

超声波流量计测量流体声速的实验方法

王新峰[†] 熊显潮 高敏忠

(中国酒泉卫星发射中心发射测试站, 酒泉 732750)

(2010年12月10日收到; 2011年5月21日收到修改稿)

为获取液体介质的声速值, 设计了一种测定流体声速的实验方法, 该方法利用时差式超声波流量计和标准流量校验设备同时对封闭管道中的液体进行流速测量, 分别得到流速的测量值和真实值, 从而计算出超声波流量计的仪表系数, 并由此导出了一定条件下液体介质的声速值随仪表系数的变化关系式. 利用该方法测量给出了 0.17 MPa 下四氧化二氮 (N_2O_4) 在 7.6—19.4 °C、偏二甲肼 ($(CH_3)_2NNH_2$) 在 6.5—25.2 °C 范围内的流体声速值, 并为其他液体介质的声速测量提供了借鉴.

关键词: 超声波流量计, 声速, 仪表系数, 温度

PACS: 43.35.+d, 43.58.+z, 62.60.+v

1. 引言

声速是描述声波在媒质中传播特性的一个基本物理量, 表征声波能量的传递快慢, 对于完全气体而言, 声速可以直接用状态方程^[1]计算得到. 实际中经常需要用到液体的声速值, 它是液体介质中的压力波传播速度, 反映的是液体的压缩性, 可压缩性愈大, 声速愈小, 反之声速愈大, 理想不可压缩流体声速是无限大. 由于弹性模量 E 可表示为^[2]

$$E = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right) \rho, \quad (1)$$

因此液体和固体介质的声速可表示为

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (2)$$

但是液体的弹性模量 E 不如固体好测量, 因此直接利用上述公式计算液体中的声速很困难, 除依据一些理论模型^[3, 4]进行计算外, 一般通过实验方法来测量. 依据声波传播特性测量液体介质声速的方法比较多, 常用的实验方法有共振干涉法^[5-7] (又叫振幅极值法)、相位比较法^[7, 8]、反射回波法^[9-14]、时差法^[15, 16]等. 共振干涉法和相位比较法都是通过测量得到声波的波长, 然后通过频率、波长和声速的关系式计算声速值, 测量方法和设备较

为简单, 但通常需要借助示波器进行人为观察判断, 准确度不高; 反射回波法是将超声波入射到一定厚度的被测样品中, 通过检测回波信号的传播时间来计算声速, 一般为提高测量精度需要增加脉冲回波次数, 以达到延长传输距离的目的. 时差法和反射回波法一样均采用超声波技术, 但反射回波法只采用单个超声波发射探头, 而时差法则采用一发一收两个探头, 利用收发时间差和传输距离计算声速. 超声波由于频率高, 衍射效应小, 传播方向性好, 且在固体和液体传播过程中穿透力强、衰减小, 应用最为广泛, 测量精度较高. 此外布里渊散射法^[17, 18]、脉冲回波谱分析法^[19]、声波阻抗法^[20]也有所应用. 超声波流量计作为超声技术的典型代表已经在工业上广泛应用, 作者在利用时差式超声波流量计对液体介质进行流速测量时发现需要向流量计输入待测液体介质的声速值, 为获取不同温度下液体介质的声速值以满足流速测量的需要, 本文通过时差式超声波流量计和标准流量校验设备的配合使用总结提出了一种测量流体声速的实验方法.

2. 时差式超声波流量计测速原理

时差式超声波流量计通过一对探头发射和接收超声波, 当超声波在流体介质中传播时, 其顺流

[†] E-mail: wangxinfeng@tsinghua.org.cn

方向传播速度会增大,逆流方向则减小,同一传播距离就会有不同的传播时间,通过超声波探头测量顺流传播时间和逆流传播时间之差来计算管道中流体介质的瞬时流速,再根据管道内径即可计算得到体积流量.超声波流量计的超声探头采用V法^[21]安装时,两个探头安装于管道外表面的同侧并与管道轴线保持同一水平高度,超声波传播的路径如图1所示.

