

速差法超声波气体流量计的原理和校准

钱梦碌 梁军汀 朱士明 卢杰

(同济大学声学研究所 上海 200092)

1994年10月12日收到

摘要 本文简要地介绍一种利用超声脉冲沿顺、逆流方向上传播速度之差来测定气体流速及流量的新的微机化超声波气体流量计的工作原理,以及它在内径为700mm,流速在3—13m/s范围内的校准结果。实验结果表明该微机化超声气体流量计的测速精度优于 $\pm 2\%$ 。

关键词 超声, 气体流量计, 校准。

Principle and calibration of ultrasonic gas flowmeter using velocity-difference method

Qian Menglu, Liang Juntong, Zhu Shiming, Lu jie

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract The gas flow in a closed tube can be determined by measuring the difference between the downstream and upstream propagating velocity of ultrasound. In this paper the principle of this kind of ultrasonic flowmeter is discussed in detail and the experimental results of calibration about the gas flowmeter in a $\phi 700$ mm tube system are presented. It is shown that its relative accuracy of measuring the velocity of flow is better than $\pm 2\%$ in the range of 3—13 m/s.

Key words Ultrasound, Gas flowmeter, Calibration

1 引言

随着城市煤气化及国民经济的迅速发展,冶金、化工等各部门对气体大流量的精确计测要求日益迫切,以达到进一步实现节能、安全生产及控制污染等目的。

超声波流量计是通过测量超声脉冲沿顺、逆流方向上声传播时间不同来测量流体的流速和流量的新技术。由于它对流体无阻力,无压力损失,受流体物理性质限制少,以及使用简

便等特点,早已为人们重视,并已成功地用于液体的流量计量。近年来,国际上也已开始了对超声波气体流量计的研制与开发^[1]。

基于目前对气体大流量的计测尚缺乏更有效的手段,加上煤气生产中对煤气计量的需要,在上海市煤气公司及吴淞煤气厂的协作下,我们进行了超声波气体流量计的研制。本文将简要地介绍该流量计的工作原理及在现场管道中的校准结果。

2 工作原理

速差法超声波气体流量计的工作原理可由图1来说明。一对工作频率为 f 的超声换能器 P_1 和 P_2 安装在内径为 D_a 的超声管段的管壁上。 P_1 和 P_2 之间的距离为 l ，而它们的轴线与流体流速 u 之间的夹角为 θ ，且 $D_a = l \sin \theta$ 。当 P_1 发出的超声脉冲沿 l 传播至 P_2 接收，实测得其顺流传播的声时为 t_{12} ，这时沿 l 的顺流声速 c_1 为：

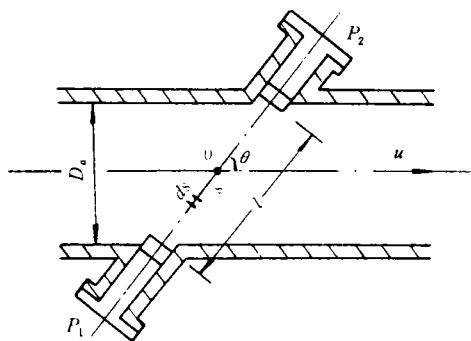


图1 速差法超声波流量计工作原理

$$c_1 = l / t_{12} = c_0 + u \cos \theta. \quad (1)$$

式中： c_0 为流体静止时媒质中的声速。

同样，当 P_2 发射超声脉冲， P_1 接收时，实测的逆流声时为 t_{21} ，而沿 l 的逆流声速 c_2 为：

$$c_2 = l / t_{21} = c_0 - u \cos \theta \quad (2)$$

由式(1)和(2)，得到顺、逆流声速差 Δc ：

$$\Delta c = 2u \cos \theta = l \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) \quad (3)$$

于是，如果 l 及 θ 已知，由实测的 t_{12} 和 t_{21} ，就可以确定流体的流速：

$$u = \frac{l}{2 \cos \theta} \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) \quad (4)$$

然而，由于流体自身的粘滞性和管壁对流体的作用，管道截面上流体的流速分布是不均匀的。通常认为，当管道内流体的雷诺数 $Re > 4000$ 时^[2]，流体呈紊流，在截面上的流速分布可表示为^[3]：

$$u(r) = \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\lambda}{2}} \left[1.875 + 1.25 \ln \left(1 - \frac{r}{R} \right) \right] \right\} \bar{u} \quad (5)$$

式中： $\bar{u}$ 为管道截面上的平均流速， λ 为光滑圆管的阻力系数，且：

$$\lambda = 0.0032 + 0.221 Re^{-0.237} \quad (5a)$$

其中雷诺数 $Re \cong Du/\gamma$ ， $D = 2R$ 为管道内径， γ 为流体运动粘滞系数。

对于截面上具有流速分布的流体，实测得到的顺、逆流声时 t_{12} 和 t_{21} 应为：

$$t_{12} = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{ds}{c_0 + u(r) \cos \theta}, \quad (6)$$

$$t_{21} = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{ds}{c_0 - u(r) \cos \theta}.$$

