

超声

(译文集)

检测

HAOSHENG JIANCE

# 前 言

超声技术是一门边缘应用技术学科，十余年来在国内外获得了广泛的重视和应用，它已深入到许多科学领域和生产部门，不断出现新的技术突破。

近年来，超声技术由于电子技术和现代电子计算机技术、计量技术等广泛采用而迅速发展，而相关技术、激光技术、频谱分析等新技术与超声技术互相渗透，更加扩大了它的科学领域和应用范围。

为了反映国外在超声技术上的研究、生产和应用等概况，我们选译了国外期刊中有关检测声学方面的文章二十一篇，供有关人员参考。由于我们水平有限，不当之处在所难免，望读者批评指正。

本辑由上海市工业自动化仪表研究所郑冠雄同志、上海材料研究所曾克京同志协助审稿，特此致谢。

上海市声学学会筹委会

1979年9月

# 目 录

1. 利用低强度超声进行测量、检测和过程控制.....	( 1 )
2. 超声式烧蚀退行测量系统 .....	( 32 )
3. 用第二代超声烧蚀退行计测量飞行端头气动噪声谱和声反射 .....	( 38 )
4. 测量再入端头退行的声共振技术 .....	( 43 )
5. 用超声脉冲法无损检验部件和结构的混凝土强度 .....	( 50 )
6. 通过超声频谱法用辐射场理论测定未知反射体的尺寸和形状 .....	( 53 )
7. 利用声学首波的超声检验 .....	( 66 )
8. 超声无损检测中的脉冲压缩技术 .....	( 71 )
9. 表面下平面型缺陷所产生横波回波的计算模型 .....	( 75 )
10. 测量物位与流量的超声仪器 .....	( 82 )
11. 空间超声换能器的线路 .....	( 96 )
12. 回声定位物位计 .....	(105)
13. 超声开关 .....	(107)
14. 超声开关及其应用例 .....	(109)
15. 利用折射率变化的超声波多普勒流量计 .....	(118)
16. 流量计 .....	(124)
17. 利用超声波测量气体的流量 .....	(127)
18. 超声互相关流量计 .....	(134)
19. 超声法测量物质密度 .....	(140)
20. 按核工业标准测量在运转中的密度 .....	(147)
21. 使用超声探测系统的旋涡流量计 .....	(150)

# 利用低强度超声进行测量、 检测和过程控制

Lawrence C. Lynnworth

本文对下列应用进行评述：流量、温度、密度、孔隙率、压力、粘度和其它传输特性、物位、位置、物相、厚度、成分、各向异性与结构、晶粒大小、应力与应变、弹性参数、气泡、粒子和检漏、无损探伤、声发射、超声显象与全息摄影，以及关于这些应用的组合等的超声测量方法。概述了这些应用范围的原理、技术、仪器和应用数据。大部分测量方法利用声速响应，但有些则利用了声衰减效应。大多数仪器设备需要浸入式探头，但在若干应用范围内，安装在外部的非浸入式换能器正在推广。脉冲技术与共振技术两者都得到广泛的利用。文中明确指出在某些情况下，由于无用变量的影响所造成的局限性。在文献目录与仪器制造厂名单中提供了更多的资料来源。

## 前 言

这篇评论主要目的在于明确指出小信号超声在工业上应用的广度、深度、实用性以及局限性。另外，还试图判明新出现的超声技术现状。

总的来说，本文的范围将局限于低强度超声的工业应用。在这些应用中，超声的传播或转换与介质或所研究部分的性质、状态、质量直接有关。我们把评述限定在“工业应用”的范围，因此，对科学研究方面、医学、牙科医术以及生物学方面的许多有意义而又重要的应用只好割爱。所谓“低强度”，即不包括那些宏观声学和非线性声学方面的应用，诸如超声清洗、加工、拉丝、焊接、空化、乳化、强化化学反应、冲击波测量以及治疗等。我们只限于测量超声传播或转换的自由，在于将范围局限在测量某一可变参数数值的场合，因此这里不打算讨论诸如石英钟、汽车库开门装置、电视机频道选择器、延迟线、滤波器以及信号处理器等器件装置，尽管它

们在工业中有着明显的重要性。

表1所列的几乎每一项应用(甚至特殊的应用)，都有标准的仪器装置以商品的形式出售。另外，因为任何超声测量，实际上都可以根据对传播时间或波幅的观察分析来进行。因此，通用电子仪器诸如数字处理示波器、计数器、时间间隔测量仪、峰值检测器等，也可以用来完成下面讨论的工业测量或检验。

在下述章节中，本文着手阐明所列举的各种应用。首先介绍一下有关的参数与典型测量方法或试验情况，其次依据这些参数在声波传播或转换时的影响，提出一些关于测量或试验方面的简短说明。

## 一、流量测量法

超声流量计的工业应用包括气体、液体以及固体物质的流量测量；其测量范围对大多数液相介质而言，可达每秒几米的数量级；测量风洞中气体的流量时，还可超出1马赫范围；管道直径范围从小于1厘米到大于1米；还可用于测量江河、水坝或明渠的流量；

表 工业测量、检验以及过程控制  
应用的部分清单

项目编号	参 数
1	流量测量法
2	温度测量法
3	密度、孔隙率
4	压力
5	动态力、振动、加速度
6	流体粘度
7	其它传输特性
8	物位
9	低反射系数分界面的定位
10	物相特性、显微结构、结节结构
11	厚度
12	定位
13	成分
14	各向异性、结构
15	无损探伤
16	金属晶粒大小
17	应力与应变
18	声发射
19	显像与全息摄影
20	弹性参数
21	气泡与粒子
22	漏气
23	中断声束
24	防盗报警
25	其它应用

工作温度范围从低温(如液态氧、液化天然气)到至少 1500°C 的高温(钢水); 允许工作的压力范围从接近真空(如吸抽减压的聚合物)到好几百大气压(如用泵加压的油、深海水); 响应时间范围从几个毫秒(引擎控制)到 24 小时(监控烟道排放); 单相介质和双相介质等。

目前(在美国)大约有 1000 台超声流量计正在使用, 大部分仪器用于直径 0.3 米以上的大管道水流量测量。几乎所有这些应用都是最近 10 年来发展起来的。

在 1957 年以前 Grosso 作了关于超声流量计发展的有意义的述评。在 1931 年发表的 Rutten 的德国专利中, 他发现了关于利用声波测量管道中流体流量的最早参考文献。在五十年代, 曾为超声流量计的商品化做过

努力, 但没有获得成功的产品。而过了 20 年左右, 占主导地位的是较为乐观的形势。目前在美国销售已经超出 100 万美元, 预计在七十年代结束以前将超过 1000 万美元。预计在能量传输、物质传输转换、过程控制以及污染问题研究等方面, 将会有更多的应用。

### 1. 物理原理

用代数方法可以很容易地概括超声与流量之间的相互关系。简言之, 假定声波沿管道轴向逆流和顺流传播一段距离  $L$ , 这两个相反方向所产生的时间差是:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 2Lv/c^2 \quad (1-1)$$

式中,  $v$ ——流速;  $c$ ——声速。

在许多(注意: 并非所有)情况下, 流体温度变化如此之大, 以致不能用式(1-1)计算  $v$ , 而得到 1% 的精度, 除非对一种明确规定的流体, 准确地测量其  $T$  值, 或者最好能直接测定  $c$  值, 以避免由于  $T$  或成分不确定而造成的误差。

另一方面, 如果能测量或产生一个与  $t_1$  和  $t_2$  的倒数成比例的量:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = (1/t_2 - 1/t_1) = 2v/L \quad (1-2)$$

