

声学译丛之二

超声检测

上海市物理学会声学工作委员会 主编

上海市科学技术翻译馆

声 学 译 丛 之 二

超 声 检 测

上海市物理学会声学工作委员会主編

*

上海市科学技术編譯館出版

(上海南昌路59号)

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

商务印书館上海厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印張 4 11/16 字數 200,000

1962年8月第1版 1962年8月第1次印刷

印数 1-2,500

书 号 : 5005 • 41

定 价 : 0.95 元

(内 部 发 行)

I

目 录

1. 超声气体分析仪	1
2. 超声流量计	3
3. 超声在工业上测量流量的可能性	6
4. 工业上的超声流量测量	11
5. 用脉冲式超声流量计测量煤焦油的流量	15
6. 脉冲式超声流量计	18
7. 流量计最新发展之一——超声流量计	22
8. 利用水声来测量河流流量	24
9. 連續粘度测量的新方法——超声粘度計一般原理	31
10. Y3B-58 型超声粘度計	41
11. 超声波濃度檢測仪	43
12. 超声金属液位計	47
13. 檢測液位和压差用的超声仪器	49
14. 超声液位記錄仪	54
15. 一种超声測量厚度方法	55
16. 超声探伤标准試块的发展	61
17. 应用超声探伤法获取焊縫橫截面的可見象	69
18. 混凝土路面的超声无损檢驗	71
19. 混凝土中超声波脉冲的速度和衰减的測定	72
20. 奧氏体鋼晶粒大小的超声檢查	73

SW/489/09

1. 超声气体分析仪

Michael Kniazuk, F. R. Prediger

Instruments and Automation, 28, p. 1916 (1955) [英文]

引言

分析特殊气体可用的仪器有如 Pauling 氏氧气表, Lilly 氏氮气表及 Fowler 氏红外线分析仪。此类仪器都很敏感,实际上能立刻有所反应,但对于涉及测定呼吸系数的研究,则所用仪器必须能测定氧和二氧化碳二种气体,因而引起了经常校准的问题。热导式电桥亦适于用来测量呼吸气体中的氧和二氧化碳的百分数;此法确是灵敏,但操作极端严格。本文所描述的超声气体分析仪,虽对个别气体并无特效,但具有若干优点:高度敏感性,操纵简易,工作稳定,节约技术人员的时间。例如应用标准化学方法,进行动物试验,仅分析六十种单独气体需时 1 日,试验时间需占 20 小时,余为准备动物及其它试验手续。如用本文介绍的仪器一个工作人员极易在 8 小时内完成一切试验工作。

虽然此超声气体分析仪的初步设计是为了研究呼吸气体,但由于适应面广和灵敏度高,有可能供作许多其他用途,如控制混合气体(而不变更其固有的瞬时反应及 0~100% 的范围内的敏感性);分析惰性混合气体;试验不同流速下各种气体的吸收效能;测定样气的均匀性以及气体中同位素浓度的相对变化等等。

利用声速分析混合气体并非新创。但文献中所描述的声学仪器中无一足够灵敏,能探测呼吸气体中氧气浓度的 0.01% 级的变化;这是测定试验动物基本新陈代谢速率的仪器的必要条件,现已有一仪器,可具有所需要的灵敏性。

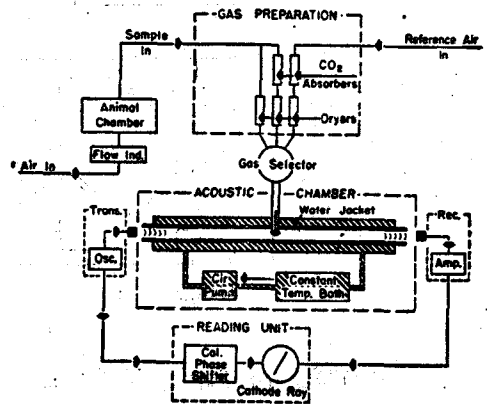
原理

当一对装置相隔一定距离的发送和接收换能器中的声波在恒定频率下由发送器不断辐射时,发送与接收器之间的声波就将存在一定的相位关系。若声波的传播介质变异,则相位关系亦变,因为波长是声速的函数。相位变化当与发送与接收器之间的波

数成正比($\Delta\phi = \omega\Delta t$ ——审校者注)地放大。因此,由引长声程或增高频率可以加强灵敏度。其有效限度决定于所采用的频率、温度、及电子与机械元件特性的稳定度。过高的频率将引起辐射换能器的有效性及相位的测量问题。长的声程需要极大容积的样气。测量相位元件的准确度决定频率与声程的最低值。

仪器说明

声室是一根光滑的金属管,直径为 8 毫米,长



Gas Preparation
Sample in
Reference Air in
CO₂ Absorbers
Dryers
Animal Chamber
Flow Ind.
Air in
Gas Selector
Acoustic Chamber
Water Jacket
Constant Temp. Bath
Cir. Pump
Trans.
Osc.
Rec.
Amp.
Reading Unit
Col. Phase Shifter

气体制备
样气进口
参考空气进口
CO₂ 吸收器
干燥器
动物室
流量指示器
空气进口
选气室
声室
水套
恒温器
循环泵
发送组合
振荡器
接收组合
放大器
指示组合
阴极射线管
移相器

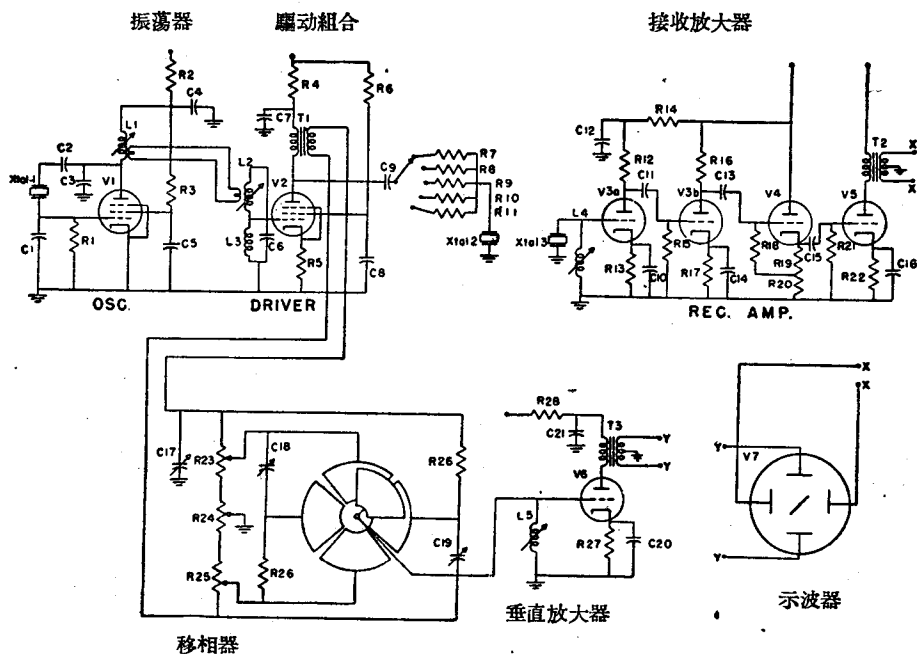
图 1 设备的设计方框图

100 厘米, 周圍裝有水套, 水在恒温下循環回流, 以保持室內氣體于固定溫度之下(圖 1)。被分析的氣體由聲管中央導入, 而由兩端流出。此種裝置的流速消除了氣流對聲速的影響。

