高精度超声波微压差计*

梁军汀　朱士明　卢　杰　钱梦鲁录

(同济大学声学研究所　上海 · 200092)

本文介绍一种新的能用于压差测量的高精度超声波微压差计,它结构简单,测量快速方便,并可通过 RS232 串行口与微机进行远距离通讯。经中国计量科学研究院标定,在压差为 0～500mm 水柱范围内,测量精度为±0.03%。

关键词:　超声,压差计

High accuracy ultrasonic pressure difference meter

LIANG Junting　ZHU Shiming　LU Jie　QIAN Menglu

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai · 200092)

A new high accuracy ultrasonic pressure difference meter used to measure pressure difference is presented. It's structure is simple, response is quick. Through the RS232 seriel port, the remote communication is convenient between the meter and a microcomputer. Its accuracy measured by the China National Institute of Metrology in the range of 0～500mm is ±0.03%.

Key words: ultrasound, pressure difference meter

1　引　言

在气体流量测量中,大量采用 Pitot 管或孔板,通过测量气流中两点之间的压差来求得流速及流量,因此,在用 Pitot 管或孔板的流量测量中,压差△P 的测量是非常关键的,它直接影响到流速及流量的测量精度。

目前,微压差的测量一般采用旋转式微压差计和倾斜式微压差计,两者测量速度都较慢,液体的平衡和仪器的手动调整亦很费时,而且易受人的视觉偏差等人为因素的影响,测量精度较低。电容式微压差计虽然测量的灵敏度较高,但量程小,而且不是压差的绝对测量,需要经常标定。

为此,我们研制了适用于现场测量使用的高精度超声波微压差计,它克服了上述微压差计的缺点,测量快(每秒数百次)、量程大(可扩充至 2000mm 水柱)、精度高(500mm 水柱内±0.03%),直接测量液柱高差的绝对值(灵敏度为 0.3μm 水柱),在现场自行连续标定,并有能直接与计算机通讯的优点。

2　测量原理

超声波微压差计是测量超声波在 U 形管的左右两根液柱中传播的声时差,来求得由气体压差引起的 U 形管两边液柱高度差,以达到压差测量的目的,其原理图 1 所示。

图 1 中,A_2B_2 是一块金属制的反射板,A_1B_1 和 A_3B_3 是气液的界面,A_2B_2 板到换能器 2 的距离 L_2 用精度为±0.5μm 的阿培比长计精确测量,3 根管子在底部连通,里面装着温度相同的液体(水),因此液体中的声速

*　第一作者:梁军汀,男,1966 年 2 月生,讲师

收稿日期:98-4-21;修回日期:98-5-20

相同。测试时分别测量换能器 1、2、3 发出的声波脉冲, 经 A_1B_1、A_2B_2、A_3B_3 界面反射后回到换能器时声波经过路径 $2L_1$、$2L_2$、$2L_3$ 传播所需的时间为 t_1、t_2、t_3。

这样, 液体中的声速由 $c= 2L_2/t_2$ 确定, 而 A_1B_1 和 A_3B_3 液面的液位差 $\triangle h$ 为:

$$\triangle h= c(t_3- t_1)/2= L_2(t_3- t_1)/t_2 \qquad (1)$$

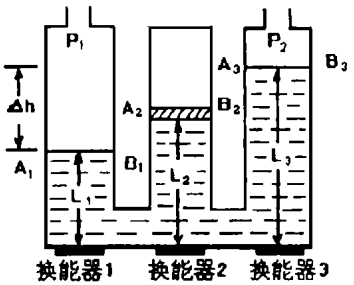


图 1　压差计原理图

于是, 压差 $\triangle P$ 为:

$$\triangle P= \rho g\triangle h= \rho gL_2(t_3- t_1)/t_2 \qquad (2)$$

其中 $\rho= 999.7 kg/m^3$ 是水的密度, $g= 9.8066 m/s^2$ 是重力加速度。

考虑到探头壁厚、电缆、仪器电路和触发电平等引起的系统时延 τ, 式(2)可修正为:

$$\triangle p= \rho g\triangle h= \rho gL_2(t_3- t_1)/(t_2- \tau) \qquad (3)$$

由于仪器的测时灵敏度很高(可测到 0.2ns, 相当于 0.3μm), 在无压差调整水平时很难完全调到 $\tau_{13}= t_{30}- t_{10}= 0$, 往往存在一个微小的初始液位差 $\triangle h_0$:

$$\triangle h_0= L_2\tau_{13}/(t_2- \tau) \qquad (4)$$

计及这量值, (3)式应改为:

$$\triangle P= \rho g(\triangle h- \triangle h_0)$$
$$= \rho gL_2[(t_3- t_1)- \tau_{13}]/(t_2- \tau) \qquad (5)$$

