



超 声 工 业 测 量

同济大学声学研究室

一、前 言

超声工业测量是超声检测技术中的重要分支,许多工业非声量(密度、浓度、成份、粘度、弹性、强度、硬度、温度、流量、液位、厚度等)与描述媒质声学特性的超声量(声速、衰减、阻抗等)之间存在着直接或间接关系,探索了这些关系的规律,就可以通过这些超声量的测量去测定那些工业非声量,这就是超声工业测量的主要研究内容。它的应用历史与超声检验技术同样悠久,并共同构成了超声检测技术,但是获得广泛重视和应用却是近十多年的事。这是由于自动测量与自动控制技术的发展促进了超声工业测量技术的研究和应用;在若干应用领域中,和其他工业测量方法相比,超声技术有着无可取代的优点,又成为推动工业自动化水平向前发展的有力工具。国外在这方面的研究和应用较早,很多已经商品化,并不断在研制新产品,目前除继续推广应用外,对其技术本身的研究也出现若干新的突破方向。国内十多年来,在这方面的研究工作和应用也有长足的进展,从研究的广度来看与国外相仿,从研究的深度着眼,虽然在不少方面已经接近国际水平,但对本技术的提高和突破上开展工作尚嫌不够,这都有待于今后努力,也正是我国超声检测工作者的光荣任务。

二、基本途径

描述媒质传播特性的声学参量有声速、衰减和声阻抗。媒质某些状态、特性和空间分布的变化与这些声学参量有关,也可以导致这些声学参量的改变,或者改变其一,或者兼而有之。显然,超声工业测量的基本途径就在于媒质声速、衰减、声阻抗的工业测量。

1. 声速技术

经典声速测量方法有共振、干涉、相位及脉冲法等。共振法装置简单、精度较高的有干涉仪和脉冲重

叠、脉冲叠加法。而工业上常用的应当首推脉冲法,其中测时脉冲技术仍然是最基本的。借助现今电子技术,频率的测量有着极高的精度,在某些应用中,把测时脉冲技术变换为测频脉冲技术受到重视,其中回鸣法(Sing-around)就是一例。声速技术在测距定位、媒质状态和媒质特性分析上是一项基本而又常用的一个途径。

2. 衰减技术

媒质中超声衰减是声吸收、散射、扩散损失的总称。针对上述不同衰减机构可以采用不同方法,但工业上常用的大都采用脉冲法。混响法测吸收应用不多,测量共振带宽 Δf 来反映声衰减的也有应用。在脉冲法中衰减测量的原理是对不同声程接收讯号的幅值进行比较,或者观察同一路程多次回波衰减曲线。衰减测量的精度还远不及声速测量为高。但在超声工业测量应用中,有些媒质特性变化并不主要反映在声速上而是对于声衰减的反应比较敏感,这时衰减的测量就成为必要的手段了,如某些溶液浓度,悬浮粒子的粒径测量就是这样。

3. 阻抗技术

在换能器的等效电路中可以看到,除了换能器自身等效机械阻抗外,还存在着由媒质提供的与辐射阻抗成正比的等效电阻抗。辐射阻抗的一般形式是 $Z_L = R_L + jX_L$,实数部分代表辐射阻,虚数部分代表辐射抗,辐射阻抗也反映着媒质的特性,如换能器单面向无限大媒质辐射平面行进纵波时, $X_L = 0$,即 $Z_L = R_L = \rho C A$,式中 A 是辐射面积, ρC 是媒质密度与声速乘积,称为特性阻抗。于是 Z_L 就与媒质特性 ρC 建立了直接联系。一般情况下 $X_L \neq 0$, $R_L \neq 0$,即 Z_L 表现为复数。工业上辐射阻抗的测量很少采用阻抗(或导纳)电桥。根据媒质不同特性,采用不同方法,如果媒质特性变化对于辐射抗的反应比较灵敏,由于电抗可以改变系统的共振频率,就利用共振频率的测量来反映媒质这一特性,如弯曲振动式圆管比重计、硬度计,胶结

强度检测仪就是根据这一原理制成的。如果媒质特性变化对于辐射阻的反应比较敏感,由于辐射阻 R_L 代表着阻尼性质,测量与 R_L 有关的振幅衰变率 δ 也能反映媒质的这一特性,一些超声粘度计就是根据这一原理。

三、应用范围及发展趋势

1. 测距定位

液位、测厚、浪高仪、座标仪等均属于这一类应用。在连续测量液位的超声技术中,应用最为广泛的是脉冲回波法。根据传声媒质的种类可以分成气介式、液介式和固介式三种。超声液位测量的基本问题是声速校正,即在脉冲回波式液位计所根据的 $L = \frac{1}{2} Ct$ 公式