2 個壓電晶體裝置在聲管中約距每端 3 厘米之處, 充作發送與接收聲能的換能器。所用的是 45 度 Z-切法 ADP (磷酸二氫鉍) 晶體, 其共振頻率為 150.1 千赫。

振蕩器(圖 2)頻率由晶體控制在 150.1 千赫上,

并調整到良好波形。驅動放大器的輸出為 75~100 伏, 供應發送晶體與放在校准的 360° 移相器(劃分每波長為 1000 分度)之前的分相網絡移相器的輸出經放大後接到陰極射綫管的 Y-偏轉板上, 同時接收晶體的輸出經放大後接到 X-偏轉板上。利用利薩如(Lissajous)圖形的 45° 直綫作為另點指示器; 當測量相位差時, 該直綫改變, 經用移相器調整, 使示波器重現直綫時讀出移相器上變動分度, 即得被測氣體的含量。



消除气流对声速的影响。晶控振荡器的 150.1 千赫发送信号加到阴极射线管中的垂直偏转片上。在声管另一端的接收信号加到水平偏转片上,利用校准的移相器来平衡这二信号的相位。氧灵敏度为 0.0036% 氧/分度。

振荡器产生 150.1 千赫信号—驱动器供应 100 伏给发送晶体(晶体^[2])与移相器(划分每波长为 1000 分度)。在声管另一端的晶体^[3]接收信号,经放大后接到阴极射线管中水平偏转片上。

(刘貽謀译 郑冠雄审校)

2. 超声流量计

H. Dahlke W. Welkowitz

IRE International Convention Record, Pt. 6: 255-58 (1960) [英文]

前言

大约从 1950 年以来,人们就已经致力于利用超声技术来测量液体流量。在以前所有的例子中,所使用的技术均以利用脉冲技术或相位技术来测量流量对声速的影响为基础[1~5]。这中间也包括第一个商品工业流量计在内^[6]。本文所述的流量计则依另一不同的原理来工作。在这种情况下,流动液体对横过液流的超声束造成偏移的现象被用来作为工作原理。这种技术连同近三年来在卡尔顿工业公司(Gulton Industries Inc.)所进行的试验工作系由皮得曼首先提出的^[7]。这一系统在概念上及所需的金属材料上都很简单。因此具有可靠地应用于工业上的可能性。

工作原理

这一系统的工作原理,是一种声束偏移的原理。敏感系统是一种振幅的敏感系统。如图 1 所示,垂直发射一个频率为一兆赫的超声脉冲通过内有流动液体的管壁。这脉冲穿过液体并被管壁往返地反射。在每一反射之后,回波振幅均有减小,经过约十来次反射后,这连续的脉冲将因为吸收和折射而消失。每一脉冲的一部分能量穿过管壁,被位于管壁外,与发射换能器面对的接收换能器所检出。发射器的脉冲发出的时间是这样定的,那便是要在前一个脉冲的连续回波消失以后再发出一新的脉冲。因此每一接收换能器上的电压便包含一串脉冲,每一脉冲都随有许多的回波。每一个这种回波被检出、放大及整流,最后变成一直流输出,从各自的波道中出去(这里共有二条波道——审校者注)。

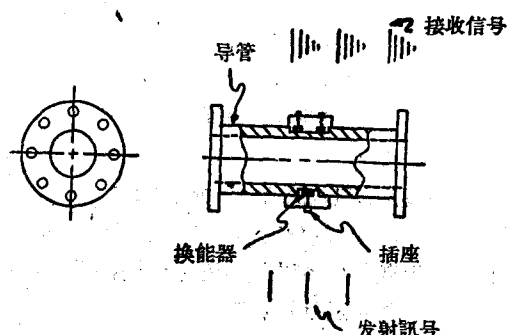


图1 超声流量计示意图

一个超声场系由一种介质的机械振动所组成,在本文内这介质便是管道内的液体。因此如图 2 所示,这液体的运动或流动将引起声束相对于接收换能器的偏移,声束偏移的方向将根据声速向量与流速向量的合成结果而定。如果接收换能器具有恰当的尺寸,那么射到它们上面的声束部分将会改变,结

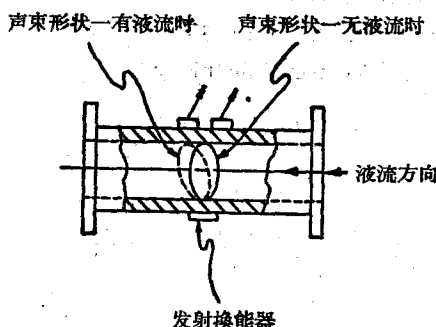


图2 有液流时声束的偏移

果每个换能器的讯号输出幅度也便改变。灵敏度(输出电压与速率之比)是接收换能器与发射换能器的相对位置的函数。一个输出电压与接收晶体间相对位置的关系的典型曲线图示于图 3。如果如图 2 所示,接收换能器系位于声束中心的两边,那么在有流量的情况下,接收换能器之一的输出将增加,而另一

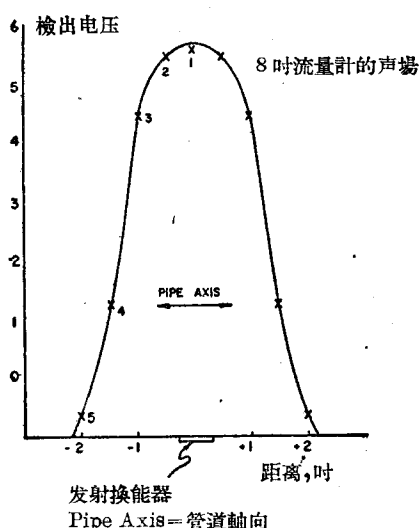


图3 输出电压对接收位置的关系

个的则将减少。

理論上的訊号输出的分析如下：

令声束偏移的角度为 α ，声束在接收换能器上的偏移距离为 L ，管中平均流速为 V_f ，管道内径为 d ，液体内的声速为 V_s ，则

$$\tan \alpha = \frac{V_f}{V_s} \quad \text{及} \quad \tan \alpha = \frac{L}{d},$$

或

$$L = d \frac{V_f}{V_s} \quad (1)$$

无流量时，接收换能器的输出电压为：

$$V_{R1} = V_T \delta_1 K_0, \quad V_{R2} = V_T \delta_2 K_0 \quad (2)$$

其中 V_T 是发射换能器的激励电压， δ_1, δ_2 ，为包括声束的折射、衰减、接收换能器的灵敏度以及接收增益在内的一个因数。 K_0, K_1, K_2 为常数。

有流量时，上述输出电压便变为

$$V_{R1} = V_T \delta_1 \left(K_0 - K_1 d \frac{V_f}{V_s} \right) \quad (3)$$

$$V_{R2} = V_T \delta_2 \left(K_0 + K_2 d \frac{V_f}{V_s} \right) \quad (4)$$

由于 $\frac{K_1 \cdot d \cdot V_f}{K_0 \cdot V_s}$ 相对于 1 来说甚小，所以

$$\frac{V_{R1}}{V_{R2}} \approx \frac{\delta_1}{\delta_2} \left(1 - \frac{K_1 + K_2}{K_0} \cdot d \cdot \frac{V_f}{V_s} \right) \quad (5)$$

用一个可以抑止零点时电压的指示表，则它可以给出一个输出讯号：

$$E_0 = K \frac{\delta_1}{\delta_2} \cdot d \cdot \frac{V_f}{V_s} \quad (6)^*$$

[式中 K 为常数等于 $\frac{K_1 + K_2}{K_0}$ ——譯者]