在仪器和探头安装调试后, 通过多次(n = 6400 次)测量标准距离 L_2 探头的第 1 次回波和第 2 次回波到达的时间 t_{21} 和 t_{22}, 取两者差的平均值, 就可确定延迟 τ:

$$\tau= [\sum_{i=1}^{n}(t_{22}- t_{21})]/n$$

通过多次测量探头 1、3 的第 1 次回波的到达时间 t_{10} 和 t_{30}, 取两者差的平均值, 就可确定 τ_{13}: $\tau_{13}= [\sum_{i=1}^{n}(t_{30}- t_{10})]/n$

τ、τ_{13} 测定后, 微压差计将根据每次测得的 t_1、t_2、t_3 按式(5)计算压差, 实现压差的自动测量及根据 t_2 进行的自动连续校正。

3　仪器简介

压差计总体框图如图 2 所示。

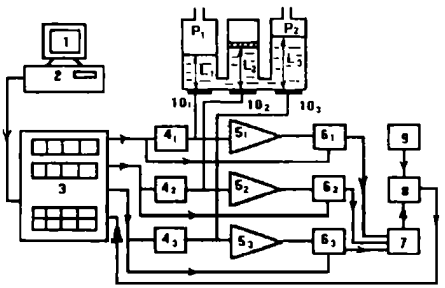


图 2　压差计总体框图

图中(1)显示屏、(2)计算机、(3)单片机主体、(4)发射电路、(5)放大器、(6)过零电平检测电路、(7)或门、(8)计时门、(9)晶振时标、(10)换能器。

测量时, 单片机主体(3)依次控制 3 个发射电路(4_1, 4_2, 4_3)使换能器(10_1, 10_2, 10_3)发射超声波, 并经各自的界面反射后由放大器(5_1, 5_2, 5_3)放大。对每一路发射接收信号, 各自的过零电平检测电路(6_1, 6_2, 6_3)产生一个从发射开始到第 1(或第 2)次回波信号到达后的第 1 个过零电平瞬刻结束的正方波, 并通过或门 7 使计时门 8 打开, 石英晶体振荡电路 9 产生的时标脉冲经打开的门 8 由单片机读入, 单片机把读入的时标个数乘以时标周期就得到了从脉冲发射到接收这段时间内的声时 t_1、t_2、t_3。这样, 由已存有的 τ、τ_{13}、ρ、g 及 L_2 就可按式(5)由计算机给出压差并在屏幕上显示。

4　提高测量精度的方法

由式(5)可见, 要提高微压差 $\triangle P$ 的测量精度就必须提高声时的测量精度, 为此, 我们

从硬件和软件着手采取了不少技术措施, 使得声时测量灵敏度达到 0.2ns, 液位差测量灵敏度达到 0.3μm, 压差测量精度达到±0.03%。所采取的方法主要有以下几个方面:

(1) 尽可能高的发射信号工作频率和减小接收放大器的带宽, 换能器工作频率为 5MHz, 放大器采用了选频放大, 使信号的放大倍数及信噪比大大提高。

(2) 过零电平检测。

(3) 高的时标频率, 采用 25MHz 的石英晶振作为时标, 其周期为 40ns。

(4) 声时的随机多次测量后平均。

超声波发射和晶振计时时标可采用同步或不同步(随机) 方式, 如采用同步方式, 即时标信号和发射脉冲是同步的, 这样在超声波发射到接收这个时间间隔内测量得到的整数个时标的个数将是稳定不变的, 任意次测量的结果都一样, 误差总是±1 个时标脉冲, 对 25MHz 的时标信号而言一个周期即为 40ns, 约相当于 60μm 水柱。而这样的误差显然不能满足我们的要求。为此我们采用了不同步计时方式, 即随机多次测量后平均的方式, 这样大大提高了测时的精度。

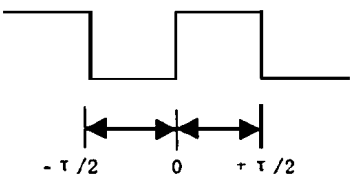


图 3 随机测量声时原理图

图 3 为采用随机多次测量后平均方式提高测时精度的原理图。图中画出了一个完整的晶振时钟周期。首先考虑被测时间间隔的上升沿, 该上升沿可以随机地落在这一时标周期的任何位置。当被测时间间隔的上升沿与时标脉冲的上升沿重合时, 误差为零, 当时间间隔的上升沿向左移动, 误差(少计数的时间) 由 0 变至 $-\tau/2$, 时间间隔的上升沿向右移动时, 误差(多计数的时间) 由 0 变至 $\tau/2$, 那么在整个周期内平均的平方误差为:

$$2\int_0^{\tau/2}\frac{y^2}{\tau}\mathrm{d}y=\frac{\tau^2}{24}\times 2=\frac{\tau^2}{12}$$