中(L 为所测距离, t 为声时, C 为声速),不能认为 C 是不变的。在气介、液介方案中,它是媒质温度、成分等因素的灵敏函数,必须对此声速进行校正。声速校正是一个声学问题,利用声学方法更为直接有效,已经总结出两种基本校正方案,即固定校正段和固定标志校正方案。例如采用固定标志校正方案的气介式液位计,可以对量程几十米的水库水位进行精确测量到 ± 1 厘米;采用悬臂式固定校正段方案对油罐油位进行测量可以精确测量到 ± 1 毫米。固介式液位计可以忽略声速变化影响,同时还可以在较恶劣环境下(如腐蚀性媒质、高温、高压、抽空等)工作,因而往往在一些特殊场合考虑使用。以上几种液位计国内均有应用,也有部分产品。界面、料位的测量与液位计有着相同的声学原理,在使用上可能存在着更多的技术困难,如界面清晰程度,料位中的物体颗粒大小等。除了上述连续测量的超声液位计外,工业生产上还往往要求提供不连续的定点式液位、料位讯号。这类定点物位讯号计的特点是简单实用,有连续波穿透式、阻抗式、脉冲穿透式和反射式等,国内已有多种产品。超声开关也属于一种定点式报警器,它只提供讯号的“有”或“无”,并且传送一个讯息供自动控制应用。超声开关的应用已经越出了工业测量的范围,国外报导过在遥控、通讯以及日常生活中超声开关的应用。超声液位技术的发展趋势除扩大应用外,和其他检测仪表一样,还要求装置应趋于轻型化,并稳定耐用。在提高测量精度方面,曾经有过把定点式液位计与机械传动装置联合使用,超声换能器起着跟踪、判断液面的作用,可由机械系统控制,而控制讯号却仍由超声换能器来提供;液位的变化,也就是超声换能器升降距离可由其他方法精确读出。这种方案完全不受声速及环境条件限制,在大量程中可以精确测量到毫米级。缺点是要增加机械可动部件,使设备庞杂。

在超声测厚中,国内研究应用较早,有共振式、脉冲式多种产品。最近研究趋向集中在薄层测厚和高温

测厚等方面。在薄层测厚中正在研究采用窄脉冲、高频率发射、延迟耦合和选择低声速波型(板波)等多种途径来缩短盲区或避免盲区的影响,都具有一定效果。在高温测厚应用方面,从换能器考虑,有耐高温换能材料和非接触式换能器(例如电磁声换能器)等措施;从耦合方法考虑有喷射冷却液体和滚压等措施。国外在这方面多有报导,国内也有所试验研究。

2. 媒质状态

流速、流量、温度等属于媒质状态参量。

超声测量流量的方法甚多,时差法、相差法、频差法等都是基于测量流动流体中,流速对声速的贡献。但在流量测量中,正如其他超声工业测量技术一样,声速还和其他因素有关,如温度、成分等,因此不得不采取声速补偿措施。在上述三种基本测量方法中,频差法的声速影响较小,国外这种流量计商品甚多,国内也有不少研究成果。测量多普勒频移的超声多普勒法在医学上测量血流量国外早有研究应用。近期报导了有折射式超声多普勒法,也可以避免声速温度影响。在超声流量计中主要是精度不高,这是由于液体声速约为每秒1500米左右,而流速只有每秒几米,流速对声速的贡献只有 10^{-3} ,若保证测量精度 10^{-2} ,则要求声速变化的稳定性在 10^{-1} 是必要的,这在小口径、低流速、高粘度、而温度条件、媒质物理性质和流动状况又不很稳定情况下是难以保证的。近来超声流量计都在朝着提高精度与稳定性方面考虑,出现了许多新的突破,如超声涡街流量计、超声相关流量计以及流体综合分析技术等。其中超声涡街流量计与相关流量计完全与声速无关,应用条件倒也并非十分苛刻。国内也有超声涡街流量计的研究并已用于测定气体流量。流体综合分析技术可以同时测量流速、声速及密度,从而对媒质的状态和特性提供综合数据。

在已经提到的和下面将要提及的超声工业测量技术中,声速无不和媒质温度有关。在超声测温技术中,人们所利用的正是这种相关性。在许多经典测温方法都无法适用的场合,如核子技术中的极高温,超导体中的超低温,以及宇航、卫星通讯、温度遥测和高空的气温测量等,声学测温的优越性就更为明显。超声测温的原理一是直接测量被测媒质声速变化,其优点是反应迅速;二是通过测温元件声速的变化来反映温度。前者用于气温、超低温的测量,如利用超声干涉仪测量液氮的 $2K \sim 20K$ 的低温,以建立热力学低温标准,国外、国内都有研究。采用测温元件如细线温度计可以测量高温,细线应由耐高温材料制成。石英温度计也属于测温元件,在特定切割方式中,它的谐振频率与温度成线性关系。石英温度计可以进行微热测量,也可以对深海温度进行遥测。超声测温技术近几年发展迅速,应用范围广泛又深入,也出现了同时测量温度和其他

