

超声波流量计

曹锡安

(上海工业自动化仪表研究所)

一、前言

很早就有人应用超声技术来测量流体的流速，但在很长一段时间内，尚未付诸实用。进入七十年代以后，随着工业的发展，以及节能和环境保护等方面的问题的提出，在流量测量领域内，许多新的、困难的课题接踵而至，原有仪表难以适应。由于超声波流量计可以实现非接触测量，能在管道上直接安装使用，没有压力损失。对于大口径管道、腐蚀性介质、易爆及带有强放射性介质的测量更为优越。同时，对小流量、粘液以及非导电介质的测量也不受限制。特别是随着电子技术的飞跃发展，锁相技术和微处理机的应用，超声波流量计的各项性能又大大提高，应用范围日趋扩大。目前，可供实用的超声波流量计已陆续问世。

二、超声波流量计的基本方法及其原理

根据测量原理的不同，超声波流量计可有如下几种类型。

1. 传播速度差法(见图1a)

超声波在流动的流体中，由于传播速度发生改变，致使顺流方向和逆流方向的传播时间不同，其差与被测流体的流速有关，从而可求得被测流体的流速。

在具体测量中，根据测量的物理量不同，可分为：

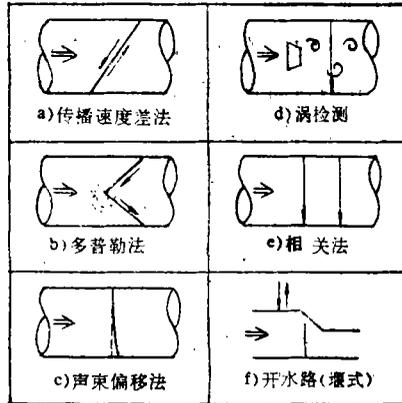


图1 超声波流量计各种测量原理比较

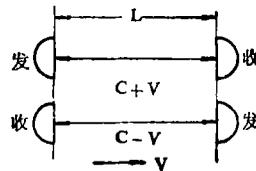


图2 传播时间差法原理图

1) 时间差法(见图2)

在流速为 V 的流体中，设置两对间距都为 L 的超声波换能器，超声波在该介质中的传播速度为 C ，则顺、逆向超声波传播时间分别为：

$$t_1 = L / (C + V) \quad t_2 = L / (C - V) \quad (1)$$

时间差为

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 2LV / (C^2 - V^2) \quad (2)$$

由于 $C \gg V$

$$\Delta t = 2LV / C^2 \quad (3)$$

式中含有 C^2 项，即 Δt 受声速变化影响。另外在小口径管道及低流速场合， Δt 相当小，

要高精度测量十分困难。

2) 相位差法

在顺逆两方向上同时发射频率为 f 的连续超声波, 测量接收信号的相位偏移

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t = 2L\omega V/C^2 \quad (4)$$

式中 ω 为角频率。这种方法可避免对微小时间差的测量, 从而可提高测量精度, 但测量结果也要受声速变化的影响。

3) 频差法

在顺逆两个方向上, 分别以超声波传播时间 t_1 和 t_2 为周期, 各自组成闭路循环系统, 它们的循环频率 f_1, f_2 为

$$f_1 = \frac{1}{t_1} \quad f_2 = \frac{1}{t_2} \quad (5)$$

$$\Delta f = f_1 - f_2 = (C+V)/L - (C-V)/L = 2V/L \quad (6)$$

式中, Δf 与被测介质的声速无关, 比较实用, 早期的产品大多采用此方法。采用单声道切换方式, 测量一次约需数秒, 响应慢。循环过程中易受干扰, 在含有气泡或杂质的介质中工作不可靠等等。近年的产品中则采用 TLL 方式, 将时差法和频差法结合起来, 而兼有两者的优点。该方法响应快, 并采用先进的信息处理技术, 具有较强的抗干扰性能, 使仪表可靠性和稳定性大大提高, 已成为普遍使用的一种重要方法。

2. 多普勒法(见图1b)

向流体中发射连续的超声波, 经悬浮在流体中散射体散射, 超声波将产生与流速成正比的多普勒频移, 而以此求得流速。这种方法主要适用于固液两相流体的流量测量。

3. 声速偏移法(见图1c)

此法是通过测量超声波束在流动介质中所产生的几何位移, 而求得流速。实际上偏移量极小, 只适用于流速较大的场合, 而且测量精度较差, 实用价值不大。

4. 传感器法

另外, 还有几种作传感器使用的方法。

1) 旋涡法(见图1d)