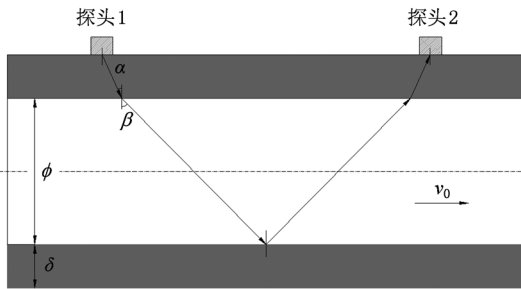


图1 超声波在管道及液体中的传播路径

设管道内径为 ϕ , 壁厚为 δ , 流体流动速度为 v_0 , 超声波在静止流体介质中的传播速度即声速为 c , 超声波从管壁进入流体界面时的入射角和折射角分别是 α, β . 则超声波在顺流方向从探头1到达探头2的传播时间为

$$t_1 = t_0 + \frac{2\phi \cos\beta}{c + v_0 \sin\beta}, \quad (3)$$

其中 t_0 为超声波在管壁材料及探头材料内部传播的时间之和,与待测流速大小无关.超声波在逆流方向从探头2到达探头1传播时间为

$$t_2 = t_0 + \frac{2\phi \cos\beta}{c - v_0 \sin\beta}. \quad (4)$$

(3), (4) 两式相减得

$$t_2 - t_1 = \frac{4\phi v_0 \tan\beta}{c^2 - v_0^2 \sin^2\beta}. \quad (5)$$

因为常温下一般液体的声速可达千米每秒,而液体流速一般不超过数米每秒,相对于声速可以忽略不计,故有 $c^2 \gg v_0^2 \sin^2\beta$, 由(5)式可得流速为

$$v_0 = \frac{c^2 - v_0^2 \sin^2\beta}{4\phi \tan\beta} (t_2 - t_1) \approx \frac{c^2}{4\phi \tan\beta} (t_2 - t_1). \quad (6)$$

可见,对于确定的管道和流体介质,测得的流速与超声波在正反两个行程上的传播时间差成正比.

3. 声速测量实验

超声波流量计是用于测量液体流速和流量的,本身并不能测量流体声速,通过超声波流量计的通讯接口可以直接读取到流速值和体积流量值,但是流量计中的时间差 ($t_2 - t_1$) 的测量值对外进行了封装并不能读取,这意味着直接通过测得的流速和已知的管道参数去计算流体声速的办法行不通.为了实现流体声速测量,设计的声速测量实验示意图如图2所示,液体介质稳定流出液体储罐后,通过流量可调阀门进入测量管道,经过超声波流量计和流量校验设备的同步测量后再流回至储罐中.该实验涉及到两个子实验,一是利用时差式超声波流量计测量流速实验,另一个是利用标准流量校验设备测量流量实验,通过两个实验的结合计算得到流体声速值.

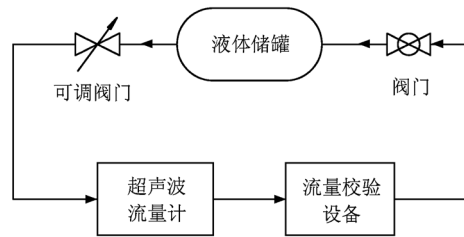


图2 流体声速测量实验示意图

3.1. 超声波流量计测量流速

超声波流量计探头安装前,需要向流量计主机输入(或选择)管道参数,包括材质、外径、壁厚、有无衬里等,流量计根据这些参数计算出两个探头的安装距离,并以此为依据对两探头的安装距离进行适当微调,使超声波信号的质量和强度均达到最佳,微调前确管道中充满液体介质.实际应用中我们发现为保证超声波流量计正常工作,还需要输入一个重要的参数——待测介质的流体声速,也就是说为了实现超声波流量计对不同温度的流体介质都能进行流速测量,必须事先知道相应温度下的流体声速值,这对于一些特殊的流体介质而言几乎是不可能做到的,即便是常见的液体一般也只能得知某一个或某几个特定温度下的流体声速值.若流体声速值无法得知,则流速测量无法进行.通过实践摸索我们发现可以这样来解决:在超声波探头已安装好且管道中充满待测流体介质时,通过试凑法

得到流体声速 c 的一个近似值 c'_0 , 并输入流量计中, 使得超声波流量计能在几个不同温度下均正常工作, 此后保持该近似值设置不变. 这样就可以实现超声波流量计对不同温度下流体介质进行流速测量. 由于输入时差式超声波流量计的各项管道参数及流体声速近似值都是带有一定误差的, 从测速原理可知这些误差将会给流速的测量结果带来误差. 从(6)式可以看出流体流速 v_0 与流体声速 c 的平方成正比关系, 而流体介质的温度变化会引起流体声速 c 的变化, 同时还会引起管径 ϕ 、折射角 β 的细微变化, 此外管道的柔度及液体压力对流体声速也有影响^[22], 所有这些因素都对流速的测量结果存在影响, 影响关系很复杂. 诸多因素的影响导致超声波流量计的流速测量结果存在偏差, 反映在测量值与真实值之间存在差异, 这个差异可以用仪表系数表示, 仪表系数此处定义为流速的真实值 v_0 与测量值 v_m 之比, 即

