得沿声

程上的线平均流速为:

$$V_L = \frac{L^2}{2(L-l)\cos\theta} \left(\frac{1}{t_d} - \frac{1}{t_s} \right) \quad (3)$$

由式(3)可以看出,流速 V_L 与 $\left(\frac{1}{t_d} - \frac{1}{t_s} \right)$ 有关,与流体中的声速无关。

由流体力学可知,在光滑圆管道中,在层流状态,流速呈抛物线规律分布,在湍流状态则呈高次抛物线或对数规律分布。管道内速度分布可用雷诺数 Re 描述。一般认为,当 $Re > 10^4$ 时即呈湍流模式。考虑上述因素,式(3)须经流体力学修正,才能确定实际管道截面平均流速。

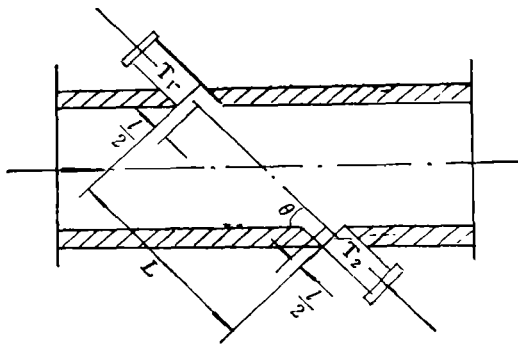


图1 原理图

沿管道截面的平均流速 $\bar{V}_s$ 与体积流量 Q 有如下关系:

$$\bar{V}_s = \frac{Q}{A} = \frac{\iint_A V(A) dA}{A}$$

或

$$\bar{V}_s = \frac{2}{R^2} \int_0^R V(r) r dr \quad (4)$$

式中 Q 为管道内体积流量; $V(r)$ 为截面上任意一点的速度; r 为该点至管壁的距离; R 为管道的半径。

超声波声程上的线平均流速可以表示为

$$V_L = \frac{1}{L} \int_0^L V(l) dl \quad (5)$$

考虑到声程上的流速相当于沿管道直径上的线平均流速,则

应用声学

$$V_L = \frac{1}{2R} \int_{-R}^{+R} V(r) dr \quad (5a)$$

由式(4)和式(5a)可以看出, V_L 与 $\bar{V}_s$ 之比为

$$K = \frac{V_L}{\bar{V}_s} = \frac{\frac{1}{2R} \int_{-R}^{+R} V(r) dr}{\frac{2}{R^2} \int_0^R V(r) r dr} \quad (6)$$

K 称为流体动力学校正系数。公认比较精确的流速校正系数公式^[4]为:

$$K = 1 + 0.01 \sqrt{6.25 + 431 Re^{-0.237}} \quad (7)$$

因此流体的体积流量应表示为

$$Q = A \cdot \bar{V}_s = A \cdot \frac{V_L}{K} \quad (8)$$

式中 $A = \pi R^2$ 为管道的截面积。

应该指出,流速校正系数不是雷诺数的单值函数,它与测量管段条件,即测量段的上下游直管长度,入口前局部阻力件形式及工艺等诸多因素有关。流速校正系数可以在校正装置上进行测定。为了保证严格的校准和测量精度,要求上游直管段长度为 $30D$ 至 $40D$,下游直管段长度大于 $15D$ 。

三、换能器

在超声测量技术中,最常用的超声换能器是压电晶体换能器。我们选用发、收兼用的锆钛酸铅压电陶瓷片,即 SF 型 PZT。

压电晶体用于气体超声波流量计遇到的主要困难是特性声阻抗失配问题。压电陶瓷体的特性声阻抗 $Z_1 = 11 \times 10^6 \sim 30 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, 空气的特性声阻抗 $Z_2 = 3.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 。由下式

$$\alpha = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (9)$$

可知,声能透射率约为 0.40×10^{-4} 。通过两个换能器,收到的超声波能量甚微。基于这个原因,文献[2]介绍的超声波气体流量计采用气体动力式声信号发生器。最近该公司改进的超声气体流量计改用加匹配层的压电陶瓷换能器^[5]。

