关于超声测时稳定性和可靠性的若干问题

曹 锡 安

（上海工业自动化仪表研究所）

随着电子技术的飞跃发展，超声波应用于工业过程检测越来越广泛，如超声波流量计、超声波料位计、超声波浓度计……。由于这些仪表都属非接触式测量，适合工业现场应用，在三废处理、节能及自动控制等各个方面都具有一定的经济意义。

无论哪一种超声检测仪表，都要求能稳定可靠地接收信号，然后才谈得上测定精度、分辨率等。然而在错综复杂的工业现场，要满足这个先决条件也并非轻而易举。往往在接收到的信号中伴随着各种的外来干扰，甚至有时会发生信号被阻断的现象，给仪表的正常测量带来困难。

在超声检测仪表中，有许多是测量传播时间来反映介质的物理量变化或化学成份变化的。本文就超声测时中遇到的一些问题进行讨论。例如测量流速，认为水中声速为1500m/s左右，在φ300mm的充水管道中，超声波穿过管径的传播时间约220μs。当管内的流速为1m/s时，顺逆两路传播时间之差仅为120ns。要满足1%的测量精度，就要求有1ns的分辨率（即10^{-9}秒），也就是说要求达到10^{-5}的测时稳定度。若换能器工作频率选为1MHz左右，脉冲周期即为1μs。在接收波形触发整形时，如果发生误触发（即所谓"跳波"），仪表读数就会大幅度地变动，以至超过最大量程范围，根本不能测量了。其他如测位，成份分析等场合，虽然没有象上述测流时要求那么高，但由误触发带来的测量误差也是不可低估的。

其次，被测介质一般都不是非常"纯净"的，或多或少地含有气泡或少量悬浮颗粒物质等杂质。当超声波穿透介质时，可能被散射而使接收波幅度衰减，也有可能声束被瞬时阻断而接收不到信号，致使仪表读数混乱。

再者，一般测量传播时间，都是以收到的第一个接收波作为计时开关信号的。从发射至将要接收到信号为止的时间间隔内，如果通过电源网络等引入外来干扰，也会使整个测量系统工作失常。

为了确保超声测时的可靠性，可以考虑在测量回路上适当采取一些措施。

一、采用PLL（锁相）技术

在测流及成份分析等场合，传播时间只有几百μs，用一般计时脉冲（如1MHz）来计时是不能满足要求的。为了达到1ns的分辨率，往往需要用1000MHz计时脉冲，并且相应要提高各种门电路开关速度，这是不现实的。解决这个问题的办法，一种是进行时间放大，但回路较复杂。另一种是取时间的倒数，也就是发射超声波脉冲后经过介质中传播，接收到的信号即刻回馈作发射，这样往复循环下去，即所谓："回鸣法"（Sing—around）。在声程较短，介质中声衰减不大的情况

下，由于多次反射严重，这种方法实现起来较困难。另外，这种方法在回馈过程中易受各种干扰，故稳定性较差。目前盛行采用锁相技术来解决这些矛盾[1]。

PLL的基本原理如图1所示，设置一个电压控制振荡器VCO。同步信号发生器使发射器激励换能器，发射超声波脉冲，同时使计数器开始计数VCO的频率。在时间差检测回路，计数终了信号N/f与超声波在介质中传播时间进行比较，时间差信号被变换成电压后去调节VCO。在闭合环路达到稳定状态时，时间差信号为零，$t=N/f$。这样的调节每秒约可进行数百次，故响应较快，即使有若干次接收不正常，可以将其抛掉，采用下面要讲的脱落保持电路，以保证仪表工作正常，输出稳定。

