

# 微机化超声波气体流量计的研制

梁军汀 钱梦霖 卢杰 朱士明

(同济大学声学研究所 上海·200092)

超声波在气体中传播的声速随气体流动速度的变化而变化,通过测量管道上斜向对置的一对换能器间超声波沿气流顺向和逆向传播的声速差,可以求出两换能器间气流的线平均流速,进而根据换能器放置角度和管径求得管道内气流的面平均流速及流量。和其它流量计相比,微机化超声波气体流量计具有简便、正确、无流阻、无压力损失、不受气体成分变化、对低频脉动气流及大管径大流速气体流量都能进行正确测量等独特的优点。本文将简要介绍微机化超声波气体流量计的基本原理、电路结构、仪器校准过程及实验结果。

## 1 引言

随着社会生活的现代化,对鼓风机空气流量的测量,城市中使用的煤气及其它工矿企业中大量使用的气体原料或产品的流量测量,已显得日益迫切。

目前,对气体流量的检测,大多使用孔板流量计,它只适用于测量稳态气流,不仅有压力损失,而且是针对小管径的,对于大管径仅能作为参考。微机化超声波气体流量计对气流无压力损失,不仅能正确测量大管径大流速气体流量,而且对低频脉动气流也能进行正确测量。它采用计算机作为主控系统,能实时地快速测量并显示管道内气体的瞬时流量(流速)、压力、温度,同时还能根据用户需要在显示器上以数据的曲线形式显示每小时、每班、每天、每月的累积流量和平均压力,平均温度等参量,随时进行存贮或以报表形式自动打印输出。本流量计适用于各种介质的气体,测试精确(误差小于±2%),操作方便。

## 2 基本原理



图1 换能器安装示意图

超声波气体流量计通过测量超声脉冲沿气流顺向和逆向传播的声速差来求得流速,进而求出流量。

对于如图1所示安装的超声换能器,假设两换能器间的距离为 $L$ ,换能器安装方向和轴线之间的夹角为 $\theta$ ,超声波在静态气体中传播的声速为 $c_0$ ,则当管道内气体流速为 $u$ 时,超声波顺向传播声速 $c_1$ 和逆向传播声速 $c_2$ 分别为<sup>[1],[2]</sup>:

$$c_1 = L/t_1 = c_0 + u \cos \theta \quad (1)$$

$$c_2 = L/t_2 = c_0 - u \cos \theta \quad (2)$$

$$\Delta c = c_1 - c_2 = L/t_1 - L/t_2 = 2u \cos \theta \quad (3)$$

式中, $t_1, t_2$ 为超声波顺向传播声时和逆向传播声时,由(3)式可得

$$u = \frac{L}{2 \cos \theta} \left( \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \quad (3a)$$

如果考虑由于电路、电缆及换能器等产生的延时 $\tau_1, \tau_2$ 则(3a)式可表示为:

$$u = \frac{L}{2 \cos \theta} \left( \frac{1}{t_1 - \tau_1} - \frac{1}{t_2 - \tau_2} \right) \quad (3b)$$

从(3b)式可以看出,只要测出顺向和逆向传播声时 $t_1, t_2$ 及延时 $\tau_1, \tau_2$ ,就能求得管道内的流速 $u$ 。测得的流速 $u$ 与媒质的声速 $c_0$ 无关,因此,用速差法测量流体的流量(流速)将不受媒质成分改变的影响,同时也大大减小了温度对测量的影响,这对于生产现场实

际测量是十分有利的。

由于在管道壁及流体内部存在摩擦粘滞作用,实际流体流速在管道截面上存在着流速分布,因此用超声波测量的流速  $u$  实际上是管道截面内直径上的线平均流速  $u_{线}(\Delta c)$ ,而测量流量需要的是管道内截面的面平均流速 ( $u_{面}$ ),它们之间并不完全相等,因此,用速差法测得的流速  $u_{线}(\Delta c)$  必须经过修正。

根据流体动力学理论,当管道内流体的雷诺数大于 4000 时,流体呈紊流状态,此时,线平均流速与面平均流速之间存在着一动力校正因子  $K$ ,即  $u_{面} = Ku_{线}(\Delta c)$ ;

$$K = (1 + 0.625 \sqrt{\lambda/2})^{-1} \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为光滑圆管的阻力系数:

$$\lambda = 0.0032 + 0.221 Re^{-0.237} \quad (4a)$$

其中  $Re$  为雷诺数:  $Re = DU/\gamma$ ,  $D$  为管道直径,  $U$  为管道内流速,  $\gamma$  为气体的运动粘滞系数。对于空气,  $15^\circ\text{C}$  时  $\gamma = 1.46 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 。