那么,  $\Delta t$  与  $c$  之间的依赖关系就得以回避了, 大多数超声流量计采取了后一方程的优点, 即以声环法或伺服频率法测量  $f_1$  和  $f_2$  或  $\Delta f$ 。

还有一种重要方法就是测量马赫数  $v/c$ 。若把该比值乘以流体的特性阻抗  $\rho c$ , 则得到与  $\rho c$  成比例的项  $\rho v$ , 亦即流体的质量流量。关于测定液体  $\rho c$  的方法有晶体阻抗测量法和新近发展起来的测量一端浸入被测液体的衰减棒的反射系数的方法。值得注意的是  $v/c$  还可用几种方法来取得: 按照  $(t_2 - t_1)/(t_2 + t_1)^2$  比率; 按照  $c\Delta t$  乘积; 根据声束偏差角以及多普勒效应等测量法。

应用超声测量流量的其它物理原理有噪声检测(将有流动对无流动作鉴别)、相关性(测量固有的或导入标记的传播时间或图形)

以及超声脉冲回波式液位检测(用来校正未充满管道中的读数,或用液位与流速的关系曲线测量水槽或水堰的流量)。还有一种已成为商品的流量计,通过检测迭加在沿径向穿过流体的超声束上的漩涡调制,实现用超声检测流体撞击矗立在流体中的构件时所产生的漩涡频率。有时,还可能用另一种超声方法,即应用声发射方法来检测构件本身所产生的撞击漩涡频率。

前面所述的各种方程通常需要进行修正;用超声程与流量轴线之间的夹角,来略为修正弯曲导管的曲率;通常显得更重要的是,将单声程上测到的平均流速  $v_a$  转换成为所要求面积上的平均流速  $v_a(v_a = K v_d)$ 。前式中最后一项转换系数,对于液体  $K = 0.75$ (层流);  $K = 0.90 \sim 0.96$ (稳定湍流);  $K = 0.995$ (动态湍流)。

## 2. 流量计的测量单元与换能器结构

图 1a~n 说明目前正在使用的流量计的测量单元与探头设计。图 1a 表示典型的  $45^\circ$  凹进安装的换能器孔,单声道;图 1b 为减小涡流和改进线性而设计的  $45^\circ$  遮蔽式换能器孔,以及一套与断面形状无关的线性响应(按面积平均)的直线型流量管道和安装换能器的侧架;图 1c 说明适用于求平均面积的 4 弦高斯求面积法,目前通过该方法在大到足以容纳 4 声道的管道中进行测量,其最高精度  $\sim 0.1\%$ ;图 1d 是一种利用外部耦合的声楔使纵波或切变波作斜入射而产生折射的方法;图 1e 采用与管道相同的材料制成的声楔,使用效果不错;图 1f 适用于水堰和文丘里渠的流量测量;图 1g 为测量液态金属流量的多普勒装置;图 1h 表示一种撞击漩涡发生器。此外尚有控制折射、多次传播、围绕管道“声短路”或控制其它问题的设计。

适用于小管道(直径  $\geq 2.5$  厘米)和大管道(直径  $\geq 30$  厘米)标准夹装式流量计都有商品供应。用一般的固紧软管夹或花篮螺栓夹紧。为了使耦合块或声楔位置与方向不变,

作者曾利用几组顶部为特殊形状的螺栓,然后用夹具控制坐标,将这些螺栓焊在直径为 7.5 厘米的管子上。这样,螺栓起着类似于定位销的作用,并且还可以使声楔固定在该管子上,扭矩可调。在 1i、1j、1k 各图中,示出了这类夹装式流量计。

作者曾于 1974 年建议,利用延伸导向波的磁致伸缩转换特性测量金属丝的拉速。在芬兰赫尔辛基大学 Lunkala 的指导下研究的另一种不接触测量方案,是利用空气与移动着的纸或金属板相耦合的静电传感器,作为建立在以平面波作导向波测量的流量计量系统的一个组成部分。

与这些非侵入式、甚至不接触式换能器的安装相反,值得注意的是久已抛弃的浸入式换能器的概念,可能重新在特殊场合应用。其动机在于放弃非侵入性来换取轴向传播。Frankenberger 等曾于 1974 年在一个流量计的测量管中,将两个频率约为 1 兆赫的 PZT 环形换能器同轴安装,以便测量层状空气流量(图 1e)。Lynnworth 为了校验或测量在一段固定的径向距离上的流量,曾于 1972 年和 1975 年建议使用一种比较小的、作为一个探头而插入的流量测量室。对于这样一类的浸入式探头来说,其安装位置最好选择在局部流速与平均面积流速相等的地方。对于流速分布为抛物线的层流来说,这一点发生在半径  $r = 0.707a$  处(管道直径为  $2a$ )。对于产生漩涡放射的圆环或构件,位置最好选择在平均面积的径向距离。再者,如果为了进行电声转换,这些漩涡放射体至少有一部分用压电或磁致伸缩材料制成。在某些情况下,检测放射频率的振动可以直接在放射体上进行。

还要提到的是两种浸入式流量计探头。前一种探头型式(图 1m)在大多数情况下,本质上是一种一端为斜面的长缓冲棒,这样设计是为了使探头浸入流体中,也能适应对一般探头来说是难以容忍的温度、腐蚀或其它



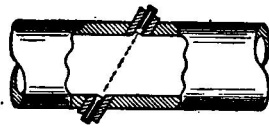


图 1a 一对在管道对角线上安装的换能器之间交替地沿相反方向传播声脉冲。由于流体的流动，逆流的信号被延迟，而顺流的信号被加速

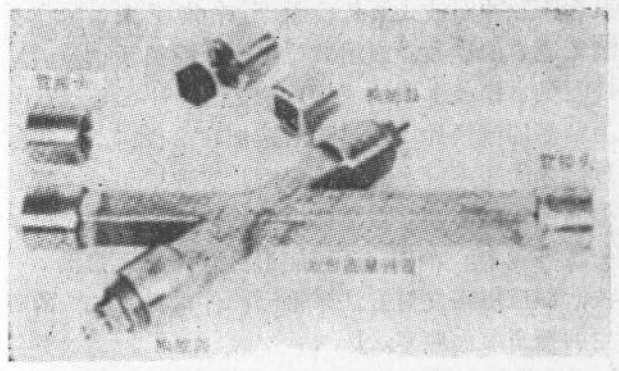


图 1b 平均面积型流量计单元由以下部分组成：流量直管、为降低涡流在换能器孔道上设置筛以及逐步过渡的入口接头。换能器发出的超声穿过流量管道截面的 100%。此测量方法对于层流、混合流以及湍流等流动方式响应都是线性的

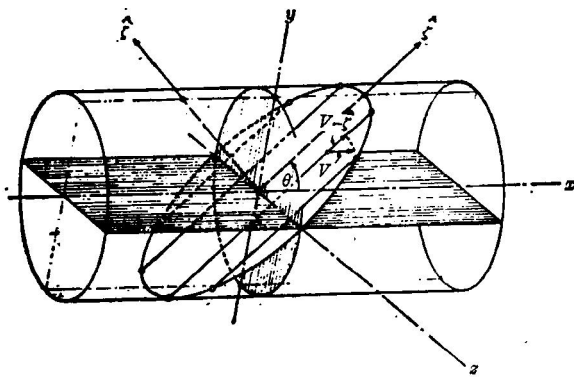


图 1c 说明高斯面积流速测量法。用测量平面与管壁的交线确定一个椭圆；将流速矢量  $V(x, \xi)$  的垂直分量在椭圆面积上积分，求得容积流量 (Fisher & Spink, 1972)