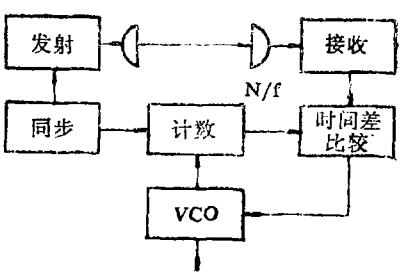

图 1 PLL方式工作原理图

二、接收波脱落保持电路

在测流和成份分析场合，介质中如果混有气泡及悬浮物质，有时会遮断声束，使声波不能传播。在测位时，由于反射面的不规则，常常会接收不到反射波，或者虽然收到反射波，更确切地说是散射波，但反射波幅度较小，在一定电平以下。

接收波脱落检测回路由比较器，R—S触发器及与门组成。在遇到上述这些情况时，该回路就动作，中止取样，使仪表输出保持前一时刻的数值。如果接收波长时间地脱落，则可以通过定时回路发出警报。

三、设置接收窗口

从发射超声波脉冲起至接收到第一个波为止的时间间隔内，由于接收门一直敞开着，外界各种干扰信号都很容易侵入，从而影响测量的稳定性。克服此弊病的最有效的方法是设置一个能跟踪目标的窗口，在此窗口内接收门是打开的，除此之外，门一直关闭着，可以有效地防止干扰信号的侵入。实现此功能的线路并不复杂。在测流和成份分析场合，声程基本固定，传播时间的变化不大。为此，设置一个延迟回路，其脉冲宽度取为t_1（略小于传播时间t），它的脉冲前沿与时钟周期同步，去控制接收门。测位时，声程是可变的，由接收信号去触发一个延迟回路，延迟脉冲宽度取为t_2（略小于时钟周期t_0）。由于声程变化不会太快，接收窗口还是可以跟踪目标的。在设计此窗口宽度时，必须考虑介质温度变化所引起的声速变化，以及环境温度对电子元件参数的影响等因素。

四、接收波自动增益回路

众所周知，超声测时的关键是接收波到达时刻的取出。一般的超声波接收波形如图2所示，如果简单地设置一个触发电平E_1，将接收波首先超过这一电平的时刻t′作为接收波到达时刻，测量是不稳定可靠的。因为接收波幅度的大小取决于许多因素，如介质中常会含有杂质，声波受到散射，声能量被衰减了；随着温度的变化，介质本身对声的吸收系数改变了；

超声波换能器经过长期使用，其机电转换效率变了；声耦合部份的耦合程度变了等诸如此类的问题。虽然超声波传播时间实际上未变，由于接收波幅度变化，结果造成△t的测量误差。换能器工作频率取1MHz时，由于接收波幅度变动，致使触发点在1/4波长（即250ns）范围内滑动。如果发生误触发，△t就为1μs，这对于精密测时来说是无法忍受的。为此，在选取接收波到达时刻前，要求调节放大器的增益，使接收波被放大后，幅度能保持一定。

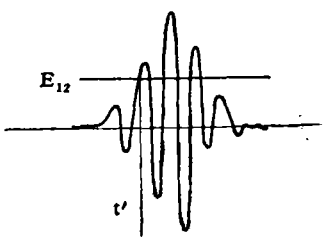

图 2 接收波形图

实现这种功能的方法有多种。最常见的是类似于收音机中频放大部份，用输出波的平均电平来调节放大管的基极电流，通过改变放大管的基极电流达到控制增益的目的。但这种方法动态范围较小，信号较大时会失真。另一种方法是在受控放大器的输入端接有分压电路，由放大器的输出直流电平控制分压电路的某个元件（如场效应管或压敏电阻），改变输入信号分压比来调节输入量，以使放大器的输出量保持不变。还有一种方法是使放大器输出脉冲的峰值电压或包络线被控制在某一固定电平。上述这些控制方法，都依赖于回馈，有一定延迟时间，故只适用于慢变化信号的增益控制。