表 1 列出了在内径  $D = 125\text{mm}$  的管道内,流速为 3、15、35m/s 时,相应的动力校正因子  $K$  值,显然在雷诺数变化约一个量

级时,  $K$  值的变化仅 1% 左右,因此在实际应用中完全有可能只采用一个动力校正因子  $K$  值,由实测的线平均流速来得到面平均流速,而截面积为  $S_0$  的管道内的流量  $Q$  为:

$$Q = S_0 K u_{线}(\Delta c) \quad (5)$$

由于管道内气流的复杂性,线平均流速与面平均流速的关系由比托管通过实验精确校准得到,用比托管测量面平均流速及在管道截面上的测点位置分布根据国际标准 ISO3966-1977(E) 而定。

表 1 内径 125mm 管道内动力校正因子  $K$  的计算值

流速(m/s)	雷诺数 $Re$ (* $10^5$ )	阻力系数 $\lambda$	$K$
3	0.257	0.0231	0.937
15	1.284	0.0168	0.946
35	2.997	0.0143	0.950

### 3 仪器及工作原理

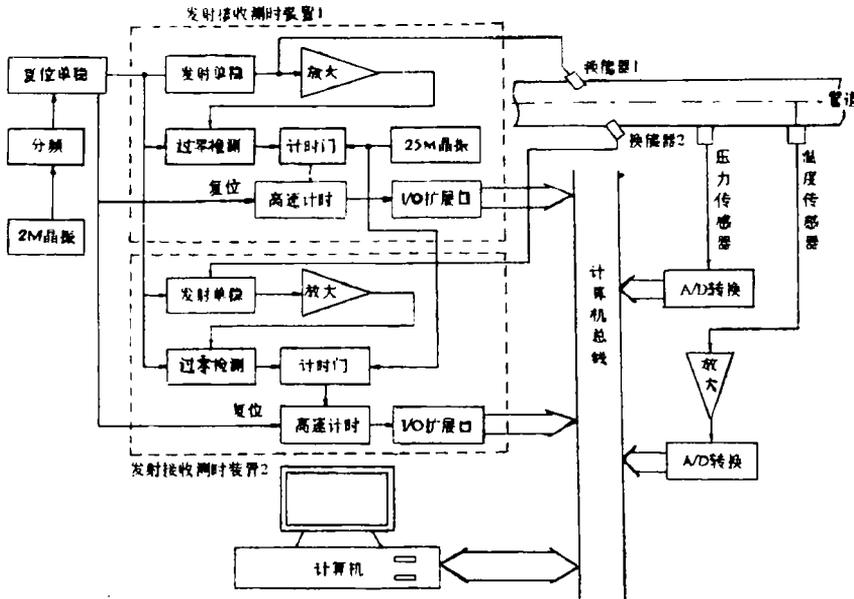


图 2 超声波流量计原理图

微机化超声波气体流量计由两个超声波发射接收测时装置,一个测压装置,一个测温装置和计算机等几部分组成。如图 2 所示。

两个超声波发射接收及测时装置分别触发换能器 1 和换能器 2,使之发射超声脉冲并分别由对方接收,测得超声脉冲顺向传播声时和逆向传播声时。由于我们在测时电路中采取了提高发射接收能力、过零检测、采用尽可能高的超声工作频率和尽可能高的时标频率(25MHz)等措施,计算机又采用了“随机地多次测量后取平均”的方法<sup>[3]</sup>,使得测量声时的标准误差降到纳秒量级,从而达到了很高的测时精度,保证了流速测量的正确性和可靠性。

测压装置采用了 8 位 A/D 转换器,直接对压力传感器内放大器输出的信号进行转换。压力传感器由复旦大学研制,其压力范围为 0~120kPa 响应频率为 1kHz,因此能及时地反映低频脉动气流的压力变化。压力测试灵敏度为 120/256≈0.5kPa。

测温装置采用了高性能放大器和 8 位(A/D)转换器,假设温度范围为 0~50℃,则温度测试灵敏度为 50/256≈0.2℃。压力和温度的测试精度取决于被测气体的压力和温度范围。

计算机直接读取从超声波测时、测压、测温装置中传送来的数字信号,对它们进行预处理和计算,并在屏幕上以数据、曲线等形式显示瞬时流量、瞬时压力、瞬时温度及累积流量、平均压力、平均温度等各种所需参数,自动进行存贮或打印。

仪器中对声时、压力、温度的测试采取了严格的定时测试,其测试重复频率由晶振分频后控制(每秒 50 次),这样,可以方便地根据时间关系对瞬时流量进行累积,得到累积流量及平均压力、平均温度等。