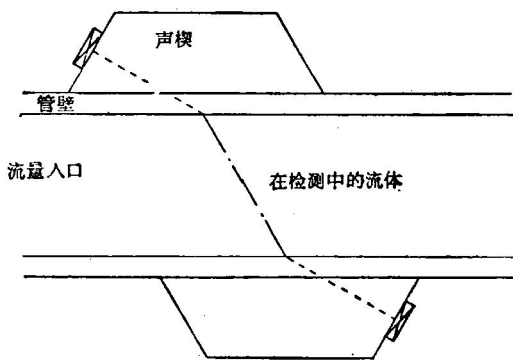


图 1d 采用外部耦合的声楔，得到倾斜入射的纵波或切变波



图 1e 左边是装在管壁内折射声楔，右面是由外空腔  $C_1$  加内腔  $C_2$  或具有平行面的声楔  $W_2$  在管壁内构成不折射窗孔

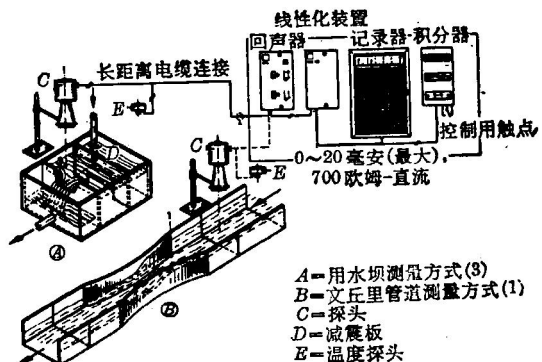


图 1f 正确使用堰、斜槽或文丘里管进行明渠流量测量，流量与液位之间的关系重复性很好。水位的不接触声学检测如图所示，图中换能器  $C$  在表面上发射一个脉冲，其往返时间必须进行温度补偿



图 1g 测量流量或马赫数  $v/c$  用的多普勒流量计, 用于测量丙烯酸管道内流动的液态金属 Hg 和 NaK; 其内径为 0.476 厘米; 发射频率约 10 兆赫; 平均流速约为 1~5 厘米/秒 (Fewlis, 1973)

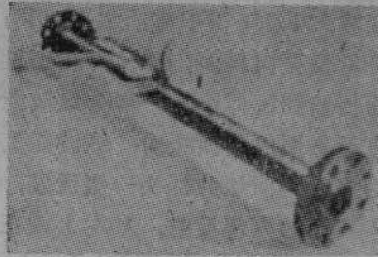


图 1h 漩涡流量计, 该流量计有两种不同的结构: 一种是长度为直径 20 倍的流量测量段, 如图所示; 另一种是装在两个法兰中间的扁平型, 其管道直径 1 英寸以上

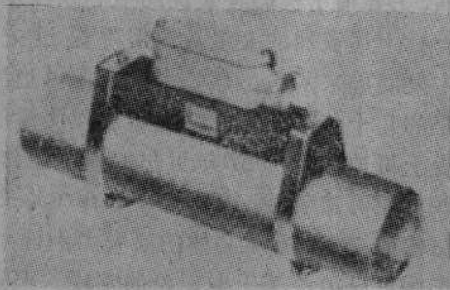


图 1i 夹装式流量计, 适用于直径为 2.5 厘米以上的管道

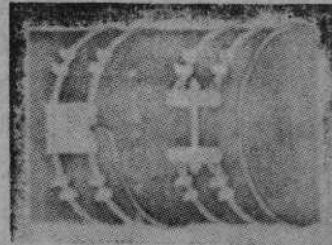


图 1j 用于管道直径大于 80 厘米的夹装式流量计

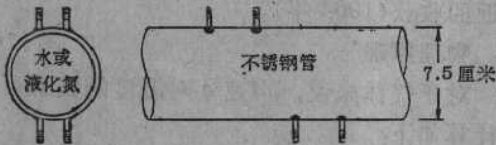


图 1k 将螺栓焊在管道上, 便于对夹装式换能器声楔定位、调整和固定 (作者, 1974)

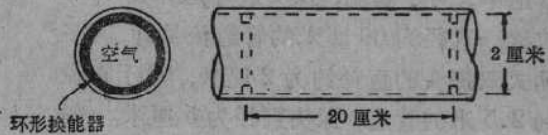


图 1l 应用沿管道轴向传播的浸入式换能器 (Frankenberger, 1974)

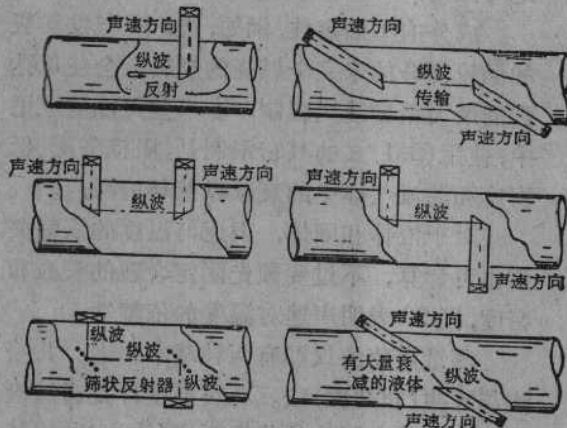


图 1m 外部安装换能器的浸入式流量计 (Lynnworth, 1967, 1969, 1974)

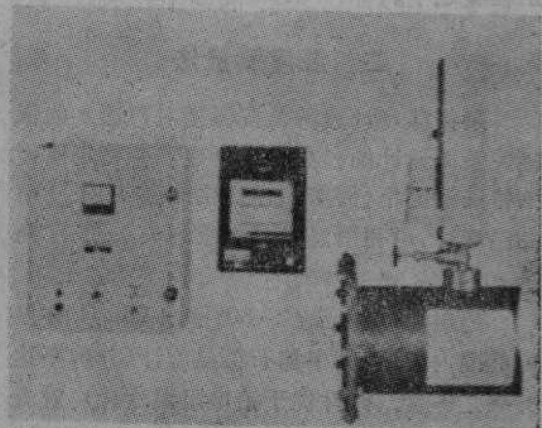


图 1n 多普勒流量计装有两个固定在靠近管道轴线上的换能器



不利因素的环境。这使装在外面的探头所产生的切变波,以及平行于流动方向( $SV$ )的质点位移分量偏振向斜面传播,并在那里转换为纵波而传输到流体中。一部分纵波能量沿近似垂直于斜面的斜面折射;纵波能量的其余部分沿靠近斜面端的探头一侧反射,它是一种背离斜面的内部反射,基本上或在最佳选择情况下,精确地垂直于缓冲棒主轴。依据传输或反射(多普勒)的各种原理,所产生的两种波都可以用来测量流量(Lynnworth, 1967, 1969)。

图 1n 所提到的是 1974 年由 EDO 公司推出的浸入式探头。看来这是当时市场上唯一可以买到的适用于工业应用的多普勒式流量计。其典型发射频率约为 3 兆赫,使用了两个在上流 30 厘米处对准的探头,根据需要可挑选在有代表性的流动区域上。这就是说,探头的穿透深度是可调的。这样,利用它,可以测定流速的分布,从而能使探头取得最佳位置。例如,在某些情况下,在一个半径为  $a$  的管道中,对于湍流,探头最好选择在  $0.2a$  的位置。直径为 60 厘米的管道流量计,其多普勒式双探头的直径约为 2 厘米,对于直径大到 2.5 米的管道,探头直径为 5 厘米。探头可用自动定时操作的刷洗装置清洗。目前,这种超声流量计在污水处理应用的有效特性正在鉴定中。

