

频差法超声流量计

姜天仕 吴淑珍

(北京大学无线电系声学教研室)

1981年7月27号收到

本文介绍我们与北京自来水公司共同研制的频差法超声流量计的原理,特点。该机采用了锁相倍频,自动增益,消除干扰和自动纠错电路,从而使该机性能稳定可靠。

一、概 述

1. 超声流量计发展概况^[1-2]

用超声法测量,监控流体的流速或流量,近十年来才比较广泛地采用。然而,追溯它的历史却有几十年了。

1931年,吕特根(Rüttgen)提出了用两个声信号的时间差法测量流体流量的可能性。直到1955年世界第一台商用超声流量计才诞生。可是,它在技术上存在许多缺点,未能得到广泛地应用。此后,各国对超声流量计展开了广泛地方案研究。

1957年,美国国家标准局为海军测声速时,发明了“Sing-around”法(鸣环法)。此后,用“鸣环”技术研制了各种频差、时差法超声流量计方案。到六十年代末,以集成电路和大规模集成电路为代表的电子技术卓越的进展,大大促进了超声流量计的实用性。七十年代中期,许多方案日趋成熟,开始推广使用。对自流管,渠道和河流的测量也开始采用超声波法。

在国内,有许多单位研究超声流量计。我们于1978年研制成功频差法超声流量计,随后在北京自来水公司运行了两年,性能稳定可靠。于1981年3月进行了鉴定,并着手推广使用。

2. 超声流量计的用途与特点

在石油,化工,水电和给排水等生产和科研中,经常遇到如何计量和监控流体的流速或流

量问题。及时、准确地知道流量是搞好企业管理,经济运行的基础数据之一。

传统的流量计大都采用机械方法。它有难以避免的缺点,甚至有些地方无法使用。因为这种流量计在测量时需将其部件放入流体内,妨碍流体的流动,造成压力损失。同时,也容易磨损和被腐蚀。此外,机械的运动部件有一定的惯性,瞬态响应差,灵敏度低。而且,对大口径管道自流管和河渠的测量则无能为力。相比之下,超声流量计具有如下特点:

1) 测量时,换能器可插入管壁或置于壁外,与被测流体不直接接触。这种非接触测量的优点是不破坏流场,无压力损失。

2) 结构简单,使用维修方便。检修时不妨碍流体的正常流动。

3) 成本较低。对大口径,几乎不随口径增加而增加成本。同一台机器可适用于不同口径。

超声流量计按其基本工作原理,大致分为传播速度差法,多卜勒法等七种。详见图1。

这些方法各有特点。一般,时差法适用于大口径管道、河渠的流速或流量测量;频差法适用于中小口径管道;多卜勒法适用于测定具有气泡或固体颗粒的非均匀流体。波束偏移法和噪声法设备简单,但精度较低。相关法和空间滤波法^[3]尚处于研究试用中。上述各法测量精度因方案而异,一般在0.5%—10%范围内。