采用多层结构,加匹配层可以改善声阻抗

匹配^[6]。可选用一层或几层中间材料置于压电晶体与负载介质之间作为耦合层,以提高传输增益。如以 Z_1 和 Z_3 分别代表陶瓷晶体与气体的特性阻抗, Z_2 为耦合层材料的特性阻抗,则可以借助传输公式来确定耦合层厚度 d :

$$Z_1 = Z_2 \left(\frac{Z_3 \cos kd + jZ_2 \sin kd}{Z_2 \cos kd + jZ_3 \sin kd} \right) \quad (10)$$

其中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。当 $d = \frac{\lambda}{4}$, $Z_2 = \sqrt{Z_1 \cdot Z_3}$ 时,

能达到最高的传输效率。作为压电晶体和空气负载之间耦合的特性阻抗应为 $Z_2 = 10 \times 10^4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, 在实际应用中是很难准确找到这样一种材料的。

我们试制的换能器探头,采用单层耦合材料,这种材料是用适量的聚四氟乙烯细粉与环氧树脂混合加工制成,具有比较低的阻抗(约为 $2 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$)。选耦合层厚度 $d = \frac{\lambda}{4}$ 。使

用过两种不同材料,均能达到较好的匹配效果。在同样的电激励功率驱动下,可使接收信号幅度提高 32dB。图 2 为声程等于 300mm 接收换能器上得到的信号波形。

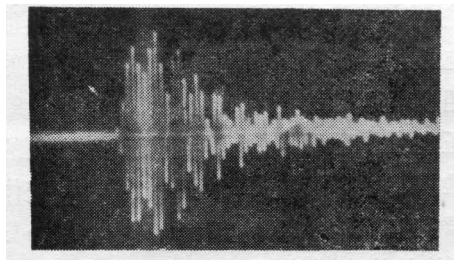


图 2 接收换能器接收信号波形
(纵坐标 100mv/cm)

气体介质中声波衰减特性是气体超声波流量计的另一个困难。在脉冲式超声波测量技术中,为了保证测量精度,应要求较高的超声波频率,但是因气体本身的粘滞性,热传导等所引起的吸收效应,使介质吸收系数与频率的平方成正比,因此频率又不宜选得过高。我们选用厚度为 10mm 的圆板形压电陶瓷,固有频率为 200kHz。换能器结构图如图 3 所示。实验证明,这种换能器结构简单,性能稳定,其耐腐蚀

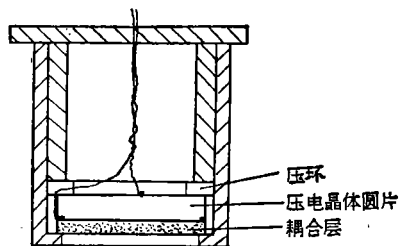


图 3 换能器结构图

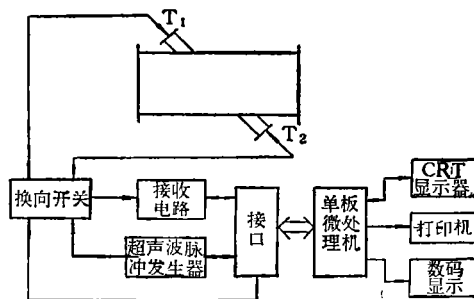


图 4 仪器结构框图

性良好。

四、仪器结构

图 4 为超声波流量计结构框图。仪器由检测部份,脉冲发生器,放大器,单板微型计算机和接口电路组成。检测部份采用单路结构,换能器 T_1 和 T_2 兼作发射和接收超声波之用,由换向开关转换。仪器交替测量 t_d 和 t_u ,每一秒钟交换一次。

在顺流周期中,由微型机控制脉冲发生器产生 10 个电脉冲,这串脉冲由换向开关加到换能器 T_1 上。每个脉冲前沿同时触发换能器和接口电路中的计时器,计时开始。时钟由微型机的时钟信号 (18MHz) 提供。当一声脉冲经过声程 L 后,换能器 T_2 接收这一信号,并由换向开关馈入放大器,经过放大后的信号关闭计时电路,计时停止,测得顺流时间 t_d 。微型机通过给定的程序进行 10 个循环的测量得到 Σt_d 。