在测位场合，除了上述AGC自动增益外，还常用一种灵敏度时间控制STC回路。超声波在介质中传播，声能被衰减，它的反射波幅度与测定距离成反比地减少。STC回路就是随着从发射到接收的时间间隔大小来控制放大器的放大量，以补偿声波在传播过程中的衰减。具体回路如图3那样，由电阻、二极管D以及电容C、开关管等构成分压回路。发射脉冲使开关管导通，将电容C上电荷放掉，B点电位为零。这时二极管D中电流较大，（由电源 E_{cc} 和电阻决定）阻抗较小，发射脉冲一结束，开关管由导通变成截止，电源 E_{cc} 通过电阻和二极管D对电容C充电，其光电曲线随着C上电荷增加，B点电位上升，通过二极管的电流越来越小。由二极管的电流——阻抗特性可知，此时二极管阻抗越来越大，A点分压也越来越大。整个放大器的放大量随着时间而改变，适当调节电容C的容量，改变充电曲线形状，达到自动补偿声衰减的目的。

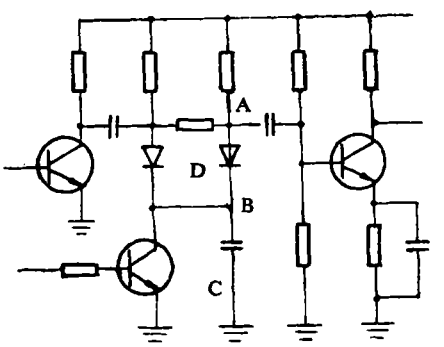

图 3 STC回路

五、双触发回路〔2〕

所谓双触发回路，是预先设置二种不同的触发电平，当接收波形变化时，改变触发电平，自动地选择最佳触发电平来检测时间。如图4所示，通常以L电平来检

测时间（见实线部份），在稍许高的电平上预设H电平。当波形变化时（见虚线部份），若继续在L电平上触发，就会引起误触发，产生时间检测误差。此时可改用H电平触发，即由第二个波触发变到用第三个波触发。如果能引入第二个波与第三个波元时间差的时间补偿，测得传播时间t的绝对值也就不变。待接收波恢复，并且第二个波的幅度超过H电平时，再返回到用L电平触发。

为了自动地进行上述的动作，双触发

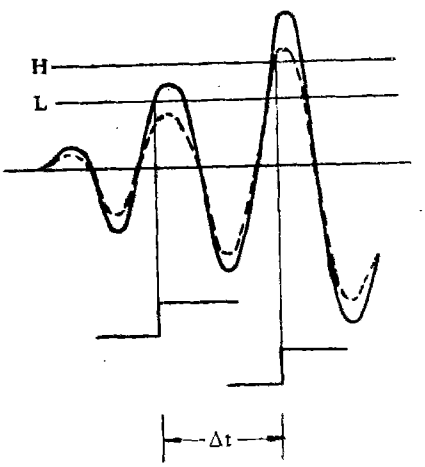

图 4　由声衰减变化引起的接收波形变化

回路可由以下几个部份构成：

1. 误触发检测回路

该电路判别是否产生了误触发，而且还要能判别误触发的方向（延迟一个波还是提前一个波触发）。譬如在测流场合，温度等因素引起超声波传播时间的变化是很缓慢的，这在PLL系统中根本不成问题。由流速变化引起的超声波传播时间变化虽然快，但变化量却十分微小（ns数量级）而由误触发所引起的变动却是大幅度的(μs数量级)，故两者较容易加以区别。