将式(5)代入上式，并利用关系式：

$$r = s \sin \theta, \quad R = D_a / 2 = l \sin \theta / 2,$$

以及

$$\left[\frac{1.25 \bar{u} \cos \theta}{c_0 + \bar{u} \cos \theta (1 + 1.875 \sqrt{\frac{\lambda}{2}})} \sqrt{\frac{\lambda}{2}} \right]^2 \ll 1,$$

可以得到顺流声时 t_{12} 及顺流声速 c_1 为：

$$t_{12} \cong \frac{l}{c_0 + \bar{u} \cos \theta (1 + 1.875 \sqrt{\frac{\lambda}{2}})}$$

$$\left[1 + \frac{1.25 \bar{u} \cos \theta}{c_0 + \bar{u} \cos \theta (1 + 1.875 \sqrt{\frac{\lambda}{2}})} \right],$$

$$c_1 = l / t_{12} \cong c_0 + \bar{u} \cos \theta + 0.625 \bar{u} \cos \theta \sqrt{\frac{\lambda}{2}}. \quad (7a)$$

而逆流声速 c_2 为：

$$c_2 = l / t_{21} \cong c_0 - \bar{u} \cos \theta - 0.625 \bar{u} \cos \theta \sqrt{\frac{\lambda}{2}} \quad (7b)$$

由式(7a)和(7b)，可以得到有流速分布时截面上的平均流速 $\bar{u}$ 与实测的线平均流速 u 之间的关系：

$$\bar{u} = Ku \quad (8)$$

式中： K 为动力校正因子，且：

$$K = \left(1 + 0.625 \sqrt{\frac{\lambda}{2}} \right)^{-1} \quad (8a)$$

而 u 是式 (4) 所示沿 l 方向、由实测声时 t_{12} 和 t_{21} 所确定的线平均流速。

这样，对于内径为 D_a 的管道，流体的流量 Q 就可由超声速差法测定：

$$Q = \frac{\pi D_a^2}{4} Ku \tag{8b}$$

通常采用的超声时差法测量流体的流量是与流体的声速 c_0 成正比，而超声速差法测得的流体流量只与线平均流速 u 有关，而 u 是与媒质声速 c_0 无关的。因此，与时差法相比，速差法测量流体的流速和流量，将不受媒质组分变化的影响。同时也大大减小了温度等环境参数对流量测量的影响。这对于生产现场的在线流量检测是非常有利的。

式 (8a) 表明，动力校正因子 K 是雷诺数的函数。对于空气，15℃ 时的运动粘滞系数 $\gamma = 1.46 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 。在内径 D_a 为 700mm 的管道内，流速为 3、15 及 35m/s 时相应的 K 值列于表 1。显然，在雷诺数变化约一个数量级时， K 值的变化仅 1% 左右。因此，在实际应用中，完全有可能采用一个动力校正因子 K 值，由实测的线平均流速 u 来得到面平均流速 $\bar{u}$ ，就可以以足够的精度来确定相应的流量。

表 1 内径 700mm 管道内动力校正因子 K 的计算值

流速 (m/s)	雷诺数 Re	阻力系数 λ	K
3	1.43×10^5	0.0167	0.946
15	7.17×10^5	0.0122	0.953
35	1.67×10^6	0.0106	0.956

由于管道内实际的流速分布与式 (5) 的分布总是有差异，为此，我们将由实验来确定 K 值，对超声波气体流量计进行校准。

3 校准

超声波气体流量计的校准是在现场内径 700mm 的管道系统中进行 (图 2)。为了确定超声波气体流量计的动力校正因子 K ，必须采用一标准方法精确测定管道截面的平均流速 $\bar{u}$ 。为此，在校准系统中设立了皮托管段。在超声波气体流量计测量线平均流速 u 的同时，按照国际标准 ISO3966-1977 (E) “测量封闭管道中流体流量——用皮托管的速度面积法”^[3]，来测定截面上的平均流速 $\bar{u}$ 。

根据 ISO3966 规定，在马赫数小于 0.25 的流速范围内，在内径 $D_p = (698.6 \pm 1.5) \text{mm}$ 的截面上，我们选取四个同心圆与二正交直径的 16 个交点上来测量局部流速 u_{pi} ；而面平均流速 $\bar{u}$ 可表示为：

$$\bar{u} = \sum_{i=1}^{16} u_{pi} / 16. \tag{9}$$

而 u_{pi} 为：

$$u_{pi} = (1 - \epsilon) \sqrt{2\xi \left(\frac{\Delta p}{P} \right) \frac{ZRT}{M}} \tag{10a}$$