这一結果上乘管道的断面积便可给出体积流量。

这一系統的一些特性，可通过方程式(6)的考查

而认知。将两接收换能器的输出相除，就可見到最后输出讯号与发射讯号的振幅无关。如果二晶体的衰减因数 δ_1 和 δ_2 对温度与时间的变化是相互成线性关系 ($\delta_1 = K \delta_2$)，那么输出讯号与此变化无关。另一方面，如果没有任何进一步的修正，这一输出則将与管径 (d) 和声速 (V_s) 的变化有关。

如果发射器换能器通过一綫圈相联，而这綫圈与换能器的支架电容是調諧的，那么激励电压的大小将随着液体声阻抗 (ρ, V_s) 的不同而变化。它的整流后的量值是：

$$E_T = \alpha \rho V_s, \quad (7)$$

α 为常数

假如方程式中(6)的电压 E_0 乘以方程式(7)中的电压 E_T ，則最后的結果将是：

$$E = E_0 E_T = K \frac{\delta_1}{\delta_2} d \frac{V_f}{V_s} \alpha \rho V_s$$

或

$$E = \alpha K d \frac{\delta_1}{\delta_2} \rho V_f \quad (8)$$

这里 ρ 为液体密度， α 为发射器脉冲的振幅。

输出电压 E 不包含声速 V_s ，而仅包含液体流速与密度的乘积 ρV_f ，这就是单位时间流过质量，或称质量流量。

綫路說明

系統的方框图示于图4，发射器包括一科耳毕兹(Colpitts)振荡器，其后跟随两个調諧放大級，第一級放大器的帘栅电压由一脉冲宽度和重复频率可变的多諧振荡器控制，这样可使得发射器按照所需要的脉动情况开或关。第二級放大的输出激励发射换能器。傳至换能器的脉冲頂峰的功率属于十分之几瓦的数量級。

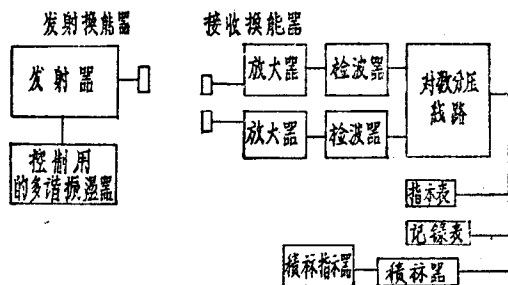


图4 綫路的方框图

接收换能器联到典型的調諧放大器上，那些放大器在穩定度上进行了很好的匹配。放大器的输出送到检波綫路中，然后依次轉到一个带有电压表作

指示的两极管式的对数分压器中。由于有效的范围很小,所以虽然采用了对数线路,但表的读数与流量仍然近乎一直线关系。一个记录式的电流表与这表在一起被运用。放大器的输出也可送至一积算器以得出总的液流体积。

管道和换能器

这种流量计的声学部分包括一段装有陶瓷换能器(探头)的管子。该单元的草图如图1所示。换能器由钛酸铅+锆酸铅压电陶瓷材料制成,磨成的厚度正好能使其谐振频率为一兆赫。换能器前面的型示于图5中。如方程式(6)所指出,这系统的输

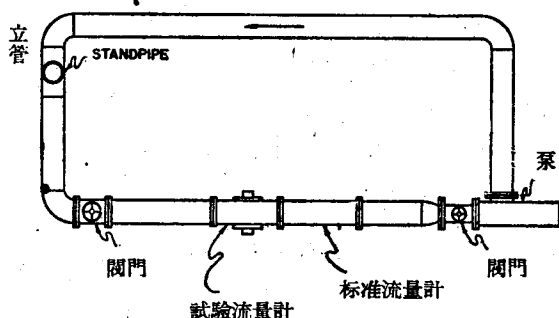


图5 试验装置图

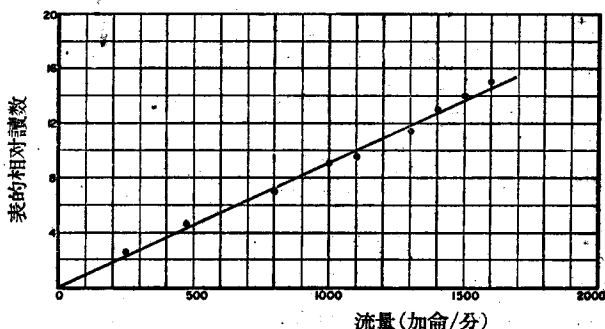


图6 超声流量计的线性试验 1960-1。

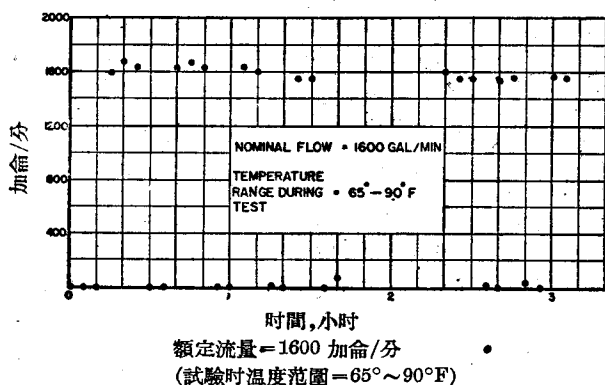


图7 超声流量计的稳定性试验 1960-1。

管壁的厚度做成管子材料中声波半波长的倍数。接收换能器位于从发射换能器发射出来的声束的两边。为了使它能方便地用于液流系统中,流量计管子的长度可以做成与普通管阀一样的长度。

测 量

本文所讨论的流量试验及测量均系在古尔顿(Gulton)流量试验装置中进行的。这试验装置可以允许0~1600加侖/分的水流过8吋的试验管道。该系统系利用赫尔塞(Hersey)PM型流量计作标准。这是一个校正到 $\pm 1\%$ 精度的仪表。试验装置的图

出系与流量成线性关系。一个线性关系的试验结果示于图6。这试验表明在整个试验范围内输出是非常线性的。以前在赫尔塞-斯培灵仪表公司(Hersey-Sparling Meter Co.)的试验设备上所进行的试验表明,该系统在达到3000加侖/分的流量时仍维持线性关系。这系统的灵敏度是这样的,即在流量为1600加侖/分时,二接收换能器的输出比约超过流量为零时25%。该单元在3小时内稳定试验的结果示于图7。由于在试验过程中曾经数次地开、关水泵,所以这试验同时是灵敏度稳定性与零点稳定性的试验。如果这种流量计的额定范围取3200加侖/分,那么在这一过程中最大的不稳定性是满刻度的 $\pm 2.5\%$ 左右。由于读数是在校验值的两边波动,所以在这个时期内其总的读数误差是远小于上述误差的。如图5所示,古尔顿试验装置是一闭合的回路系统。在这些试验中水系热至65。 $\sim 90^{\circ}\text{F}$ 。

讨 论

一种声束偏移式的超声流量计的理论 and 试验已如上述。各种曲线所表示的试验结果,表明了这一系统由它的线性和稳定性表现出来的性能。留下的主要问题是要研究零点和灵敏度二者的长期稳定性。其目的是在对这系统进行最初的校准后,可以在几个月的期间内仅用极少的调整,就可使它的读数再现。

(吳安意譯 鄭冠雄校)

参 考 文 献

- [1] R. C. Swengel, W. B. Hess, S. K. Waldorf: Demonstration of the Principles of the Ultrasonic Flowmeter, *Electr. Engineering*, Vol. 73, No. 12, pp. 1082~1085, (1954).
- [2] K. S. Stull: Ultrasonic Phase Meter Measures Water Velocity, *Electronics*, Vol. 28, pp. 128~131, Sept. 1955.
- [3] H. P. Kalmus: Electronic Flowmeter System, *Rev. Scientific Instruments*, Vol. 25, pp. 201~206 March 1954.
- [4] Z. F. Herrick: Resume of Discussion Group on Ultrasonic Flowmeters, *IRE Transactions on Medical Electronics*, Vol. ME-6, No. 4, pp. 202~203, Dec. 1959.
- [5] D. L. Franklin, D. W. Baker, R. M. Ellis, R. F. Rushmer: A Pulsed Ultrasonic Flowmeter, *IRE Transactions on Medical Electronics*, Vol. ME-6, No. 4 pp. 204~206 Dec. 1959.
- [6] J. Kritz: Ultrasonic Flowmeter, *Instruments and Automation*, Vol. 28, pp. 1912~1913, Nov. 1953.
- [7] L. Petermann: Patent No. 2, 874, 568.