$$K = \frac{v_0}{v_m}. \quad (7)$$

3.2. 流量校验设备测量流量

流速的真实值 v_0 借助于标准流量校验设备测量后计算获得. 标准流量校验设备配有标准体积的容器和高精度计时器, 通过调节阀门开度使一定流速的液体稳定流入流量校验设备, 根据测量流入的精确体积和流动时间即可得到体积流量, 即

$$Q_{ij} = \frac{V_{ij}}{t_{ij}}. \quad (8)$$

其中 V_{ij}, t_{ij}, Q_{ij} 分别表示在第 i 个流量点时的第 j 次测量得到的体积、时间和体积流量, 一般选取 3—5 个流速点, 每点至少测量 3 次.

再根据管道内径即可计算出流速值 v_0 为

$$v_0 = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi\phi^2}. \quad (9)$$

3.3. 测量实例

利用上述测量方法, 对四氧化二氮(N_2O_4)和偏二甲肼($(CH_3)_2NNH_2$)两种液态介质进行了测量, 图3、图4分别是在不同温度、不同流量(1000 L/min, 1200 L/min, 2400 L/min, $\phi = 200$ mm)下测量计算得到的仪表系数变化情况. 测量结果均表明在相同的体积流量下, 仪表系数随温度变化呈现比较明显的近似线性增大趋势.

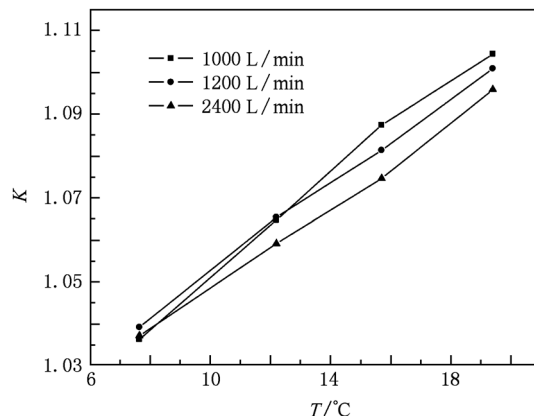


图3 仪表系数随温度变化情况(介质: N_2O_4 , $P = 0.17$ MPa)

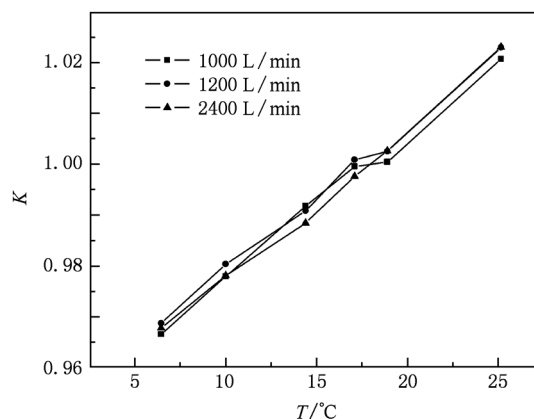


图4 仪表系数随温度变化情况(介质: $(CH_3)_2NNH_2$, $P = 0.17$ MPa)

3.4. 流体声速与仪表系数关系式

由实测结果(图3、图4)可以看出在流量一定时, 即真实流速 v_0 保持不变的条件下, 温度升高时, 仪表系数 K 随之增大, 由(7)式可知 v_m 减小了; 而根据(6)式, 超声波流量计的流速测量值 v_m 可表示为

$$v_m = \frac{c_0'^2}{4\phi \tan\beta} (t_2 - t_1). \quad (10)$$

那么由(10)式可知温度 T 虽然改变了, 但超声波流量计中流体声速的设置值 c'_0 却保持不变, 而温度对 ϕ, β 的影响可以忽略不计, 可推知超声波流量计的时间差 $(t_2 - t_1)$ 的测量值减小了, 结合流速测量原理((6)式)可知是由于流体声速 c 增大的缘故, 这就直接证明了温度对流体声速的影响. 根据超声波流量计的理论测速公式(6)和实际测量计算

公式(10)可知,在管道参数一定、流速不变情况下,时间差($t_2 - t_1$)的测量值也将保持不变,将(6)式除以(10)式并结合(7)式可得

$$K = \frac{v_0}{v_m} = \frac{c^2}{c_0'^2}. \quad (11)$$

考虑到仪表系数 K 随温度 T 变化,因此流体声速与仪表系数的关系式可写成

$$c(T) = \sqrt{K(T)} \cdot c_0'. \quad (12)$$

上式虽然是声速与仪表系数的关系式,但意味着声速变化是温度影响的结果. 根据不同温度下的仪表系数 K ,通过曲线拟合的方法求得 $K = 1$ 时的温度 T_0 ,则温度 T_0 时对应的流体声速即为初始声速设置值 c_0' .