## 二、温度测量法

超声温度计通常是按温度对声速  $c$  的依赖关系而设计的。在只要测定一个特定温度的特殊情况下(例如物相变化的温度或再结晶温度),可利用温度对衰减的关系进行测量。

超声温度计已在  $-80^{\circ}$  到  $+250^{\circ}\text{C}$  的温度范围内应用,其中如石英温度计(分辨率达万分之一度,线性优于铂电阻温度计)、射流温度计(通常以低于 10 千赫振动)。在飞机、空间技术和其它发动机等方面的应用已超过

了 1000 台。能耐  $1200^{\circ}\text{C}$  高温的射流敏感元件是相当普通的;由于材料的限制,它在高达  $2200^{\circ}\text{C}$  的应用仍处于短期试验阶段。在接近  $3000^{\circ}\text{C}$  或更高的温度下,细金属丝探头型敏感元件所能提供的精度和寿命超过热电偶。在研究气体的传输特性中,利用气体本身作为敏感元件,超声脉冲技术已能在  $10,000\sim 20,000^{\circ}\text{C}$  范围内测温。

到目前为止已出售的石英温度计约有 1600 台。迄今已销售的细金属丝型温度探头约有 30 余件,与其联用的仪器有 12 台左右,主要用于核燃料装置的中心线温度测量。

上述仪器的大多数应用都是过去 10 年中发展起来的,虽然技术的起源可追溯到更早的几十年间。例如,细金属丝测量法在历史上可追溯到 1957 年贝尔的先驱工作,在有些方面可追溯到 1947 年 Frederick 关于切口棒的论文。石英晶体的研究可溯源于 1880 年居里兄弟关于压电现象的发现。但是构成石英温度计基础的线性系数( $LC$ )切割,则是较近的收获(1964 年)。

### 物理原理

对于气体来说,声速  $c$  对温度的关系可以计算如下:

$$c = (rRT/M)^{1/2} \quad (2-1)$$

其中  $r = c_p/c_v$ (热容比);  $R$  = 气体常数;  $T$  = 绝对温度;  $M$  = 平均分子量。

成分的不确定性,例如,进入喷气发动机的涡轮部分的未完全燃烧的燃料,会使可达到的最大精度受到限制。在一些可能的应用中,使用(2-1)式的其它限制是:阻抗失配、低密度和湍流气体中的衰减以及环境噪声。

对于液体和固体,声速与温度的依赖关系也可计算,不过要预先测定合理的模数和密度,图 22 表明声速对温度的依赖性。

测量声速的仪器有两种基本原理:共振法与脉冲(非共振)法。石英温度计是通过检测一块石英小圆片的共振频率(约为 28 兆赫  $\pm 1000$  赫/ $^{\circ}\text{C}$ )的变化而读出绝对温度  $T$  的。

射流温度计的振动频率决定于敏感元件的几何形状和流经该元件的气体的声速。贝尔共振型温度敏感探头可以看作其频率随弹性与密度变化而变化的小音叉。贝尔先前介绍过非共振细金属丝型绝对温度  $T$  敏感探头，接着由他的同事特别是 Thorne，再过后由作者与其同事以及其他的研究者继续加以研究。Fowler 曾经研制过一种混合型测温技术，通过宽频带脉冲的激励，使一种短探头共振。同一作者利用脉冲技术，论证了具有双区和多区剖面的细金属丝温度探头，而 Fam 论证了直角金属丝探头。

### 温度计装置

在新近的 IEEE 和 ISA 论文集中评论了超声测温技术的应用，其内容我们不再赘述。图 2b 为由 Hewlett-Packard 公司生产

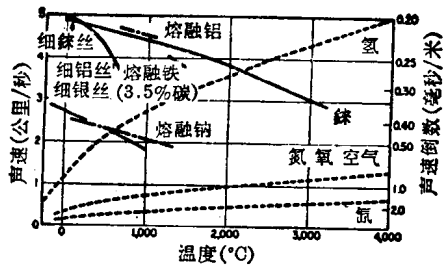


图 2a 若干材料中的超声速度对温度的关系

的石英温度计；图 2c 是一种射流式温度计；图 2d 是共振式温度敏感探头；图 2e 为非共振式单区金属丝式温度敏感探头；图 2f 为非共振多区金属丝式温度敏感探头；图 2g 说明固体如钢坯内部的温度分布的超声测量的概念；图 2h 说明对导管中的液体（如不锈钢管中的液态钠）的非浸入式测量。

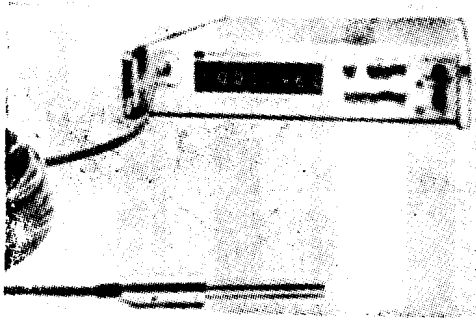


图 2b HP2801A 型石英温度计和 2833B 型海洋学温度探测装置尺寸(单位为英寸和毫米)。这种探头的工作范围从  $-40^{\circ}\text{C}$  到  $+120^{\circ}\text{C}$ ，允许最大承受压力为 10,000 磅/平方英寸(相当于 4 英里或 7 公里左右的海洋深度)，工作频率为 28 兆赫；对温度变化的灵敏度约为 1000 赫/ $^{\circ}\text{C}$

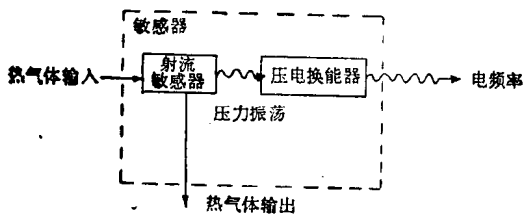
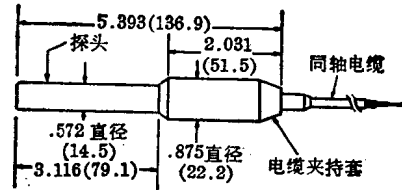


图 2c 射流温度计元件和换能器的工作简图 (McMillan & Pamperin, 1972)

序号	谐振器	Q	对于 Q=50 的直径比	特性
1	$\lambda/2$	$\pi/2r$	0.125	可以支持在中心的节点上，要求高温接头
2	$\lambda/4$	$\pi/4r$	0.087	用化学机械加工可以把测量线做成整体
3	$\lambda/4, \lambda/2$	$\pi/2r^2$	0.421	对给定 Q 值要求最小机械加工，与测量线成为整体
4	$\lambda/4, \lambda/4$	$\pi/4r^2$	0.353	可以支撑在大直径部分上
5		不易分析		弯曲“音叉型”，形状不方便

图 2d 谐振温度探测器的形状和特性(贝尔, 1972)