3. 超声在工业上测量流量的可能性

Martin Schweiger

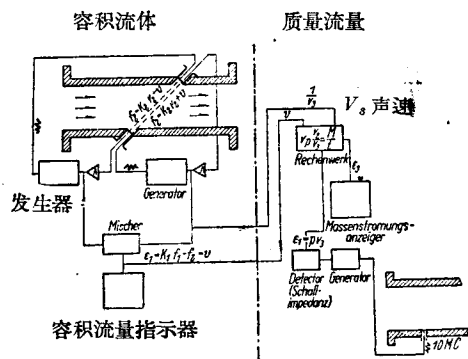
Zeitschrift für Messen, Steuern, Regeln, Jahrgang, 3 Heft 11: 466~470 (1960) [德文]

要准确地测量流量,其决定性的关键在于:不断反复试验,使现有的测量方法能适合于各种特殊的使用条件并发展新的测量方法。因此应用超声方法在最近已引起了普遍的注意。在这方面我们大概都知道过去所用的方法上的一些缺点。特别是差压式流量计的主要缺点就是一定要插入到管道内。在这里首先要提出的缺点现在可以用超声方法来避免,就只要把作为测量敏感元件的超声发送器装配在导管的外部,这种方式特别适用于测量腐蚀性介质。

下面首先要报导这方面的技术水平以及由EKB (民主德国国营 Bitterfeld 电化学联合企业) 实验室所进行的研究试制工作。

主要对二种原则上不相同的超声测量方法作了详细的讨论并互相作了比较。一种是脉冲^{[1][2]}法,即利用四个超声换能器作为流量敏感元件并以频率测量法作为流量测定的手段。作用原理可见图1。每两个相对的振子合成一对,其中一个振子作为发送器,另一个作为接收器。一个发送器发出与流速同向的超声波,另一个则发出与流速反向的超声波。这里就二次利用一种作为“脉冲反馈系统”所熟知的测量声速的方法。这种方法的工作原理如下:

一个短高频电脉冲由一个脉冲发生器发送到换能器的石英晶体上。这个晶体就将电脉冲转换为



Generator=发生器
Mischer=混合器
Rechenwerk=计算装置
Massenstromungsanzeiger=质量流量指示器
Detector (Schallimpedanz)=探测器(声阻抗)

图1 用四个超声换能器的方法通过声学密度的测量这种方法还可以测定质量流量

一个短声脉冲,透过一个给定的距离为一个特性相同的晶体所接收。这样重新转换成的电脉冲,经整流后尽可能地使之成为一个完整的方波低频脉冲。然后利用这一脉冲反馈来触发脉冲发生器。依据这测量原理就可进行顺流与逆流二次测定来求得流量。由于顺流与逆流二个系统之间过渡时间的不同发生时差,这可以用拍频方法来检测。由于所出现

的拍頻極小，因此在技術上就難進行測量。所以這種方法很不經濟。同時振子之間的距離又難保持恒定，而且超聲的反射也會引起顯著干擾。

與此相反，還可以考慮的相位測量法^[4]在測量技術上是容易實現的。然而聲速變化對測量結果的影響和脈沖法相比較顯然是麻煩的。其作用原理可見圖2。把二塊石英晶體裝配在導管外部的一定的距離中。利用混頻管對由於流速的影響所引起的發送與接收信號之間的相位變化進行比較。但由於只有利用一種適當的所謂“雙路法”才能使距離和聲速變化，以及由於相位移所引起的頻率變化得到消除，因此在二個石英晶體之間就利用一個馬達驅動的開關，以便用10赫頻率從發送到接收波道進行交替換向。這樣，一回順流發射，另一回逆流發射，最後把這二個方向中的對發送信號的相位移進行比較。所以時間 $\leq 10^{-1}$ 秒的短時聲速波動和距離波動可以不受影響。

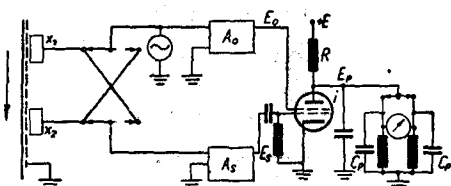


圖2 用二個振子的發送和接收作用的交替來實現一種分路法

用數學公式來表示測量值對討論上述方法是很有啟發性的。前面已經說過，脈沖法是以測量拍頻為基礎的。這可按下列方式來理解。順流和逆流的過渡時間：

$$t_1 = \frac{d}{c+v} \text{ 和 } t_2 = \frac{d}{c-v}$$

其相應的頻率為：

$$f_1 = \frac{c+v}{d} \text{ 和 } f_2 = \frac{c-v}{d}$$

因此我們就可得到拍頻

$$f_1 - f_2 = \frac{2v}{d} \quad (1)$$

至於相位測量法可從下列公式推導出來。這裡需要測定的是直接過渡時間差 Δt ：

$$\Delta t = t_2 - t_1 = d \cdot \left(\frac{1}{c-v} - \frac{1}{c+v} \right) = c^2 \frac{2dv}{(1-v^2/c^2)}$$

$$\text{因為 } \frac{v^2}{c^2} \ll 1 \text{ 和 } \frac{\Delta p}{360} = \frac{\Delta t}{T} = \Delta t f,$$

故：

$$\Delta p = \frac{360 \cdot 2d \cdot f}{c^2} \quad (2)$$

$$\left(\text{應為 } \Delta p = \frac{360 \cdot 2dv \cdot f}{c^3} \text{ 審核者注} \right)$$

第一個方程式雖然簡單卻仍然直接指出在發展這種原理的方法時會出現某些困難。量值不受聲速影響的優點還必須通過克服大部分結構上的缺點來獲得。顯然靈敏度的提高是和發送器的距離成反比。這將會使儀器結構上產生一些困難。假定發送器的距離 d 為10厘米，那末當水中的聲速 c 為 1.5×10^5 厘米秒 $^{-1}$ 時則聲脈沖的過渡時間 $t < 10^{-4}$ 秒。因此必須以10兆赫上下的載波頻率來進行工作，以便頻帶的寬度可實現相應脈沖傳送。但由於介質中不同物體上所引起的超聲反射使干擾的敏感程度有所增加。此外在處理測量射程 d 為常數時，也有誤錯。當然 d 可以保持很穩定。但因為用二個相互獨立的系統來進行工作，這二個系統相互之間可能有出入，這樣就會出現很大的誤差。