以上结果是单边(被测时间间隔上升沿) 的平均平方误差, 同理下降沿的平均平方误差也为 $\tau/12$, 所以一次时间间隔测量总的平方误差是 $(\tau^2/12)\times 2=\tau^2/6$。$N$ 次测量平均值的标准差为: $\sqrt{(\tau^2/6)\times(1/N)}=\tau/\sqrt{6N}$

如果取 $N=6400$, 就有 $\delta=\tau/\sqrt{6\times N}=40/\sqrt{6\times 6400}\approx 0.2$ns。

这个结果比一个时标周期 40ns 小 200 倍, 相当于 5000MHz 时标的计时效果。

(5) 软件自动剔除偏差较大的错误数据。

5 测量结果

研制的超声波微压差计, 送到中国计量科学研究院进行了标定, 表 1 是在环境温度 19.8℃条件下用国家微压基准及工作基准活塞压力计作为标准器的测试结果, 结果表明其精度为±0.03%。

表 1 测试结果

标准器示值(mm 水柱)	被测器示值(mm 水柱)
0.00	-0.031
60.00	59.954
100.00	99.951
150.00	149.950
200.00	199.936
250.00	249.926
300.78	300.737
401.03	401.006
501.30	501.251

为了考察仪器的稳定性, 我们还在同济大学土木工程防灾国家重点实验室对仪器进行了静态试验, 在压差为零的条件下让仪器连续开机运行了 64 个小时, 结果表明其最大零点漂移只有±2μm。

6 结论

超声波微压差计具有以下优点:

(1) 测量快速方便, 克服了目前常用的旋转式和倾斜式微压差计必须手动、测量费时

的缺点;

(2) 微压差计测量灵敏度可达 0.3μm 水柱, 精度为±0.03%, 弥补了一般方法测微压差的精度的不足。

(3) 在现场自行连续标定, 保证了测量的高精度。

(4) 有 RS232 串行口输出。使压差计不仅可直接用于测量风洞实验室及工矿企业中 Pitot 管或孔板的压差, 而且还可以和计算机相连, 利用自行研制的软件, 直接精确测量气体的流速(及流量)。并可根据用户需要实时地在计算机屏幕上以图表和数字形式直观地显示压差、流速、瞬时流量、及每班、每日、每月、每年的累积流量、平均压力、平均速度等。还可设置报警, 随时打印、储存及调阅任何日期的测量结果, 调阅不影响测量及储存。

本微压差计已获得国家实用新型专利(ZL95244799.1)。

参考文献

1 梁军汀, 钱梦禄等. 微机化超声波气体流量计的研制. 声学技术, 1995; 14(2): 82～86

2 朱士明, 刘镇清等. 提高声时测量精度的过零检测数字平均法. 声学技术, 1990; 9(3)

3 朱士明, 江泽涛等. 声时差法测量螺栓应力. 声学技术, 1995; 14(4): 181～186

国际声学动态

开展声的生态学和声景研究

近年来人们重视研究生物及其声环境的关系, 提出了“声的生态学”(Acoustic Ecology)这一名称, 它综合了声学、美学、哲学、建筑学和社会学等学科的内容, 它所处理的问题称为“声景”(Soundscape 或称 Acoustical Landscape)。

声景一词最初由加拿大 Murray Schafer 提出的, 他是作曲家和研究工作者, “声音世界的调和”(The Turning of the World)一书的作者。声景是指在一定地区内有关声音的总体情况, 它反映了该地区内的社会、技术和自然情况。Schafer 提出的“世界声景计划”是要使听声和发声相互保持微妙的关系, 此计划之任务乃是要促进两者之间的和谐。

1993 年 8 月, 一次以“声音世界的调和”为主题的国际性学术会议在加拿大班芙市举行。讨论的中心议题包括对大众安静的看法, 民族与音乐的生态学(ethno-music-ecology)、城市声景、感到讨厌的声谱和声考古学(sound archeology)等。

1995 年美国声学学会春季年会上, 首次由音乐声学和噪声两个专业委员会联合举办“声景”专题分组报告会。世界声景计划研究主任、著名作曲家 Truax 作了题为“声音的文脉: 在 Simon Fraser 大学进行的声通讯和声景研究”的报告。其它特邀报告还有: “小区噪声: 主流探索”、“声卫生学: 保护耳、肺和其它器官不受伤害的重要性”、“由一个‘声音观察点’发展到‘充满声音的城市’总体计划。

1998 年 6 月的第 16 届国际声学大会上, 在噪声和建声专业组亦有一个称之为“天然和建筑环境中的声景”专题分组会。共有 4 篇论文: 房屋研究中需要注意声景(瑞典和波兰合著); 外国人所辨认的日本声景特征-对居住在日本的外国人所作有关声音的问卷调查(日); 展示本土音乐和舞蹈的展览馆中的声学问题和声学设计(澳); 商业建筑中声环境的实际条件调查(日)。

王季卿