同理,在逆流周期中测出 10 次逆流传播时间 Σt_u 并送入计算机。直到 20 次传播时间测量完毕,微型机算出平均流速和流量。式(6)中的流速校正系数和式(3)中的系数分别存入微

型机的只读存储器。微型机以给定的程序自动地对存入的全部数据进行处理。测量结果由 8 位数码管显示,并由接口电路将结果送到 14 位微型打印机和 CRT 显示器等外部设备。

五、实验装置

本系统曾数次进行实验室和现场试验。实

验室内以常压空气为流动介质,校准装置分别用过毕托管和孔板流量计。现场试验中以天然气为流动介质,管道内气压在 $9\sim 25\text{kg/cm}^2$ 范围,校准采用孔板流量计。

实验装置如图 5 所示。检测器管段长 900 mm,管道内径 200 mm,管壁厚 10 mm。安装探头的一对斜管与主管轴线之间夹角为 45° ,探头装入斜管中而又不伸出主管内,这样可以

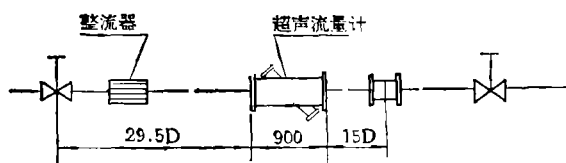


图 5 实验校正装置图

保证管道内部无障碍物。探头用“O”形圈密封安装。检测器可耐受 25kg/cm^2 压力。试验管道的上游管段长 $29.5D$,下游管段长 $15D$ 。校准用的孔板流量计安装在下游出口处,孔板流量计截面比 m 为 0.4。下游保证有一定的长度。为了保证气流稳定,上游入口处装有整流器,整流器长 40mm。记录仪分别用过微压计和差压计。静压用 0.5 级压力表。温度用精密水银玻璃温度计和半导体温度计。

六、实验结果与精度讨论

实验结果示于图 6—8。图 6 为用孔板流量计作校准装置的实验室测试曲线,图 7 为现场测试曲线。实验是在不同的日期和不同温度、压力等条件下进行的。结果表明,当流速在 $5\sim 25\text{ms}$ 范围内,超声波流量计测量的流速与孔板流量计测量的流速对比,其满度误差为 0.6%,图 8 示出本系统的流速刻度误差。

实验证明了所取压电式换能器结构适用于气体超声波流量计。如图 2 所示,接收信号比较大,因此在整个流速范围内,均能保证接收信号的首波(即前沿)触发计时电路,用一只 60dB 的放大器就可以保证测量精度,并且有较强的抗扰能力。

应用声学

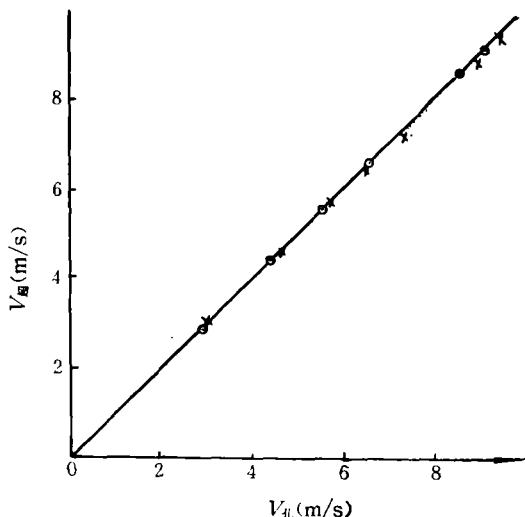


图 6 实验室测试曲线

由式(3)可见,仪器的测量精度与声程长度的测量精度、声时测量精度和角度加工精度有关。要求有比较高的机械加工精度和量测精度。当声程 L 测量误差为 $\pm 1\text{mm}$ 将产生 $\pm 0.3\%$ 的附加误差;而角度加工误差 $\pm 0.1^\circ$,将产生附加误差为 $\pm 0.15\%$ 。

流体介质流动时还会产生声束偏移,流速越高这种效应越显著。它不但使测量时接收信号幅度降低,而且还会影响测量精度。若流速为 30m/s ,这种效应将引入 $\pm 0.1\%$ 的误差。