雖然一般發展趨勢是這樣，可是我們由於上述理由放棄了這種測量原理而改走了只用二個超聲換能器工作的相位測量技術路線。然而我們的方法的原理是與目前知道的有所不同。

研究試驗的經過：

按照上述技術路線進行了實驗室設計，其作用原理可見圖3。利用一個Clapp-Franklin振盪器來產生一個高度穩定的高頻振盪。其頻率為1.05兆赫。這一信號（振幅約為0.1伏）是在下面一個緩沖器級上加予以放大。後面一級是B-類倍增器。這裡經滤波後的2.1兆赫的信號這一電子管輸送到二個推挽式工作的輸出管上。但與普通的推挽電路有所不同，這個共同的振盪回路卻分成二個單獨回路。由此可使二個超聲發送器達到局部的分離。在這些振盪回路中放了二個鈦酸鋁振子，其共振頻率約為2.2兆赫。該二個振子是按照相位差 180° 的電路來激發的。此外振子還通過適當的耦合電容器直接和每一個放大器聯結。脈沖發生器由外部電阻分緒發出相位差 180° 的脈沖既加到振盪器的倍增級上

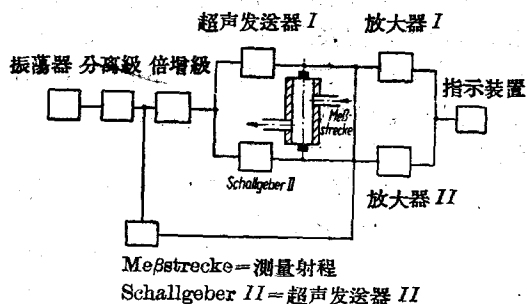


圖3 試驗模型的框圖

又加到二个放大器上。这脉冲发生器是一个自由振荡的多諧振荡器。发射比率为 1:2, 脉冲持續時間 ~500 微秒。

使用这种测量方法的条件是能使小的振幅范围内的声波不受干扰地傳播, 即声場中无散射現象出現。当一正脉冲使振荡器的倍增級导电时, 一个大負脉冲就把二个接收放大器截止。为了避免通过脉冲发生器的外电阻(这实际上是一个栅漏电阻)的負反饋, 可以把发射脉冲通过二极管加到放大器的輸入端上。

在发送時間內二个超声波就横跨一段規定的所謂測量射程中的流动介质。用一个乙 烯基塑料 (Vinidur) 圓片使振子和介质隔离。

脉冲持續時間大体上可以这样来規定: 要使得在发送結束时第一个超声振荡正好在对面按装的振子前面。接着二个放大器导电, 这样射程中的二串脉冲信号就可以被接收下来。由于順流与逆流的傳播关系, 使这二串脉冲按公式 (2) 产生相位差, 把这些移相的信号送到一个混相管 (EQ 80 型) 的控制栅上。这电子管同时可限制得完全不受振幅波动的影响, 只要使它的飯压, 从而所用的电路中的帘栅压保持稳定。这一相位差决定着飯极控制电流的变化, 亦即簡單地可作为用来指示的流量量度。可惜 EQ 80 在相位差 180° 以下时的工作是非綫性的。因为二个信号有 180° 的相位差, 因此就需要有一个移相器, 以便能調整到电子管的特性曲綫的綫性范围内工作。这一移相器作为所謂分相器把相位旋轉到 90° 。

在作了簡短的原理說明之后, 对电路設計的理由进一步介紹如下:

曾采用了一种具有高度頻率稳定的 Clapp-Franklin 振荡电路作为发生器的振荡器。因为按照公式 (2) 頻率要直接影响測量結果, 所以对頻率的高度稳定性的要求是必要的。

頻率的选择可以根据工作观点而定, 就是利用尽可能大的声波波长来进行工作。这样仪器的干扰敏感性就可降低。工作頻率的选择不仅如此, 而且也要考虑到能由国营 Hermsdorf 陶瓷厂供应适合于这个頻率范围的通用振子。

关于測量射程方面要說的是: 測量射程的結構要考虑到它的长度能合乎几何的要求, 以便能适当地增大脉冲持續時間。为了保证脉冲能正确无誤地傳送, 这是必要的。因此, 这样的測量射程应有 75 毫米的比較大的长度。此外, 在它的装配中还有一

种困难, 就是很难避免声的反射, 因为二个振子是平行面对地按装的。振子的支架曾采用图 4 所示的方式, 通过选择一个最佳的发射比例可以避免声反射。如果反射只是短时地在发送時間內出現, 那么反射是可以避免的。为了滿足这一条件, 必須做到接收与发送時間之和相等等于 $2d/c$:

$$T_s + T_e = \frac{2d}{c} \quad (3)$$

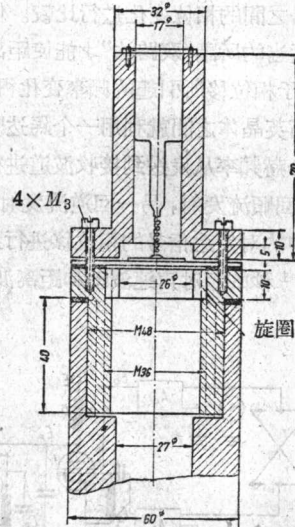


图 4 振子的支架裝置

放大器是用一个頻帶設計得有相当宽度的二級諧振放大器。EQ 80 是用来作为測相管。在这管子上測得平均的直流电。

图 5~8 所示的是相位差的图象与其所属的校准曲綫。这些照片是在一次校准試驗中摄影的。当

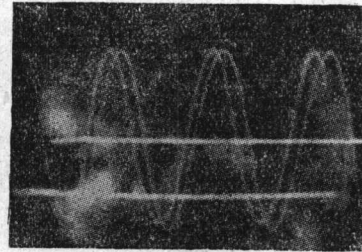


图 5

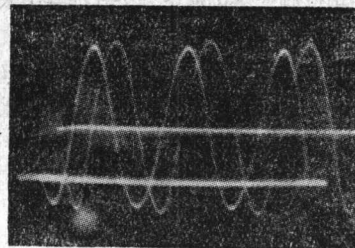


图 6 相差示波图

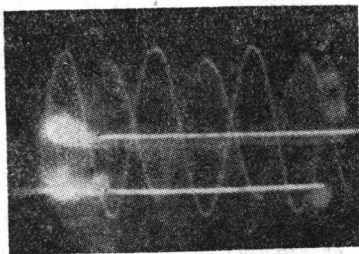
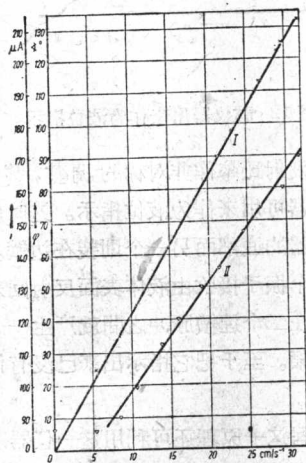


图 7



曲线 I = 相位差的测得值与流速的关系
曲线 II = 电流测得值与流速的关系

图 8 校准图

时进行的测量流速为 0~30/秒。这样首先就可证实所述原理的正确性。前面已经说过，这一超声测量方法的优点是极为明显的。由于测量探头（钛酸钡振子）和介质并不接触，因此这一方法正好能运用于腐蚀性介质的测量。本文所述的测量装置单就工作安全而论应该远胜于其他超声方法。

若从公式(2)中可能出现的误差根源来讨论，则可得下面的分析：要是由于热膨胀和装置上的困难而允许有 1 毫米的距离变化（对其本身来说这一值已经很高），这样在所应用的测量射程上就可能引起一个 1% 的误差。

所用的振荡器能保持有一个至少为 10^{-3} 的频率常数，因此由于频率所引起的误差同样是在 1% 以下。

因为超声发生器的输出级和放大器是用同样的电路元件（相同的温度系数）所构成。所以在温度升高时电路元件的变化从而振荡回路的解谐作用的百分比都是相同而不致产生相位误差。