在流体中垂直地插入具有一定形状的柱体, 其下游就会产生两列内旋的、相互交替的旋涡。该旋涡对穿过流体的超声波束进行调制, 检测出调制频率 f , 就可知道流速

$$f = su/d \quad (7)$$

式中, s 为斯特哈尔数, d 为柱体直径。该法适用于小口径管道测量, 压损低, 主要用于气体介质。检测方式可采用幅度调制或相位调制。

2) 相关法(见图1e)

在传输管道中选取同轴两点 $x(t)$ 和 $y(t+\tau)$, 此两点的瞬时流速剖面之间存在着一定的相关性。

$$\psi_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (8)$$

假如所有湍流扰动或声不连续性, 在此两点产生幅度和相位相同的信号, 那么当 τ 等于此两点之间扰动的平均传输时间时, $\psi_{xy}(\tau)$ 将出现最大值。如果流量中所有成份均以速度 u 运动, 则换能器间距为 L 时, 流速为

$$u = L/\tau_m \quad (9)$$

这里 τ_m 是对应于 $\psi_{xy}(\tau)$ 峰值点的 τ 值。测得结果表明流速与声速无关, 并且是声程范围内的平均流速, 测量精度足够满足工业应用需要。目前主要是研制价廉的相关器。

3) P-B堰式法(见图1f)

测量标准形状堰内流体的液面高度, 并换算成流体的流量。这种方法多用于污水处理, 农业用水等场合。

以上这些测量方法中, 频差法和多普勒法使用得最为广泛, 下面将着重介绍应用这两种方法的超声波流量计。

三、TLL方式超声波流量计 测量回路原理及其特点

1. 管外测量

将换能器夹装在管壁外(见图3), 设超

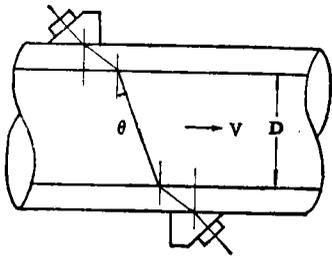


图3 夹装式测量时超声波的传播

声波在流体中的折射角为 θ ,管道内径为 D ,流体以外的超声波传播时间为 τ ,则顺逆流方向的超声波传播时间分别为:

$$t_1 = \frac{D/\cos\theta}{C+V\sin\theta} + \tau \quad t_2 = \frac{D/\cos\theta}{C-V\sin\theta} + \tau \quad (10)$$

$$\Delta F = \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{N\sin 2\theta}{D} \left(1 + \frac{\tau C \cos\theta}{D}\right)^{-2} \cdot V \quad (11)$$

流量为:

$$Q = \frac{1}{k} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{D\rho N}{\sin 2\theta} \left(1 + \frac{\tau C \cos\theta}{D}\right)^2 \cdot \Delta F \quad (12)$$

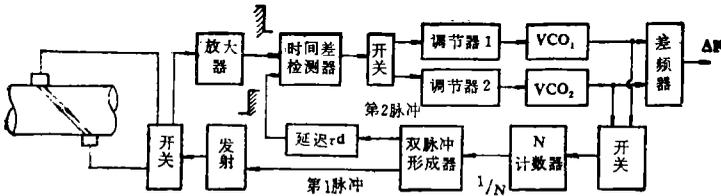


图4 TLL方式超声波流量计测量回路原理方框图

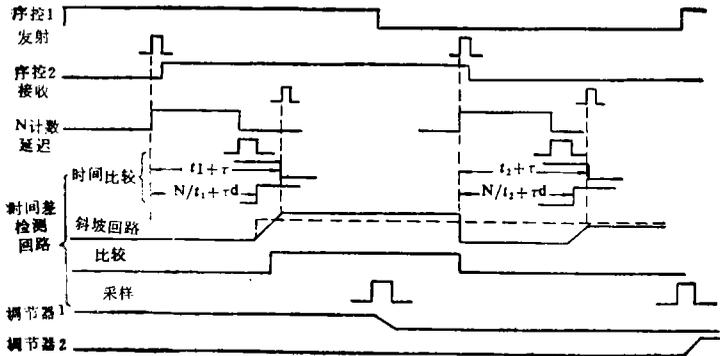


图5 TLL方式基本回路工作波形图

式中, ρ 是介质密度, k 是流速分布修正系数, N 是倍频数。

2. TLL法的测量回路原理

在测量回路中设置两个独立的压控振荡器(VCO)振荡频率分别为 F_1 、 F_2 。(见图4和5)。时钟控制开关切换到顺流方向,先将计数器复零,并开始计数VCO₁脉冲信号。当计数到被设定值 N 时,给出第1个脉冲,此时计数器复零,并重新计数。当再计数到 N 值时,就给出第2个脉冲……。在双脉冲形成器产生两个脉冲,它们之间所需的时间就是 N/F_1 。其第1个脉冲作为顺流方向发射用,第2个脉冲则经过延迟回路,被延迟 τ_d 后,送往时间差检测回路。声波经发射后,通过管内流体中传播,被接收到的时间信号($t_1 + \tau$),延迟回路来的信号 $N/F_1 + \tau_d$ 。若 τ_d 与 τ 相等,则被检测的时间差就为 $N/F_1 - t_1$ 。这一时间差被转换成斜坡电压,与设定电压进行比较后,则用以控制采样信号,并由调节器再转换成控制电压,调整VCO₁频率 F_1 ,构成闭环。