其中：(1- ϵ) 为流体压缩率，且

$$(1 - \epsilon) \approx \left[1 - \frac{1}{2\gamma} \frac{\Delta p}{P} + \frac{\gamma - 1}{6\gamma^2} \left(\frac{\Delta p}{P} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{10b}$$

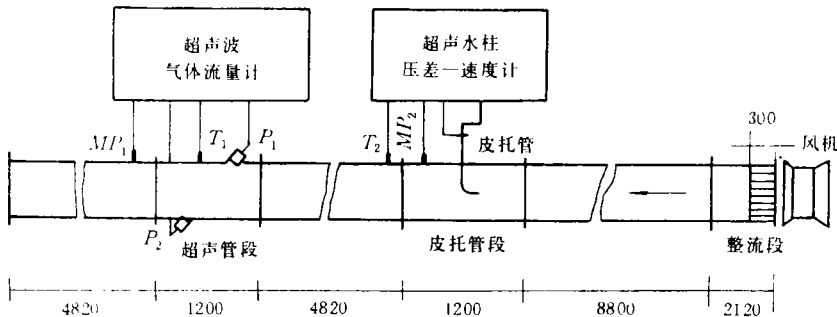


图 2 超声波气体流量计校准系统

T 为测点处温度 ($^{\circ}\text{K}$)，它可由轴上温度 T_0 及 Δp 、 P 来表示，

$$\frac{T_0}{T} = \left(1 + \frac{r-1}{r} \frac{\Delta p}{P}\right) \quad (10c)$$

而 ξ 为标准皮托管的校准因子。本实验使用标准皮托管经国家气象局标定， $\xi=1.000$ ，其用于测速时的精度为 $\pm 0.125\%$ 。 P 是静压，由动态压力传感器 MP_2 检测， T_0 由 A 级的铂电阻温度计检测。 Z 是气体定律偏离因子。对空气，在静压 P 小于 10 倍大气压，温度在 273°K 至 373°K 时， $Z \approx 1$ ；气体常数 $R=8.3143\text{J/mol}\cdot^{\circ}\text{K}$ ； γ 为流体的比热比，对于空气 $\gamma=1.4$ 。而 Δp 是皮托管的全压孔与静压孔之间的压差。它由我们自行研制的智能化超声水柱压差计检测，经中国计量科学研究院测定，在 $0-120\text{mm}$ 水柱压差范围内，其压差测量的精度为 $\pm 0.03\%$ 。

这样，在空气中校准时用皮托管测得的局部流速可以由实测的 Δp 、 P 及 T_0 确定：

$$u_p = 23.966(1-\varepsilon) \cdot$$

$$\sqrt{\xi T_0 \left(\frac{\Delta p}{P}\right) / \left(1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{\Delta p}{P}\right)} \quad (10d)$$

校准时，管道内空气流速的改变是通过增减管道进风口面积来达到。整个实验流速范围为 $3-13\text{m/s}$ 。在某一流速下，皮托管移动到 ISO3966 规定的第 i 个测点，实测得到相应的压差 Δp_i 、静压 P 及温度 T_0 ，输入微机按式 (10d) 计算并显示出 50000 次测量平均值 u_{pi} 。与此同时，超声波气体流量计也实测顺、逆流声时 t_{12} 和 t_{21} ，利用已测定的距离 l ，夹角 θ 以及系统声延时 τ_0 等，按式 (4) 由微机给出及显示 4000 次测量的平均值 u_i 。这一测点结束后，皮托管移到下一个规定的测点，测量相应的 u_{p+1} 及 u_{i+1} 。直到 16 个测点上的 u_{pi} 及 u_i 都测定后，取平均，就得到在这一流速下的线平均流速 u 及面平均流速 $\bar{u}$ 。实验结果如表 2 所示。

表 2 $\phi 700$ 管道中超声气体流量计校准结果

$\bar{u}$ (m/s)	$u \pm \sigma$ (m/s)	u^* (m/s)	$\delta = \frac{u^* - \bar{u}}{\bar{u}}$ (%)	雷诺数 Re ($\times 10^5$)
12.847	13.227 ± 0.120	12.818	-0.23	6.14
*11.550	11.842 ± 0.032	11.479	-0.68	5.52
*10.155	10.376 ± 0.062	10.064	-0.89	4.86
* 8.782	9.126 ± 0.055	8.840	-0.66	4.20
* 7.378	7.640 ± 0.056	7.398	0.27	3.53
* 5.883	6.080 ± 0.039	5.885	0.04	2.81
4.308	4.464 ± 0.041	4.317	0.23	2.06
*13.000	13.502 ± 0.023	13.084	0.65	6.16
*11.131	11.506 ± 0.029	11.148	0.16	5.32
* 9.981	10.285 ± 0.024	9.964	-0.17	4.77
* 8.620	8.945 ± 0.056	8.664	-0.51	4.12
* 7.156	7.483 ± 0.020	7.246	1.26	3.42
* 5.836	6.051 ± 0.026	5.857	0.36	2.79
* 4.285	4.456 ± 0.014	4.310	0.58	2.05
*12.976	13.481 ± 0.037	13.064	0.68	6.21
*10.248	10.393 ± 0.033	10.069	-1.75	4.90
* 7.893	8.106 ± 0.033	7.805	-0.54	3.78
* 5.469	5.616 ± 0.021	5.435	-0.45	2.62
3.056	3.163 ± 0.051	3.056	-0.004	1.46