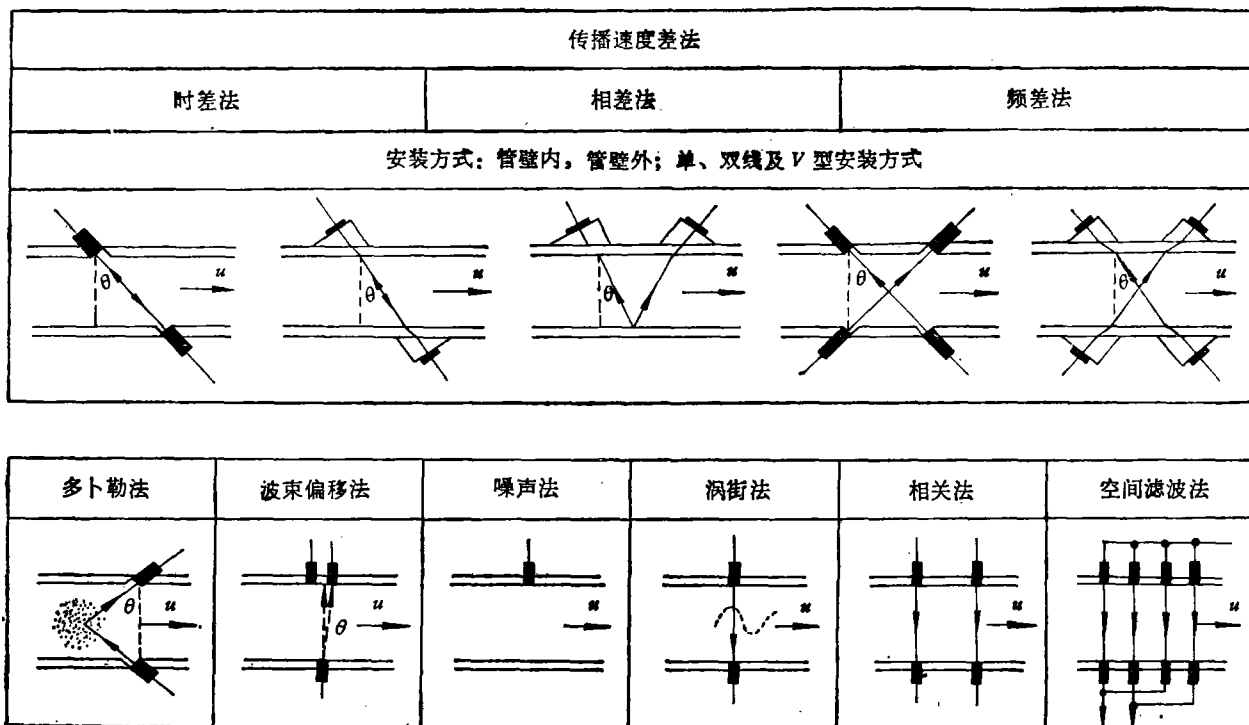


图 1 超声流量计的基本方法及换能器安装示意图

二、频差法超声流量计的基本原理

频差法是利用“鸣环”技术, 形成顺流和逆流鸣环(或称循环)频率, 测量其频差, 从而求出流速或流量的方法。它是时差法与相差法的发展, 其特点是声速 c 随流体温度的变化对测量精度影响较小, 易于用数字电路技术实现。

1. 频差与流速关系

如图2所示, 在通道 1 中, 顺流发射超声波, 超声波由 A 传至 B 所用的时间为:

$$t_+ = L/(c + u) \quad (1)$$

在通道 2 中, 超声波由 B 至 A 的时间为:

$$t_- = L/(c - u) \quad (2)$$

式中: L 为 A, B 间距离

c 为超声波在流体静止时的声速

u 为流体的平均流速

以顺流和逆流传播的时间 t_+ 和 t_- 为周期, 在通道 1 和 2 中, 各自组成闭路循环系统。其循环频率分别为:

$$f_+ = 1/t_+ = (c + u)/L \quad (3)$$

$$f_- = 1/t_- = (c - u)/L \quad (4)$$

式中, f_+ , f_- 分别称为正, 逆循环频率。正逆循环频率之差, 称为频差。即

$$\Delta f = f_+ - f_- = 2u/L \quad (5)$$

$$\therefore u = (L/2)\Delta f \quad (6)$$

从(6)式看出, 频差与流速成正比。所以, 测量出频差求得流速或流量的方法, 称频差法。

2. 产生循环脉冲的方法

如图 2 所示, 初始触发脉冲触发发射机, 发射一超声脉冲。该脉冲经 t_+ (或 t_-) 时刻传至接收换能器。接收后, 经放大和整形, 其前沿又去触发发射机, 开始第二次发射。此后, 每经 t_+ (或 t_-) 时刻, 发射机就被触发, 发射一次声脉冲。因此在各自的回路中形成循环脉冲, 其频率是传播时间 $t_{\pm}$ 的倒数。