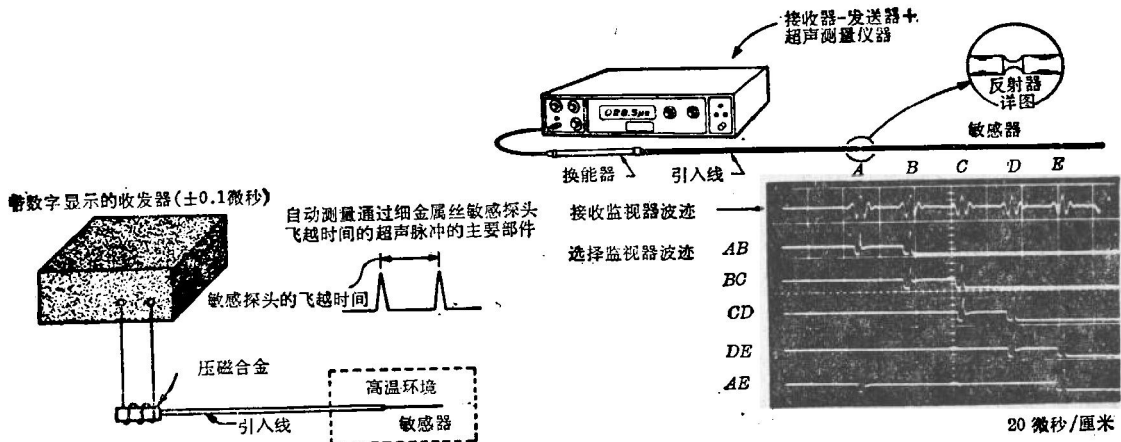
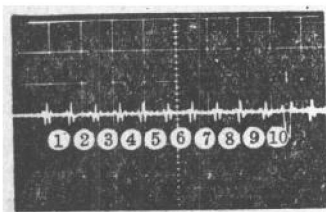


图 2e 带非共振单区敏感元件的温度探头

简图和波形图说明超声温度分布图,包括多个串联敏感元件的单测量线,按沿测量线敏感元件的位置所选择的回波扫描。所选择各对回波之间的传播时间(微秒)对应于反射各点间的温度。各回波对 AB、BC、CD、DE 给出温度分布图;AE 回波对给出平均温度



波形图表示从 10 个在单测量线上串联的温度敏感元件的终端所反射的回波  
图 2f 多区温度测量头

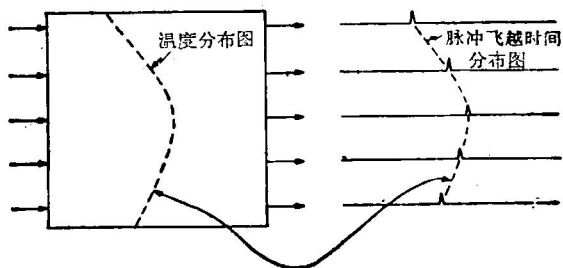


图 2g 超声测定大钢坯内的温度分布

能量对物质的相互作用与  $\gamma$  射线能量有很大不同。其区别可参考下述测量气体和液体的密度以及测量固体的密度和孔隙率的应用予以说明。

我们考虑若干种共振和非共振探头型密度计,它们一般局部地或整个地浸入被测流体中。还有不穿透的传输型器件或测量方法,其中  $c$  或  $a$  为  $\rho$  或  $q$  的函数。前者可通过分析探头中的声传播来测定流体对探头“加载”,后者则通过分析流体或固体介质本身中的声传播进行测量。

### 共振探头原理

图 3a 中所示的 IIT Barton 型密度计探头,由一个横过支承圆筒且被对称固定的敏感振动片所组成。在工作时,振动片作简

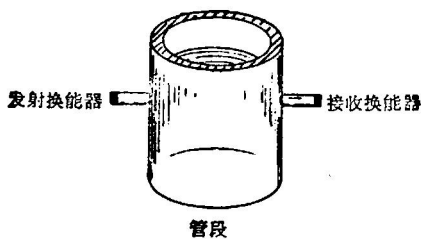


图 2h 通过测量超声脉冲穿过管段直径(25 厘米)的传播时间来测定液态钠的温度,测量头是非浸入式,测试后将测量头拆去。试验地点: Argonne National 研究所(1968)

### 三、密度、孔隙率

若干用超声测量密度( $\rho$ )和孔隙率( $q$ )的方法,乍看似乎与熟知的、利用反向散射或吸收原理的  $\gamma$  射线测量方法相似。然而,超声

谐运动,从而使其周围的流体发生加速度,振动片的共振频率取决于周围流体的密度。当流体密度增加时,振动频率将随之而下降。同理,当密度下降时,则振动频率将按下列一般关系式而增加:

$$\rho = A/f^2 + C \quad (3-1)$$

其中  $A$  和  $C$  均为常数;  $f$  = 频率。

探头安装在内有流体的管线上,探头内装了一个压电探测器,用来检测振动片的频率。信号在发送器中放大后,激励探头中的放大器,用最小的力维持振动片以系统的共振频率振动。

探头能在各种静态或动态的流体、从低温到大于  $100^\circ\text{C}$  的情况下工作,准确度为满刻度的  $0.1\%$ ,应用于包括空间技术、化学、石油化工、炼油厂、输油管、低温技术以及食品加工各方面。用于各种液体时,要求粘度小于约  $100$  厘泊。

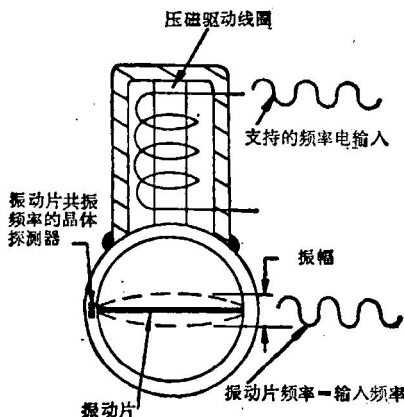


图 3a IIT-Barton 型振动物片密度计, 示出磁致伸缩激励器和压电探测器(1972)

图 3b 为另一种共振探头设计, 被测液体



图 3b Dynatrol U 型管共振器测量密度/比重/固体浓度(%)

(甚至粘度极高的)流过一根 U 型管, 该充液管的共振频率指示液体的密度  $\rho$ 。

图 3c 表示按照 Hoop 方式振动原理而设计的流体密度计(Abbotts, 1972)。

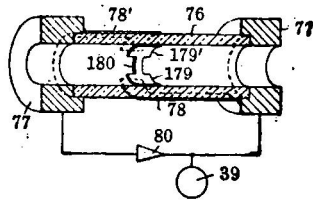


图 3c 由空心压电陶瓷圆管构成的密度计探头(同上)

大约 1955 年以来, 若干研究者曾考虑过, 用测量一个向液体发射声能量的晶体的电阻抗来测定该液体的声特性阻抗  $\rho c$ 。这一方法, 显然还没有进入实用阶段。

关于宇航用的密度计, 曾在高度为  $140\sim 280$  公里轨道上, 用一个可作微量天平的共振石英晶体对密度低得和空气一样的气体进行测试。据报道, 对于在  $10^{-4}\sim 2\times 10^{-6}$  托范围内的各种压力, 其响应是线性的, 而灵敏度为  $1.7\times 1.8$  赫/克, 精度为  $6\%$  (参见 Roder, 1974)。

### 非共振探头原理

图 3d 为一种由 NU Sonics 公司研制的脉冲-回波式声速探头, 主要适用于第四和第十三节中所述的应用, 也可以在密度为  $\rho$ 、声速为  $c$  的已知函数的情况下, 用来测量密度。该探头可以安装在管道的凹进处或顺流安装。在两种情况下, 测量方法都是以脉冲在换能器与反射器之间经过一段规定的液体传播路程做基础。

另一种脉冲-回波式探头(图 3b)是作者

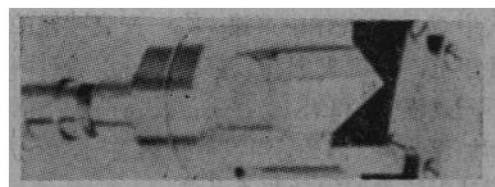


图 3d 由换能器和角形反射器组成的声速探头, 一般用来测量成分和分界面, 在某些情况下, 可以用来测量密度

所在实验室研制的，适用于液体的  $\rho c$  测量。这种反射探头与图 3a~3d 中所示的那些探头相比，具有许多潜在的优点，即体积小、便于清洗、不会因安装而产生压降或使流动破坏。再则本方法便于在外部安装。它的基本限制在于所测得的  $\rho c$  是在相当薄的、邻近探头的液层中进行的。因此，沉积物的形成会阻止自由流动液体的精确测量。测量  $\rho c$  用的探头与单独测量  $c$  的方法相结合而测得  $\rho$ ，或者与测量  $v/c$  相结合而测得质量流量，例如，燃油的质量流量。反射系数的概念也能应用于测量固体密度，但不适用于气体。