开关切换到逆流方向时,重复上述动作,调整VCO₂频率 F_2 ,也构成闭环。

当顺逆两方向都处于闭合同步状态时,可得下式:

$$N/F_1 - t_1 = 0 \quad N/F_2 - t_2 = 0 \quad (13)$$

即

$$\frac{N}{F_1} = t_1 = \frac{D/\cos\theta}{C+V\sin\theta} \quad \frac{N}{F_2} = t_2 = \frac{D/\cos\theta}{C-V\sin\theta} \quad (14)$$

两个VCO的频率之差 ΔF 为

$$\Delta F = F_1 - F_2 = \frac{N\sin 2\theta \cdot V}{D} \quad (15)$$

随着时钟控制,不断地切换开关。一秒钟内顺逆交替地进行数百次取样,不断地校

准VCO的频率。将两个VCO的频率 F_1 和 F_2 输往差频器,即可得到与流速成正比的 ΔF 信号。

上海工业自动化仪表研究所研制的LES-01型超声波流量计就属此种类型。它可应用于自来水、工业用水、农业用水、海水及污水等液体介质,管道口径为 $\phi 300 \sim 3000\text{mm}$,量程范围 $0 \sim 10\text{m/s}$,精度 $\pm 1.5\%$ 。日本的富士电机制造和横河北辰电机公司也有同类产品。

3. 主要特点

1) 流速分布的影响。超声流量计实质上是测速型仪表,易受流速分布的影响,为了保证有足够的精度,要求换能器安装部位有足够长度的直管段。一般是上游侧 $10D$ 以上,下游侧 $5D$ 以上。

2) 响应快。TLL法中每秒顺逆交替测量数百次。一般流量变动频率是较低的,即使有阶跃式的大变化,也能在1秒内响应。

3) 抗干扰能力强。在流体中混入气泡或其他异物时,接收波幅度往往因散射而被衰减,有时甚至接收不到。TLL系统中可将对应的VCO保持输出,直至下次接收正常,才恢复对VCO的控制。另外它有自动跟踪的特点,设置接收窗口和同步窗口,可防止一切随机干扰脉冲的侵袭。

4) 介质温度的影响。在管外测量时,由于 τ 的存在, ΔF 还是受声速的影响。TLL法中 τ 在回路上则被抵消,另外大管径时由于声发散现象,认为 θ 基本上不变。但严格讲来, θ 是要随温度而变的,还有残余 $\delta\tau$ 。管径越小,影响越严重。故这种流量计被限制在介质温度 $0 \sim 40^\circ\text{C}$,管径 $\phi 300\text{mm}$ 以上,超过这一范围必须另加温度补偿。

5) 零点校正。顺逆两路要达到完全一致,实际上是不可能的。采用开关交替切换控制变换器,求两次读数的平均值,就可以消除变换器的零点偏差,不需人为调整。

6) 系数的设定。根据配管的材质、尺寸

(管径和壁厚)以及流体的声速,就可以计算出系数。

四、超声多普勒流量计测量回路原理及其特点

1. 测定回路原理(见图6)

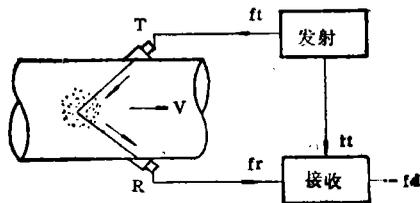


图6 超声波多普勒流量计测量回路原理图

在垂直于管轴的同一截面的管壁外,设置换能器T和R。从T向包含微粒子的流体中发射一定频率 F_t 的连续超声波,经微粒子散射,由R接收反射波。在流体流动时,由于多普勒效应,这反射波频率变成与发射频率不相同的频率 F_r 。其频率差是多普勒频移 F_d ,它与管轴中心附近的流速 V 的关系为