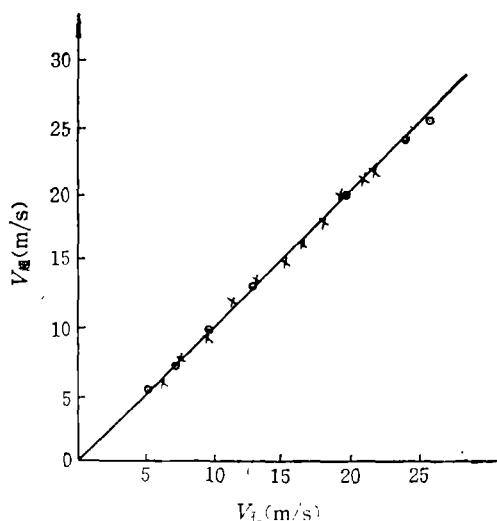


图7 现场试验曲线

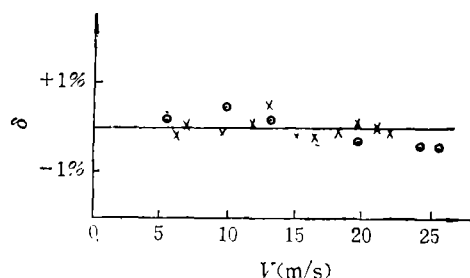


图8 误差曲线

流速分布不均匀性也限制了测量精度的提高。例如,对天然气而言,当流速从5m/s变化到25m/s,流速校正系数约改变0.80%。但在现场试验中求得的流速校正系数,基本上符合式(7)的理论计算值。

应该指出,我们在计算线平均流速时是假设在压电片中心轴线上进行积分,而实际上换能器发射的超声波却是一束射线,形成了一个在面积带上的积分,其结果使得实验测得的流速校正系数略为偏低。因此有提出要求压电晶片直径 $d < \frac{D}{10}$ [7]。

上述影响仪器测量精度的诸因素中,测量管段的加工精度,管内流速的分布不均匀性以及电气计时误差是主要因素。而其它因素影响较小,可以不予考虑。在流速5m/s—25m/s范

围内,其最大误差估算为 $\pm 0.68\%$,随着流速的增加,误差变小。本仪器采用一次性校准即可满足一般工业测量的需要。对于要求高的场合,需要更精确的校正。用微型机根据测得的 V_L ,选择其相应的 K 值进行自动校正,可进一步提高测量精度。

七、结 束 语

在流量测量技术中,超声波流量计具有其它流量计不可相比的优点。超声波流量计无插入部件和可动部件,不改变流体的流态,不会对流体产生附加阻力。测量结果呈线性,而且基本上不受流体物理参数的影响。

我们根据声振动传播动力学原理,还提出用声学法测量气体密度的新方法。在本仪器中添加测量介质压力的压力传感器。由微型计算机作数据处理,最终可以测出密度和质量流量。经82年的一次现场试验,证实这种方法是可行的。

可见,采用微型计算机,在不太复杂的检测器结构的情况下,可以完成多功能的作用。这在许多科研及工业部门可有广泛的用途。可望这种流量计不久将在自动化测量技术中发挥重要作用。

参加此项研究工作的还有合肥智能机械研究所的朱翠华,巫昊,黄怀萍,马士忠和段忆生等同志。

参 考 文 献

- [1] Scapa, Lab. Inc. *Ultrasonics*, 11-2 (1973), 55—56.
- [2] F. Bert Cook, *Energy Pipelines and System*, 3 (1974), 33—38.
- [3] 内海秀雄,“计量研究所报告”, 26-1 (1977) 中译“国外计量”, 3(1978).
- [4] Г. И., Биргер, *Измерительная Техника*, 10 (1962), 53—55.
- [5] W. D. Munk, *Oil and Gas Journal*, Sept. 6 (1982), 111—117.
- [6] L. C. Lynnworth, *IEEE. Trans. on Sonics and Ultrasonics*, SU-12 (1965), 37—48.
- [7] Н. И., Бражников *Измерительная Техника*, 8, (1966), 57—62.