电路中各级波形及时间关系见图 2 (b)。

3. 频差法超声流量计的基本公式

实际的超声流量计, 换能器不能置于流体内部, 而置于管壁内或壁外。我们研制的

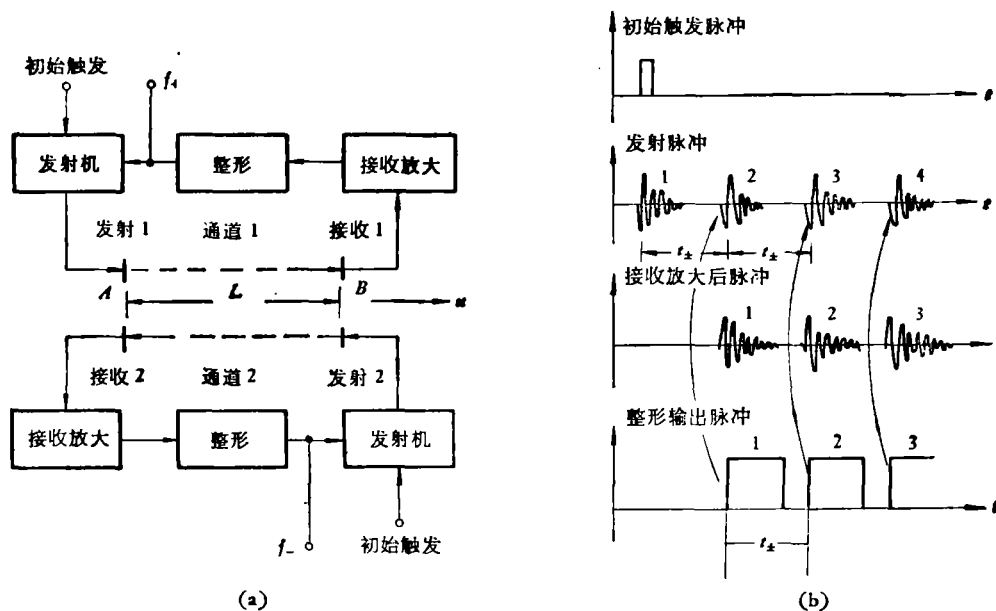


图2 循环脉冲形成方法示意图

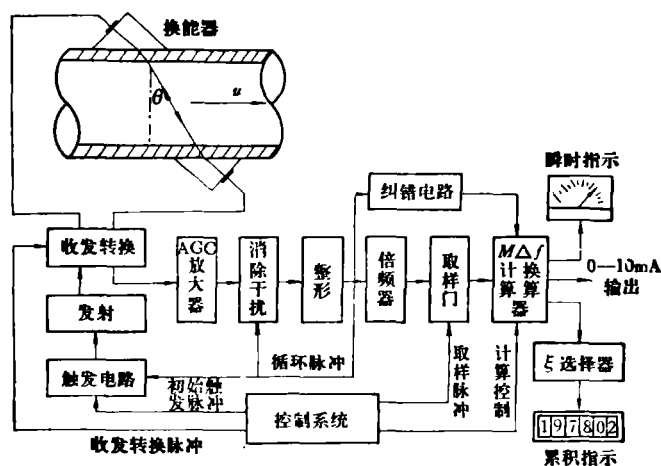


图3 频差法流量计原理方框图

CLJ-1 型超声流量计是管外安装换能器的。图 3 画出了换能器的安装方法及电路原理方框图。

由图可知,超声波顺、逆流方向传播的时间分别为:

$$t_+ = \frac{D/\cos\theta}{c + u \sin\theta} + \tau_0 \quad (7)$$

$$t_- = \frac{D/\cos\theta}{c - u \sin\theta} + \tau_0 \quad (8)$$

式中, τ_0 表示超声波在声楔、管壁中传播的时间及电路延迟时间之和。

u 是沿声程平均流速。

D 是管道内径。

θ 是超声由管壁入射到流体、中的人射角。

由 (7), (8) 式可知,正逆循环频率为:

$$f_{\pm} = \left[\frac{D/\cos\theta}{c \pm u \sin\theta} + \tau_0 \right]^{-1} \quad (9)$$

频差:

$$\Delta f = f_+ - f_- = \frac{\sin 2\theta}{D} \left[1 + \frac{c\tau_0 \cos\theta}{D} \right]^{-2} u \quad (10)$$