在PLL系统中，时间差检测回路将

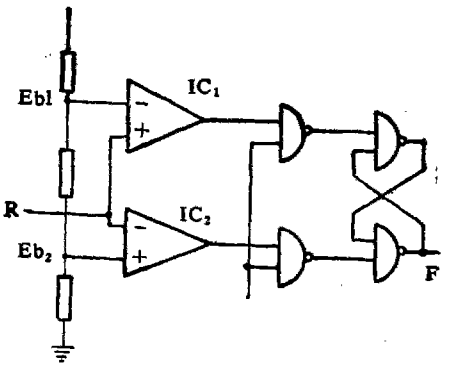

图 5　误触发判别回路

声波传播时间t及计数VCO频率终了信号的时间差信号变换成斜坡电压R，作为如图5所示的误触发判别电路的输入。误触发判别电路由比较器IC_1、IC_2及与非门，R—S触发器构成，从电阻分压器取得设定电压Eb_1和Eb_2。正常情况下，斜坡电压R处于Eb_1和Eb_2之间。若开始时接收波以第二个波触发，触发电平为L，输出端下为“1”。以后波形幅度衰减，仍用L电平触发会发生误触发。此时斜坡电压R超过Eb_1，比较器IC_1输出为“1”。与非门的另一个输入端输入一个正逻辑脉冲信号，它比超声波到达时刻迟，而比下一个测定周期的起始时刻早。此时输出端F为“0”，触发电平就变为H。经PLL系统调整后，斜坡电压R仍回到Eb_1和Eb_2之间，比较器IC_1和IC_2输出又都为“0”，这时F端保持“0”。当接收波幅度恢复正常，并且第二个波的幅度超过H电平时，斜坡电压R小于Eb_2，比较器IC_2输出变为“1”，又致使F端变为“1”。

2. 触发选择回路

如图6所示，以误触发检测回路输出

端F来控制开关管，当F为“1”时，开关管导通，比较器“—”端的电平为L。当F为“0”时，开关管截止，分压器抽头电压上升，比较器“—”端的电平提高到H，变更了接收波时间检测比较器的基本电平。

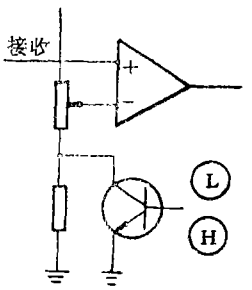

图 6 误触发检测回路

3. 延迟时间补偿回路

用L电平触发检测时没有延迟问题，当改用H电平时，触发点从第二个波跳到第三个波，需要补偿被延迟了的时间（超声波工作频率为1MHz时，应补偿1μs）。具体回路如图7所示，该电路由单稳、非门及门电路组成。当误触发检测回路的输

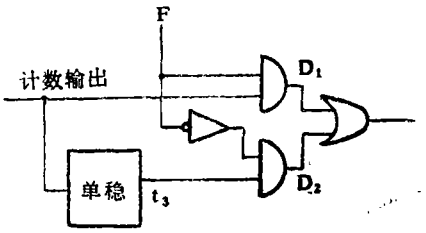

图 7 延迟时间补偿回路

出F为“1”时，从计数器来的信号通过与门D_1及或门，输往时间差检测回路。当F为“0”时，从计数器来的信号经单稳延迟后，通过与门D_2及或门，输往时间差检测回路。设单稳脉冲宽度为t_3，并使$t_3=\triangle t$，整个PLL系统达到同步后，测到的接收波到达时刻为$t=N/f+\triangle t$，这样输出信号N/f内就扣除了延迟时间。

六、过零触发〔3〕

各种因素会造成接收波的幅度瞬时波动，用固定触发电平选取接收波到达时刻，会造成测时误差。譬如换能器工作频率为1MHz，接收波幅度$3V_p$，选取触发电平$1.5V_p$，若包含$0.1V_p$的波动，会产生4ns的误差。由于超声波换能器是以一定频率工作的，即使接收波幅度变化，其脉冲周期也不变。采用过零触发措施，触发电平为零，影响触发点的仅为比较器的失调电压，若失调电压为$0.02V_p$，在有$0.1V_p$波动时仅引起0.05ns的测时误差，可以忽略不计。

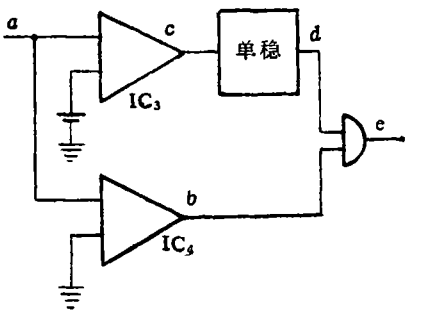

图 8 过零触发回路

具体回路如图8所示，在比较器IC_4，输入信号a与零电平E_0相交，产生输出信号b。采用最前沿的零交信号，一般是不稳定的，干扰等因素会引起测量误差，应选取幅度相当大的被检测波与零电平相交的讯号。在比较器IC_3，输入信号a与触发电平E_1相交产生的信号C，再去触发单稳，产生一个脉冲d，它的时间宽度比1/2