通过将上述实验测量得到的仪表系数 K 值代入(12)式中便可得到 N_2O_4 和 $(CH_3)_2NNH_2$ 两种介质的流体声速随温度的变化情况(见图5),可以看出在所测量的温度范围内,两种介质的流体声速均随温度升高而增大,其中 N_2O_4 液体温度从 $7.6\text{ }^\circ\text{C}$ 变化至 $19.4\text{ }^\circ\text{C}$ 时,其声速从 986 m/s 增大至 1013 m/s ; $(CH_3)_2NNH_2$ 液体温度从 $6.5\text{ }^\circ\text{C}$ 变化至 $25.2\text{ }^\circ\text{C}$ 时,其声速从 1405 m/s 增大至 1444 m/s .

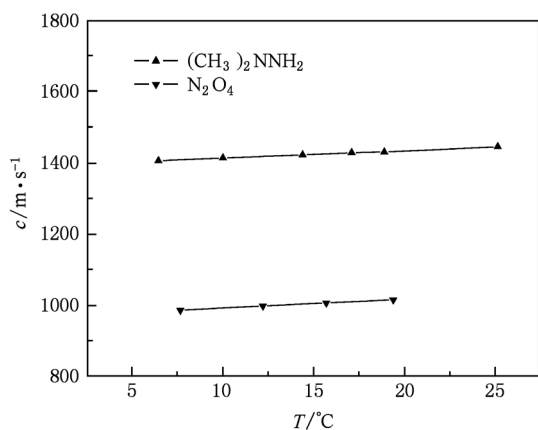


图5 实验测得的流体介质声速值

4. 讨 论

此处需要说明的是时间差($t_2 - t_1$)的测量值与

计算值((5)式)是有区别的,前者是通过超声波流量计的高频超声脉冲电路直接测量出的,而后者则是通过给定的参数计算出的,当温度变化时,测量值是变化的,而计算值保持不变,因为流体声速的设置值没有发生变化.

另外,根据两种液体介质的实测结果发现,流量为 2400 L/min 时测得的仪表系数 K 的非线性误差和重复性误差较之流量为 1200 L/min 和 1000 L/min 均偏小,这从另一个角度说明了超声波流量计测速时对待测介质的流速有一定的要求,流速过低,测量误差将变大. 因此在上述计算流体声速时以流量为 2400 L/min 时测得的仪表系数 K 为准进行计算. 声速测量值的误差取决于流量校验设备和超声波流量计二者的测量误差,通过误差传播公式求得本实验方法测得的流体声速的相对误差为 $\pm 0.25\%$.

5. 结 论

本文通过时差式超声波流量计测量不同温度下的流体流速值,并与标准流量校验设备测量计算得到的流速值进行对比,得到对应温度下的仪表系数,再根据超声波流量计中预设的流体声速近似值,导出了待测流体介质的流体声速与仪表系数的关系式. 由于超声波流量计一般为非接触式,测量时只需将超声波探头安装于管道外表面,与流体介质非接触,且不破坏原有管道结构和布局,但要选择合适的安装位置,避免振动、电磁等对超声波流量计的干扰. 另外,测量中还应注意寻找合适的流量测量点以提高超声波流量计的测量精度从而降低声速测量的误差. 目前超声波流量计应用比较广泛,使用一段时间后一般都必须重新进行标校,该声速测量方法相当于利用标准流量校验设备对超声波流量计进行在线标校的同时就测量出了流体介质的声速值,因此该声速测量方法简便快捷. 虽然应用实例中流体声速值是在恒定的压力下测得的,但同样可以在其他压力条件下进行测量,该方法可以为其他液体介质尤其是有毒、易燃易爆等特殊介质的流体声速测量提供重要借鉴.