参量的多参数测温技术,如利用复合细线温度计在核物理研究中同时测定温度与核通量。此外,还报导过利用超声测温判断与温度有关的某一物理现象是否出现,如熔点、沸点以及相变指示等。

3. 媒质特性

在某些化工产品和化学中间反应的质量分析、指标检验和成分鉴定方面,超声技术可应用的范围特别广泛,对这项工作的研究和应用也颇有成效,如利用阻抗技术的液体粘度的测量,国内已有产品,利用声速技术的某些油类比重、酸类浓度、输油管线上油品检验、氯丁橡胶乳液聚合度等方面亦有不少样机投入使用。在气体成份分析方面(如氯气纯度)也在进行应用研究。对矿浆浓度、粒度也研究用声衰减方法进行分析,不同粒径的悬浮物对不同频率声波有着不同的声衰减,因此可用多种频率对悬浮物粒径进行测量。对媒质特性进行分析时,为了消除温度影响,可以采用恒温、测温补偿以及使用标准媒质与待测媒质对比等措施。在媒质特性分析中,最近还有些新发展,如利用弯曲振动圆管的比重计就是一例。它利用圆管共振频率的改变来反映所盛被测媒质比重的变化,国内已在研制。在气体分析方面,有报导采用超声与色谱仪联合使用,对多元气相组份进行精密分析,利用氢气弛豫现象对气体含氢量的分析也是一种新途径。

在固体某些力学特性分析上的应用,有些也属于

超声工业测量的范围。利用阻抗技术测量共振频率的超声硬度计和类似同一原理的检验层状结构胶结强度的胶结强度测定仪就属于这方面的应用。在建筑部门中还经常应用低频超声波声速衰减仪,用以测量混凝土强度和试样粘弹性以及探测小构件隐患。在钻探工程中利用超声测井仪,测量钻井周围地质情况,在我国一些油田中已有应用。已经生产的声波岩石参数测定仪可以进行各种岩石力学方面的研究,如岩体稳定性、围岩松动圈范围的试验研究等,这些工作已经属于岩体工程的研究范围。

四、结 束 语

超声工业测量是一门新兴的应用技术,目前正处在迅速发展之中,本文只描绘了一个轮廓,但已可以看出它的广泛应用前景。

我国近年来,在超声工业测量应用方面发展极为迅速,取得一些可喜成果。但总的说来,也还存在一些问题:有属于电子技术方面的超声仪表稳定性问题;也有属于声学技术(超声传播理论、换能器理论)方面的合理设计问题;还有超声工业测量技术本身发展的一些新途径,如频谱分析、相关技术等,目前还较少开展研究;把超声技术和其他新技术(如激光等)联合运用的研究工作目前也开展很少。这些问题,都有待于今后努力解决。

(上接第 235 页)

- [13] Fleischer, R. L. et al., *Phys. Rev.*, **133** (1964), A 1443 and **156** (1967), 353.
- [14] Benton, E. V. Nix, W. D., *Nucl. Instrum. Methods*, **67** (1969), 343.
- [15] Katz, R. Kobetich, E. J., *Phys. Rev.*, **170** (1968), 401.
- [16] Henke, R. P. Benton, E. V., *Nucl. Instrum. Methods*, **97** (1971), 483. and **67** (1969), 87.
- [17] Lal, D. et al., *Nature*, **221** (1969), 33.
- [18] Carpenter, B. S. Lafleur, P. D., *Int. J. Appl. Radiat. Isotop.*, **23-4** (1972), 157.
- [19] Price, P. B. et al., *Phys. Rev.*, **164** (1967), 1618 and *Phys. Rev. Lett.*, **21** (1968), 630.
- [20] Khan, H. A. Durrani, S. A., *Radiat. Eff.*, **13** (1972), 257.
- [21] Johnson, D. R. Henke, R. P. et al., *International Topical Conference on Nuclear Track Registration in Insulating Solids and Application*, 1969/5/6—9, Clermont-Ferrand, II 46 and II 136.
- [22] Goland, A. N. der Mateosian, E., *Nucl. Instrum. Methods*, **106** (1973), 295.
- [23] Hirokatsu Takemi et al., *J. Nucl. Sci. Technology*, **10-4** (1973), 214.
- [24] Fleischer, R. L. et al., *Science*, **170** (1970), 1189.
- [25] Stern, R. A. Price, P. B., *Nature*, **240-100** (1972), 82.
- [26] Price, P. B. et al., *Phys. Rev.*, **167** (1968), 277.
- [27] DeBlois, R. V. Bean, C. P., *Rev. Sci. Instrum.*, **41** (1970), 909.
- [28] Abmayr, W. Paretzke, H. G., *Atomkernenergie*, **20-2** (1972), 162; Varnagy, M. et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **106** (1973), 301.
- [29] Cohn, C. E. Gold, R., *Rev. Sci. Instrum.*, **43** (1972), 12, 18.