放大器的非对称结构决定仪器的常数 K ，它即使利用具有不同符号的温度系数的电路元件时变化

很小，而这种变化在任何情况下可以用移相器的调整得到平衡。关于振子直接的或是由输出管功率波动所决定的不均匀的发热问题由于利用脉冲技术之故，无需讨论。

反射作用对测量结果的影响可用条件(3)来说明。多谐振荡器的频率常数约为 5%。因此条件(3)也只保持 5%。由此和由于无法控制的间歇振荡现象所引起的 10% 的接收时差，正说明了测量值的杂散情况。

在公式(2)中所出现的多参数影响这一方法并不受到限制。它们可以按照图 9 装上各个不同的接头和与此有关的对各种测量范围的灵敏度抑制作用加以避免。这样的装置法又提供了一个重要的优点。当仪器在工作时首先调整到不灵敏的范围上，并确定流速的近似值。然后调整到最灵敏的范围内，这样就可以很大的精度测得 Δp 值。

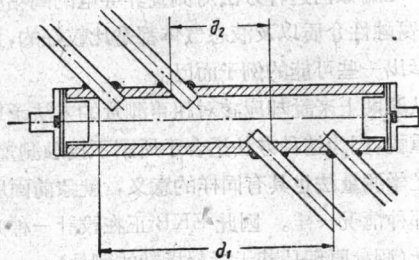


图 9 用不同的接头装置来调节灵敏度

关于理论与实验的基础要谈的到此为止。因为目前我们对这种方法还没有现场工作经验，所以最后还想提一下对这种化费较贵的方法来代替现有的方法还没有这样要求。

但是在这—关系中应该指出，如能完成一种可以直接测定质量流量的方法的话，那末这是一种完全可以竞争的测量原理。这一试验应作进一步的研究所。

这可以下列方式来进行：首先是用声速测量法（类似脉冲反馈系统）来确定脉冲的宽度。在图 10 和图 11 中二个脉冲高度的距离是相当于流速，而脉冲宽度相当于声速。由于公式(2)中的“ c^2 ”还要有一个第二个有关声速的说明。这可以通过测量辐射阻抗的方法来测得。因为在辐射阻抗中也有密度出现，因此根据相当的电子乘法，其测量结果直接和质量成正比。

但是将上述的方式投入现场使用从目前来看在一些特殊的情况下还是值得的，这些情况就是当所有其它方法，特别是当电磁法（Altoflux）也不能应

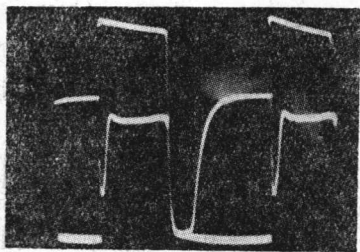


图 10 EQ 80 上的输出

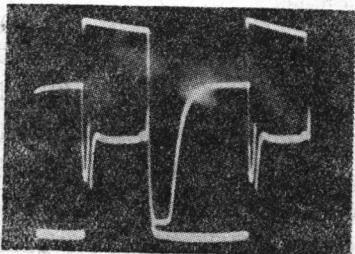


图 11 录入图象的发射脉冲

用时。无论如何这种方法对测量非导电的高粘度液体,强腐蚀性介质以及液态气体都是比较好的,这里只是举出一些可能的例子而已。

从原则上来说却应该对超声测量的方法予以较大的重视,因为这种方法适合于所谓不接触测量。

光学测量法也具有同样的意义,就象前面所提到的那种情况一样。因此 EKB 正在设计一种光学密度计(测量原理是基于折射指数的测量)。

这一方法在任何情况下可和超声方法相配合。最后,对这种方法还要指出一些其它的用途(图 12)。

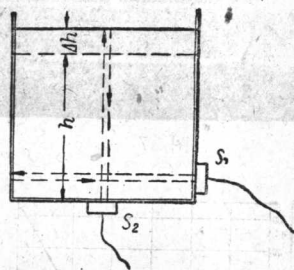


图 12 该仪器用来作为液位指示

要是把发射比率作非对称的调整,譬如 1:10,那末这一仪器可用来作为液位指示。这时就把一个振子装在容器的底部而另一个则装在边壁。在接收的时间内一个振子接收由液体表面反射回来的超声脉冲信号。在二个连续脉冲之间就产生一个作为液位量度的拍频。至于把它指示出来已没有什么困难了。

此外根据这一原理还可利用这一仪器来进行材料探测。因此,按照相应的装备就有可能把这仪器作为多用途测量仪器应用。

(孙介铭译 郑冠雄审校)

参 考 文 献

- [1] Kritz Jacke: *Instruments and Automation*. Vol. 28, Nov. 1955, S. 1912~1913 Ultrasonic Flowmeter.
- [2] Knapp, C.: *Voith Forschung und Konstruktion*, Heft 3, August 1958, Geschwindigkeits- und Mengenmessung stromender Flussigkeiten mittels Ultraschall.
- [3] Prospekt der Firma Fischer und Porter.
- [4] Kamlmus, H. P.: *Review Scientific Instruments*. Vol. 25 Nr. 3, March 1954.

4. 工业上的超声流量测量

Fischbacher, R. E.

Automation Progress 5, 2, 40~42; 56~57 (1960) [英文]

在程序工业上, 流量是一个必需测量的较重要参数。从目前常用流量计品种繁多这一点来看, 可知流量测量不是一个单纯的问题, 而是包含许多极其分歧的问题的一个综合性的问题, 而这种分歧多半还是由于现有方法的局限性引起的。

理想的流量计, 应该不受环境条件和流体性质的影响。精确度不应随温度、压力或密度而改变。管子的构形, 以及管路中阀门的设置, 都不应引起任何影响。粘滞度的变化也不应使仪器的性能改变。腐蚀性流体、浮粒或纤维、都不应对仪器有所影响。最后, 理想的流量计测量容积流量, 最好是测量质量流量时, 其误差应小于 1%, 必要时, 应小于 0.1%。

现有的流量计, 大体上还能具备一些上述条件, 但不能同时达到全部要求。孔板式流量计, 虽然多少还要受粘滞度的影响, 但可能是工业方面用得最广泛的一种。实际上, 这种流量计, 结构简单, 从应用范围来看, 它已达到高度发展的阶段。在适当的使用条件和细心维护下, 这种流量计精确度可达 1%, 这对大多数用途来说, 也足够了。其他各种压差式流量计 (如皮托管式、文森里式等等), 也都具有相同的特性。可变面积式流量计, 采用锥形管子, 并在管子里装着一根能往上升的阀杆。这种流量计也受粘滞度的限制, 但在粘滞度系数相当恒定的情况下, 精确度可达 0.5%。旋叶式流量计, 目前正逐步向更高的精确度发展。这种流量计, 用在相当洁净的流体中时, 准确度据说已远远超过 0.1%。最近, 又已有电磁流量计可以应用。这种流量计以流体的电导率为依据, 实际上完全与各种外在参数无关。

以上所举的各种流量计, 只有最后一种是非收缩式的。也就是说, 这种流量计, 测流部分的管内壁与其余部分的相同, 没有节流作用, 因此避免了压头的损失, 而且在需要清除管壁上的沉淀物时, 便于疏通。这种流量计不会因流体中所含的、足以妨碍机动部件的悬浮粒子而引起阻塞。