式中 u 是沿声程平均流速, 需要求出它与

垂直截面的面平均流速 u_s 的关系, 才能计算流量。在光滑的圆管道中, 湍流的面平均流速与 u_s 的关系为:

$$K = \frac{u}{u_s} = 1 + 0.01 \sqrt{6.25 + 431 R_e^{-0.237}} \quad (11)$$

式中, K 为流速修正系数, R_e 是雷诺数。

因此, 可以用管道的截面积 S 与 S 面上的平均流速 u_s 的乘积表示流量。设流体的密度为 ρ , 则流量 Q 可表为:

$$Q = \frac{\pi D^3}{4K \sin 2\theta} \left[1 + \frac{C\tau_0 \cos \theta}{D} \right]^2 \rho \Delta f \quad (12)$$

这是频差法超声流量计的基本公式。如果换能器置于管壁内, 则 $\tau_0 \approx 0$, 于是。

$$Q = \frac{\pi D^3}{4K \sin 2\theta} \rho \Delta f \quad (13)$$

由上两式可见, 管外安装换能器方式, 测量结果与声速 c 有关, 但影响较小。管壁内安装换能器方式, 声速 c 几乎没有影响。从 (11) 式可见, K 值与雷诺数有关。所以雷诺数变化太大时, 对测量结果要自动修正。

当流体静止时, 由 (9) 式可知:

$$f_0 = f_+ = f_- = [D/(c \cos \theta) + \tau_0]^{-1} \quad (14)$$

f_0 称为静态循环频率。

4. 仪表常数的计算

为了进行累积流量显示, 要把频差数换算成以吨为单位的流量值。因此, 要从理论上计算出每吨流体相应的脉冲数, 它用 ξ 表示, 称为仪表常数。

由 (12) 式知:

$$Q = \frac{\pi D^3}{4K \sin 2\theta} \left[1 + \frac{C\tau_0 \cos \theta}{D} \right]^2 \rho \Delta f$$

式中, Δf 表示单位时间内频差, 在电路中用脉冲数表示。 Q 是单位时间 (1 秒) 内流量。

在收发转换型频差法流量计中, 存在三个问题, 需对上式进行修正。

1) 对正逆循环脉冲取样时间 τ 不一定是单位时间。它由总体指标及电路结构决定。

2) 取数周期 T 。即每隔 T 时刻取出一组频差数。所以 Δf 应表示 T 时刻内的流量。

3) 为了精确地计算频差, 采用了锁相倍频

技术。使 f_+ , f_- 均倍 M 倍, 则频差为 $M \Delta f$ 。

考虑到上述三种因素, 则 T 时间内流量应表为:

$$Q_T = \left\{ \frac{\pi D^3 \rho}{4MK \sin 2\theta} \left[1 + \frac{C\tau_0 \cos \theta}{D} \right]^2 \frac{T}{\tau} \right\} \cdot M \Delta f \quad (15)$$

式中, $M \Delta f$ 为取样时间为 τ 时, 每隔 T 时刻取出的频差数。它与 Q_T 成正比。大括号内的值可近似为常数。它的倒数称仪表常数, 用 ξ 表示; 则:

$$Q_T \xi = M \Delta f \quad (16)$$

$$\therefore \xi = \frac{4KM \sin 2\theta \tau}{\pi D^3 \rho T} \left[1 + \frac{C\tau_0 \cos \theta}{D} \right]^{-2} \quad (17)$$

考虑到 (14) 式, 则 (17) 式可化为:

$$\xi = \frac{8KM \tau f_0^2}{\pi D \rho T c^2} \operatorname{tg} \theta \quad (18)$$

(18) 式对无法实际校准的大口径流量计, 考虑 ξ 时是重要的公式。

5. 频差法超声波流量计原理方框图

见图3, 控制系统控制收发转换开关。使两个换能器交替发射和接收, 形成正逆循环脉冲。该脉冲通过倍频器, 倍乘 M 倍之后, 依次通过取样门分别取出 τ 时间内的脉冲数, 该数送入运算器运算, 给出瞬时流量指示和累积流量指示的信号。