- [1] Zhang Z S, Cui G X 1998 *Fluid Dynamics* (Beijing: Tsinghua University Press) p210 (in Chinese) [张兆顺、崔桂香 1998 流体力学(北京:清华大学出版社)第 210 页]
- [2] Pan W Q 1988 *Engineering Fluid Mechanics* (Beijing: Tsinghua University Press) p20 (in Chinese) [潘文全 1988 工程流体力学(北京:清华大学出版社)第 20 页]
- [3] Luo B Y, Lu Y G 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4397 (in Chinese) [罗奔毅、卢义刚 2008 物理学报 **57** 4397]
- [4] Chen S, Guo X Q 2007 *J. Qingdao Univers. (E&T)* **22** 73 (in Chinese) [陈爽、郭绪强 2007 青岛大学学报(工程技术版)**22** 73]
- [5] Del Grosso V A, Mader C W 1972 *J. Acoust. Soc. Am.* **52** 1442
- [6] Chen G J, Xie J N, Huang Y Q 2009 *University Physical Test* (Beijing: National Defense Press) p60 (in Chinese) [陈国杰、谢嘉宁、黄义清 2009 大学物理实验(北京:国防工业出版社)第 60 页]
- [7] Wang H C, Bian Z 2009 *J. Huazhong Agricul. Univers.* **28** 504 (in Chinese) [王红晨、卞之 2009 华中农业大学学报 **28** 504]
- [8] Pan W, Ma Q Y 2009 *J. Nanjing Normal University (Engin. Tech.)* **9** 79 (in Chinese) [潘雯、马青玉 2009 南京师范大学学报(工程技术版)**9** 79]
- [9] Yang R F, Qiu T Q 2006 *Technic. Acoust.* **25** 431 (in Chinese) [杨日福、丘泰球 2006 声学技术 **25** 431]
- [10] Gao F, Zheng Y M 2009 *Transd. and Microsys. Technolog.* **28** 68 (in Chinese) [高峰、郑源明 2009 传感器与微系统 **28** 68]
- [11] Chen C, Millero F J 1977 *J. Acoust. Soc. Am.* **62** 1129
- [12] Mia S, Ohno N 2009 *Tribol. Internat.* **43** 1043
- [13] Gedanitz H, Dávila M J, Baumhögger E, Span R 2010 *J. Chem. Thermodyn.* **42** 478
- [14] Greenberg Y, Yahel E, Ganor M, Hevroni R, Korover I, Dariel M P, Makov G 2008 *J. Non-Crystalline Solids* **354** 4094
- [15] Greenwood M S, Adamson J D, Bamberger J A 2006 *Ultrasonics* **44** 461
- [16] Tong J P, Sui C H, Wei G Y 2004 *J. Transd. Technol.* **23** 28 (in Chinese) [童建平、隋成华、魏高尧 2004 传感器技术 **23** 28]
- [17] Mert B, Sumali H, Campanella O H 2004 *Rev. Sci. Instru.* **75** 2613
- [18] Resa P, Sierra C, Elvira L 2011 *Measur. Sci. Tech.* **22** 025403
- [19] Liu D H, Xu J F, Li R S, Dai R, Gong W P 2002 *Optics Communications* **203** 335
- [20] Liu Y P, Wang Y G 2008 *Tech. Acou.* **27** 176 (in Chinese) [刘艳平、王寅观 2008 声学技术 **27** 176]
- [21] Huang T 2006 *Automat. in Petro-chem. Indus.* **2** 85 (in Chinese) [黄彤 2006 石油化工自动化 **2** 85]
- [22] Du D H, Zhang J T 2006 *Chin. Hydraul. Pneumat.* **10** 7 (in Chinese) [杜大华、张继桐 2006 液压与气动 **10** 7]

Experimental method of measuring sound velocity using ultrasonic flowmeter

Wang Xin-Feng[†] Xiong Xian-Chao Gao Min-Zhong

(*Test and Launch Station, Jiuquan Satellite Launch Center of China, Jiuquan 732750, China*)

(Received 10 December 2010; revised manuscript received 21 May 2011)

Abstract

In order to obtain sound velocity in liquid, an experimental method of measuring sound velocity is designed. A time-difference type ultrasonic flowmeter and normal flow checkout equipment are used to measure the flow speed of liquid in closed hydraulic pipeline simultaneously, then the measured value and the true value of the flow rate are measured, and the meter-factor of the ultrasonic flowmeter is determined. Furthermore, the relationship between the sound velocity and the meter-factor is derived under a certain condition. Based on the method, the velocity of sound in dinitrogen tetroxide (N_2O_4) at 7.6—19.4 °C and unsymmetric dimethyl hydrazine ($((CH_3)_2NNH_2)$) at 6.5—25.2 °C are measured at 0.17 MPa. It provides reference for measuring the sound velocity in other liquid.

Keywords: ultrasonic flowmeter, sound velocity, meter-factor, temperature

PACS: 43.35.+d, 43.58.+z, 62.60.+v

[†] E-mail: wangxinfeng@tsinghua.org.cn