此外, 非收缩式流量计的另一种构造技术, 以利用流动液体中超声波的传播为基础。在英国, 尤其

在美国, 已经设计出来各种超声流量计, 供各方面使用, 但其中大多数仍停留在实验室阶段, 即使有一部分已经脱离了实验阶段, 也只能适用于高速液流方面。由于液体中的声速是测量的主要依据, 它一般在 5000 呎/秒左右的范围中, 因此, 显而易见, 流速越低, 则要求有越精密的测量技术。当流速为 100 呎/秒左右时, 则测量工作比在 5 呎/秒流速时简单得多, 5 呎/秒的流速在工业生产过程中是比较普通的。到目前为止, 工业上用的超声流量计, 在英国还没有定型产品, 而美国已能供应的超声流量计, 用在比较低的流速方面, 也还不见得成功。

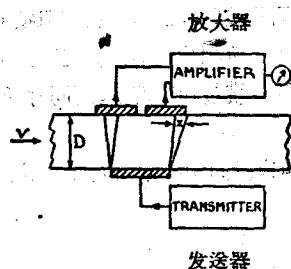


图1 被偏移的声束, 随流动流体而漂移, 因此, 它被不均匀地分布在各个接收换能器之间

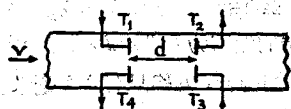


图2 这种系统利用脉冲的逆流传递和顺流传递之间的时间差为设计基础

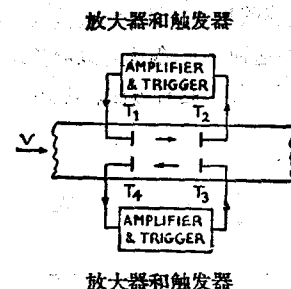


图3 由于采用了自再生振荡电路, 这种仪器可不受流体中声速局部变化的影响

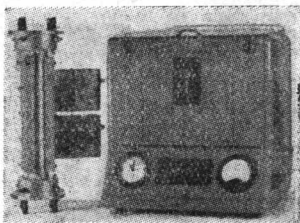


图4 这种相位比较式流量计系利用逆流傳送和順流傳送的不同頻率为基础,因此可以使这两个頻率同时产生

声束偏移

超声流量计的工作原理很简单。已提出的有好几种不同的设计方案,其中一种如图1所示。这是一种最简单的系统,主要是利用液流使超声波束偏移。

设在管子一面的一只换能器,使适当的定向发射的声束通过流体,傳送到管子的另一面。在这里,声束冲击着两只接收换能器,使每只换能器都能在没有流时接收到一份相等的能量。当液体流动时,波障面即以声速 c 横过管子傳播,而同时受流速 v 推向順流。

于是,声束就向順流方面偏移。声束末端的偏移量为:

$$X = D \frac{v}{c}$$

式中, D 为管的直径。

在一支直径約4吋、液体中的声速 c 約1500米/秒的水管里,当管中的水以50米/秒的流速流动时,声束末端的偏移为0.33厘米,而在最大流速只有1.5米/秒的場合,偏移只有0.1毫米。显然,在要求辨别0.001毫米偏移的場合中,这就不精密测量的最好依据了。

关于这一点,只要使声束从斜对方向横过管子发射,并经过管壁几次反射后而被接收,就可得到一些改善。采用这种方法,射程可以增长,因而总的偏移量可以提高。不过这种方法,只能适用于高速度的液流方面。

時間或相位差

图2所示的第二种系统利用的是流动流体中声傳播的速度差。如果拿一个脉冲激发换能器 T_1 , 则其超声脉冲将在经过声速和流速所确定的一段时间

后到达 T_2 。这个時間延迟是:

$$t_1 = \frac{d}{c+v}$$

其中, d 为 T_1 到 T_2 的距离。

在静止流体中,过渡時間应为 $\frac{d}{c}$, 但由于整个流体沿傳播方向移动,因此所需的時間較短。在这里,如果跟 t_1 比較,零流量時間 $\frac{d}{c}$ 作为一个預先确定的基准時間是不合式的,因为 c 不是稳定的量,而要依温度、压力和其他因數而定。

因此,这里采用了微分原理,把脉冲同时加在 T_1 和 T_3 上。加在 T_3 上的脉冲,以反流体的方向推进,并在時間

$$t_2 = \frac{d}{c-v}$$

之后到达 T_4 。因此,二个不同的到达時間之差为:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2dv}{c^2 - v^2} \approx \frac{2dv}{c^2}$$

在低流速下,由于 Δt 一般只有几分之一微秒,因此,这些脉冲可以用角頻率 $\omega = 2\pi f$ 和具有測得的相位差的連續訊号来代替。这就是:

$$\Delta\phi = \omega \Delta t = \frac{2\omega dv}{c^2}$$

在把各个数值插入式中时,我們还需要考虑另一个附加的参数 ω 。从相位测量的观点看,在最高的流速下, $\Delta\phi$ 应尽可能接近 360° , 也就是說, $\frac{\Delta\phi}{2\pi} \leq 1$ 。超过 360° , 就会产生模棱現象。在前面的4吋管子中,如声束是以 45° 角横过液流的, d 就等于 $0.1/\cos 45^\circ$ 米,而分解在声束方向上的流速分量,则为 $1.5 \cos 45^\circ$ 米/秒。因此,相位差为:

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \omega \Delta t = \omega \frac{2 \times 0.1 \times 1.5 \times \cos 45^\circ}{1500^2 \cos 45^\circ} \\ &= \frac{1}{7.5} \times 10^{-6} \omega \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{1}{7.5} \times 10^{-6} f$$

如果我們选定 f 值为 $5 \cdot 10^6$, 則 $\frac{\Delta\phi}{2\pi} = 0.66$, 这样,就可以有充份余地,避免相位的模棱現象。一只尺寸适中的换能器所发出的声束宽度应该要狭,象以上这样一个頻率,对这一要求并无矛盾。以上这一点,主要是为了避免超声能量向不必要的方向傳播,从而避免在两个换能器系統之間引起干扰。对一个圆形活塞式輻射器來說,其发散角为

$$\theta = 2 \sin^{-1} 0.61 \left(\frac{\lambda}{a} \right) = 2 \sin^{-1} 0.61 \left(\frac{c}{af} \right)$$

这里, α 为换能器的半径, λ 为流体中声的波长。例如 1 厘米直径的 5 兆赫换能器, 声束的发散角约为 5° 。这已能完全令人满意了。

流体中的声衰减是与频率有关的另一个因素。在大多数流体中, 射程短时, 这种衰减现象在 5 兆赫下情况并不严重, 但在少数流体中, 则非常重要。在液浆和其他悬浮体中, 由于散射的影响, 可引起附加的声衰减。当粒子的尺寸跟所用频率的声波的波长差不多的时候, 这种影响就值得重视。因此, 通过衰减问题的考虑, 也给人以启示: 采用比较低的频率, 有时也还是必要的。

这种系统的另一个值得注意的特点是, $\Delta\phi$ 公式中有因数 $\frac{1}{c^2}$ 存在。由于 c 不恒定, 因此对 c 的起伏不定, 必需采取措施, 进行补偿。

振荡回路

图 3 说明流量计方程式中消去 c 的方法。在这种系统中, 换能器 T_1 所发出的一个脉冲, 向 T_2 推进, 并在这里为 T_2 所接收, 经过放大, 最后再用来触发 T_1 的另一个脉冲。

再触发的作用, 实际上可以说是同时发生的。因此能够在振荡回路的周围建立起一连串的脉冲。同时, 在 T_3-T_4 回路中, 也产生一个相同的振荡, 但其在流体中的传送, 则以相反的方向进行。

