

# 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：

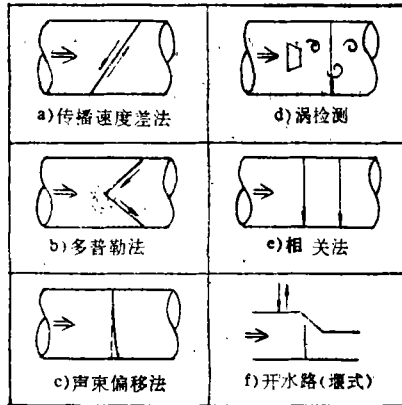


图1 超声波流量计各种测量原理比较

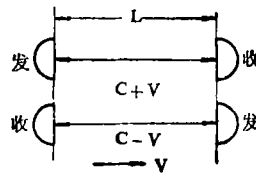


图2 传播时间差法原理图

### 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 $\Delta t$ 受声速变化影响。另外在小口径管道及低流速场合， $\Delta t$ 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  $\omega$  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,  $\Delta f$  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  $\tau$  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  $\tau_m$  是对应于  $\psi_{xy}(\tau)$  峰值点的  $\tau$  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

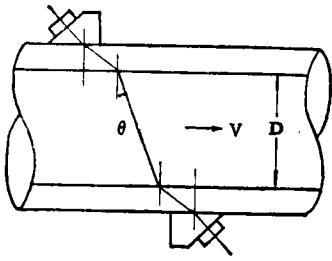


图3 夹装式测量时超声波的传播

声波在流体中的折射角为 $\theta$ ,管道内径为 $D$ ,流体以外的超声波传播时间为 $\tau$ ,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:

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

式中, $\rho$ 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VCO<sub>1</sub>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 $\tau_d$ 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 $\tau_d$ 与 $\tau$ 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VCO<sub>1</sub>频率 $F_1$ ,构成闭环。

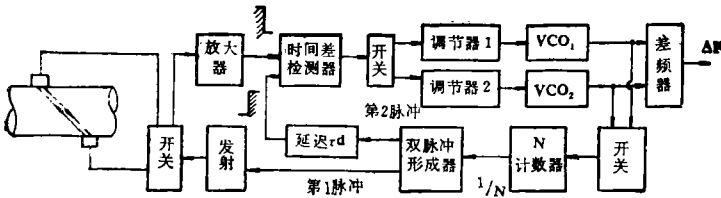


图4 TLL方式超声波流量计测量回路原理方框图

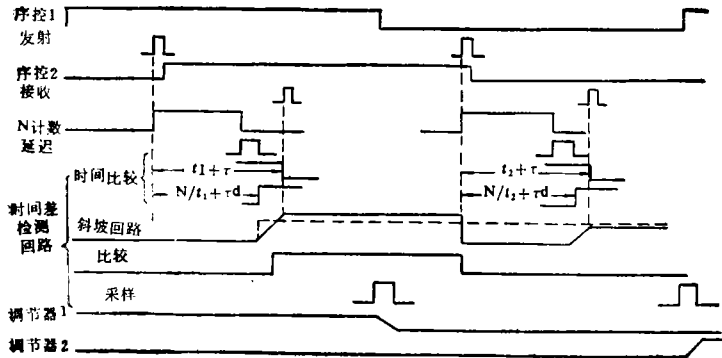


图5 TLL方式基本回路工作波形图

开关切换到逆流方向时,重复上述动作,调整VCO<sub>2</sub>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 $\Delta F$ 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 $\Delta F$ 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 $\tau$ 的存在, $\Delta F$ 还是受声速的影响。TLL法中 $\tau$ 在回路上则被抵消,另外大管径时由于声发散现象,认为 $\theta$ 基本上不变。但严格讲来, $\theta$ 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)

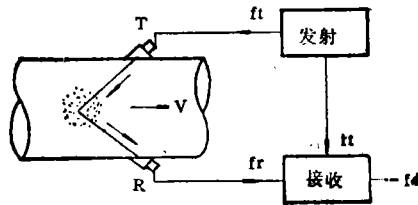


图6 超声波多普勒流量计测量回路原理图

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 $\varphi$ ,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,  $\varphi$  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。在发收两声束交叉区里, 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  $1\text{Hz}$  约为  $0.7\text{mm/s}$ 。

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  $100^\circ\text{C}$ , 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  $0.01\text{m/s}$ , 测量精度  $\pm 1\%$ 。

5) 横河北辰电机公司的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。