在电路中采用了自动增益控制放大器和消除干扰电路, 使调试简便, 运行稳定。采用自动纠错电路, 使循环偶然中断时, 保持正确读数。较长时间中断循环, 可显示故障。

三、CLJ-1 型超声流量计

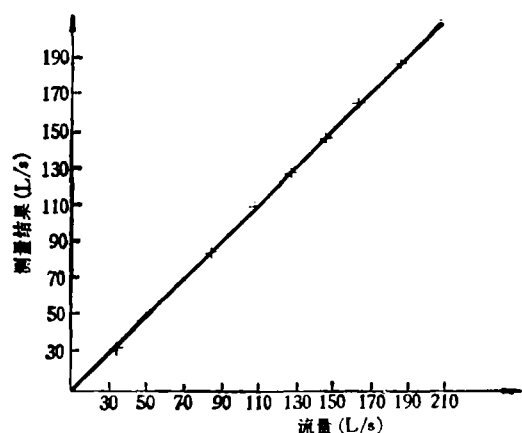
根据上述原理制成的 CLJ-1 型超声流量计, 主要技术指标, 实验结果与误差分析如下:

1. 主要技术指标

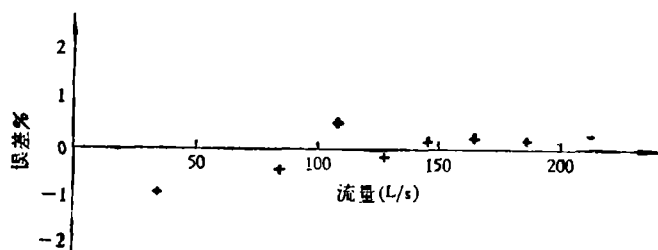
1) 累积流量由 6 位十进计数器指示。瞬时流量由 0—10 mA 表头指示。并可供远传。

2) 适用于钢管, 铸铁管。管径 $\phi 300$ mm 以上。

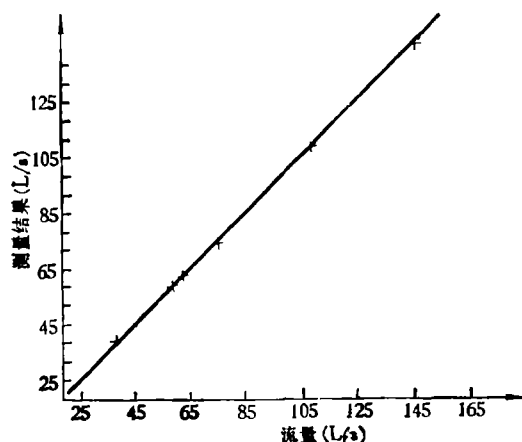
3) 在 0.5—2.5m/s (以上) 流速范围, 精度



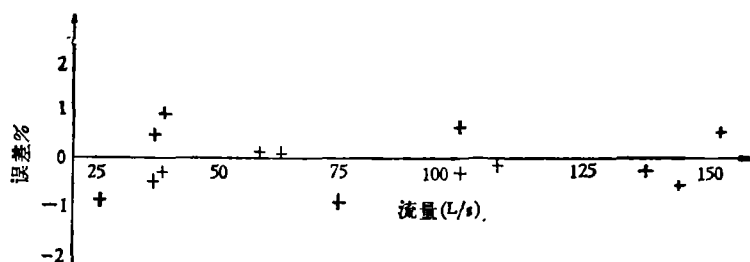
(a)



(b)



(c)



(d)

图4 CLJ-1型超声流量计测试结果

(a) (b) 为 $\phi 300\text{mm}$ 铸铁管 (c) (d) 为 $\phi 275\text{mm}$ 钢管

$\pm 2\%$, 数字显示为 ± 1 字。

2. 实验结果

1) 实验条件

配水管口径: $\phi 300\text{mm}$ 铸铁管, $\phi 275\text{mm}$ 钢管。

流速范围: $0.5\text{--}3\text{m/s}$,

标准容积是 20M^3 , 检定精度 $\pm 0.2\%$ 。

2) 实验结果, 见图4。

3. 误差分析

由(12)式可得:

$$\frac{\delta Q}{Q} = -\frac{\delta K}{K} + 3\frac{\delta D}{D} + \frac{2c \cos \theta}{D} \delta \tau_0 - 2 \tan 2\theta \delta \theta \quad (19)$$