* 系用于最小二乘法拟合的数据组。

表中 $u \pm \sigma$ 中的 σ , 是 16 个 u_i 的平均值 u 的标准偏差。为了减小由于风机源的不稳定以及环境等对动力校正因子 K 的测量影响, 我们选用 u 测量相对误差 $\delta = \pm \sigma/u \leq 0.73\%$ 的 16 组数据 $(u, \bar{u})$ 进行最小二乘法线性拟合, 得出超声面平均流速 u^* 与线平均流速 u 之间的关系及动力校正因子 K :

$$u^* = (0.970u - 0.012) \text{ (m/s)} \quad (11)$$

$$K = 0.970 \quad (11a)$$

式 (11) 的相关系数 $r = 0.9996$ 。而 u^* 与 $\bar{u}$ 之间的相对误差 δ 也已列入表 2。显然, 在 3—13 m/s 范围内超声波气体流量计的测速误差小于 $\pm 2\%$ 。而且, 实测的动力校正因子 K 值与表 1 的理论估算值也相当一致。这进一步证实了速差法超声波气体流量计不仅在实用上, 而且在原理上也是正确可信的。

4 结论

通过测量超声脉冲沿顺、逆流方向上的传播声时 t_{12} 和 t_{21} , 用速差法得到流体的线平均

流速 u , 再由动力校正因子 K 来确定流体的面平均流速 u^* , 从而实现气体大流量的检测, 这种超声波气体流量计不仅具有对流体无流阻、无压力损失, 受流体组分及环境影响小的优点, 而且测量精度高, 还能工作于低频脉动气流场合。因此, 是一种极有应用前景的气体大流量测试技术。

致谢 本工作的现场校准是在吴淞煤气厂进行。吴淞煤气厂的蔡以志同志, 武达贤高工等进行了 $\phi 700$ 管道系统的设计和施工。中国计量科学研究院流量室的徐英华工程师对该超声波气体流量计进行了校准测试, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 孙东谋. 高桥化工, 1992, (2): 45—47.
- [2] 同济大学声学研究室. 超声工业测量技术, 上海人民出版社, 1977. 161—183.
- [3] International Organization for Standardization, ISO Standard Handbook Vol. 15, Switzerland, ISBN 9267 100769, 1983, 146—184.

(上接第 28 页)

误差的不规则成分进行补偿, 每个声强探头样品都或大或小地存在着高频相位误差的不规则成分, 样品 A 、 B 、 C 、 E 都是经过选择的, 样品 D 的相位误差不规则成分较大, 必须利用其它传声器另行选配调试。

(5) 如整个频段相位误差都不大, 则经过移相网络补偿后能达到较好的技术指标, 如样品 E 。

在测量的 25 个频率点上, 样品 B 、 D 的相位特性未能得到有效的改进, 样品 A 、 C 、 E 的相位特性得到了不同程度的提高, 其中样品 A 在低频段 125 Hz 以下的相位补偿效果十分明显。样品 C 的相位补偿效果最好, 在 23 个频率点上都得到了改进, 特别是将 5000 Hz 频率点上的相位误差从 3.10 度调整到 1.10 度。

4 小结

声强测量的精度主要取决于声强探头两路

信号之间的相位匹配, 我们希望能把相位误差减小到最低限度。在有限的实验条件下, 探头的相位误差限制了声强测量的精度。通过采用电路相位补偿的方法, 能在不同程度上改善声强探头的性能, 如果经过选择的传声器对能够接近所需的要求, 那么通过补偿就能达到所需的要求。另外, 如果后级声强分析系统是采用窄带互谱方式的, 可以对声强探头的相位误差信息进行分析取样存储, 纳入以后每次实时分析的程序, 可以对声强探头的相位误差进行更加全面、更加有效的补偿。

参 考 文 献

- [1] 马大猷, 沈 嵘 编著, 声学手册, 第一版, 北京: 科学出版社, 1983. 589.
- [2] ISO, 9614-1: 1993 (E). 1—5.
- [3] IEC, 1043: 1993. 23—27.