### 传输原理

**气体密度** 在气体中传输后(图 3f)，所接收到的脉冲的相对幅度主要取决于衰减棒和气体分界面上的阻抗失配以及气体中的衰减损耗。对于图中所示的对称情况，且忽略声束的散射，气体密度  $\rho_1$  可以用基准回波幅度  $A$  以及对应于在气体路径  $L$  的单一传输和三

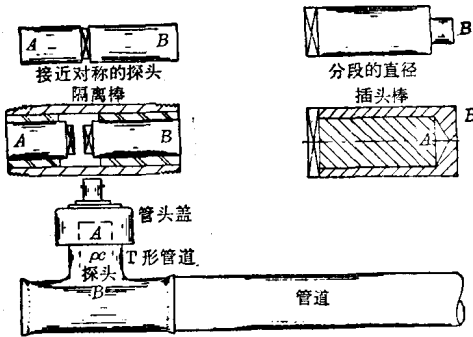


图 3e  $\rho c$  密度计探头实例以及装在标准三通管道内的  $\rho c$  探头的视图

重传输的第一幅度  $B$  和第二幅度  $C$  给出：

$$\rho_1 = (Z_0/4C_1) |B/A| (B/C)^{1/2} \quad (3-2)$$

式中  $C_1$ ——气体中声速； $Z_0$ ——衰减棒的特性阻抗。阻抗失配和衰减损耗可以通过两个不同声程  $L_1$  和  $L_2$  或者通过发射两种不同频率加以分离，因为，当没有声散射时， $\alpha \sim f^2$ ，而且阻抗失配损耗与  $f$  无关。

即使压力基本上是均匀的，在有温度梯度存在的气体空间中，也存在密度梯度。所

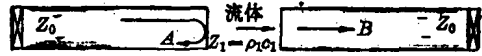


图 3f 用衰减棒的传输测量法测定流体特性

以对密度分布进行测量是重要的。例如，在空气动力学风洞试验中，总气体的质量流量需要按局部的  $\rho v$  乘积的面积积分来计算。一个解决此问题的非侵入式超声方法是用第二节的传输法测量  $c$  的分布。现在，若能把  $c$  分布转换为  $T$  分布(图 2h)，且在一个位置上(例如在风洞内壁上)的压力为已知，则原理上可以把  $T$  和  $\rho$  结合起来测量作为风洞坐标函数的  $\rho$ 。实际上，利用声速在理想气体中的表达式  $c = (rT/\rho)^{1/2}$ ，就能求得  $\rho$ 。

**液体密度** 对图 3f 所示作用的液体来说，在某一  $\alpha L$  远小于失配损耗的频率上，其密度可用下式表达：

$$\rho_1 = (Z_0/c_1) |B/4A| \quad (3-3)$$

式中角注 1 表示该量指液体。

另一方面，对泥浆、矿渣或其它类似的两相介质， $\alpha L$  也许比失配损耗大很多。在这些情况下，根据经验流体密度与衰减大概是相关的。

有时，还可考虑到另一种非侵入式探头来代替图 3d 所示的那种探头，即对于  $\rho$  为  $c$  的已知函数的那种情况，凡安装在外部的换能器均可改做测量在导管内的声速  $c$  (见第二十一节和图 2h)。

**固体密度** 利用反射系数原理，可以测量一端浸在液体(如水)中的固体元件的密度。这是图 3e 所示的另一应用。

已知厚度  $l$  与波长相比显得很薄的固体板，其密度可以根据反射与传输系数原理来测量。利用近似式：

$$\rho = AZ_0/\pi Bfl \quad (3-4)$$

可以计算其密度。式中， $A$  和  $B$  分别为中心频率  $f$  的反射和发射的射频脉冲幅度； $Z_0$  为板的两面上的介质特性阻抗。

**孔隙率** 与按  $\rho$  和  $c$  成比例或存在相互关系来测量液体密度相似，测量某些陶瓷(特



别是瓷质绝缘子)的孔隙率  $q$  的行之有效的办法是测量声速  $c$  (图 3g)。

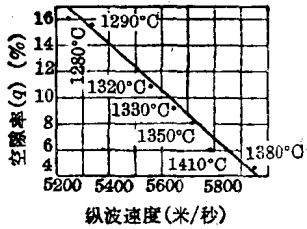


图 3g 一种瓷质绝缘子的绝对孔隙率与纵波声速的变化关系 (Filipczyński 等, 1966)

根据 1966 年 Filipczyński 等关于瓷绝缘子电介质特性的报道, 烧结最佳时(例如: 1380°C 点火温度)对应于最低孔隙率的声速最高。在这个约束条件下, 升高点火温度会使孔隙率降低, 有效的声程随着瓷料中所含气体在瓷料熔融时发生充填而缩短。但是, 温度过高(1410°C)会使气体逸出, 而产生新的细孔, 使声速降低。为了避免孔隙率变化很大, 可以在点火过程中跟踪  $c$  的变化, 或者限制炉温。

Spriggs(1962 年)建议用指数方程式:  $E = E_0^{b_0} \alpha_0^{-b_0} q^{\alpha_0}$  描述弹性模量与孔隙率的关系(式中,  $E$  为有孔材料的弹性模量、 $E_0$  为无孔基块的模量、 $b_0$  和  $\alpha_0$  均为经验常数、 $q_0$  分别为开孔和闭孔的孔隙率)。考虑开孔和闭孔的试验适用于计算低孔隙率, 例如对于冷压和烧结的铝, 孔隙率最大不超过  $q = \sim 0.16$  ( $q =$  孔隙容积/总样品容积)。Martin 和 Haynes (1971) 建议过另一种方程:  $E = E_0 - k_2 E_0 q^{2/3}$ , 其中  $k_2$  为与平均孔隙特性有关的经验常数。这表达式对于大量的多孔固体都是有效的(即使  $q$  高达“临界孔隙率”, 即  $E \leq 10\% E_0$ )。Hasselman(1962)考虑到孔隙作为一种连续相模型中的分散相, 提出了一个适用于多孔合成物的方程:

$$E = E_0 \left[ 1 + \frac{bq}{1 - (b+1)q} \right] \quad (3-5)$$

但曾指出, 在许多情况下,  $q$  的增加会伴随着显微结构或孔隙率类型发生变化。因此, 弹

性的各种特性(诸如  $E$ 、 $G$  或  $\sigma$ )对  $q$  的依赖性就不能用一个对于  $0 < q < 1$  均有效的单一方程来表达。

至少从 1965 年以来, 若干科学工作者曾研究过关于海底沉积物的反射能力对孔隙率的相互关系。当时, Breslau 曾用 12 千赫做过大西洋海底反射测量[参阅 Fass 的研究工作(1969)与其后的讨论(1971)]。在这些孔隙率对反射能力的研究工作中所引用的相关系数在 0.706 到 0.97 范围内。