（下转第11页）

四、结 语

1. 利用2.7MHZ的超声技术，在R=0.981较好的相关系数下，证实了文献[11]中关于红细胞绝热压缩系数K_e与其平均血红蛋白浓度MCHC之间呈线性关系的结论。

2. 对取自健康男性青年的红细胞，在0.9%Nacl水溶液中，25℃及pH=6.7条件下，测得MCHC=(30.0±1.5)g%，$Ke=(34.83\pm0.80)\times10^{-12}\ cm^2/dyn$。

作者衷心感谢周同彬同志对本工作的支持与帮助。

参 考 文 献

〔1〕冯若："超声与超声医学"，《自然杂志》4.3(1983)187-190

〔2〕Sarvazun, A. P.: "Ultrasonics in Bio phyiscal Investigations," IEEE 1983 Ultrasoni)cs Symposium, G—SU President's Speaker。

〔3〕冯若："声谱技术在研究生物大分子中的应用"，《生物化学与生物物理进展》，2(1980)8—15。

〔4〕冯若："明胶水溶液的超声性质"《声学学报》，1(1981)44—49。

〔5〕叶式公、冯若、陈兆华、范百刚："牛血红蛋白的声学性质"，《应用声学》，3.2(1984)23—26

〔6〕龚秀芬、冯若、朱正亚："生物媒质非线性效应的超声研究，"《声学学报》，(待发表)

〔7〕冯若、龚秀芬、朱正亚、石涛；"生物媒区中非线性声学参量的B/A研究，"《物理学报》，(待发表)

〔8〕Gong Xiu—fen, Feng Ruo, Zhu Cheng—ya and Shi Tao: "Ultrasonic investigation of the nonlinearity Parameter B/A in biological media," (J.A.S.A将发表)

〔9〕冯若："哺乳动物组织的超声性质研究进展，"《应用声学》，3，1(1984)1—7。

〔10〕冯若、陈兆华、朱正亚、戴焕平；"猪的新鲜离体软组织的超声衰减与速度，"《声学学报》，(待发表)。

〔11〕Shung, K.K. and Krisko, B.A. "Acoustic measurement of erythrocyte compressibility," J.Acoust. Soc. Am. 72(5) (1982) 1364—1367。

〔12〕Urick, R. J. "A Sound Velocity Method for Determining the Compressibility Of Finely Divided Substance", J. Appl. phys. 18 (1947) 983—987。

〔13〕Weiser M.A. and Apfel, R.E. "Extension of Acoustic Levitation to Include The Study of Micron Size Particles in a More Compressible Host Liquid," J. Acoust. Soc. Am. 71(1982) 1261—1268。

〔14〕冯若、陈兆华、朱正亚、戴焕平，"用脉冲插入取代法研究物质的超声性质，"声学技术，4，(1983) 28—31。

（上接第54页）

周期大，但比一个周期小（指超声脉冲周期）。信号b和d通过与门获得脉冲信号e，该脉冲的前沿时刻就是过零触发时刻。

七、外部同步回路

在一个工业现场使用多台同种超声波检测仪表时，为了避免由于相互干扰可能产生误动作的危险，可以共同使用一个定时器来同步发射；或取其中一台为主动，而其它各台作从动，将同步端相互联结，就可以防止相互干扰。

以上介绍了在超声测时过程中，为了提高测量的可靠性和稳定性，对接收信号怎样进行处理的问题。今后借助于电子技术的进步，会产生更多更高级的处理方法。特别是随着微处理机在检测仪表中的应用，将可以出色地完成更加复杂的讯息处理。