$$F_d = \frac{2\cos\theta \cdot F_t}{C} \cdot V \quad (16)$$

流量 Q 为

$$Q = S\bar{V} = SkV = \frac{SkC}{2\cos\theta \cdot F_t} \cdot F_d \quad (17)$$

式中 $k = \bar{V}/V$ 为补偿系数。这种流量计可测量固液二相流,精度为 $\pm 2 \sim 3\%$,重复性在 $\pm 1\%$ 以内。

2. 特点

1) 流速分布影响 与其他超声波流量计一样,流速分布不均匀会直接影响测量精度,故必须保证有足够的直管段长度。

2) 介质温度影响的自动补偿。将换能器夹装在管壁外,通过声楔材料将超声波发射到流体中去。设入射角为 φ ,声楔中声速 C_1 ,根据Snell定律

$$\sin\varphi/C_1 = \sin\theta/C \quad (18)$$

式(16)可改写成

$$F_d = \frac{2\sin\varphi}{C_1} \cdot F_1 \cdot V \quad (19)$$

式中, φ 是一定的, C_1 是固体声速, 随温度变化很小。利用式(19), 基本上可与介质温度无关而获得多普勒频移 F_d 。

3) 流体中粒子的浓度。多普勒法必须使用于含有一定浓度粒子的流体, 但浓度也不能太大, 要考虑发射波的衰减。

4) 多普勒频移信号。在收发两声束交叉区里, 所有粒子或气泡都会散射回具有速度信息的超声波。由于粒子所处位置不同, 产生的多普勒频移也不一样, 接收到的信号具有一个频谱。将发射和接收元件分开, 收集由相交区来的反射波, 这区域在流速截面的中间部份。若将发射和接收元件各以一定角度组装在单个换能器内, 它们的声束相交区会随管径的大小而改变位置。在实际使用时还要求声束尽量窄些, 可使声束相交区缩小, 接收信号频谱也窄。

5) 分辨率好。由于发射采用高频波, 可获得较高的多普勒频移, 故分辨率尚好。例如取 $F_1 = 2\text{MHz}$, $V = 1\text{m/s}$, 则 $F_d = 1.33\text{KHz}$, 即 1Hz 约为 0.7mm/s 。

6) 没有零点漂移。由于多普勒频移正比于流体的流速, 流体静止时, 不产生多普勒频移, 无零点漂移问题。

五、超声波流量计发展动向

近年来已出现一批能付之实用的新型超声波流量计。

1) 美国 Controlotron 公司的 480 型宽声束超声流量计, 采用宽声束时间差法原理。它能测量高温、高压、低温及粘液等特殊场合的液体流量, 管径可小到 $1/2''$, 流速范围从 $-40 \sim +40$ 呎/秒, 包括零。灵敏度为 0.001 呎/秒, 精度可达 $\pm 1\%$ 。这家公司最近开发了一种 960 型超声流量计, 有 4 个通道, 可同时测量 4 根不同口径管道的流量。

2) 日本富士电机制造公司的 COM (Coal and Oil Mixture) 超声波多普勒流量计, 可测固液二相流, 精度为 $\pm 2 \sim 3\%$ 。美国 Polysonics 公司的“HYDRA”, 超声波多普勒流量计, 具有信号——干扰识别装置, 适用范围可扩大到没有反射固体物质的干净液体。

3) 日本富士电机制造公司的便携式超声波流量计, 采用 TLL 原理, 内装 CPU 进行温度自动补偿。介质温度范围达 100°C , 被测管道口径可小至 1 英寸 ($\phi 25\text{mm}$), 精度 $\pm 1.5\%$ 。

4) 日本海上电机公司的用于气体的 GF 系列超声波流量计, 采用类似 TLL 方式的求时间倒数之差的原理。由于合理设计声道系统及电气回路中特殊的信息处理, 使超声波流量计在气体测量领域中得到实际应用。这种流量计目前可使用在流体温度范围 $-30 \sim +180^\circ\text{C}$, 压力 $0 \sim 10\text{kgf/cm}^2\text{G}$, 流速测量范围 $0 \sim 30\text{m/s}$, 流速分辨率达 0.01m/s , 测量精度 $\pm 1\%$ 。

5) 横河北辰电机公司以测量标准堰内流体液体高度, 然后换算成流量的开渠流量计。还有日立制作所和富士电机制造公司的测液位及流速, 然后由微处理机计算出流量的用于非满管的开渠流量计。其中测位和测速都用超声波方法, 这些开渠流量计一般用于污水处理及排水、下水等场合, 测量精度为 $\pm 3\%$ 左右。

另外, 苏联、西德等国也有与上述相类似的产品。

六、结束语

总之, 由于超声波流量计具有许多突出的优点, 已成为流量测量仪表发展的一个重要方向, 正日益被人们所重视。可以相信, 超声波流量计在流量测量中的地位将变得越来越重要。