#### 四、压 力

压力会影响声在固体、液体与气体中的传播, 然而影响的方式各不相同。在固体中, 外加的压力会导致所谓应力感生的各向异性, 如同 Crecraft、Hsu 以及其他人所证明的(见第十七节)。在液体中, 压力  $p$  对  $c$  和  $\alpha$  的影响一般是小的(相对于气体中的影响), 但弛豫峰值的频移却极为明显。正如声纳研究者所知, 由于流体静压, 海中声速随深度  $D$  而显著增加。深度系数(压力效应)是  $\Delta C/\Delta D = 0.017$  米/秒·米;  $(\Delta C/C)/\Delta D = 1.1 \times 10^{-5}$ /米。在非理想气体中,  $c$  是随  $p$  的增加而增加的, 而  $\alpha$  与  $p$  成反比。对于一种非理想气体来说, 物态方程可以写作:  $pV = RT + Bp$ , 其中  $V$  为容积;  $B$  为第二“维里”系数。由此得:

$$c = [\gamma(RT + 2Bp)/M]^{1/2} \quad (4-1)$$

标准的超声压力测量仪器, 包括一种利用石英晶体特殊切割而制成的 Hewlett-Packard 仪器和一种 Wallace & Tierman 声纳压力计。前一种仪器(图 4a)的石英晶体的频率与压力的关系几乎是线性的, 不过需要温度补偿。探头组件包括石英晶体压敏振荡器与一个标准振荡器。与压力有关的差频经过电缆被输送到信号处理器。压敏振荡器的典型变化为  $\sim 0.5$  到 1 兆赫。石英压力计的测量范围是  $0 \sim 884$  公斤/厘米<sup>2</sup> ( $0 \sim 12,000$  磅/英寸<sup>2</sup> 绝对压力), 工作的温度范围  $0^\circ\text{C} \sim$

150°C, 在采样周期为1秒时, 分辨力 $<0.7$ 克/厘米<sup>2</sup>(0.01磅/英寸<sup>2</sup>)。自1971年问世后, 迄今已经销售了约50余台。应用场合包括: 油井钻探、海洋学研究、油井中脉冲试验以及监控地下爆炸。

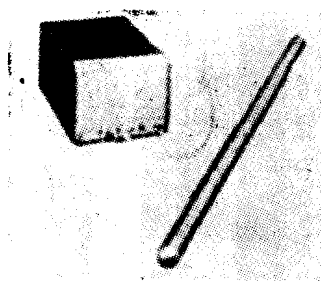


图4a 2811A型石英压力计利用一个独特的、具有高稳定性石英共振器的换能器, 其频率变化与所加压力成正比

后一种仪器(图4b)利用超声脉冲对两个水银柱的相对高度进行测量。在压力计的每个水银柱底部安装一个压力换能器, 发射经过水银而到表面的脉冲, 并接收从表面反射的回波。超声脉冲在两个水银柱底部同时发射, 两个接收回波之间的时间差与水银柱的高度差存在相互关系。

保持 $c$ 为常数, 就能建立时间差对高度差的关系式。选择一个参考时间(主钟振荡器), 便可选择不同的标定单位。已商品化的压力计的标准单位有: 英寸汞柱、磅/英寸<sup>2</sup>、毫米汞柱、毫巴、磅/英寸<sup>2</sup>、牛顿/米<sup>2</sup>以及巴斯喀等。

实际上, 用短水银柱的第一个回波触发一个计数器, 累加主钟振荡器的周期。并用高水银柱的回波使该计数器停止工作。这样所累加的周期数即代表水银柱的高度差。

要使声速和水银密度保持不变, 需要精密的温度控制。用一种水银玻璃温度计控制的恒温器作为热的标准。对于在32英寸汞柱压力时精度为 $\pm 0.0005$ 英寸汞柱, 要求温度控制精度小于 $\pm 0.05^\circ\text{F}$ 。

声纳压力计的范围从0~0.8米(0~32英寸)汞柱、分辨力基本上为十万分之一、校

准精度在0.001英寸以上, 1969年问世。应用场合包括压力传感器的校准、风洞中、引擎测试台和真空室中的压力连续测量, 以及用于自动气象台的气压计。总之, 它是适用于测量绝对压力、差示压力或真空的计量仪器。

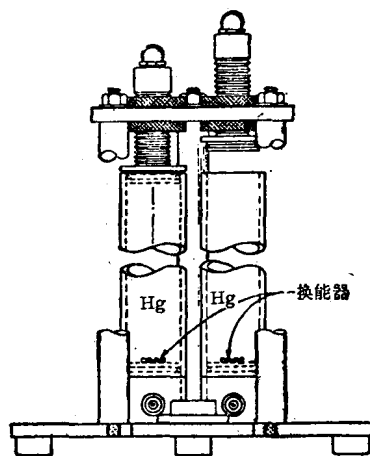


图4b 数字式U形管声纳压力计, 利用超声脉冲来测量两个水银柱的高度差

## 五、动态力、振动、加速度

许多年来, 广泛使用各种压电换能器来测量动态力、振动、加速度、力矩等等。这些应用都是从压电材料的定义发展起来的。在本节中, 我们只想提一下石英和其它材料, 目前可应用在: 从低温到 $\sim 800^\circ\text{C}$ 、有核辐射的环境、频率高达100千赫以上, 其组装部件可分辨多达三个轴的分量(图5)。

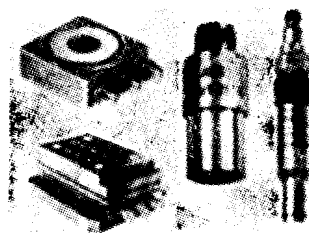


图5 压电测试设备包括2个和3个分量的测力石英换能器、多分量测力计、高温压力换能器以及测量压力、力、加速度、力矩、切削力等的引擎压力计

## 六、流体粘度

依照经典理论, 声在气体中的吸收是由

于粘滞效应与热传导效应作用的总和。这些效应所造成的  $\alpha$  比率大约在 1 和 3 之间, 对于普通气体:

$$\alpha_{\text{粘}}/\alpha_{\text{热}} = 4\eta C_v \gamma / 3K(\gamma - 1) \quad (6-1)$$

其中,  $\eta$  = 粘度系数、 $C_v$  = 定容比热、 $\gamma$  = 热容比 ( $C_p/C_v$ )、 $K$  = 热传导系数(对单原子气体,  $K = 2.5C_p\eta/\gamma$ )。实验已经证实声在单原子气体中的吸收没有电离作用的经典理论。在双原子和多原子气体中、在二元混合物中以及在正在进行反应的气体中, 所观察到的由于漫散射、弛豫效应或内在效应所造成的衰减要比理论值高得多。在六十年代, Carnevale、本文作者和他的同事报道了在  $\sim 10^4$ °K 的氩中测定  $\eta$  的情况, 根据所测得的衰减系数  $\alpha$  计算了  $\eta$ :

$$\eta = \alpha \gamma C_v / 2\pi^2 f^2 [(4/3) + 5(\gamma - 1)/2\gamma] \quad (6-2)$$

在非金属液体中, 理论上的声吸收主要是由于  $\eta$  所造成的, 因为  $K$  的效应微不足道。在非单原子液体中曾观察到过度的衰减, 如同对某些气体一样, 经典理论已不能解释。参阅大家所熟知的 Herzfeld 和 Litovitz 的著作(1959)。1971 年本文作者曾对聚合过程的粘度变化特性进行过一次非浸入式监控试验。在直径 75 毫米的不锈钢管内装有  $\sim 50$  厘泊和  $\sim 10^4$  厘泊粘度的液体, 发射脉冲穿过钢管时的衰减明显表示出粘度的巨大差别。然而对粘度的细小差别的分辨力, 复现性就很差了。