## 4 实验结果

### 4.1 超声波气体流量计的稳态校准

用前面所述的仪器,我们在内径为

φ125mm 的管道内用空气进行了稳态气流的流量测定试验及校准,管道内空气流速的大小由阀门控制,范围为 3~18m/s,管道内的实际面平均流速按照国际标准 ISO3966—1977(E)“测量封闭管道中流体量-用比托管的速度面积法”由比托管测试得到,并以此作为标准对用超声方法测得的流速进行修正。

根据 ISO3966 规定,在马赫数小于 0.25 的流速范围内,可在内径为  $D=125\text{mm}$  的截面上选取三个同心圆与二正交直径的 12 个交点来测量局部流速  $u_i$ ,而面平均流速  $u_p$  为:

$$u_p = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} u_i \quad (5)$$

$u_i$  可由比托管和我们自行研制的超声微压差计测得的压差  $\Delta p$ ,动态压力传感器测得的静压  $P$ ,铂电阻温度计测得的  $T_0$  来确定:

$$u_i = (1-\epsilon) \sqrt{2\zeta \left(\frac{\Delta p}{P}\right) \frac{ZRT}{M}} \quad (6)$$

式中  $(1-\epsilon)$  为流体压缩率,且

$$(1-\epsilon) = \sqrt{1 - \frac{1}{2\gamma} \frac{\Delta p}{P} + \frac{\gamma-1}{6\gamma^2} \left(\frac{\Delta p}{P}\right)^2} \quad (6a)$$

$T$  为测点的温度(°K),它可由轴上温度  $T_0$  及  $\Delta p, P$  来表示:

$$T = T_0 \left(1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{\Delta p}{P}\right)^{-1} \quad (6b)$$

而  $\zeta$  为标准比托管的校准因子,本实验用的标准比托管  $\zeta=1.002$ , $Z$  是气体定律偏离因子,对于空气,在静压  $P$  小于 10 倍大气压且温度在 273K 至 373K 时  $Z \approx 1$ , $R$  为气体常数, $R=8.3143\text{J/mol} \cdot \text{K}$ , $\gamma$  为流体比热比, $\gamma=1.4$ , $M$  为摩尔质量, $M=0.02895\text{kg/mol}$ ,因此,在空气中校准时,用比托管测量的局部流速可表示为:

$$u_i = 23.966(1-\epsilon) \cdot \sqrt{\epsilon T_0 \left(\frac{\Delta p}{P}\right) \left(1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{\Delta p}{P}\right)^{-1}} \quad (7)$$

校准时,在某一流速下移动比托管到 ISO3966 规定的某一测点上,由超声压差计测出压差  $\Delta p$ ,静压  $P$  及轴上温度  $T_0$ ,由微机

按(7)式计算并显示出 5000 次测量的平均值  $u_{pi}$ , 与此同时, 超声波气体流量计也由实测的顺向和逆向声时  $t_1, t_2$  以及已测定的距离  $L$ , 夹角  $\theta$  及系统声延时  $\tau_1, \tau_2$  等, 按(3b)式由微机计算并显示出 4000 次测量的平均值  $u_{ai}$ , 这一测点结束后, 移动比托管到下一个测点, 测量相应的  $u_{pi+1}, u_{ai+1}$ , 直到 12 个测点上的流速  $u_{pi}$  和  $u_{ai}$  都测定后, 分别取平均得到该流速下的线平均流速  $u_a$  及面平均流速  $u_p$ , 其实验结果如表 2 所示。

表 2 比托管测量值  $u_p$  超声测量值  $u_a$

面平均流速  $u_a^*$  及相对误差  $\delta$

	$u_p$ (m/s)	$u_a$ (m/s)	$u_a^*$ (m/s)	$\delta = \frac{(u_a^* - u_p)}{u_p}$	$Re (* 10^5)$
1	3.213	3.178	3.219	+0.2%	0.267
2	4.359	4.207	4.368	+0.2%	0.373
3	5.525	5.168	5.440	-1.5%	0.473
4	6.680	6.220	6.615	-1.0%	0.572
5	7.645	7.199	7.707	+0.8%	0.655
6	8.796	8.214	8.840	+0.5%	0.753
7	9.928	9.237	9.982	+0.5%	0.850
8	11.117	10.249	11.112	-0.1%	0.952
9	12.316	11.290	12.274	-0.3%	1.054
10	13.102	11.948	13.008	-0.7%	1.122
11	14.050	12.774	13.930	-0.9%	1.203
12	15.152	13.844	15.125	-0.2%	1.297
13	16.136	14.728	16.111	-0.2%	1.382
14	17.184	15.740	17.241	+0.3%	1.471
15	18.235	16.747	18.365	+0.7%	1.561