与前面所说的一样, 顺流方向中的过渡时间为:

$$t_1 = \frac{d}{c+v}$$

这就是接连的两个脉冲之间的时间间隔, 这些脉冲按照以下频率重复:

$$f_1 = \frac{1}{t_1} = \frac{c+v}{d}$$

逆流脉冲的重复频率为:

$$f_2 = \frac{1}{t_2} = \frac{c-v}{d}$$

因此, 拍频的求出并不复杂:

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2v}{d}$$

从上式可以看到, 拍频与声速 c 无关。

在这里, 让我们再来考虑一下一种带有对角射程的、额定流量跟以前一样的 4 吋管子。这种管子, 在无流时, 回路频率为:

$$f_1 = f_2 = \frac{c}{d} \approx 10 \text{ 千赫}$$

在流速为 50 米/秒时, 拍频为:

$$\Delta f = \frac{2v}{d} = 500 \text{ 赫}$$

在流速为 1.5 米/秒时, 则拍频减低至:

$$\Delta f = 15 \text{ 赫}$$

虽然, 在低刻度读数下, 所需的时间常数可能比较长些, 但作为满额输出来说, 这还是可以采用的一个数值。如果在各个振荡器之间存在着耦合, 则这些振荡器会产生彼此曳调现象, 这一点是一个有力的障碍。为了减轻电耦合, 可以采取各种适当的措施, 但是从本文下一段可以看到, 要防止声耦合却不是这样容易。因此, 振荡器的曳调现象确是一个问题。

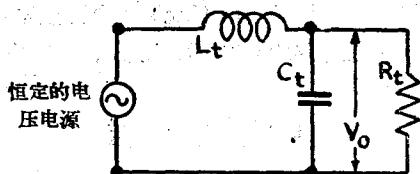


图 5 声束偏移式装置的自校正特性, 详示在这种装置的换能器等效电路中(如图): 声阻抗与流体的密度成比例

C 的局部变化

到这里为止, 我们一直假定每对换能器之间的传播条件是相同的。现在让我们假定情况不是这样, 而是在一个射程中的声速为 c , 在另一个射程中的声速为 $c + \Delta c$ 。这样, 过渡时间就变成:

$$t_1 = \frac{d}{c + \Delta c + v} \text{ 和 } t_2 = \frac{d}{c - v}$$

根据上式, 则相位差为:

$$\Delta\phi = \frac{2\omega d}{c} \left(\frac{v}{c} + \frac{1}{2} \frac{\Delta c}{c} \right)$$

在 1.5 米/秒的更低的流速下, $\frac{v}{c}$ 为 10^{-3} , 而在误差为 0.5% 时, $\frac{\Delta c}{c}$ 必须不超过 10^{-5} 。经验表明, 在管子间隙相当紧密的各个区域里, 都有可能存在比以上数值大得多的分歧。

因此可以断言, 根据两个独立的射程设计的流量计天生地易于引起误差。如果把这两个射程安排得近一些, 就可以使 c 值的分歧程度减低, 但另一方面又会增大在逆流和顺流的两个讯号之间发生交叉耦合的危险。因此, 对这两个讯号, 采用单射程方式, 才是真正的解决方法。

目前已经设计了应用这种原理的各种流量计。但其讯号是首先按一个方向传送, 然后再按另一个方向传送的。这样的解决还不能完全使人满意。除

非换向的动作能用很高的速度进行,否则,在随后的复杂情况下,流体将会在接連的傳送之間,向前移动,这样也就不能在这两种情况中的换能器之間找到相同的流体試样。

基本上,在这里有必要同时按逆流和順流的方向,在单独的一对换能器之間傳送訊号。

只要在逆流和順流射程上采用不同的頻率,就可以实现以上要求。要在不同頻率的訊号之間进行相位的直接比較,当然不能办到,但要消除这种困难,也还可以找到一些其他的方法,图4所示的就是按照这种原理設計的一种比相流量計。

这种流量計,不同于低流速用的双射程式流量計,它不受漂移的影响,达到能令人滿意的程度。

声速的补偿

在上述两种流量計里,声速 c 都出现在最后的表达式中,因此还需設法把这变数消去。这有两种可能的做法。第一,先測量 c 值,再計算改正值。第二,即設計一些自动补偿的方法。

只要測量单过渡的时间或相位迟延,就可以在低流速下导出声速 c 的近似值:

$$t_1 = \frac{d}{c+v} \simeq \frac{d}{c} \quad \text{或} \quad \phi_1 = \frac{d}{c}$$

同时,要获得更高的精确度,只要測量

$$t_1 + t_2 = \frac{d}{c^2 + v^2}$$

根据这一表达式,就可自动算出改正值。

声束偏移式流量計,应用一种简单的改正原理。这种原理的根据是换能器晶面上的声阻抗是与液体的声阻抗 ρC 值 (ρ 为液体的密度) 成比例这样一个事实,从图5可以看到,声阻抗看起来就是晶体电阻抗的一个組成部分。图中,声阻抗用 R_t 表示,而 C_t 为晶体电容。如图中所示,只要通过一个从恒定电压电源接来的調諧綫圈 L_t ,使晶体激发,則跨接晶体的电压 V_o 与 R_t 成比例,因此也与 ρC 成比例。于是,檢波器的輸出为:

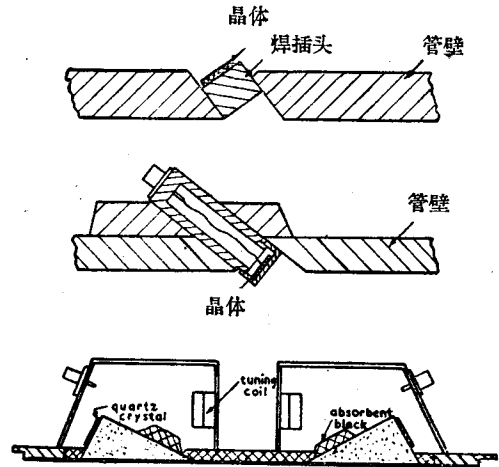
$$X \propto \frac{Dv}{c} \times \rho C \propto \rho dV^*$$

这样,变数 c 就被消掉,而流量計也就变成一只质量流量計。

在相差式流量計里,我們可以这样安排,使在一定范围里, d 可以随 c^2 而改变,因而也可以从实质

上使 $\frac{d}{c^2}$ 恒定。于是

$$\Delta\Phi = 2\omega kv$$



quartz crystal = 石英晶体
tuning coil = 調諧綫圈
absorbent black = 吸收剂黑体

图6 换能器装管的一些安装方法:由于声束的过份折射,因此外装法不合实用。

换能器

在一般情况下,要直接把换能器装在管子的外壁上是不行的,因为折射会使声束横过管子的傳播角度受到限制。在装水的鋼管里,这个角度,从管壁法綫算起,可能比 10° 略微大些。由于这原因,有必要在管壁中留下一个空腔,或嵌入一块适当的材料,如图6所示。只要細心选择材料,并采用切变波式的晶体,就可以在設計换能器时,不必变更管内部的輪廓。流体的性质,以及系統所賴以进行工作的温度和压力,都会影响换能器的設計,不过如充份注意材料和技术的选择,要应付范围很广的种种要求,还是可以做到的。

液流条件的影响

大多数流量計在一定程度上都受液流条件的影响。横过管子的速度分布,亦即流速的剖面,是与管的构形和雷諾数有关。在长的直管子里,流速的剖面在临界雷諾数以内近似于抛物綫。在湍流区里,剖面則比較近于平頂形状。经过許多弯头之后,流

* $\Delta U \approx D \cdot \frac{v}{c}$, 应为 $D \cdot \frac{v}{c} \times \rho C \approx \rho Dv = Q$ 。——审校者注