目前可以买到的测量粘度的仪器不是根据上述的传输概念, 其原理是以粘性液体对浸入式探头的衰减效应。

### 测量液体粘度的探头

超声粘度探头有几种不同的几何形状。图 6a 说明一种依照 Mason(1947)设计的浸入式扭力波压电换能器。利用它, 曾对从 0.01 到 6 泊范围内的粘度进行了测量。粘度较高的液体显示一种切变刚性, 使测得的晶体共振频率和电阻的分析复杂化。Mason 等

(1947) 也利用过切变波在斜入射时的反射能力(图 6b)。新近(1970)曾用过根据 Moore 和 McSkimin 评述的关于切变波在垂直入射时的反射能力(图 6c)。

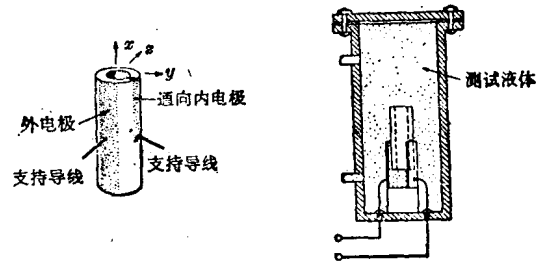


图 6a 测量粘度用的实验装置, 利用一个扭力换能器来测量轻液体的粘度。如图中左所示, 依照 Mason(1947)的工作, 该扭力 ADP 晶体用 3 根导线悬挂在波节上, 并浸入到被测液体中

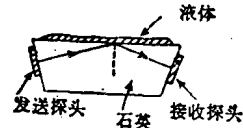


图 6b 在液体中产生切变波的装置 (Mason 等, 1949)

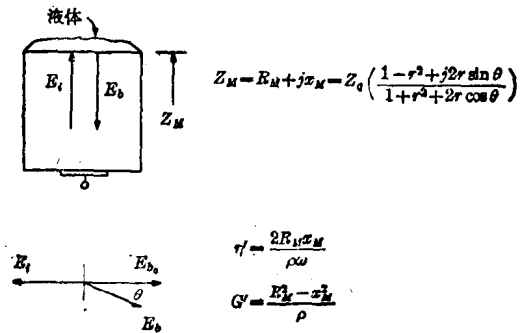


图 6c 切变波的反射系数测量法的基础 (Moore & McSkimin, 1970)

由 Bendix 公司生产的粘度计具有各式各样的探头, 其敏感元件一般是一个有防护的共振薄片。它一端为磁致伸缩部分, 另一端为不锈钢部分。它的工作原理如下(图 6d):

工作时, 探头插入液体中, 将它“切变”或“粘性制动”的程度用电子测量方法转换成为与该特定液体对应的粘度值, 对  $\eta\rho$  值, 其量程包括 4 个刻度, 最大值为 50,000 厘泊  $\times$  克

/厘米<sup>3</sup>。探头适用于许多不同的液体，温度高达 +200°C 和压力从 0 到 750 磅/英寸<sup>2</sup> 表压的环境下均可正常使用。

如有需要，用一个电子组件通过多点采样器接到许多探头上，这样就可以在一个中心站对几种液体进行测量。

电子组件发出的电流短脉冲，通向装在探头内的线圈，该线圈绕在薄片敏感元件上。由此产生的磁场激励磁致伸缩元件使之发生纵向振动。当振动幅度被衰减到一个预定水平时，继而触发起另一个脉冲。这样，脉冲的重复频率即为  $\eta\rho$  的量度。由于  $\rho$  通常是已知的，因此， $\eta$  就可测定。对于牛顿流体来说，精度约为 2%，对于非牛顿流体，复现性约为满刻度的 1%。

早先在波兰发展了一种超声粘度计，其中的机械共振器产生的是扭转振动，在荧光屏显示衰减曲线。对已知  $\rho$  的液体在荧光屏上用粘度单位标定。

大约一年前，Papadakis 曾发表测量环氧树脂聚合过程中其粘度随着模量的增加而增加的报告。他利用 5 兆赫纵波和容积切变波测量反射系数 ( $R$ )，并用 100 千赫左右的伸长波和扭转波导入浸入式金属丝来测量  $R$  和  $\alpha$ 。该标准金属丝探头与读数仪器可用来自动测量粘度，尽管它们原来是为其它用途而设计的(见第二、二十节、图 6e)。

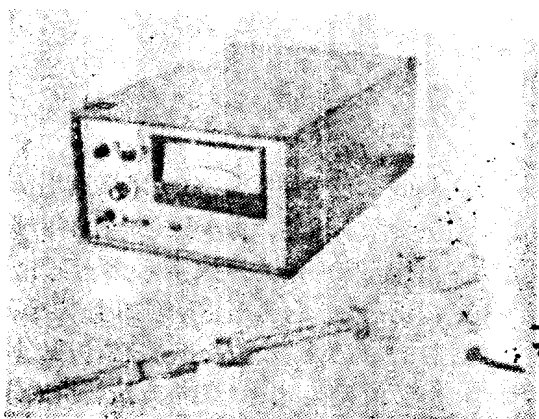


图 6d Ultra-Viscoson 1800 型粘度计检测对共振探头的衰减效应，由此测定粘度  $\times$  密度的乘积  $\eta\rho$

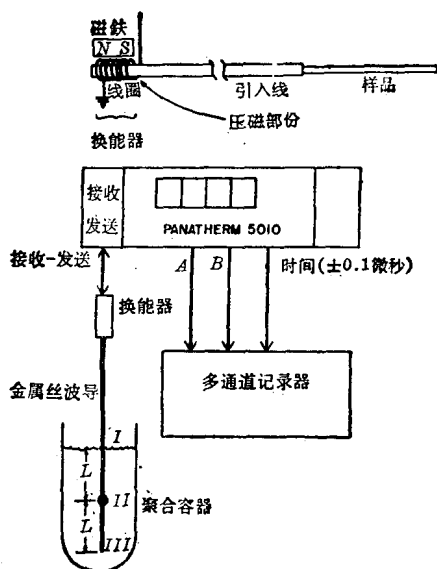


图 6e 自动监控聚合过程用的细金属丝的实验装置详图。首先回波振幅输出  $A$  和  $B$ ，分别为来自焊接点 ( $II$ ) 和样品终端 ( $III$ ) 的回波。然后，当弯月形回波 ( $I$ ) 增加到预定触发电平时，通道  $A$  开始监控液面 ( $I$ ) 而通道  $B$  切换到焊接点 ( $II$ ) (Papadakis, 1974)

## 七、其它的传输特性

除  $\eta$  外， $\alpha$  的测量结果还可以用热传导系数  $K$ 、扩散系数  $D_f$ 、活化能  $E$ 、弛豫强度  $S$ 、旋转碰撞数  $Z_{rot}$  等参数来说明。工业实际中一般很少直接测量这些基本参数，显然目前还没有用来测量这些参数的标准仪器。有时利用经验得到的相互关系，进行一种特殊的传输参数(例如，热传导系数  $K$ )的间接测量。当  $c$  和  $\alpha$  以预定方式对于象隔热挡板那样，部分影响  $K$  变化的材料变量有响应时，便可建立这样的相互关系。在其它的情况下，例如，关于碳在  $\sim 2200^\circ\text{C}$  时变成为铈的过程，可以看成是一种声速随时间而变化的扩散过程。做了一次这样的实验：当一根自热的铈金属丝外包上石墨毡，在真空条件下通过声速对曝光时间的超声监测，曾观察到这一扩散过程。Bell 曾指出，温度  $T_D$  超过使扩散快速进行的温度(例如，对氮在  $T_D = 881^\circ\text{C}$  时变成为钛的过程)，同样可通过  $c$  和  $\alpha$  的剧