如果 $c = 1455\text{m/s}$ (15°水), $\theta = 23^\circ$, D

以 m 为单位 τ_0 用 μs 表示, θ 用度表示。则上式变为:

$$\frac{\delta Q}{Q} = -\frac{\delta K}{K} + 3\frac{\delta D}{D} + \frac{0.0027}{D} \delta \tau_0 - 0.034 \delta \theta \quad (20)$$

当 $D = 0.3\text{m}$, $u_e = 0.5\text{--}2.5\text{m/s}$ 时, R_e 为 $1.5 \times 10^5 \text{--} 7.5 \times 10^5$ 流速修正系数的误差

$\frac{\delta K}{K}$ 不大于 $\pm 0.5\%$ 。

如果 D 的测量精度达 $\pm 0.1\%$ 以上, 它对测量附加的误差为 $\pm 0.3\%$ 。

时间 τ_0 的误差与管径成反比。对小管径要注意 τ_0 的稳定性。如果 $\delta \tau_0 < 0.1\mu\text{s}$, 误差为 0.09% 。

角度 θ 的误差主要与声楔加工精度,两换能器的一致性 & 安装平行度有关。如果加工精度 $\pm 0.1\%$, θ 将有 ± 0.05 度变化,引起 $\pm 0.17\%$ 的误差。

上面讨论的都是根据几何声学原理,把超声波作为一束射线考虑的。并且按换能器压电晶片的中心射线进行计算。一般要求压电晶片直径与管径之比小于十分之一。此外,由于声束漂移,声线弯曲和声速的变化等,均对测量精度有影响,但较小。这里就不分析了。

综上所述,在管径 0.3m ,流速 0.5m/s — 2.5m/s 范围内,测量精度 $< \pm 1.5\%$ 。

四、结 束 语

目前,除频差流超声流量计外,多卜勒超声流量计 & 利用鸣环技术制成的时差法超声流量计^[4],也开始广泛地使用了。

由于超声流量计可以在管外测量管内流量,无压力损失等独特优点。对大中型管道、自流管 & 河渠的测量,在技术上和经济上占有重要地位。它有着广泛地应用前景。

对超声流量计的研究,我国才刚刚迈出第一步。随着电子技术的发展,新技术的不断应用,作为工业自动化中必不可少的超声流量计必然会迅速发展,满足四个现代化的需要。

由于水平有限,一定会有许多缺点,错误。恳请读者批评指正。

参 考 文 献

- [1] 北京大学无线电系超声测流组,无线电电子学资料,5 (1978).
- [2] 山本美明,日本音响学会誌,36 No. 1 (1980).
- [3] *Proceedings of IMEKO Symposium on Flow Measurement and Control in Industry*, Tokyo, Japan, November (1979), 239—244.
- [4] *Proceedings of IMEKO Symposium on Flow Measurement and Control in Industry*, Tokyo, Japan, November (1979), 171—175.

(上接第7页)

单独共振时,在其自由端都能得到较大的位移振幅,甚至还能比半波长型工具大,并且可以选择适当的振动模式工作,以获得良好的工作效果。

3. 利用细长杆单独共振的工具系统,已在玻璃板上加工出直径为 6mm 、深达 280mm 的孔。采用一根工具杆就可以完成多个深孔的加工,累计加工总深度达 2000 — 3000mm 以上,不需要更换工具。在玻璃上的钻孔速度,一般约为 6mm/min 以上,需要的电功率比复合振动系统

按“全谐振”工作时少。

4. 可以认为,工具杆细长时,它和D系统(驱动系统)的耦合很弱,因此,它几乎可以完全独立地振动。局部共振这个新原理,除了用于超声加工深小孔外,可以有更广泛的用途。

本文的“热像图”是由华北光电技术研究所刘岳林同志帮助拍摄的,其余照片由金月星和司晓黎两同志帮助拍摄。在实验过程中,还得到其他一些同志的帮助,一并致谢。

参 考 文 献

- [1] K. F. Graff, *Wave motion in elastic solids*, Clarendon press, Oxford, 1975, 91.