表 2 中,  $u_a^*$  为对 15 组  $(u_a, u_p)$  进行最小二乘法线性拟合后的拟合值, 拟合后得到的超声面平均流速  $u_a^*$  与线平均流速  $u_a$  之间的关系式, 相关系数  $r$ , 及动力校正因子  $K$  分别为:

$$u_a^* = 1.116u_a - 0.328$$

$$r = 0.9996$$

声学技术

$$K = 1.116$$

结果表明, 超声波流量计在所测流速范围内的测量误差小于  $\pm 2\%$ , 而且实测的动力校正因子  $K$  值与表 1 的理论计算值也比较一致, 这也进一步证实了速差法超声波气体流量计不仅在实用上, 而且在原理上是可信的。

#### 4.2 超声波气体流量计的动态测试

超声波气体流量计的一个显著的特点是可用于对生产中的低频脉动气流进行测定, 为了进一步证实这一点, 我们在  $\phi 125\text{mm}$  管道上进行了脉动流量测量的对比实验, 把超声波气体流量计在脉动气流下测得的结果和孔板及比托管在稳流状态下测得的结果进行比较, 其测试对比装置系统如图 3 所示。

图中 4L-20/8 型空气压缩机产生的  $20\text{m}^3/\text{min}$  的脉动气流, 经整流段后直接流入超声段被微机化超声波气体流量计检测, 而后输入容积为  $20\text{m}^3$  的贮气罐以平滑气流的脉动。经过平滑处理后的气流用孔板测定其流量  $Q_h$ , 再经阀门及整流段后由比托管测量其流量  $Q_p$ , 由于超声波气体流量计测得的流量  $Q_a$  是在工作压力  $P_1$  下得到的, 为了在相同条件下进行对比,  $Q_p$  也将换算成工作压力  $P_2$  下的流量。

$Q_a, Q_h$  及  $Q_p$  的实验结果如图 4 所示, 实验结果清楚地表明超声波气体流量计是完全能胜任脉冲流量的正确测定的。

### 5 超声波流量计优点

超声波气体流量计有以下几个主要优点:

(1) 超声波流量计不仅能对小管径而且能对各种不同管径的气体流量进行测量, 并且无流阻、无压力损失。

(2) 能对各种不同的气体进行测量。测量结果不受气体成分改变的影响。

(3) 不仅能对稳定气流进行测量而且还能对脉动气流进行测量。

(4)操作简便,由于实现了计算机自动控制基本上不需要操作。

(5)还可提供气体分子量(或浓度)的信

息。  
因此,超声波气体流量计在大气体流量的计测及工业应用中是很有发展前途的。

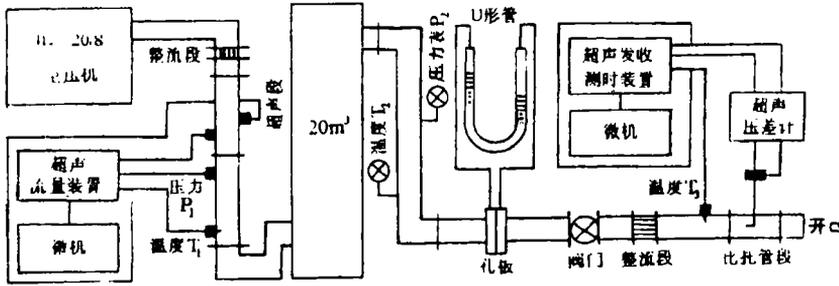


图3 超声波流量计对脉动气流流量检测的对比实验装置

### 参考文献

1. 超声工业测量技术. 同济大学声学研究室. 上海人民出版社
2. 声学基础. 杜功焕等. 上海科学技术出版社
3. 朱士明等. 声学技术, 1990; (3)期: 36~39
4. IBM PC/XT 微型计算机接口技术. 张昆藏. 清华大学出版社

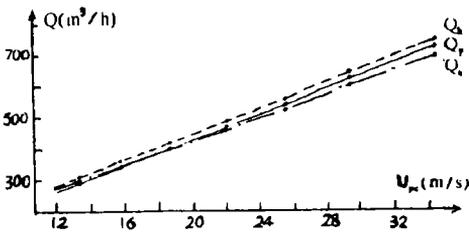


图4  $Q_a$ 、 $Q_h$  及  $Q_p$  的实验结果  
 $U_{pc}$  为比托管段管轴处流速

